CLIMATE CHANGE
30/2026

Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Übereinkommen von Paris – 2026

Nationales Inventardokument zum deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2024

Herausgeber:
Umweltbundesamt

Für Mensch & Umwelt

Umwelt Bundesamt

CLIMATE CHANGE 30/2026

Nationaler Inventarbericht

Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Übereinkommen von Paris - 2026

Nationales Inventardokument zum deutschen
Treibhausgasinventar 1990 - 2024

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Kontakt

Dieser Bericht entstand im Rahmen der Arbeiten der Nationalen Koordinierungsstelle für das *Nationale System Emissionsinventare* (NaSE) am Umweltbundesamt (UBA). Die Beiträge zu den Kapiteln Landwirtschaft bzw. Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft wurden vom Thünen-Institut (TI) erarbeitet.

Die elektronische Fassung dieses Berichts sowie die entsprechenden zugehörigen Emissionsdaten im Common Reporting Format (CRF) (Version 1.0 auf Basis der Datenbank ZSE mit Stand Trendtabellen vom 15.01.2025) sind nach Abschluss auf der Internetseite des Umweltbundesamtes bereitgestellt:
http://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/treibhausgas-emissionen

Federführung Gesamtbericht: Dirk Günther, (UBA V 1.6)

Autoren (in alphabetischer Reihenfolge): Sascha Adam (TI WO), Lukas Ahrem (III 2.1), Gregor Barth (V1.5), Maja Bernicke (UBA III 2.2), Andreas Bertram (UBA V 1.3), Til Bolland (UBA III 2.2), Christian Böttcher (UBA V 1.6), Kathrin Brand (III 2.4), Özge Can (UBA V 1.6), Marion Dreher (UBA V 1.5), Detlef Drohsin (UBA V 1.5), Karsten Dunger (TI WO), Cornelia Elsner (III 1.4), Traute Fiedler (UBA III 2.1), Roland Fuß (TI AK), Andreas Gensior (TI AK), Sabine Gores (Öko-Institut Berlin), Ulrich Gromke (UBA III 2.1), Charlotte Grosse (DBI GuT), Johannes Grübel (UBA V 1.5), Erik Grüneberg (TI), Dirk Günther (V 1.6), Kevin Hausmann (V 1.6), Tim Hermann (III 2.4), Erik Hoffmann (I 2.2), Philipp Hölting (UBA I 2.2), Petra Icha (V 1.5), Kristina Juhrich (UBA III 2.1), Kai Kessler (UBA III 2.6), Robert Kludt (UBA V 1.6), Katharina Koppe (UBA I 2.2), Anna Koska (UBA III 2.1), Michael Kotzulla (UBA V 1.6), Birgit Laggner (TI LV), Andreas Laggner (TI AK), Jens Langenfeld (UBA V 1.5), Christian Lehmann (UBA III 2.2), Burkhard Lenzen (V 3.2), Sandra Leuthold (III 2.2), Christian Liesegang (UBA III 2.1), Kerstin Martens (UBA III 1.4), Christian Mielke (UBA V 1.6), Jana Niebuhr (V 1.6), Karen Pannier (UBA III 2.1), Sebastian Plickert (UBA III 2.2), Miriam Possel (UBA V 1.6), Christopher Proske (UBA III 2.1), Katja Oehmichen (TI WO), Jens Reichel (UBA V 1.6), Almut Reichart (UBA III 2.1), Thomas Riedel (TI WO), Claus Rösemann (TI AK), Sebastian Rüter (TI HF), Marc Scherstjanoi (TI-WO), Stephan Schiller (UBA V 1.6), Wolfgang Stümer (TI WO), Cora Vos (TI AK), Tobias Vosen (UBA V 1.6), Nicole Wellbrock (TI WO), Frank Wetzel (UBA I 2.2), Jiexia Zheng (UBA V 1.6), Daniel Ziche (TI AK)

Kapitelverantwortliche:

Kapitel 1	Tobias Vosen
Kapitel 2	Tobias Vosen
Kapitel 3	Özge Can, Michael Kotzulla, Christian Böttcher
Kapitel 4	Robert Kludt, Jens Reichel, Jiexia Zheng
Kapitel 5	Jana Niebuhr, Roland Fuss, Thünen-Institut für Agrarklimaschutz
Kapitel 6	Jana, Niebuhr,Roland Fuss, Thünen-Institut für Agrarklimaschutz
Kapitel 7	Stephan Schiller
Kapitel 9	Jana Niebuhr
Kapitel 10	Michael Kotzulla, Stephan Schiller
Anhang 1	Christian Mielke
Anhang 2	Kevin Hausmann
Anhang 3	Michael Kotzulla
Anhang 4	Stephan Schiller
Anhang 5	Tobias Vosen, Stephan Schiller, Christian Mielke
Anhang 6	Petra Icha, Marion Dreher, Kristina Juhrich
Anhang 7	entsprechend der fachlichen Zuständigkeit (siehe Kapiteln 3 bis 7)

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis 5
Abbildungsverzeichnis 16
Tabellenverzeichnis 23
Abkürzungsverzeichnis 42
Einheiten und Größen 50
Erklärung der Einleitenden Informationstabellen 50
ES Zusammenfassung 53
ES.1 Hintergrundinformationen zu Treibhausgas-Inventaren und Klimawandel 54
ES.1.1 Hintergrundinformationen zum Klimawandel 54
ES.1.2 Hintergrundinformationen zu den Treibhausgas-Inventaren 54
ES.2 Zusammengefasste Emissionen von Treibhausgasen sowie deren Einbindung in Senken .. 55
ES.3 Zusammengefasste Emissionsschätzungen und Trends der Quell- und Senkengruppen 59
ES.4 Sonstige Informationen zu indirekten Treibhausgasen und Vorläufersubstanzen 60
ES.5 Analyse der Hauptkategorien 60
ES.6 Durchgeführte Verbesserungen 61
1 Einleitung 62
1.1 Hintergrundinformationen zu Treibhausgas-Inventaren und Klimawandel 62
1.1.1 Hintergrundinformationen zum Klimawandel 62
1.1.2 Hintergrundinformationen zu den Treibhausgas-Inventaren 63
1.2 Eine Beschreibung der nationalen Umstände und institutionellen Regelungen 64
1.2.1 Nationaler Koordinierungsausschuss und Nationale Koordinierungsstelle 66
1.2.2 Inventarerstellung 71
1.2.3 Archivierung von Informationen 84
1.2.4 Verfahren für die offizielle Prüfung und Genehmigung des Inventars 85
1.3 Allgemeine Beschreibung der angewandten Methodik und Datenquellen 86
1.3.1 Datenquellen 86
1.3.2 Methoden 95
1.4 Kurzbeschreibung der Hauptkategorien 95
1.5 Informationen zum Qualitätssicherungs- und –kontrollplan sowie zum Inventarplan inklusive Verifizierung und zum Umgang mit vertraulichen Informationen 101
1.5.1 Prozeduren zu Qualitätssicherung- und –kontrolle 101
1.5.2 Aktivitäten zur Verifizierung 109
1.5.3 Umgang mit vertraulichen Informationen 111

1.6 Generelle Unsicherheitenschätzung, einschließlich Daten über die Gesamtunsicherheit der nationalen Gesamtemissionen 112
1.7 Generelle Prüfung der Vollständigkeit 115
1.7.1 Informationen über die Vollständigkeit, einschließlich Datenlücken und nicht berichtete Kategorien 115
1.7.2 Beschreibung der unbedeutenden Kategorien 116
1.7.3 Gesamtmenge der als nicht signifikant betrachteten Emissionen 117
1.8 Metriken 117
1.9 Zusammenfassung der angewendeten Flexibilitäten 117
2 Trends der Treibhausgas-Emissionen und -Senken 118
2.1 Beschreibung und Interpretation des Emissionsverlaufs für aggregierte Treibhausgasemissionen 121
2.2 Beschreibung und Interpretation des Emissionsverlaufs nach Kategorien und nach Treibhausgasen 122
2.2.1 Beschreibung und Interpretation des Emissionsverlaufs nach Kategorien 122
2.2.2 Kohlendioxid (CO_2) 125
2.2.3 Lachgas (N_2O) 126
2.2.4 Methan (CH_4) 127
2.2.5 F-Gase 127
3 Energie - Sektor 1 129
3.1 Übersicht (CRF-Sektor 1) 129
3.2 Verbrennung von Brennstoffen (1.A) 129
3.2.1 Verifikation des sektoralen Ansatzes zu CRF 1.A 134
3.2.2 Internationale Bunkerbrennstoffe 137
3.2.3 CO_2-Emissionen aus der nichtenergetischen Verwendung von Energieträgern 144
3.2.4 Öffentliche Elektrizitäts- und Wärmeversorgung (1.A.1.a) 148
3.2.5 Mineralölraffinerien (1.A.1.b) 159
3.2.6 Herstellung von festen Brennstoffen und sonstige Energieerzeuger (1.A.1.c) 163
3.2.7 Verarbeitendes Gewerbe (1.A.2) 168
3.2.8 Transport (1.A.3) 192
3.2.9 Sonstige: Haushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen, Land-, Forstwirstschaft und Fischerei (1.A.4 stationär) 223
3.2.10 Sonstige: Haushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen, Land-, Forstwirtschaft und Fischerei (1.A.4 mobil) 232
3.2.11 Andere Bereiche (1.A.5.a stationär) 240
3.2.12 Andere Bereiche (1.A.5.b mobil) 243

3.2.13 Militär ... 249
3.3 Diffuse Emissionen aus Brennstoffen (1.B) ... 249
3.3.1 Feste Brennstoffe - Kohlenbergbau und -umwandlung (1.B.1) ... 250
3.3.2 Öl und Erdgas und diffuse Emissionen aus der Energieerzeugung (1.B.2) ... 257
3.4 Abscheidung, Transportund Speicherung von CO_2 (CCS) (CRF 1.C) ... 287
3.4.1 Kategorie (1.C) ... 287
4 Industrieprozesse (CRF-Sektor 2) ... 289
4.1 Übersicht (CRF Sektor 2) ... 289
4.2 Mineralische Industrie (2.A) ... 289
4.2.1 Mineralische Industrie: Zement (2.A.1) ... 290
4.2.2 Mineralische Industrie: Kalk (2.A.2) ... 293
4.2.3 Mineralische Industrie: Glas (2.A.3) ... 295
4.2.4 Mineralische Industrie: Weiterer Einsatz von Karbonaten (2.A.4) ... 299
4.3 Chemische Industrie (2.B) ... 308
4.3.1 Chemische Industrie: Ammoniakproduktion (2.B.1) ... 309
4.3.2 Chemische Industrie: Salpetersäureproduktion (2.B.2) ... 311
4.3.3 Chemische Industrie: Adipinsäureproduktion (2.B.3) ... 314
4.3.4 Chemische Industrie: Caprolactam, Glyoxal & Glyoxylsäure (2.B.4) ... 316
4.3.5 Chemische Industrie: Carbidproduktion (2.B.5) ... 318
4.3.6 Chemische Industrie: Titandioxid-Produktion (2.B.6) ... 319
4.3.7 Chemische Industrie: Soda-Herstellung (2.B.7) ... 320
4.3.8 Chemische Industrie: Petrochemie und Industrieruß-Produktion (2.B.8) ... 321
4.3.9 Chemische Industrie: Produktion von halogenierten Kohlenwasserstoffen und SF_6 (2.B.9) ... 328
4.3.10 Chemische Industrie - Sonstige: Emissionen aus sonstigen Produktionsprozessen (2.B.10) ... 332
4.4 Metallproduktion (2.C) ... 333
4.4.1 Metallproduktion: Eisen und Stahl (2.C.1) ... 334
4.4.2 Metallproduktion: Ferrolegierungen (2.C.2) ... 341
4.4.3 Metallproduktion: Aluminium (2.C.3) ... 342
4.4.4 Metallproduktion: Magnesium (2.C.4) ... 346
4.4.5 Metallproduktion: Blei (2.C.5) ... 348
4.4.6 Metallproduktion: Zink (2.C.6) ... 349
4.4.7 Metallproduktion: Sonstige (2.C.7) ... 351

4.5 Verwendung von nichtenergetischen Produkten aus Brennstoffen und von Lösemitteln (2.D) ... 352
4.5.1 Anwendung von Schmiermitteln (2.D.1) ... 352
4.5.2 Anwendung von Paraffinwachsen (2.D.2) ... 358
4.5.3 Sonstige: Lösemittel - NMVOC (2.D.3 Lösemittel) ... 360
4.5.4 Sonstige: Verwendung von Bitumen zur Dachdeckung (2.D.3 Bitumen) ... 367
4.5.5 Sonstige: Straßenasphaltierung (2.D.3 Asphalt) ... 369
4.5.6 CO_2-Emissionen aus dem Einsatz von AdBlue® (2.D.3 Sonstige: AdBlue®) ... 371
4.6 Elektronik-Industrie (2.E) ... 373
4.6.1 Halbleiter- und Platinenproduktion (2.E.1) ... 374
4.6.2 TFT (2.E.2) ... 376
4.6.3 Photovoltaik (2.E.3) ... 376
4.6.4 Wärmeüberträger (2.E.4) ... 377
4.7 Anwendungen als ODS-Ersatzstoff (2.F) ... 378
4.7.1 Kälte- und Klimaanlagen (2.F.1) ... 383
4.7.2 Schaumherstellung (2.F.2) ... 414
4.7.3 Feuerlöschmittel (2.F.3) ... 421
4.7.4 Aerosole (2.F.4) ... 423
4.7.5 Lösemittel (2.F.5) ... 427
4.7.6 Andere Anwendungen, die ODS Ersatzstoffe verwenden (2.F.6) ... 428
4.7.7 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (2.F alle) ... 428
4.8 Sonstige Produktherstellung und -verwendung (2.G) ... 429
4.8.1 Elektrische Betriebsmittel (2.G.1) ... 431
4.8.2 SF_6 und FKW aus sonstiger Produktverwendung (2.G.2) ... 434
4.8.3 Verwendung von N_2O (2.G.3) ... 446
4.8.4 Sonstige Produktherstellung und -verwendung: Andere - ORC-Anlagen (2.G.4 ORC-Anlagen) ... 450
4.8.5 Sonstige Produktherstellung und -verwendung: Andere - Containerbegasung (2.G.4 Containerbegasung) ... 453
4.8.6 Sonstige Produktherstellung und –verwendung: Sonstige, Anwendung von Holzkohle (2.G.4 Holzkohle) ... 454
4.9 Andere Produktionen (2.H) ... 456
4.9.1 Andere Produktionen: Zellstoff- und Papierherstellung (2.H.1) ... 456
4.9.2 Andere Produktionen: Nahrungsmittel und Getränke (2.H.2) ... 459
4.9.3 Andere Bereiche (2.H.3) ... 461

5 Landwirtschaft (CRF-Sektor 3) ... 463
5.1 Übersicht (CRF Sektor 3) ... 463
5.1.1 Kategorien und Gesamtemissionen 1990 - 2024 ... 463
5.1.2 Das Emissionsinventarmodell Py-GAS-EM ... 464
5.1.3 Charakterisierung der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung ... 470
5.1.4 Vergärung von Energiepflanzen: Konzept und Aktivitätsdaten ... 491
5.1.5 Konzept und Aktivitätsdaten für Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden und Kulturen ... 493
5.1.6 Gesamtunsicherheit aller THG-Emissionen des Sektors 3 ... 500
5.1.7 Qualitätssicherung und -kontrolle ... 504
5.2 Fermentation bei der Verdauung (3.A) ... 508
5.2.1 Beschreibung der Kategorie (3.A) ... 508
5.2.2 Methodische Aspekte (3.A) ... 508
5.2.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (3.A) ... 513
5.2.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (3.A) ... 513
5.2.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (3.A) ... 515
5.2.6 Geplante Verbesserungen (3.A) ... 516
5.3 Wirtschaftsdünger-Management (3.B) ... 516
5.3.1 Beschreibung der Kategorie (3.B) ... 516
5.3.2 Methan-Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management (3.B, CH_4) ... 518
5.3.3 NMVOC-Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management ... 525
5.3.4 Direkte N_2O- und NO-Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management (3.B, N_2O & NO) ... 528
5.3.5 Indirekte N_2O-Emissionen als Folge des Wirtschaftsdünger-Managements (3.B) ... 535
5.4 Reisanbau (3.C) ... 537
5.5 Landwirtschaftliche Böden (3.D) ... 537
5.5.1 Beschreibung der Kategorie (3.D) ... 537
5.5.2 Methodische Aspekte und Emissionen(3.D) ... 539
5.5.3 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (3.D) ... 547
5.5.4 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (3.D) ... 549
5.5.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (3.D) ... 550
5.5.6 Geplante Verbesserungen (3.D) ... 552
5.6 Brandrodung (3.E) ... 552
5.7 Verbrennen von Ernterückständen auf der Fläche (3.F) ... 553
5.8 CO_2 aus Kalkung und Harnstoffanwendung (3.G-I) ... 553

5.8.1 Beschreibung der Kategorie (3.G-I) ... 553
5.8.2 Methodik und Emissionen (3.G-I) ... 554
5.8.3 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (3.G-I) ... 555
5.8.4 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (3.G-I) ... 555
5.8.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (3.G-I) ... 556
5.8.6 Geplante Verbesserungen (3.G-I) ... 556
5.9 CH_4 und N_2O aus der Vergärung von Energiepflanzen (Fermenter und Gärrestelager) (3.J) ... 556
5.9.1 Beschreibung der Kategorie (3.J) ... 556
5.9.2 Methodische Aspekte (3.J) ... 557
5.9.3 CH_4-Emissionsfaktor und -Emissionen (3.J, CH_4) ... 557
5.9.4 N_2O-Emissionsfaktoren und -Emissionen (3.J, N_2O) ... 558
5.9.5 NO-Emissionsfaktoren und -Emissionen (3.J, NO) ... 559
5.9.6 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (3.J) ... 559
5.9.7 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (3.J) ... 559
5.9.8 Kategoriespezifische Rückrechnungen (3.J) ... 559
5.9.9 Geplante Verbesserungen (3.J) ... 560
6 Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (CRF-Sektor 4) ... 561
6.1 Übersicht (CRF Sektor 4) ... 561
6.1.1 Kategorien und Gesamtemissionen und -senken 1990 - 2024 ... 561
6.1.2 Methodische Grundlagen ... 570
6.1.3 Qualitätssicherung und -kontrolle ... 640
6.1.4 Geplante Verbesserungsmaßnahmen ... 646
6.2 Definitionen von Landnutzung, Klassifizierungssysteme und ihre Widerspiegelung in den LULUCF-Kategorien ... 647
6.2.1 Wälder ... 647
6.2.2 Ackerland ... 647
6.2.3 Grünland ... 648
6.2.4 Feuchtgebiete ... 649
6.2.5 Siedlungen ... 651
6.2.6 Sonstiges Land ... 653
6.3 Informationen zu den für die Ermittlung der Landflächen gewählten Ansätzen und zu den verwendeten Landnutzungs-Datenquellen ... 653
6.3.1 Informationen zu Ansätzen zur Darstellung von Landflächen und zu Landnutzungsdatenbanken, die für die Inventarerstellung verwendet werden ... 653

6.3.2 Informationen über die bei natürlichen Störungen angewandten Ansätze, falls zutreffend 670
6.3.3 Informationen zu den Ansätzen für die Berichterstattung über Holzprodukte 670
6.4 Wälder (4.A) 670
6.4.1 Beschreibung der Kategorie (4.A) 670
6.4.2 Methodische Aspekte (4.A) 673
6.4.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (4.A) 708
6.4.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (4.A) 714
6.4.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (4.A) 718
6.4.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (4.A) 721
6.5 Ackerland (4.B) 721
6.5.1 Beschreibung der Kategorie (4.B) 721
6.5.2 Methodische Aspekte (4.B) 726
6.5.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (4.B) 729
6.5.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (4.B) 739
6.5.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (4.B) 741
6.5.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (4.B) 742
6.6 Grünland (4.C) 742
6.6.1 Beschreibung der Kategorie (4.C) 742
6.6.2 Methodische Aspekte (4.C) 748
6.6.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (4.C) 750
6.6.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (4.C) 756
6.6.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (4.C) 759
6.6.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (4.C) 760
6.7 Feuchtgebiete (4.D) 760
6.7.1 Beschreibung der Kategorie (4.D) 760
6.7.2 Methodische Aspekte (4.D) 765
6.7.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (4.D) 767
6.7.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (4.D) 770
6.7.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (4.D) 771
6.7.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (4.D) 772
6.8 Siedlungen (4.E) 772
6.8.1 Beschreibung der Kategorie (4.E) 772
6.8.2 Methodische Aspekte (4.E) 776
6.8.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (4.E) 776

6.8.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (4.E) 780
6.8.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (4.E) 782
6.8.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (4.E) 783
6.9 Sonstiges Land (4.F) 783
6.9.1 Beschreibung der Kategorie (4.F) 783
6.9.2 Methodische Aspekte (4.F) 784
6.9.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (4.F) 784
6.9.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (4.F) 784
6.9.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (4.F) 784
6.9.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (4.F) 785
6.10 Holzprodukte (4.G) 785
6.10.1 Beschreibung der Kategorie (4.G) 785
6.10.2 Methodische Aspekte (4.G) 787
6.10.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (4.G) 791
6.10.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (4.G) 791
6.10.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (4.G) 792
6.10.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (4.G) 793
6.11 Andere Bereiche (4.H) 794
7 Abfall und Abwasser (CRF-Sektor 5) 795
7.1 Übersicht (CRF Sektor 5) 795
7.2 Abfalldeponierung (5.A) 795
7.2.1 Geordnete Deponierung – Deponierung von Siedlungsabfällen (5.A.1) 796
7.3 Biologische Abfallbehandlung (5.B) 813
7.3.1 Kompostierungsanlagen (5.B.1) 814
7.3.2 Vergärungsanlagen (5.B.2) 820
7.4 Abfallverbrennung (5.C) 827
7.4.1 Krematorien 827
7.4.2 Brauchtumsfeuer und ähnliche offene Verbrennungen 828
7.5 Abwasserbehandlung (5.D) 828
7.5.1 Kommunale Abwasserbehandlung (5.D.1) 828
7.5.2 Industrielle Abwasserbehandlung (5.D.2) 848
7.6 Andere Bereiche (5.E) 859
7.6.1 Andere Bereiche - Mechanisch-biologische Abfallbehandlung (MBA) (5.E Other MBA) 860
8 Andere (CRF-Sektor 6) 866

9 Indirektes CO2 & N2O 867
9.1 Beschreibung der Kategorie (indirekte Emissionen) 867
9.2 Methodische Aspekte (indirekte Emissionen) 867
9.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (indirekte Emissionen) 867
9.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (indirekte Emissionen) 867
9.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (indirekte Emissionen) 867
9.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (indirekte Emissionen) 867
10 Rückrechnungen und Verbesserungen 868
10.1 Erklärung und Rechtfertigung der Rückrechnungen 868
10.1.1 Generelles Vorgehen 868
10.1.2 Rückrechnungen im Inventar 2026 nach Quellgruppen 868
10.1.3 Rückrechnungen im Inventar 2026 nach Substanzen 871
10.2 Auswirkung auf die Höhe der Emissionen 872
10.2.1 Auswirkung auf die Emissionshöhe von Kategorien 1990 873
10.2.2 Auswirkung auf die Emissionshöhe von Kategorien 2005 874
10.2.3 Auswirkung auf die Emissionshöhe von Kategorien 2023 875
10.3 Auswirkung auf die Emissionstrends und die Konsistenz der Zeitreihe 876
10.4 Verbesserungen des Inventars 877
10.4.1 Implementing Regulation Article 9: Reporting on implementation of recommendations and adjustments 885
10.5 Areas of improvement and/or capacity-building related to the flexibility provisions applied with self-determined estimated time frames for improvements (related to non-mandatory provisions as per para. 7(c–d) of the MPGs) 895
Anhang 1 Hauptkategorien 896
Anhang 1.1 Beschreibung der Methoden zur Festlegung der Hauptkategorien 896
Anhang 1.1.1 Methode-1-Verfahren 897
Anhang 1.1.2 Methode-2-Verfahren 903
Anhang 1.1.3 Bewertung qualitativer Kriterien 903
Anhang 2 Bewertung der Unsicherheit: Unsicherheiten nach Kategorien 904
Anhang 3 CO_2-Referenzverfahren und Vergleich mit dem Sektoransatz 919
Anhang 3.1 Vergleich der Ergebnisse des sektoralen und des Referenz-Ansatzes 919
Anhang 4 QS/QK-Plan 923
Anhang 5 Zusatzinformationen als Bestandteil des NID oder andere hilfreiche Referenzinformationen 924
Anhang 5.1 Zusatzinformationen zur Inventarerstellung und zum Nationalen System 924

Anhang 5.1.1 Festlegungen im Grundsatzpapier „Nationales System“ zur Emissionsberichterstattung 924
Anhang 5.1.2 Zusatzinformationen zum Qualitätssystem Emission 926
Anhang 5.1.2.1 Mindestanforderungen an ein System zur Qualitätskontrolle und –sicherung 926
Anhang 5.1.3 Das Datenbanksystem Zentrales System Emissionen 941
Anhang 5.1.4 Verification of the German Greenhouse Gas Inventory 942
Anhang 5.1.4.1 Introduction 942
Anhang 5.1.4.2 The European Emission Trade Data 945
Anhang 5.1.4.3 Results and Discussion 948
Anhang 5.1.5 The European Emission Trade System 950
Anhang 5.1.6 Past and Present Verification Activities of Greenhouse Gas Emissions in National and International Projects 950
Anhang 5.1.6.1 Introduction 950
Anhang 5.1.6.2 Fossil Fuel CO_2 data 951
Anhang 5.1.6.3 Methane 952
Anhang 5.1.6.4 N_2O 954
Anhang 5.1.7 Detailed sector time series analysis 955
Anhang 5.2 Zusatzinformationen zu den Trends der Treibhausgase 958
Anhang 5.3 Rückrechnungen: detaillierte Betrachtung auf Grundlage von CRT Table 8 966
Anhang 6 Detaillierte Erläuterung der Methoden und Daten zur Berechnung von CO_2 Emissionen aus der Verbrennung von Brennstoffen 967
Anhang 6.1 Die Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland 967
Anhang 6.2 Aufbau der Energiebilanzen 968
Anhang 6.3 Methodische Aspekte: Energiebedingte Aktivitätsraten 970
Anhang 6.4 Unsicherheiten, Zeitreihenkonsistenz und Qualitätssicherung der Energiebilanz . 970
Anhang 6.4.1 Qualitätsbericht der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen zur Erstellung der Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland 971
Anhang 6.4.1.1 Hintergrund 971
Anhang 6.5 Aktionsplan Energiedaten Inventarverbesserung 986
Anhang 6.6 CO_2-Emissionsfaktoren 990
Anhang 6.6.1 Steinkohlen 990
Anhang 6.6.2 Braunkohlen 994
Anhang 6.6.3 Mineralöle 996
Anhang 6.6.4 Gase 998
Anhang 6.6.5 Abfall und Sonderbrennstoffe 1000

Anhang 6.6.6 Biomassebrennstoffe 1000
Anhang 6.6.7 Liste der abgeleiteten Kohlendioxid-Emissionsfaktoren für Energie & Industrieprozesse 1001
Anhang 7 Weitere detaillierte methodische Beschreibungen für einzelne Quell- und Senkenkategorien 1006
Anhang 7.1 Weitere detaillierte methodische Beschreibungen für CRF 1 (Energie) 1006
Anhang 7.1.1 Energiewirtschaft (1.A.1) 1006
Anhang 7.1.1.1 Methodische Aspekte der Ermittlung der Emissionsfaktoren (Kapitel 3.2.4.2) 1006
Anhang 7.1.2 Verkehr (1.A.3) 1006
Anhang 7.1.2.1 Verkehr - Ziviler Luftverkehr (1.A.3.a) 1006
Anhang 7.1.2.2 Ableitung der Aktivitätsraten zum Straßenverkehr (1.A.3.b) 1008
Anhang 7.1.2.3 Ableitung der Emissionsfaktoren 1012
Anhang 7.1.3 CO_2-Emissionen aus der Schmierstoff-Mitverbrennung in Zweitakt-Ottomotoren 1014
Anhang 7.1.4 Fossiles CO_2 aus Biokraftstoffen 1017
Anhang 7.2 Weitere detaillierte methodische Beschreibungen für CRF 2 (Industrieprozesse) 1019
Anhang 7.3 Weitere detaillierte methodische Beschreibungen für CRF 3 (Landwirtschaft) ... 1019
Anhang 7.3.1 Verteilungen von Haltungs-, Lager- und Ausbringungsverfahren sowie Weidegangdaten (3.B, 3.D) 1019
Anhang 7.4 Weitere detaillierte methodische Beschreibungen für CRF 4 (LULUCF) 1032
Anhang 7.5 Weitere detaillierte methodische Beschreibungen für CRF 5 (Abfall und Abwasser) 1032
11 Referenzen 1033

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entwicklung der Treibhausgase in Deutschland seit 1990, nach Treibhausgasen ... 56
Abbildung 2: Emissionsentwicklung in Deutschland seit 1990, nach Kategorien ... 59
Abbildung 3: Relative Entwicklung der Treibhausgasemissionen seit 1990, nach Kategorien ... 60
Abbildung 4: Struktur des Nationalen Systems Emissionen (NaSE) ... 66
Abbildung 5: QSE - Rollen Aufgaben und Arbeitsabläufe ... 79
Abbildung 6: Steuerung und Dokumentation von QKQS-Maßnahmen ... 80
Abbildung 7: Verfahrensablauf für die jährliche Inventar-Verifikation mit ETS-Monitoring-Daten ... 83
Abbildung 8: Übersicht über den Prozess der Emissionsberichterstattung ... 84
Abbildung 9: Verantwortlichkeiten und Datenfluss für die Berechnung der Treibhausgasemissionen im Energiebereich ... 86
Abbildung 10: Verantwortlichkeiten und Datenfluss für die Berechnung der Treibhausgasemissionen der Industrieprozesse ... 90
Abbildung 11: Verantwortlichkeiten und Datenfluss für die Berechnung der Treibhausgas-emissionen der Landwirtschaft ... 92
Abbildung 12: Datenfluss für die Berechnung der Treibhausgasemissionen aus dem Bereich Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF) und KP-LULUCF ... 93
Abbildung 13: Datenfluss für die Berechnung der Treibhausgasemissionen aus dem Bereich Abfall und Abwasser ... 94
Abbildung 14: Relative Entwicklung von Kohlendioxid, Methan und Lachgas gegenüber 1990 ... 122
Abbildung 15: CO_2-Emissionen in CRF 1.A, nach Brennstoffen und ohne Emissionen aus Biomasse und internationale Verkehre ... 126
Abbildung 16: Übersicht über die Treibhausgas-Emissionen des CRF-Sektors 1 ... 129
Abbildung 17: CO_2-Emissionen in Deutschland – Vergleich nationaler und internationaler Berechnungsergebnisse ... 136
Abbildung 18: CO_2-Emissionen in Deutschland – relative Abweichung gegenüber IEA-Daten ... 136
Abbildung 19: Treibhausgas-Emissionen des von Deutschland ausgehenden internationalen Flugverkehrs seit 1990 ... 137
Abbildung 20: Treibhausgas-Emissionen des internationalen Seeverkehrs seit 1990 ... 141
Abbildung 21: Entwicklung der CO_2-Emissionen der Kategorie 1.A.1.a ... 149
Abbildung 22: Entwicklung der CO_2-Emissionen der Kategorie 1.A.1.b ... 160
Abbildung 23: Entwicklung der CO_2-Emissionen der Kategorie 1.A.1.c ... 164
Abbildung 24: Entwicklung der CO_2-Emissionen in Kategorie 1.A.2.a nach Produkten ... 171
Abbildung 25: Entwicklung der Brennstoffeinsätze der Kategorie 1.A.2.f Non-Metallic Minerals 179
Abbildung 26: Entwicklung der Brennstoffeinsätze der Kategorie 1.A.2.g viii ... 183
Abbildung 27: THG-Emissionen der Fahrzeuge und mobilen Maschinen der Bauwirtschaft seit 1990 ... 187
Abbildung 28: Treibhausgas-Emissionen des nationalen zivilen Flugverkehrs seit 1990 ... 193
Abbildung 29: Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen des Straßenverkehrs seit 1990 ... 202
Abbildung 30: Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen des Schienenverkehrs, seit 1990 ... 210
Abbildung 31: Treibhausgas-Emissionen der nationalen Schiffsverkehrs seit 1990 ... 215

Abbildung 32: Änderung der Gesamtemission von 1.A.4 (stationär) in Abhängigkeit von der Temperatur 225
Abbildung 33: Verlauf des Energieverbrauchs von 1.A.4 (stationär) nach vier Brennstoffkategorien 226
Abbildung 34: THG-Emissionen der betrachteten Teilsektoren seit 1990 233
Abbildung 35: Kraftstoffverbrauch innerhalb der betrachteten Teilsektoren seit 1990 234
Abbildung 36: Entwicklung der CO_2-Emissionen der Kategorie 1.A.5.a 241
Abbildung 37: Entwicklung der THG-Emissionen aus mobilen Quellen des Militärs seit 1990 244
Abbildung 38: Entwicklung des Kraftstoffeinsatzes seit 1990 245
Abbildung 39: Entwicklung der Methanemissionen in der Kategorie 1.B 250
Abbildung 40: Entwicklung der Grubengasemissionen im aktiven und stillgelegten Bergbau 252
Abbildung 41: Vergleich mit internationalen IEF für Methan aus 1.B.2.b iv Logarithmische Darstellung; Bezug auf das Jahr 2020 276
Abbildung 42: Vergleich der mit internationalen IEF für Methan an 1.B.2.b v 279
Abbildung 43: Übersicht über die Treibhausgas-Emissionen des CRF-Sektors 2 289
Abbildung 44: Zeitlicher Verlauf und Kategorienzuordnung der aus dem Reduktionsmitteleinsatz zur Primärstahlerzeugung bzw. Gichtgasaufkommen resultierenden CO_2-Emissionen 336
Abbildung 45: NMVOC-Emissionen aus lösemittelbasierten Produkten und Anwendungen (2.D.3.a, d-i) 365
Abbildung 46: Übersicht über die Treibhausgas-Emissionen des CRF-Sektors 3 464
Abbildung 47: Logik der nationalen Methodik für die Emissionsberechnungen in der Tierhaltung am Beispiel der Mutterkuh. („Leistungsindikator“ steht hier für die Summe aus leistungs- und erhaltungsbedingtem Bedarf) 465
Abbildung 48: Konzept und thematische Inhalte des Py-GAS-EM-Modells 466
Abbildung 49: Prinzipieller Modellansatz für Transporte 469
Abbildung 50: Darstellung der Berechnung auf Basis der NUTS-3-Regionen von direkten N_2O-Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden 539
Abbildung 51: Vergleich der jährlichen indirekten N2O-Emissionen aus Auswaschung und Oberflächenabfluss nach IPCC 2006 Tier 1 Methode und neuer Tier 3 Methode nach Eysholdt et al. (2022) 543
Abbildung 52: Veränderungen der N_2O-Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden zwischen Submission 2025 und Submission 2026 551
Abbildung 53: Zeitreihen der Treibhausgasemissionen und – senken (Summe aus CO_2, CH_4 und N_2O) [kt CO_2-Äquivalente] im LULUCF-Sektor seit 1990, unterschieden nach Unterkategorien 568
Abbildung 54: Zeitreihen der Treibhausgasemissionen und –senken (Summe aus CO_2, CH_4 und N_2O) [kt CO_2-Äquivalente] im LULUCF-Sektor seit 1990, unterschieden nach Pools 569
Abbildung 55: Zeitreihen der Treibhausgasemissionen und – senken (Summe aus CO_2, CH_4 und N_2O) [kt CO_2-Äquivalente] im LULUCF-Sektor seit 1990, unterschieden nach Treibhausgasen (GHG) 569
Abbildung 56: Zeitreihen der modellierten C_{org}-Vorräte [t C ha^{-1}] für Deutschland [DT) und die einzelnen Bundesländer 579

Abbildung 57: Modellierter C_{org}-Vorrat für 1990 und 2024 [t C ha^{-1}] sowie die Änderungsraten zwischen diesen Jahren [t C ha^{-1} a^{-1}] 580
Abbildung 58: Geschätzter Kohlenstoffeintrag durch Hauptfrüchte [Mg C ha^{-1} a^{-1}] für Deutschland (DT) und die Bundesländer 580
Abbildung 59: Geschätzter durchschnittlicher Kohlenstoffeintrag durch Hauptfrüchte [t C ha^{-1} a-1] vor und nach 2014 581
Abbildung 60: Geschätzter durchschnittlicher Kohlenstoffeintrag durch Zwischenfruchtanbau [Mg C ha^{-1} a^{-1}] für Deutschland (DT) und die Bundesländer 581
Abbildung 61: Geschätzter Kohlenstoffeintrag durch Zwischenfruchtanbau [t C ha^{-1}] 582
Abbildung 62: Zeitreihen des durchschnittlichen Kohlenstoffeintrags [Mg C ha^{-1}] durch organische Düngung in mineralische Ackerböden Deutschlands (DT) und seiner Bundesländer 582
Abbildung 63: Geschätzter durchschnittlicher Kohlenstoffeintrag durch organische Düngung [t C ha^{-1}] 583
Abbildung 64: Links: Regionalisierte C_{org}-Vorräte [Mg C ha^{-1}] im Vergleich mit den beobachteten C_{org}-Vorräten [Mg C ha^{-1}] von BZE-Beprobungspunkten. Rechts: Kernel-Dichte und angepasste Dichtefunktion der Unterschiede zwischen beobachteten und geschätzten C_{org}-Vorräten [Mg C ha^{-1}] 583
Abbildung 65: Vergleich der durch Downscaling (LULUCF) abgeleiteten Kohlenstoffeinträge und der Kohlenstoffeinträge, die an BZE-Standorten aus standortspezifischen Managementinformationen abgeleitet wurden 584
Abbildung 66: Karte der (A) SOC-Vorräte [t C ha^{-1} 30 cm^{-1}] und (B) C/N-Verhältnisse in den Mineralböden Deutschlands, bewirtschaftet als Ackerland mit annuellen Kulturen (*Ackerland$_{annuell}$*) 589
Abbildung 67: Karte der (A) SOC-Vorräte [t C ha^{-1} 30 cm^{-1}] und (B) C/N- Verhältnisse in den Mineralböden Deutschlands unter Grünland 591
Abbildung 68: Relativer Kohlenstoffverlust ([%]; Unsicherheiten: 95 % - Konfidenzintervall [%]) humoser Oberbodenhorizonte infolge baubedingter Störungen, abgeleitet aus Response-Funktionen für Grünland bzw. Wald zu Ackerland (Poeplau et al., 2011) bei einer durchschnittlichen Bauzeit von 12 Monaten 593
Abbildung 69: Zeitreihen der Impliziten Emissionsfaktoren (IEF) für $CO_{2\text{-onsite}}$ + DOC und CH_{4_land} + CH_{4_ditch} [t CO_2-Equivalents] aus organischen Böden Deutschlands der Landnutzungssubkategorien Ackerlandannuell (cro1) und Grünland i.e.S. (gra1) 604
Abbildung 70: Entwicklung der Kohlenstoffvorräte [t C ha^{-1}] in Kompartimenten der pflanzlichen Biomasse von Obstanbauflächen sowie die daraus resultierenden Emissionen [t C ha^{-1}] in aufeinander folgenden Umtriebszyklen (|). Transparente Balken sind nur bei Landnutzungsänderung emissionsrelevant 613
Abbildung 71: Entwicklung der Kohlenstoffvorräte [t C ha^{-1}] in Kompartimenten der Biomasse von Weingärten sowie die daraus resultierenden Emissionen [t C ha^{-1}] in aufeinander folgenden Umtriebszyklen (|). Transparente Balken sind nur bei Landnutzungsänderung emissionsrelevant 615
Abbildung 72: Entwicklung der Kohlenstoffvorräte [t C ha^{-1}] in Kompartimenten der pflanzlichen Biomasse von Baumschulen (SOC) sowie die daraus resultierenden Emissionen [t C

ha^{-1}] in aufeinander folgenden Umtriebszyklen (|). Transparente Balken sind nur bei Landnutzungsänderung und Ablauf der Betriebsdauer emissionsrelevant 617
Abbildung 73: Entwicklung der Kohlenstoffvorräte [t C ha^{-1}] in Kompartimenten der Biomasse von Weihnachtsbaumkulturen (crox) sowie die daraus resultierenden Emissionen [t C ha^{-1}] in aufeinander folgenden Umtriebszyklen (|). Transparente Balken sind nur bei Landnutzungsänderung emissionsrelevant 618
Abbildung 74: Entwicklung der Kohlenstoffvorräte [t C ha^{-1}] in Kompartimenten der pflanzlichen Biomasse von Kurzumtriebsplantagen (SOC) sowie die daraus resultierenden Emissionen [t C ha^{-1}] in aufeinander folgenden Umtriebszyklen (|). Transparente Balken sind nur bei Landnutzungsänderung und Ablauf der Betriebsdauer emissionsrelevant 620
Abbildung 75: Entwicklung der Kohlenstoffvorräte [t C ha^{-1}] in Kompartimenten der Biomasse von Hecken/Gehölzen sowie die daraus resultierenden Emissionen [t C ha^{-1}] in aufeinander folgenden Umtriebszyklen (|); transparente Balken sind nur bei Landnutzungsänderung emissionsrelevant 625
Abbildung 76: Entwicklung der Kohlenstoffvorräte [t C ha^{-1}] in Kompartimenten der pflanzlichen Biomasse von Terrestrischen Feuchtgebieten (wettwett) sowie die daraus resultierenden Emissionen [t C ha^{-1}] bis zum Erreichen eines unterstellten Gleichgewichtszustands (|). Transparente Balken sind nur bei Landnutzungsänderung emissionsrelevant 627
Abbildung 77: Entwicklung der Kohlenstoffvorräte [t C ha^{-1}] in Kompartimenten der pflanzlichen Biomasse von Gebäude und Freiraumflächen (set1) in Siedlungsräumen Deutschlands sowie die daraus resultierenden Emissionen [t C ha^{-1}] in aufeinander folgenden Umtriebszyklen (|). Transparente Balken sind nur bei Landnutzungsänderung emissionsrelevant 631
Abbildung 78: Treibhausgasemissionen (Summe aus CO_2, CH_4 und N_2O) [kt CO_2-Äq.] infolge Landnutzung und Landnutzungsänderung aus Wäldern von 1990 – 2024 nach Unterkategorien 672
Abbildung 79: Treibhausgasemissionen (Summe aus CO_2, CH_4 und N_2O) [kt CO_2-Äq.] infolge Landnutzung und Landnutzungsänderung aus Wäldern von 1990 – 2024 nach Pools 672
Abbildung 80: Kohlenstoffvorräte und Kohlenstoffvorratsveränderungen für die unterirdische und oberirdische Biomasse im Wald für die Jahre 1987/1993, 2002, 2008, 2012, 2017, 2022 675
Abbildung 81: Holzeinschlag in Deutschland 675
Abbildung 82: Entwicklung der Absterberaten nach Baumarten seit 1990 (Waldzustandsbericht 2024) 677
Abbildung 83: Vergleich verschiedener Funktionen zur Ableitung der unterirdischen Biomasse 683
Abbildung 84: Zeitlicher Verlauf der Datenerhebung durch die Bodenzustandserhebung im Wald sowie die darauf basierende Bodenkohlenstoffmodellierung. 690
Abbildung 85: Räumliche Verteilung der Inventurpunkte der ersten und zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE-Wald). 691
Abbildung 86: Aufbau eines Inventurpunktes der Bodenzustandserhebung im Wald (BZE-Wald) 692

Abbildung 87: Übersicht über die Berechnung der jährlichen Änderungsraten für organischen Kohlenstoff in der Humusauflage und im Mineralboden 696
Abbildung 88: Mittlere modellierte Bodenkohlenstoffvorräte in [t ha^{-1}] 703
Abbildung 89: Waldbrandflächen zwischen 1990 und 2024 (nach BLE, 2024)..... 706
Abbildung 90: Vergleich der Emissionen des mineralischen Bodens inkl. der Streu für die Submission 2025 und 2026..... 719
Abbildung 91: Treibhausgasemissionen (Summe aus CO_2, CH_4 und N_2O) [kt CO_2-Äq.] infolge Landnutzung und Landnutzungsänderung aus Ackerland von 1990-2024 nach Unterkategorien (Unsicherheitendarstellung nur für Gesamtsumme)..... 725
Abbildung 92: Treibhausgasemissionen (Summe aus CO_2, CH_4 und N_2O) [kt CO2-Äq.] infolge Landnutzung und Landnutzungsänderung aus Ackerland von 1990-2024 nach Pools (Unsicherheitendarstellung nur für Gesamtsumme) 726
Abbildung 93: Treibhausgasemissionen (Summe aus CO_2, CH_4 und N_2O) [kt CO2-Äq.] infolge Landnutzung und Landnutzungsänderung aus dem Grünland i.e.S. 1990-2024, dargestellt nach Unterkategorien 745
Abbildung 94: Treibhausgasemissionen (Summe aus CO_2, CH_4 und N_2O) [kt CO_2-Äq.] infolge Landnutzung und Landnutzungsänderung aus dem Grünland i.e.S. 1990-2024, dargestellt nach Pools 746
Abbildung 95: Treibhausgasemissionen (Summe aus CO_2, CH_4 und N_2O) [kt CO_2-Äq.] infolge Landnutzung und Landnutzungsänderung aus Gehölzflächen und Hecken von 1990–2023, dargestellt nach Unterkategorien 747
Abbildung 96: Treibhausgasemissionen (Summe aus CO_2, CH_4 und N_2O) [kt CO_2-Äq.] infolge Landnutzung und Landnutzungsänderung aus Gehölzflächen und Hecken von 1990-2023, dargestellt nach Pools 748
Abbildung 97: Treibhausgasemissionen (Summe aus CO_2, CH_4 und N_2O) [kt CO2-Äq.] infolge Landnutzung und Landnutzungsänderung aus Feuchtgebieten von 1990-2024, dargestellt nach Unterkategorien 763
Abbildung 98: Treibhausgasemissionen (Summe aus CO_2, CH_4 und N_2O) [kt CO_2-Äq.] infolge Landnutzung und Landnutzungsänderung aus den Feuchtgebieten von 1990-2024, dargestellt nach Pools 764
Abbildung 99: Treibhausgasemissionen (∑ CO_2, ∑ CH_4 und ∑ N_2O) [kt CO2-Äq.] infolge Landnutzung und Landnutzungsänderung aus den Feuchtgebieten von 1990–2024 764
Abbildung 100: THG-Emissionen [kt CO_2-Äq. nach IPCC AR5] infolge Landnutzung und Landnutzungs-änderung aus Siedlungen von 1990 – 2024, dargestellt nach Unterkategorien 775
Abbildung 101: THG-Emissionen [kt CO_2-Äq. nach IPCC AR5] infolge Landnutzung und Landnutzungs-änderung aus Siedlungen Deutschlands von 1990 – 2024, dargestellt nach Pools..... 775
Abbildung 102: Netto CO_2-Emissionen und Einbindungen in Holzprodukten [kt CO_2)..... 785
Abbildung 103: Kohlenstoffflüsse, Kohlenstoffspeicher und ihre CO_2-Emissionen und Einbindungen entlang der Forst- und Holzkette..... 786
Abbildung 104: In Deutschland produziertes Schnittholz und Holzwerkstoffe [Mm^3] (FAO, 2022) 787
Abbildung 105: Kalibrierung des Derbholzabgangs gemäß Waldinventurdaten mittels Holzeinschlagstatistik [Mio. Vfm] 788

Abbildung 106: Nicht genutzter und genutzter Derbholzabgang gemäß Waldinventurdaten und Einschlagstatistik [Mm³] 789
Abbildung 107: Entwicklung des heimischen Rohstofffaktors $f_R(i)$ der berücksichtigten Rohstoffkategorien (FAO, 2022, 2025) 790
Abbildung 108: Übersicht über die Treibhausgas-Emissionen des CRF-Sektors 5 795
Abbildung 109: Veränderung der Entsorgungspfade der Siedlungsabfälle seit 1990 797
Abbildung 110: Trend in der Zusammensetzung des Hausmülls zwischen 1990 und 2013 803
Abbildung 111: Entwicklung der Input-Mengen von mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland 861
Abbildung 112: Stoffstromschema Mechanisch-Biologische Abfallbehandlung 862
Abbildung 113: Änderung der Gesamtemissionen über alle Kategorien gegenüber Submission 2025 870
Abbildung 114: Änderung der Gesamtemissionen über alle Kategorien gegenüber Submission 2025, ohne LULUCF 871
Abbildung 115: Rückrechnung der Gesamtemission der einzelnen Treibhausgase über alle Quellgruppen gegenüber der Submission 2025 872
Abbildung 116: absolute Änderungen in CRF-Hauptkategorien und Gesamtinventar, für 1990 ... 874
Abbildung 117: absolute Änderungen in CRF-Hauptkategorien und Gesamtinventar, für 2005 875
Abbildung 118: absolute Änderungen in CRF-Hauptkategorien und Gesamtinventar, für 2023 876
Abbildung 119: prozentuale Abweichungen der im Referenzverfahren erfassten jährlichen Gesamt-Aktivitätsraten von den Gesamtmengen gemäß sektoralem Ansatz 920
Abbildung 120: prozentuale Abweichungen der mit dem Referenzverfahren berechneten jährlichen Kohlendioxid-Emissionen von den Ergebnissen des sektoralen Ansatzes 921
Abbildung 121: Übersicht zum gesamten Prozess der Emissionsberichterstattung 934
Abbildung 122: Steuerung und Dokumentation im Rahmen des NaSE und des QSE 936
Abbildung 123: Time Slice Emission data for Germany from the CAMS data store 944
Abbildung 124: Time Slice Emission data for Germany from the EPRTR Database 947
Abbildung 125: Trend plots for CO_2, CH_4 and N_2O emission totals 1990-2021 949
Abbildung 126: Fossil CO_2 emissions for Germany from bottom-up inventories, CRF depicts the reported emissions to the UNFCCC. The trend as well as the order of magnitude are in good agreement between the different sets of data. 951
Abbildung 127: Fossil CO_2 emissions for Germany as mean over the three respective decades. Energy related emissions in Germany have dropped quite significantly between the decades, whilst transport related emissions decreased slower 952
Abbildung 128: Anthropogenic CH_4 data for the reported UNFCCC data as well as selected bottom-up datasets 953
Abbildung 129: Trends in anthropogenic CH_4 data for the reported UNFCCC data over three decades 953
Abbildung 130: Top down anthropogenic CH_4 emissions from the GOSAT satellite as well as from global inversions 954
Abbildung 131: Anthropogenic N2O data for the reported UNFCCC data as well as selected bottom-up datasets 955
Abbildung 132: Trends in N2O data for the reported UNFCCC data over three decades 955

Abbildung 133: Sector comparison of reported trend data with EDGAR 8.0 data for Germany for the three major greenhouse gases (CO_2, CH_4 and N_2O) the line represents a least squares linear fit of the data 957
Abbildung 134: Steinkohlemengen für die im Emissionshandel gemessene Emissionsfaktoren und Heizwerte vorliegen..... 992
Abbildung 135: Verhältnis zwischen Kohlenstoffgehalten und Heizwerten für verschiedene Steinkohlenqualitäten 993
Abbildung 136: Verhältnis zwischen Kohlenstoffgehalten und Heizwerten am Beispiel einer Rohbraunkohlequalität..... 994
Abbildung 137: Verhältnis zwischen Kohlenstoffgehalten und Heizwerten für verschiedene Klärschlämme 1001

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Multiplikationsfaktoren, Abkürzungen, Vorsilben und Symbole 50
Tabelle 2: Einheiten und Abkürzungen 50
Tabelle 3: Standardentsprechungen 50
Tabelle 4: Emissionsentwicklung in Deutschland, nach Treibhausgas und Kategorie, in [kt CO_2-Äquivalent] 57
Tabelle 5: Anteile an der Emissionsentwicklung in Deutschland, nach Treibhausgas und Kategorie, in [%] 58
Tabelle 6: QSE - Rollen und Verantwortlichkeiten 78
Tabelle 7: Number of categories and key categories 96
Tabelle 8: Hauptkategorien für Deutschland gemäß Methode 1-Ansatz, mit GWP des IPCC AR5 98
Tabelle 9: Hauptkategorien für Deutschland, die sich nur aufgrund des Methode-2-Ansatzes ergeben 101
Tabelle 10: Inventarplan – offene Handlungsbedarfe 103
Tabelle 11: Inventarplan - erledigte Handlungsbedarfe/Verbesserungen 105
Tabelle 12: Übersicht Unsicherheiten Gesamtinventar 115
Tabelle 13: Vollständigkeit: Übersicht der Quellen und Senken, deren Emissionen nicht in Zeitreihen geschätzt werden (not estimated, NE), Emissionsangaben in [kt CO_2-Äq.] 117
Tabelle 14: Emissionen von direkten und indirekten Treibhausgasen und SO_2 in Deutschland seit 1990, in Kilotonnen [kt] 119
Tabelle 15: Veränderungen der Emissionen direkter und indirekter Treibhausgase und SO_2 in Deutschland seit dem jeweiligen Bezugsjahr (1990/1995) 120
Tabelle 16: Prozentuale Veränderungen der deutschen THG-Emissionen, nach Kategorien 125
Tabelle 17: Merkmale der UBA-Struktur der Bilanz der Emissionsursachen zur Disaggregierung der Energiebilanz 132
Tabelle 18: Vergleich der CO_2-Inventare mit Angaben der IEA, Absolutwerte in [Mio. t] 135
Tabelle 19: jährliche Anteile der Auslandsflüge an den Treibstoff-Inlandsablieferungen, in % 138
Tabelle 20: revidierte Treibstoff-Inlandsablieferungen, in Terajoule [TJ] 138
Tabelle 21: revidierter Anteil an den Kerosin-Inlandsablieferungen 2023, in % 139
Tabelle 22: revidierte Treibstoffmengen für Flüge ins Ausland 1990-2023, in Terajoule 139
Tabelle 23: revidierte THG-Emissionen 1990-2023, in kt und kt CO_2-Äquivalenten 140
Tabelle 24: revidierte Energiemengen, in Terajoule 142
Tabelle 25: revidierte CO_2-Emissionenfaktoren für Schweröl, in kg/TJ 143
Tabelle 26: revidierte Treibhausgas-Emissionen, in kt und kt CO_2-Äquivalenten 143
Tabelle 27: IPCC-Standardwerte für EF & Unteren Heizwert 145
Tabelle 28: Verifikation der Vollständigkeit des berichteten CO_2 aus der nichtenergetischen Verwendung von fossilen Energieträgern, für 2021 146
Tabelle 29: Technologische Emissionsfaktoren für Lachgas aus GFA, in [kg/TJ] 153
Tabelle 30: Technologische Emissionsfaktoren für Lachgas aus Anlagen < 50 MW FWL, in [kg/TJ] 154

Tabelle 31: Methan-Emissionsfaktoren für Feuerungsanlagen ab 50 MW FWL und für Gasturbinen, in [kg/TJ] 154
Tabelle 32: CO_2 aus der Rauchgasentschwefelung in Öffentlichen Kraftwerken, in [kt] 156
Tabelle 33: Rückrechnungen CRF 1.A.1.a, in [kt] bzw. [%] 158
Tabelle 34: Rückrechnungen CRF 1.A.1.b nach Brennstoffen, in [kt] bzw. [%] 162
Tabelle 35: CO_2-Emissionen aus der Gichtgasverbrennung in Kokereien, in [Mio. t] 166
Tabelle 36: Rückrechnungen CRF 1.A.1.c, in [kt] bzw. [%] 167
Tabelle 37: Rückrechnungen in CRF 1.A.2.a, in [kt] bzw. [%] 173
Tabelle 38: Rückrechnungen in CRF 1.A.2.b, in [kt] bzw. [%] 174
Tabelle 39: Rückrechnungen in CRF 1.A.2.e, in [kt] bzw. [%] 178
Tabelle 40: Rückrechnungen in CRF 1.A.2.f, in [kt] bzw. [%] 181
Tabelle 41: Rückrechnungen in 1.A.2.g viii nach Brennstoffen, in [kt] bzw. [%] 185
Tabelle 42: für das Berichtsjahr 2024 verwendete Emissionsfaktoren, in kg/TJ 188
Tabelle 43: prozentuale Unsicherheiten der Emissionsfaktoren* 188
Tabelle 44: Übersicht relevanter Datenvergleiche 188
Tabelle 45: Vergleich der verwendeten EF (CO_2) mit Default-Werten, in kg/TJ 189
Tabelle 46: länderübergreifender Vergleich der IEF für fossile Flüssigbrennstoffe, in kg/TJ 189
Tabelle 47: revidierte Primäraktivitätsdaten 2004-2023, in Terajoule 189
Tabelle 48: revidierte prozentuale Anteile 2004-2023 an EBZ 67 190
Tabelle 49: resultierende Revision der Aktivitätsdaten 2004-2023, in Terajoule 190
Tabelle 50: revidierter Kohlendioxid-Emissionsfaktor 2023 für fossilen Ottokraftstoff 191
Tabelle 51: revidierte Emissionsmengen 2004-2023, in kt bzw. kt CO_2-Äquivalenten 191
Tabelle 52: jährliche Anteile der Inlandsflüge an den Treibstoff-Inlandsablieferungen, in % 194
Tabelle 53: für das Berichtsjahr 2024 verwendete Emissionsfaktoren, in kg/TJ 195
Tabelle 54: verwendete spezifische Unsicherheiten 196
Tabelle 55: Übersicht relevanter Datenvergleiche 197
Tabelle 56: Vergleich der im Inventar verwendeten EF (CO_2) mit Default-Werten [a], in kg/TJ. 197
Tabelle 57: länderübergreifender Vergleich der berichteten IEF, in kg/TJ 197
Tabelle 58: revidierte Inlandsabsätze 1990-2023, in Terajoule TJ 197
Tabelle 59: revidierte Anteile der Inlandsflüge an Treibstoff-Inlandsablieferungen 2023, in % 198
Tabelle 60: resultierende Revision der Inlandsverbräuche 1990-2023, in Terajoule TJ 198
Tabelle 61: revidierte THG-Emissionen 1990-2023, in kt bzw. kt CO_2-Äquivalenten 199
Tabelle 62: Emissionen des Straßenverkehrs, in Kilotonnen 203
Tabelle 63: relative Unsicherheiten der Kohlendioxid-Emissionsfaktoren* 205
Tabelle 64: relative Unsicherheiten der Aktivitätsdaten (AD) und IEF für Methan und Lachgas*, in % 205
Tabelle 65: Übersicht relevanter Datenvergleiche 206
Tabelle 66: Vergleich der verwendeten EF (CO_2) mit Default-Werten, in kg/TJ 206
Tabelle 67: internationaler Vergleich verwendeten CO_2-Emissionsfaktoren, in kg/TJ 207
Tabelle 68: revidierte Energieeinsätze 2003-2023, in Terajoule 207
Tabelle 69: revidierte Emissionsfaktoren für 2023, in [kg/TJ] 208
Tabelle 70: revidierte Treibhausgas-Emissionen 2003-2023, in kt CO_2-Äquivalenten 209
Tabelle 71: Überblick der verwendeten Statistiken und sonstigen Quellen 211

Tabelle 72: für das Berichtsjahr 2024 verwendete Emissionsfaktoren, in kg/TJ 211
Tabelle 73: prozentuale Unsicherheiten der Aktivitätsdaten und Emissionsfaktoren * 211
Tabelle 74: Übersicht relevanter Vergleiche 212
Tabelle 75: Vergleich der verwendeten EF (CO_2) mit Default-Werten [a], in kg/TJ 212
Tabelle 76: länderübergreifender Vergleich der berichteten IEF, in kg/TJ 212
Tabelle 77: revidierte Aktivitätsdaten, in Terajoule [TJ] 213
Tabelle 78: revidierte Emissionsmengen, in [kg] bzw. [kt CO_2-Äquivalente] 214
Tabelle 79: Quellennachweis für die verwendeten Aktivitätsdaten 216
Tabelle 80: für das Berichtsjahr 2024 verwendete Emissionsfaktoren, in kg/TJ 217
Tabelle 81: prozentuale Unsicherheiten der Emissionsfaktoren* 218
Tabelle 82: Übersicht relevanter Datenvergleiche 219
Tabelle 83: Vergleich der für das Jahr 2024 verwendeten EF (CO_2) mit IPCC-Defaults, in kg/TJ 219
Tabelle 84: länderübergreifender Vergleich der berichteten IEF, in kg/TJ 219
Tabelle 85: revidierte Energieeinsätze 2003-2023, in Terajoule 220
Tabelle 86: revidierte Emissionsfaktoren, in kg/TJ 221
Tabelle 87: revidierte Treibhausgas-Emissionen 2003-2023, in kt CO_2-Äquivalenten 221
Tabelle 88: Sektorale Emissionsfaktoren für Feuerungsanlagen der Haushalte und Kleinverbraucher für das Bezugsjahr 2010, in [kg/TJ] 228
Tabelle 89: Emissionsberechnung mit landesspezifischen Tier-2/3 Emissionsfaktoren und mit den Tier 1 Default-Emissionsfaktoren nach IPCC et al. (2006) 231
Tabelle 90: Rückrechnungen in CRF 1.A.4 stationär nach Brennstoffen, in [kt] bzw. [%] 231
Tabelle 91: für das Berichtsjahr 2024 verwendete Emissionsfaktoren, in kg/TJ 234
Tabelle 92: prozentuale Unsicherheiten der Emissionsfaktoren* 235
Tabelle 93: Übersicht relevanter Datenvergleiche 236
Tabelle 94: Vergleich der im Inventar verwendeten EF (CO_2) mit default-Werten*, in kg/TJ* 236
Tabelle 95: länderübergreifender Vergleich der berichteten IEF, in kg/TJ 236
Tabelle 96: revidierte Primäraktivitätsdaten 2003-2023, in Terajoule 237
Tabelle 97: revidierte prozentuale Anteile an den Primärdaten gemäß EBZ 67 238
Tabelle 98: revidierte Energieeinsätze der betrachteten Teilsektoren, in Terajoule 239
Tabelle 99: revidierte Emissionsmengen, in Kilotonnen CO_2-Äquivalenten 239
Tabelle 100: Sektorale Emissionsfaktoren für militärische Dienststellen, Bezugsjahr 2005, fortgeschrieben für die aktuelle Berichterstattung, in [kg/TJ] 242
Tabelle 101: Rückrechnungen in CRF 1.A.5 stationär nach Brennstoffen, in [kt] bzw. [%] 242
Tabelle 102: für das Berichtsjahr 2024 verwendete Emissionsfaktoren, in kg/TJ 245
Tabelle 103: prozentuale Unsicherheiten der Emissionsfaktoren* 246
Tabelle 104: Übersicht relevanter Datenvergleiche 246
Tabelle 105: Vergleich der verwendeten EF(CO_2) mit Default- Werten, in kg/TJ 247
Tabelle 106: länderübergreifender Vergleich der berichteten IEF, in kg/TJ 247
Tabelle 107: revidierte Energiemengen 2003-2023, in Terajoule 247
Tabelle 108: revidierter Kohlendioxid-Emissionsfaktor 2023 für fossilen Ottokraftstoff 248
Tabelle 109: revidierte Emissionsdaten, in kt CO_2-Äquivalenten 248
Tabelle 110: Förderung von Braunkohle, in Mio. t. 253

Tabelle 111: IEF Vergleich mit Ländern die für die übertägige Produktion von Braunkohle einen höheren Tier-Ansatz verwenden 254
Tabelle 112: Aktivitätsraten der Veredelungsprodukte [Angaben in Tonnen] 255
Tabelle 113: Emissionsfaktoren aus der Produktion von Steinkohlenkoks 256
Tabelle 114: Anzahl der Explorationsbohrungen (Öl und Erdgas insgesamt) 259
Tabelle 115: Verwendete Emissionsfaktoren für die Kategorie 1.B.2.a.i 259
Tabelle 116: Fördermenge Erdöl in kt 260
Tabelle 117: Verwendete Emissionsfaktoren für die Förderung und Aufbereitung 260
Tabelle 118: IEF Vergleich mit IPCC Default Werten 261
Tabelle 119: Transport von im Inland produziertem Rohöl in kt 261
Tabelle 120: Transport von importiertem Rohöl in kt 261
Tabelle 121: Transport von Rohöl mittels Binnentankschiffen in kt 261
Tabelle 122: für die Kategorie 1.B.2.a.iii verwendete Emissionsfaktoren, in [kg/t] 262
Tabelle 123: Verarbeitete Menge an Rohöl in kt 263
Tabelle 124: Auslastungsgrad der Raffinerien in Prozent 263
Tabelle 125: Rohöldestillationskapazität in Raffinerien, in kt 264
Tabelle 126: Lagerkapazität von Tanklagern in Raffinerien und Pipelineterminals, in Mio m3 . 264
Tabelle 127: Lagerkapazität von raffineriefernen Tanklagern, in Mio m^3 264
Tabelle 128: Lagerkapazität von Kavernen, in Mio m^3 264
Tabelle 129: Verwendete Emissionsfaktoren für die Kategorie 1.B.2.a.vi „Diffuse Emissionen in Raffinerien“ 264
Tabelle 130: Verwendeter Emissionsfaktor für die Kategorie 1.B.2.a. vi „Anodenherstellung in Raffinerien“ 264
Tabelle 131: Tankstellenbestand in Deutschland, Anzahl 266
Tabelle 132: Verteilte Mengen an Mineralölprodukten, in kt 266
Tabelle 133: NMVOC-Emissionsfaktoren 1.B.2.a.v „Verteilung von Ottokraftstoffen“ 267
Tabelle 134: NMVOC-Emissionsfaktoren für 1.B.2.a.v „Verteilung von Dieselkraftstoffen“ 267
Tabelle 135: NMVOC-Emissionsfaktoren für 1.B.2.a.v „Verteilung von leichtem Heizöl“ 267
Tabelle 136: NMVOC-Emissionsfaktoren für 1.B.2.a.v „Verteilung von Flugturbinenkraftstoffen“ 267
Tabelle 137: NMVOC-Emissionsfaktoren für 1.B.2.a.v „Reinigung“ 267
Tabelle 138: Anwendungs- und Wirkungsgrad der 20. und 21. Bundesimmissionsschutzverordnung (BImSchV) an Tankstellen 268
Tabelle 139: Fördermenge Erdgas in Mrd m^3 270
Tabelle 140: Verwendete Emissionsfaktoren für die Förderung 271
Tabelle 141: IEF Vergleich mit IPCC Default Werten 271
Tabelle 142: Schwefelproduktion aus der Erdgasgewinnung in Deutschland in kt 272
Tabelle 143: Verwendete Emissionsfaktoren für 1.B.2.b.iii „Aufbereitung“ 272
Tabelle 144: Vergleich nationaler IEF mit IPCC-Default Werten 273
Tabelle 145: Kohlendioxid- Emissionsfaktorvergleich (2022) in [g/m^3] 273
Tabelle 146: Länge der Hochdruckfernleitungen, in [km] 274
Tabelle 147: Unterirdische Gasspeichervolumina in [Mrd. m^3] 274
Tabelle 148: Emissionen der Untergrundspeicherbetreiber nach EU Methanverordnung 275
Tabelle 149: Emissionen der FNB nach EU Methanverordnung 275

Tabelle 150: Gasverteilungsnetz, Angaben in km 277
Tabelle 151: Vergleich der Leitungslänge verschiedener Statistiken für das Jahr 2020 278
Tabelle 152: Anzahl Erdgasfahrzeuge in Deutschland 279
Tabelle 153: Verwendete Aktivitätsraten für die Kategorie 1.B.2.b.vi „diffuse Emissionen bei Erdgas-Anwendern“ 280
Tabelle 154: Verwendete Emissionsfaktoren für die Kategorie 1.B.2.b.vi „diffuse Emissionen bei Endanwendern “ 280
Tabelle 155: Vergleich mit IPCC Default Werten 282
Tabelle 156: Fackelgasmengen in Mio. m³ 283
Tabelle 157: implizite Emissionsfaktoren für 1.B.2.c „Fackelemissionen bei der Erdgasförderung“ 283
Tabelle 158: implizite Emissionsfaktoren für 1.B.2.c „Fackelemissionen an Erdölförderanlagen“ 283
Tabelle 159: verwendet Emissionsfaktoren für 1.B.2.c „Fackelemissionen an Raffinerien: Abfackelung-Normalbetrieb“ 284
Tabelle 160: verwendete Emissionsfaktoren 1.B.2.c „Fackelemissionen an Raffinerien: Abfackelung-Störung“ 284
Tabelle 161: Vergleich der nationalen IEF mit IPCC Default Werten 285
Tabelle 162: Rückrechnung in der Kategorie 1.B.2 – NMVOC-Emissionen in kt 287
Tabelle 163: Rückrechnung in der Kategorie 1.B.2 - CO_2-Emissionen in kt 287
Tabelle 164: Rückrechnung in der Kategorie 1.B.2 - CH_4-Emissionen in kt 287
Tabelle 165: Produktion und rohstoffbedingte CO_2-Emissionen der deutschen Zementindustrie, in [kt/a] 290
Tabelle 166: Produktion und CO_2-Emissionen der deutschen Kalkindustrie, in [Mio t] 293
Tabelle 167: Glas: Aktivitätsraten der einzelnen Branchensektoren (Glassorten), in [t] 297
Tabelle 168: Scherbenanteil der einzelnen Glassorten, in [%] 297
Tabelle 169: CO_2-Emissionsfaktoren für verschiedene Glassorten (berechnet im Vergleich mit Angaben der IPCC Guidelines 2006 298
Tabelle 170: Aktivitätsraten und prozessbedingte CO_2-Emissionen der keramischen Industrie (CRF 2.A.4.a), seit 1990, in [kt] 300
Tabelle 171: CO_2-Emissionsfaktoren für verschiedene keramische Produktgruppen 303
Tabelle 172: Aktivitätsraten und nutzungsbedingte CO_2-Emissonen außerhalb der Glasindustrie 304
Tabelle 173: Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.A.4.b), in [kt CO_2] 306
Tabelle 174: In Deutschland verwendete Emissionsfaktoren für sonstige Schadstoffe, in [kg/t] 327
Tabelle 175: Meldenummern der Produktionsstatistik 327
Tabelle 176: CO_2 aus der Primärstahlerzeugung (einschließlich Gichtgasnutzung), in [Mt] 336
Tabelle 177: Kalksteineinsatz sowie Eigenerzeugung von Branntkalk in der Stahlindustrie und daraus resultierende CO_2-Emissionen, in [t/a] 338
Tabelle 178: Insgesamt unter 2.C.1 zu berichtende prozessbedingte Emissionen, in [t/a] 339
Tabelle 179: AR und prozessbedingte EF (in [kg/t]) der Primäraluminiumproduktion in 2013 .. 344
Tabelle 180: sortengruppenspezifische Emissionsfaktoren für Schmierstoffe, in Prozent 354
Tabelle 181: Umgang mit Kategorien der BAFA-Statistik 1990-1994 355

Tabelle 182: Übersicht der verwendeten spezifischen Mitverbrennungsanteile 355
Tabelle 183: Kohlendioxid aus unbeabsichtigt in mobilen Nicht-Zweitaktmotoren mitverbrannten Schmierstoffen, in Kilotonnen 356
Tabelle 184: revidierte ungewollt mitverbrannte Schmierstoffmengen, in Terajoule 357
Tabelle 185: revidierte CO_2-Emissionen aus der Anwendung von Schmierstoffen, in Kilotonnen 357
Tabelle 186: Herstellung und Verlegung von Dach- und Dichtungsbahnen mit Bitumen und dazugehörige AR und EF 368
Tabelle 187: Emissionsfaktoren bei der Herstellung Asphaltmischgut 370
Tabelle 188: modellierte AdBlue®-Einsatzmengen, in Tonnen 371
Tabelle 189: aus dem Einsatz von AdBlue® resultierende CO_2-Emissionen, in Kilotonnen 372
Tabelle 190: revidierte jährliche Kraftstoffverbräuche der SCR-Fahrzeuge, in Terajoule 372
Tabelle 191: revidierte AdBlue®-Einsatzmengen, in Tonnen 373
Tabelle 192: revidierte CO_2-Emissionen, in Kilotonnen 373
Tabelle 193: Methoden und verwendete Emissionsfaktoren für das aktuelle Berichtsjahr in Kategorie 2.F.1 – Kälte- und Klimaanlagen 380
Tabelle 194: Methoden und verwendete Emissionsfaktoren für das aktuelle Berichtsjahr in 2.F.2 (Schaumherstellung), 2.F.3 (Feuerlöschmittel), 2.F.4 (Aerosole), 2.F.5 (Lösemittel) und 2.F.6 (Andere Anwendungen, die ODS-Ersatzstoffe verwenden) 382
Tabelle 195: Rekalkulierte Emissionen von HFKW-23, HFKW-32, HFKW-125, HFKW-134a, HFKW-143a, HFKW-152a, HFKW-227ea, FKW-116 und FKW-218 in der Unterkategorie Kälte- und Klimaanlagen (2.F.1) in den Jahren 1995-2023, in t CO_2eq 411
Tabelle 196: Rekalkulierte Emissionen von HFKW-152a und HFKW-245fa 2017 bis 2023, in [t CO_2eq] 421
Tabelle 197: Rekalkulierte Emissionen von HFKW-134a und HFKW-227ea 2014-2023, in t CO_2eq 427
Tabelle 198: Überblick über Methoden und verwendete Emissionsfaktoren für das aktuelle Berichtsjahr in den Kategorien 2.G.1 (Elektrische Betriebsmittel), 2.G.2 (SF_6 und FKW aus sonstiger Produktverwendung) und 2.G.4 (ORC-Anlagen, Containerbegasung & Anwendung von Holzkohle) 430
Tabelle 199: Inventardaten 2024 der Kategorie 2.G.1 mit Unterkategorien 432
Tabelle 200: SF_6-Bestand in Teilchenbeschleunigern in 5 Anwendungssektoren ab 1995, in t . 436
Tabelle 201: SF_6-Emissionen aus Teilchenbeschleunigern nach fünf Anwendungsbereichen ab 1995, in t 437
Tabelle 202: Rekalkulierte SF_6-Emissionen aus Teilchenbeschleunigern, in Tonnen [t] 444
Tabelle 203: Rekalkulierte SF_6-Emissionen aus Isolierglasfenstern, in Tonnen [t] 445
Tabelle 204: Rekalkulierte Emissionen von HFKW-245fa 2018-2023, in t CO_2eq 453
Tabelle 205: Emissionsfaktoren für die Produktion von Zellstoff, in [kg/t] 457
Tabelle 206: Zellstoff- und Papierherstellung, produzierte Mengen 2024 457
Tabelle 207: Umgerechnete Aktivitätsdaten der Spanplattenindustrie, in [t] 458
Tabelle 208: Überblick über freiwillig berichtete fluorierte Treibhausgase, ihre Treibhausgaspotenziale und ihre Anwendungsbereiche 461
Tabelle 209: Aggregierte Emissionen der nicht berichtspflichtigen fluorierten Treibhausgase uHFCKW-1224yd, uHFCKW-1233zd, uHFKW-1234yf, uHFKW-1234ze, uHFKW-

1336mzz, HCFE-235da2, HFE-236ea2, HFE-347mmz1, PFPE/PFPMIE und SO_2F_2, in [t CO_2-Äquivalenten] 462
Tabelle 210: CRF -Tierkategorien und die für die deutsche Emissionsberichterstattung verwendete Unterteilung (3.A, 3.B) 470
Tabelle 211: Zahl der in die Berichterstattung eingehenden Tierplätze (3.A, 3.B), in 1.000 475
Tabelle 212: Mittlere Tiergewichte (3.A, 3.B), in kg/Tier 477
Tabelle 213: Mittlere tägliche Milchleistung bei Milchkühen (3.A, 3.B), in kg/Tage 478
Tabelle 214: Mittlere tägliche Gesamtenergie-Aufnahme (GE) (3.A), in MJ / Platz 478
Tabelle 215: Tägliche Trockenmasseaufnahme (3.B), in kg / Platz 479
Tabelle 216: Verdaulichkeit von organischer Substanz im Futter (3.B), in % 479
Tabelle 217: Aschegehalt des Futters (3.B), in kg/kg 479
Tabelle 218: jährliche N-Ausscheidungen (3.B(b)), in kg / Platz 480
Tabelle 219: Jahressummen der N-Ausscheidungen, aufgeteilt nach Wirtschaftsdünger-Managementsystemen (3.B(b)) und Weidegang (3.D), in Gg/a 481
Tabelle 220: Tägliche VS-Ausscheidung für Milchkühe, übrige Rinder, Schweine, Geflügel, Schafe und Pferde (3.B(a)), in kg / Platz 482
Tabelle 221: Tägliche VS-Ausscheidung für Schafe, Ziegen, Pferde und sonstige Tiere (3.B(a)) , in kg / Platz 482
Tabelle 222: Güllebasierte Systeme ohne Vergärung, in % des ausgeschiedenen VS (3.B(a)) ... 483
Tabelle 223: Strohbasierte Systeme ohne Vergärung, in % des ausgeschiedenen VS (3.B(a))... 483
Tabelle 224: Tiefstreu ohne Vergärung, in % des ausgeschiedenen VS (3.B(a)) 483
Tabelle 225: Alle Systeme mit Vergärung, in % des ausgeschiedenen VS (3.B(a)) 483
Tabelle 226: Weide, in % des ausgeschiedenen VS (3.B(a)) 483
Tabelle 227: Jahressummen des N-Eintrags durch Einstreu in strohbasierten Systemen, in Gg 484
Tabelle 228: Maximale Methan-Bildungskapazität B_o (3.B(b)) 484
Tabelle 229: Mittlere maximale Methan-Bildungskapazität B_o für Geflügel (3.B(b)), in m^3 kg^{-1} 485
Tabelle 230: Methan-Umwandlungsfaktoren *MCF* (in % von B_o) für Rinder (3.B(a)) 485
Tabelle 231: Methan-Umwandlungsfaktoren *MCF* (in % von B_o) für Schweine (3.B(a)) 486
Tabelle 232: Mittlere Methan-Umwandlungsfaktoren *MCF* (in % von B_o) für güllebasierte Systeme ohne Vergärung (3.B(a)) 486
Tabelle 233: Methan-Umwandlungsfaktoren MCF (in % von B_o) für Ziegen, Schafe, Pferde, Gehegewild, Kaninchen, Straußen, Pelztiere und Geflügel (3.B(a)) 486
Tabelle 234: N-Mengen aus Wirtschaftsdüngern, die in Biogasanlagen vergoren werden (in Gg N) 487
Tabelle 235: Methan-Umwandlungsfaktoren für das Vorlager (in % von B_o) 488
Tabelle 236: Anteile der Lagerung von Wirtschaftsdünger-Gärresten in gasdichten und nicht gasdichten Lagern (in % der in Biogasanlagen eingesetzten N-Mengen) 489
Tabelle 237: Mittlere Methan-Umwandlungsfaktoren MCF (in %von B_o) für Wirtschaftsdüngersysteme mit Vergärung (3.B(a)) 489
Tabelle 238: Berechnung der N_2O-Emissionen aus der Vergärung 489
Tabelle 239: N_2O-N-Emissionsfaktoren für Vorlager und Gärrestelager 490
Tabelle 240: Trockenmasse, VS-Menge und N-Menge der in Biogasanlagen eingesetzten Energiepflanzen, in Gg 492

Tabelle 241: Anteil der Lagerung von Energiepflanzen-Gärresten in gasdichten und nicht gasdichten Lagern (in % der zur Vergärung eingesetzten Frischmasse) 493
Tabelle 242: Berechnung der N-Mengen im ausgebrachten Wirtschaftsdünger (einschließlich Wirtschaftsdünger-Gärreste) (3.D), in Gg 494
Tabelle 243: N-Mengen, die der Berechnung der direkten N_2O-Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden zugrunde liegen (3.D), in Gg 496
Tabelle 244: Flächen der bewirtschafteten organischen Böden (3.D), in 1000 ha 497
Tabelle 245: Sektoren 3.B, 3.D und 3.J: Mengen an reaktivem Stickstoff aus der Deposition von NH_3 und NO, in Gg 497
Tabelle 246: Ausgewaschene N-Menge (incl. Oberflächenabfluss) 3.B und 3.D, in Gg 498
Tabelle 247: Düngekalkmengen (3.G und 3.I), in Gg 499
Tabelle 248: Ausgebrachte Harnstoffmengen einschließlich Ammoniumnitrat-Harnstoff-Lösung (3.H), in Gg 499
Tabelle 249: Eingangsdaten für die Berechnung von NMVOC-Emissionen aus landwirtschaftlichen Kulturen (Übersicht) 500
Tabelle 250: Gesamtunsicherheitsberechnung für die Emissionen des Sektors 3 502
Tabelle 251: CH_4-Emissionen aus der Verdauung (3.A): Veränderungen seit 1990 und Anteile an den Gesamtemissionen der Landwirtschaft (3.A) 508
Tabelle 252: Milchkühe: Milchleistung, GE-Aufnahme, verdauungsbedingte CH_4-Emission und Methanumwandlungsfaktor (3.A) 510
Tabelle 253: Methan-Umwandlungsfaktoren für übrige Rinder (3.A) 510
Tabelle 254: Methan-Umwandlungsfaktoren für Schweine (3.A) 511
Tabelle 255: Tierplatzbezogene CH_4-Emissionsfaktoren, Verdauung (3.A), in kg Platz^{-1} a^{-1} 511
Tabelle 256: Tier-1-Emissionsfaktoren für CH_4 aus der Verdauung (3.A), in kg Platz^{-1} a^{-1} 512
Tabelle 257: CH_4-Emissionen aus der Verdauung (3.A), in Gg 512
Tabelle 258: CH_4-Emissionen aus der Verdauung bei Milchkühen verschiedener Länder im Vergleich des impliziten Emissionsfaktors (IEF) für das Zeitreihenjahr 2023 513
Tabelle 259: CH_4-Emissionen aus der Verdauung bei übrigen Rindern und Schweinen verschiedener Länder im Vergleich des impliziten Emissionsfaktors (IEF) für das Zeitreihenjahr 2023 514
Tabelle 260: Vergleich der in Submission 2026 und 2025 berichteten mittleren täglichen Gesamtenergie-Aufnahme für Milchkühe, übrige Rinder und Schweine (3.A), in MJ/Tier 515
Tabelle 261: Vergleich der in Submission 2026 und 2025 berichteten tierplatzbezogenen CH_4-Emissionsfaktoren (Verdauung) für Milchkühe, übrige Rinder und Schweine (3.A), in kg/Platz 515
Tabelle 262: Vergleich der in Submission 2026 und 2025 berichteten CH_4-Emissionen (Verdauung) für alle Tiere, Milchkühe, übrige Rinder, Schweine, Schafe, Ziegen und Pferde (3.A), in Tg 516
Tabelle 263: Prozentuale Veränderung der Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management (Index: MM) seit 1990 sowie prozentuale Anteile an den landwirtschaftlichen Gesamtemissionen von CH_4, N_2O, THG und NMVOC (3.B) 518
Tabelle 264: Tierplatzbezogene CH_4-Emissionsfaktoren, Wirtschaftsdünger-Management (3.B(a)) 519

Tabelle 265: CH_4-Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management(3.B(a)) 519
Tabelle 266: CH_4 aus Wirtschaftsdünger-Management (Milchkühe, übrige Rinder, Schweine) in Gg, prozentuale Beiträge zu CH_4 insgesamt aus Wirtschaftsdünger-Management520
Tabelle 267: Durch Wirtschaftsdünger-Vergärung verursachte absolute und prozentuale Veränderung der CH_4-Emissionen gegenüber einer Situation ohne Vergärung und Gärrestelagerung (negatives Vorzeichen: Emissionsminderung)..... 520
Tabelle 268: CH_4-Emissionen aus der Lagerung von Wirtschaftsdüngern bei Milchkühen verschiedener Länder im Vergleich des impliziten Emissionsfaktors (IEF) und wichtiger emissionsrelevanter Parameter für das Zeitreihenjahr 2023..... 521
Tabelle 269: CH_4-Emissionen aus der Lagerung von Wirtschaftsdüngern bei übrigen Rindern verschiedener Länder im Vergleich des impliziten Emissionsfaktors (IEF) und wichtiger emissionsrelevanter Parameter für das Zeitreihenjahr 2023..... 522
Tabelle 270: CH_4-Emissionen aus der Lagerung von Wirtschaftsdüngern bei Schweinen verschiedener Länder im Vergleich des impliziten Emissionsfaktors (IEF) und wichtiger emissionsrelevanter Parameter für das Jahr 2023..... 522
Tabelle 271: CH_4-Emissionen aus der Lagerung von Wirtschaftsdüngern bei Geflügel verschiedener Länder im Vergleich des impliziten Emissionsfaktors (IEF) und wichtiger emissionsrelevanter Parameter für das Zeitreihenjahr 2023..... 523
Tabelle 272: Vergleich der in Submission 2026 und 2025 berichteten VS-Ausscheidungen (3.B(a)), in kg Platz^{-1} d^{-1}..... 524
Tabelle 273: Vergleich der in Submission 2026 und 2025 berichteten tierplatzbezogenen CH_4-EF für das Wirtschaftsdünger-Management (3.B(a)), in [kg Platz^{-1} a^{-1}]..... 524
Tabelle 274: Vergleich der in Submission 2026 und 2025 berichteten CH_4-Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management (3.B(a)), in [kt a^{-1}]..... 524
Tabelle 275: NMVOC: Im Inventar verwendete Tier-1- Emissionsfaktoren nach EMEP (2023), in kg Platz^{-1} a^{-1}..... 526
Tabelle 276: NMVOC: Im EMEP (2023) berechnete Tier-2- Emissionsfaktoren (IEF), in kg Platz^{-1} a^{-1} 526
Tabelle 277: NMVOC-Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management, in Gg..... 526
Tabelle 278: Prozentuale Beiträge zu den NMVOC-Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management 527
Tabelle 279: Vergleich der NMVOC-Emissionen zwischen Submission 2026 und Submission 2025 für Milchkühe, übrige Rinder und Geflügel, in Gg..... 528
Tabelle 280: Emissionsfaktoren für Emissionen von N_2O-N aus dem Wirtschaftsdünger-Management, ohne Vergärung (bezogen auf die Summe von ausgeschiedenem N und Einstreu-N) (3.B(b)), in [kg kg^{-1}]..... 529
Tabelle 281: Mittlere N_2O-N-Emissionsfaktoren nach Wirtschaftsdünger-Managementsystemen (3.B(b)), in g/kg..... 530
Tabelle 282: Direkte N_2O-Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management insgesamt und nach Systemkategorien (3.B(b)) , in Gg..... 531
Tabelle 283: Durch Wirtschaftsdünger-Vergärung verursachte absolute und prozentuale Veränderung der direkten N_2O-Emissionen gegenüber einer Situation ohne Vergärung und Gärrestelagerung (negative Werte: Emissionsminderung)..... 531
Tabelle 284: NO-Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management, in Gg 532

Tabelle 285: N-Ausscheidung pro Tierplatz für Milchkühe, übrige Rinder, Schweine und Geflügel verschiedener Länder für das Zeitreihenjahr 2023 532
Tabelle 286: Vergleich des impliziten Emissionsfaktors (IEF) für N2O-Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management für Milchkühe, übrige Rinder, Schweine und Geflügel verschiedener Länder für das Zeitreihenjahr 2023 .. 533
Tabelle 287: Vergleich der in Submission 2026 und 2025 berechneten direkten Gesamt-N_2O-Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management, in Gg 534
Tabelle 288: Vergleich der in Submission 2026 und 2025 berechneten Gesamt-N-Ausscheidungen (siehe Kapitel 5.1.3.4) , in Gg 534
Tabelle 289: Vergleich der in Submission 2026 und 2025 berechneten Gesamt-NO-Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management, in Gg 534
Tabelle 290: Indirekte N_2O-Emissionen als Folge der Deposition von NH_3 und NO aus dem Wirtschaftsdünger-Management (Submission 2026 und 2025), in Gg 537
Tabelle 291: Indirekte N_2O-Emissionen als Folge von Auswaschung aus dem Wirtschaftsdünger-Management (Submission 2026 und 2025), in Gg 537
Tabelle 292: Prozentuale Veränderung der Emissionen aus der Nutzung landwirtschaftlicher Böden seit 1990 sowie prozentuale Anteile an den landwirtschaftlichen Gesamtemissionen von N_2O und THG 538
Tabelle 293: N_2O-N Emissionsfaktoren für N-Einträge auf Böden, nach (Mathivanan et al., 2021), in kg kg^{-1} 540
Tabelle 294: Mittlere N_2O-N-Emissionsfaktoren für landwirtschaftliche Böden, in kg kg^{-1} 541
Tabelle 295: NMVOC-Emissionsfaktoren für landwirtschaftliche Kulturen, in kg kg^{-1} h^{-1} 545
Tabelle 296: Frac-Zeitreihen und Mittelwerte über die gesamten Zeitreihen (3.D), in kg kg^{-1} .. 545
Tabelle 297: Übersicht N_2O-Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Böden (3.D), in Gg.. 546
Tabelle 298: NO-Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Böden, in Gg 546
Tabelle 299: NMVOC-Emissionen aus landwirtschaftlichen Kulturen, in Gg 547
Tabelle 300: N_2O-Emissionen aus Böden verschiedener Länder im Vergleich des impliziten N_2O-N-Emissionsfaktors für das Zeitreihenjahr 2023 547
Tabelle 301: Vergleich der Frac-Größen verschiedener Länder für das Zeitreihenjahr 2023..... 549
Tabelle 302: Vergleich der in Submission 2026 und 2025 berechneten N_2O-Emissionen aus der Nutzung landwirtschaftlicher Böden(3.D), in Gg 550
Tabelle 303: Veränderung von Submission 2025 zu Submission 2026 für dieN_2O-Emissionen aus der Nutzung landwirtschaftlicher Böden (negative Werte: Abnahme), in Gg..... 550
Tabelle 304: Vergleich der in Submission 2026 und 2025 berechneten NO-Emissionen aus der Nutzung landwirtschaftlicher Böden, in Gg..... 552
Tabelle 305: Veränderung von Submission 2025 zu Submission 2025 für die NO-Emissionen aus der Nutzung landwirtschaftlicher Böden (negative Werte: Abnahme), in Gg..... 552
Tabelle 306: Vergleich der in Submission 2026 und 2025 berechneten NMVOC-Emissionen aus der Nutzung landwirtschaftlicher Böden, in Gg..... 552
Tabelle 307: Prozentuale Veränderung der Summe der CO_2-Emissionen aus Kalkung und Harnstoffanwendung seit 1990 sowie prozentuale Anteile an den THG-Gesamtemissionen der deutschen Landwirtschaft 554
Tabelle 308: CO_2-Emissionen aus der Düngekalkung (3.G, 3.I), in Gg..... 554
Tabelle 309: CO_2-Emissionen aus der Harnstoffanwendung (3.H) in Gg 555

Tabelle 310: Vergleich der deutschen CO_2 -IEF-Werte mit denen benachbarter Staaten für das Zeitreihenjahr 2022 555
Tabelle 311: CO_2-Emissionen aus Kalkung und Harnstoffanwendung (3.G-I), in [kt a^{-1}] 556
Tabelle 312: Prozentuale Anteile der Emissionen aus der Energiepflanzenvergärung (Fermenter + Gärrestlager) an den landwirtschaftlichen Gesamtemissionen von CH_4, N_2O und THG 557
Tabelle 313: CH_4-Emissionsfaktor für die Vergärung von Energiepflanzen (Fermenter und Gärrestelager), bezogen auf die mit den Energiepflanzen eingebrachte Trockenmasse, in g kg^{-1} 558
Tabelle 314: CH_4-Emissionen aus der Vergärung von Energiepflanzen (Fermenter und Gärrestelager), in Gg 558
Tabelle 315: N_2O-N-Emissionsfaktor für direkte N_2O-Emissionen aus der Vergärung von Energiepflanzen (Gärrestelager), bezogen auf die mit den Energiepflanzen eingebrachte N-Menge, in g kg^{-1} 558
Tabelle 316: N_2O-Emissionen aus der Lagerung von Energiepflanzen-Gärresten, in Gg 559
Tabelle 317: NO-Emissionen aus der Lagerung von Energiepflanzen-Gärresten, in Gg 559
Tabelle 318: Vergleich der THG-Emissionen aus der Vergärung von Energiepflanzen (Fermenter und Gärrestelager) zwischen Submission 2026 und 2025, in Gg CO_{2eq} 560
Tabelle 319: Übersicht über das Deutsche LULUCF-Berichtsystem: Landnutzungskategorien, Subkategorien und Pools, Übergangsmöglichkeiten und damit verbundene Emissionen an Treibhausgasen 563
Tabelle 320: Zuordnung der deutschen Berichtskategorien zu den IPCC-Landnutzungskategorien 570
Tabelle 321 Durchschnittliche Kohlenstoffvorräte von Mineralböden unter Ackerland [t C ha^{-1}] und deren Veränderung in der Zeit sowie die daraus resultierenden Änderungsraten [t C ha^{-1} a^{-1}] sowie die Anzahl der der Berechnung zugrunde liegenden Punkte unter Ackerland 578
Tabelle 322: Mittelwerte und Mediane der gemessenen und vorhergesagten C/N-Verhältnisse und Bodenkohlenstoffvorräte [t C ha^{-1} 30 cm^{-1}] in Mineralböden unter annuellem Ackerland (*Ackerland$_{annuell}$*) 589
Tabelle 323: Mittlerer flächenbezogener Mineralbodenkohlenstoffvorrat bis 30 cm Bodentiefe [t C ha^{-1} 30cm^{-1}] und dessen Unsicherheiten [%] für Ackerflächen mit annuellen und perennierenden Kulturen 590
Tabelle 324: Mittelwerte und Mediane der gemessenen und vorhergesagten C/N-Verhältnisse und Bodenkohlenstoffvorräte [t C ha^{-1} 30 cm^{-1}] in Mineralböden unter *Grünland* 592
Tabelle 325: Mittlere Kohlenstoff- [t C ha^{-1} 30 cm^{-1}] und Stickstoffvorräte [t N ha^{-1} 30 cm^{-1}] in Mineralböden auf Siedlungsflächen (Subkategorie „Gebäude und Freiflächen“) und deren Unsicherheiten [%] 595
Tabelle 326: Mittlerer flächenbezogener Kohlenstoffvorrat [t C ha^{-1}] und dessen Unsicherheiten (%) in Mineralböden von Terrestrischen Feuchtgebieten bis 30 cm Bodentiefe ... 597
Tabelle 327: Mittlere Kohlenstoff- und Stickstoffvorräte [t C ha^{-1}] und deren Unsicherheit (Standardabweichung [%]) in Mineralböden auf „Sonstigem Land“ bis 30 cm Bodentiefe auf Bundeslandebene 598

Tabelle 328: Flächen organischer Böden und der Entwässerungsgräben nach Landnutzungskategorien für das Jahr 2024, in Hektar [ha] 601
Tabelle 329: Implizite Emissionsfaktoren (IEF) und deren Unsicherheiten (95%-Perzentile) für CO_2-onsite + DOC, CH_{4_land} + CH_{4_ditch} und N_2O-onsite aus organischen Böden Deutschlands (4.A - 4.E; 4(II)) für das Jahr 2024..... 603
Tabelle 330: Flächenbezogener Kohlenstoffvorrat der Biomasse annueller Kulturen auf Acker- und Gartenbauland, differenziert nach Bundesland, gesamter (Bio_{total}), ober- (Bio_{ober}) und unterirdischer Biomasse (Bio_{unter}) für 2024, in [t C ha^{-1} ± Hälfte des 95 % Konfidenzintervalls] 607
Tabelle 331: Flächenbezogener Kohlenstoffvorrat der Biomasse von Grünland im engeren Sinne, differenziert nach Bundesland, gesamter (Bio_{total}), ober- (Bio_{ober}) und unterirdischer Biomasse (Bio_{unter}) für 2024, in [t C ha^{-1} ± Hälfte des 95 % Konfidenzintervalls].... 608
Tabelle 332: Landnutzungskategorien mit perennierenden Gehölzkulturen außerhalb des Waldes, deren Kompartimente und Umtriebszyklen [a]..... 608
Tabelle 333: Flächenbezogener Kohlenstoffvorrat der Biomasse von Hopfenkulturen, Zwischenfrüchten und deren Summe nach Portner et al. (2019), in [t C ha^{-1} ± Hälfte des 95 % Konfidenzintervalls]..... 621
Tabelle 334: Herleitung der jährlichen Kohlenstoffzunahme innerstädtischer Gehölzpflanzen der gemäßigten Klimazone sowie des Zeitraumes bis zum Erreichen des Gleichgewichtzustandes auf Grundlage der Daten von NOWAK et al. 2013 629
Tabelle 335: Ermittlung des mittleren Trophic Adjustment Factors αi (nach 2019 IPCC Refinement) für künstliche, stehende Gewässer Deutschlands nach Trophieklassen (Hoehn et al., 2009) 636
Tabelle 336: Ermittlung mittlerer trophischer Anpassungsfaktoren anhand des Gewässerzustandes künstlicher, stehender Gewässer Deutschlands basierend auf HOEHN et al. 2009 637
Tabelle 337: Änderungen in der Methodik zur Erstellung des deutschen LULUCF-Inventars von 2020 - 2025 differenziert nach Pools..... 643
Tabelle 338: Verbesserungs- und Aktualisierungsmaßnahmen sowie methodische Änderungen zur Erstellung des deutschen LULUCF-Inventars 2026 645
Tabelle 339: Unterteilung der Landnutzungskategorie *Feuchtgebiete* in Subkategorien gemäß 2006 IPCC Guidelines und 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (IPCC 2019), die Teilkategorien der Subkategorie „Gewässer“ sowie deren Flächen im Jahr 2024 [ha]..... 650
Tabelle 340: Berechnung des Anteils [%] der begrünten Fläche an der Gesamtfläche der Landnutzungssubkategorie Gebäude- und Freiflächen (set1) sowie des Anteils der krautigen und holzigen Pflanzen an dieser Fläche 652
Tabelle 341: Zuordnung von Hauptobjektartenschlüsselnummern und Attributen des ATKIS® zu den IPCC-Landnutzungskategorien..... 656
Tabelle 342: Basistabelle zur Ableitung der Landnutzungen 660
Tabelle 343: Kodierungen in der Basistabelle 660
Tabelle 344: Wahrscheinlichste Landnutzung (LU) und deren Datenquelle (DB)..... 661
Tabelle 345: Flächen der Landnutzungskategorien und ihrer Übergänge inklusive 20-jähriger Transition Time. 662

Tabelle 346: Landnutzungsmatrix 2024. Die Diagonale zeigt die Fläche in verbleibender Nutzung, die anderen Felder die jeweiligen Landnutzungsänderungen (einschließlich 20-jähriger Übergangszeiten) 663
Tabelle 347: Jährliche Flächen der Landnutzungsänderungen, die den Berechnungen für das Inventar (20-jährige Übergangszeit) zugrunde liegen. 664
Tabelle 348: Verteilung der Flächen landwirtschaftlicher Landnutzung nach Bodenzustandserhebung Landwirtschaft (BZE-LW), Basis-Digitalem Landschaftsmodell des ATKIS® (B-DLM) und der Agrarstrukturerhebung (ASE). Referenz ist die Gesamtfläche der BZE-LW, in [%] 670
Tabelle 349: Emissionen im Waldbereich für das Jahr 2024 671
Tabelle 350: Emissionsfaktoren der verbleibenden Waldflächen der ober- und unterirdischen Biomasse, in [t C*ha] 676
Tabelle 351: EF für die Neuwaldflächen der ober- und unterirdischen Biomasse, in [t C*ha] ... 678
Tabelle 352: Koeffizienten der Biomassefunktion für Bäume >= 10 cm BHD 679
Tabelle 353: Koeffizienten der Biomassefunktion für Bäume >= 1,3 m Höhe und < 10 cm BHD 680
Tabelle 354: Koeffizienten der Biomassefunktion für Bäume < 1,3 m Höhe 680
Tabelle 355: Wurzelprozent und Raumdichten zur Konvertierung der Datenspeicher Waldfonds-Daten 681
Tabelle 356: Volumensexpansionsfaktoren zur Konvertierung von Derbholzvolumen + unterirdischem Volumen zum Baumholzvolumen der Datenspeicher Waldfonds-Daten 681
Tabelle 357: Koeffizienten, Parameter, Unsicherheiten und Quellen für die verwendeten Biomassefunktionen, unterteilt nach Baumarten 682
Tabelle 358: Biomasse Expansionsfaktoren (BEF) und deren Fehler (RMSE%) für die Baumarten-klassen und Zersetzungsgrade (NDH = Nadelbäume, LBH = Laubbäume, EI = Eiche) 688
Tabelle 359: Totholz-Emissionsfaktoren für die verbleibende Waldfläche, in [t C*ha] 688
Tabelle 360: Totholz-Emissionsfaktoren für Neuwaldflächen, in [t C*ha] 689
Tabelle 361: Bodensubstratgruppen basierend auf den zusammengefassten Legendeneinheiten der Bodenübersichtskarte im Maßstab 1:1.000.000 (BÜK 1.000) 694
Tabelle 362: Mittlere Kohlenstoffvorräte und deren Änderungen in der Humusauflage für die BZE I-Wald und BZE II-Wald auf verschiedenen aggregierten Bodensubstratgruppen und unter Waldbeständen 701
Tabelle 363 Kohlenstoffvorräte und deren Veränderungen in den oberen 30 cm des Mineral-bodens für die BZE I-Wald und BZE II-Wald in verschiedenen Bodensubstratgruppen 702
Tabelle 364: Implizite Emissionfaktoren (IEF) (Kohlenstoff) für organische Böden, in [t CO_2 ha^{-1}] 704
Tabelle 365: Implizite Emissionfaktoren (IEF) (Kohlenstoff) für Neuwaldflächen auf organischen Böden, in [t CO_2 ha^{-1}] 704
Tabelle 366: Implizite Emissionfaktoren (IEF) (Methan und Stickstoff) für organische Böden .. 705
Tabelle 367: Durch Waldbrände emittierte Treibhausgase 707
Tabelle 368: Unsicherheiten der Emissionsfaktoren für die lebende Biomasse der verbleibenden Waldfläche für unterschiedliche Perioden 710

Tabelle 369: Unsicherheiten der Emissionsfaktoren für die lebende Biomasse auf Aufforstungsflächen für unterschiedliche Perioden 710
Tabelle 370: Unsicherheiten der Emissionsfaktoren für die lebende Biomasse auf Entwaldungsflächen für unterschiedliche Perioden..... 711
Tabelle 371: Unsicherheiten der Emissionsfaktoren für Totholz für unterschiedliche Perioden..... 712
Tabelle 372: Kohlenstoffvorratsveränderung der lebenden Biomasse in Wäldern verschiedener Länder (Deutschland für 2023 & 2024, übrige Länder für 2023), in [t C ha^{-1} a^{-1}] ... 716
Tabelle 373: Kohlenstoffvorratsveränderung des Totholzes in Wäldern verschiedener Länder (Deutschland für 2023 & 2024, übrige Länder für 2023), in [t C ha^{-1} a^{-1}] 716
Tabelle 374: Kohlenstoffvorratsveränderung der Streu in Wäldern verschiedener Länder (Deutschland für 2023 & 2024, übrige Länder für 2023), in [t C ha^{-1} a^{-1}] 717
Tabelle 375: Kohlenstoffvorratsveränderung der mineralischen Böden verschiedener Länder (Deutschland für 2023 & 2024, übrige Länder für 2023), in [t C ha^{-1} a^{-1}] 717
Tabelle 376: Kohlenstoffvorratsveränderung der organischen Böden verschiedener Länder (Deutschland für 2023 & 2024, übrige Länder für 2023), in [t C ha^{-1} a^{-1}] 718
Tabelle 377: Gegenüberstellung der in Submission 2025 und 2026 berichteten Landnutzungsmatrix 720
Tabelle 378: Gegenüberstellung der in Submission 2025 und 2026 berichteten Emissionen [kt CO_2-Äq.) 720
Tabelle 379: CO_2-, N_2O- und CH_4-Emissionen [kt CO_2-Äq.] aus dem Ackerland 2024. Dargestellt sind Summen sowie obere und untere Schranke des 95 % - Konfidenzintervalls . 722
Tabelle 380: Implizite Emissionsfaktoren [t C ha^{-1} a^{-1}] und ihre Unsicherheiten für THG-Emissionen aus annuellem Ackerland 2024 730
Tabelle 381: Implizite Emissionsfaktoren [t C ha^{-1} a^{-1}] und ihre Unsicherheiten für THG-Emissionen aus dem Hopfenanbau 2024 731
Tabelle 382: Implizite Emissionsfaktoren [t C ha^{-1} a^{-1}] und ihre Unsicherheiten für THG-Emissionen aus dem Weinanbau 2024..... 732
Tabelle 383: Implizite Emissionsfaktoren [t C ha^{-1} a^{-1}] und ihre Unsicherheiten für THG-Emissionen aus dem Obstanbau 2024 733
Tabelle 384: Implizite Emissionsfaktoren [t C ha^{-1} a^{-1}] und ihre Unsicherheiten für THG-Emissionen aus Baumschulen 2023..... 734
Tabelle 385: Implizite Emissionsfaktoren [t C ha^{-1} a^{-1}] und ihre Unsicherheiten für THG-Emissionen aus Weihnachtsbaumkulturen 2024 736
Tabelle 386: Implizite Emissionsfaktoren [t C ha^{-1} a^{-1}] und ihre Unsicherheiten für THG-Emissionen aus Kurzumtriebsplantagen 2024 737
Tabelle 387: Implizite Emissionsfaktoren für organischen Böden unter Ackerland [t CO_2-Äq. IPCC AR5 ha^{-1} a^{-1}] sowie deren Unsicherheiten (2,5 %- und 97,5%-Perzentil [%]) für das Jahr 2024 738
Tabelle 388: Kohlenstoffvorratsveränderung der lebenden Biomasse im Ackerland verschiedener Länder (Deutschland für 2023 & 2024, übrige Länder für 2023), in [t C ha^{-1} a^{-1}]) 739
Tabelle 389: Kohlenstoffvorratsveränderung der toten organischen Substanz im Ackerland verschiedener Länder (Deutschland für 2023 & 2024, übrige Länder für 2023), in [t C ha^{-1} a^{-1}] 740

Tabelle 390: Kohlenstoffvorratsveränderung der mineralischen Böden im Ackerland verschiedener Länder (Deutschland für 2023 & 2024, übrige Länder für 2023), in [t C ha^{-1} a^{-1}] 740
Tabelle 391: Kohlenstoffvorratsveränderung der organischen Böden im Ackerland verschiedener Länder (Deutschland für 2023 & 2024, übrige Länder für 2023), in [t C ha^{-1} a^{-1}] ... 740
Tabelle 392: Vergleich der Flächendaten [kha] der aktuellen und der Vorjahressubmission der Ackerlandkategorie..... 742
Tabelle 393: Vergleich der Treibhausgasemissionen [kt CO_2-Äq.] aus der Kategorie Ackerland der aktuellen und der Vorjahressubmission 742
Tabelle 394: CO_2-, N_2O- und CH_4-Emissionen [kt CO_2-Äq.] aus dem Grünland 2024, unterschieden nach Pools und Unterkategorien. Dargestellt sind Summen sowie obere und untere Schranke des 95 % - Konfidenzintervalls 743
Tabelle 395: Emissionsfaktoren [t C ha-1 a-1] mit Unsicherheiten [% vom Lagemaß] zur Berechnung der THG- Emissionen 2024 aus Grünland i.e.S. 751
Tabelle 396: Unsicherheiten von Emissionsfaktoren [2,5 %- und 97,5%-Perzentil in % vom Lagemaß] aus organischen Böden für Grünland i. e. S. im Jahr 2024 752
Tabelle 397: Emissionsfaktoren [t C ha^{-1} a^{-1}] mit Unsicherheiten [% vom Lagemaß] zur Berechnung der THG- Emissionen 2024 aus Gehölzflächen 753
Tabelle 398: Unsicherheiten von Emissionsfaktoren [2,5 %- und 97,5%-Perzentil in % vom Lagemaß] aus organischen Böden für Gehölze im Jahr 2024..... 754
Tabelle 399: Emissionsfaktoren [t C ha-1 a-1] mit Unsicherheiten [% vom Lagemaß] zur Berechnung der THG- Emissionen 2024 aus Hecken..... 755
Tabelle 400: Unsicherheiten von Emissionsfaktoren [2,5 %- und 97,5%-Perzentil in % vom Lagemaß] aus organischen Böden für Hecken im Jahr 2024..... 756
Tabelle 401: Kohlenstoffvorratsveränderung der lebenden Biomasse in Grünland verschiedener Länder (Deutschland für 2023 und 2024, übrige Länder für 2023), in [t C ha^{-1} a^{-1}]) 757
Tabelle 402: Kohlenstoffvorratsveränderung der toten organ. Masse in Grünland verschiedener Länder (Deutschland für 2023 und 2024, übrige Länder für 2023), in [t C ha^{-1} a^{-1}] 757
Tabelle 403: Kohlenstoffvorratsveränderung der mineral. Böden in Grünland verschiedener Länder (Deutschland für 2023 und 2024, übrige Länder für 2023), in [t C ha^{-1} a^{-1}] 758
Tabelle 404: Kohlenstoffvorratsveränderung der organischen Böden in Grünland verschiedener Länder (Deutschland für 2023 und 2024, übrige Länder für 2023)..... 758
Tabelle 405: Vergleich der Flächendaten [kha] der aktuellen und der Vorjahressubmission der Grünlandkategorie..... 759
Tabelle 406: Vergleich der Treibhausgasemissionen [kt CO_2-Äq.] aus der Kategorie Grünland der aktuellen und der Vorjahressubmission..... 760
Tabelle 407: CO_2-, N_2O- und CH_4-Emissionen [kt CO_2-Äq.] aus Feuchtgebieten 2024. Dargestellt sind Summen sowie obere und untere Schranken der 95 %-Konfidenzintervalle. 761
Tabelle 408: Torfabbau: $IEF_{off\text{-}site}$ [t CO_2-Äq. ha^{-1} a^{-1}] und off-site Emissionen [kt CO_2-Äq.] 767
Tabelle 409: Implizite Emissionsfaktoren mit Unsicherheiten [in % vom Lagemaß] zur Berechnung der THG-Emissionen aus terrestrischen Feuchtgebieten 2024, unterschieden nach Pools und Unterkategorien..... 768

Tabelle 410: Implizite Emissionsfaktoren mit Unsicherheiten [in % vom Lagemaß] zur Berechnung der THG-Emissionen aus Torfabbau 2023 für die Biomasse 769
Tabelle 411: Unsicherheiten von impliziten Emissionsfaktoren [2,5 %- und 97,5%-Perzentil in % vom Lagemaß] aus Gewässern im Jahr 2023 770
Tabelle 412: Unsicherheiten von impliziten Emissionsfaktoren [2,5 %- und 97,5%-Perzentil in % vom Lagemaß] aus organischen Böden für Feuchtgebiete und Torfabbau im Jahr 2023 770
Tabelle 413: Kohlenstoffvorratsveränderung verschiedener Pools in Wetland verschiedener Länder (Deutschland für 2023 und 2024, übrige Länder für 2023) 771
Tabelle 414: Vergleich der Flächendaten [kha] der aktuellen und der Vorjahressubmission der Kategorie Feuchtgebiete 772
Tabelle 415: Vergleich der Treibhausgasemissionen [kt CO_2-Äq.] aus der Kategorie Feuchtgebiete der aktuellen und der Vorjahressubmission 772
Tabelle 416: CO_2-, N_2O- und CH_4-Emissionen [kt CO_2-Äq. nach IPCC AR5] aus Siedlungsflächen 2024 Dargestellt sind Summen sowie obere und untere Schranke des 95 % - Konfidenzintervalls 773
Tabelle 417: Implizite Emissionsfaktoren und Unsicherheiten der Emissionsfaktoren [in % vom Lagemaß] zur Berechnung der Treibhausgasemissionen aus Gebäude- und Freiflächen 2024, unterschieden nach Pools und Unterkategorien 777
Tabelle 418: Implizite Emissionsfaktoren und Unsicherheiten der Emissionsfaktoren [in % vom Lagemaß] zur Berechnung der Treibhausgasemissionen aus „Photovoltaikflächen“ 2024, unterschieden nach Pools und Unterkategorien 778
Tabelle 419: Unsicherheiten Unsicherheiten von Emissionsfaktoren [2,5 %- und 97,5%-Perzentil in % vom Lagemaß] aus organischen Böden für Siedlungen im Jahr 2024 780
Tabelle 420: Kohlenstoffvorratsveränderung der lebenden Biomasse in Siedlungen verschiedener Länder, in [t C ha^{-1} a^{-1}] 781
Tabelle 421: Kohlenstoffvorratsveränderung der toten organischen Masse in Siedlungen verschiedener Länder, in [t C ha^{-1} a^{-1}] 781
Tabelle 422: Kohlenstoffvorratsveränderung der mineralischen Böden in Siedlungen verschiedener Länder, in [t C ha^{-1} a^{-1}] 781
Tabelle 423: Kohlenstoffvorratsveränderung der organischen Böden in Siedlungen verschiedener Länder, in [t C ha^{-1} a^{-1}] 782
Tabelle 424: Vergleich der Flächendaten der aktuellen und der Vorjahressubmission der Kategorie Siedlungen (4.E), in [kha] 783
Tabelle 425: Vergleich der Treibhausgasemissionen aus der Kategorie Siedlungen (4.E) der aktuellen und der Vorjahressubmission, in [kt CO_2-Äq.] 783
Tabelle 426: Vergleich der Flächendaten der aktuellen und der Vorjahressubmission der Kategorie Sonstiges Land, in [kha] 784
Tabelle 427: Jährlicher Anteil des genutzten Derbholzeinschlags aus verbleibender Waldfläche 789
Tabelle 428: Gegenüberstellung der HWP CO_2-Emissionen und ihre Einbindungen der Submissionen 2025 und 2026 792
Tabelle 429: Mengen deponierte, biologisch abbaubare Abfälle, nach Abfallfraktionen, in [kt] 803
Tabelle 430: Pro-Kopf-Mengen an deponiertem Siedlungsabfall, in [kg/Kopf/Tag] 804

Tabelle 431: Pro-Kopf Mengen an erzeugtem Siedlungsabfall, in [kg/Kopf/Tag] 804
Tabelle 432: Verwendete DOC-Werte 806
Tabelle 433: Verwendete DOC_f-Werte 807
Tabelle 434: Halbwertszeiten und Abbauraten der Abfallfraktionen 808
Tabelle 435: Anteil von Methan am gefassten Deponiegas 809
Tabelle 436: Methanfassung auf Deponien, in Kilotonnen [kt] 810
Tabelle 437: Rekalkulation: Methan-Bildung in Deponien [kt] 813
Tabelle 438: Rekalkulierte Methan-Emissionen aus Deponien, in Kilotonnen [kt] 813
Tabelle 439: Anteile der verschiedenen Behandlungstechniken bei der Bioabfallverwertung in Deutschland 816
Tabelle 440: Vergleich der durchschnittlichen Emissionsfaktoren verschiedener Kompostierungstechniken 816
Tabelle 441: Vergleich der Emissionsfaktoren für die Kompostierung, in [g/t] 819
Tabelle 442: Rückrechnungen in CRF 5.B.1 für das Jahr 2023 820
Tabelle 443: Anteile der verschiedenen Behandlungstechniken bei der Bioabfallverwertung in Deutschland 823
Tabelle 444: Vergleich der durchschnittlichen Emissionsfaktoren verschiedener Vergärungstechniken 824
Tabelle 445: Vergleich der Emissionsfaktoren für die Vergärung, in [g/t] 826
Tabelle 446: Rückrechnungen in CRF 5.B.2 für das Jahr 2023 827
Tabelle 447: Rechnerische Anzahl der Kremierungen in Deutschland, in [1000] 827
Tabelle 448: Bodentemperatur [1m] in °C, Monatsmittelwerte für Deutschland 832
Tabelle 449: Einwohner Deutschland gesamt und mit Anschluss an abflusslose Gruben 834
Tabelle 450: Verifikation CH_4 aus abflusslosen Gruben, in Kilotonnen [kt] 836
Tabelle 451: Rückrechnung der CH_4-Emissionen aufgrund angepasster Bevölkerungszahlen insgesamt und mit Anschluss an abflusslose Gruben 838
Tabelle 452: Verwertung von ausgefaultem Klärschlamm (Trockenmasse), in [t] 839
Tabelle 453: Rückrechnung der N_2O-Emissionen 847
Tabelle 454: Zeitreihe der CH_4-Emissionen aus der Industrieabwasserreinigung 851
Tabelle 455: Verwendete Parameter zur Bestimmung der Emissionen des gelösten Methans aus der anaeroben Behandlung von Industriellem Abwasser (Bezugsjahr 2013) 852
Tabelle 456: Berechnung des TOW für das Jahr 2024, Direkteinleiter 854
Tabelle 457: Unsicherheiten der mittleren spezifischen Stickstofffracht der relevantesten Industriebereiche 858
Tabelle 458: Emissionen der MBA 864
Tabelle 459: Rekalkulation MBA für 2023 865
Tabelle 460: Übersicht der von Rückrechnungen betroffenen CRF-Oberkategorien 871
Tabelle 461: prozentuale Änderungen gegenüber der vorjährigen Berichterstattung 871
Tabelle 462: Rückrechnung der nationalen THG-Gesamtemissionen (ohne LULUCF) 872
Tabelle 463: Rückrechnungen der nachrichtlichen Inventardaten (Memo Items) 873
Tabelle 464: Rückrechnung der CRF-spezifischen THG-Gesamtemission 1990, in kt CO_2-Äquiv. 874
Tabelle 465: Rückrechnung der CRF-spezifischen THG-Gesamtemission 2005, in kt CO_2-Äquiv. 875

Tabelle 466: Rückrechnung der CRF-spezifischen THG-Gesamtemission 2023, in kt CO_2-Äquiv. 876
Tabelle 467: Zusammenstellung der mit der aktuellen Berichterstattung erledigten Review-Empfehlungen 878
Tabelle 468: Zusammenfassung der mit der aktuellen Berichterstattung erledigten und der offenen in den NIR-Kategoriekapiteln genannten geplanten Verbesserungen 880
Tabelle 469: Implementing Regulation Article 9: Reporting on implementation of recommendations and adjustments, Article 9.1 885
Tabelle 470: Hauptkategorien für Deutschland gemäß Methode 1-Ansatz (vollständige Liste, mit IPCC AR5-GWP gerechnet) 898
Tabelle 471: Unsicherheiten nach Kategorien (Approach 1, Fehlerfortpflanzung gemäß Tabelle 3.4 der IPCC Guidelines) 905
Tabelle 472: Unsicherheiten nach Sektoren (Approach 2, Monte-Carlo-Simulation, gemäß Tabelle 3.5 der 2006 IPCC Guidelines) 911
Tabelle 473: Vergleich der mittels sektoralem und Referenzansatz (ohne NEV) ermittelten Energieeinsätze, in Terajoule 920
Tabelle 474: Vergleich der mittels sektoralem und Referenzansatz (ohne NEV) ermittelten CO_2-Emissionen, in Kilotonnen 921
Tabelle 475: für die jeweiligen Inlandsverbräuche abgeleitete Heizwerte, in [MJ/kg] 922
Tabelle 476: Dokumentationsinstrumente im Umweltbundesamt 938
Tabelle 477: Allgemeine Checkliste für Fachverantwortliche 939
Tabelle 478: Correlation Scores for the three datasets to the German inventory totals 948
Tabelle 479: Sectoral Correlation Scores between Edgar 8.0 and Germanys 2023 sectoral CRF Data 958
Tabelle 480: Emissionsentwicklung in Deutschland, nach Treibhausgas, in Kilotonnen CO_2-äquivalent [kt CO_2-Äq.] 959
Tabelle 481: Emissionsentwicklung in Deutschland, nach Kategorie, in Kilotonnen CO_2-äquivalent [kt CO_2-Äq.] 960
Tabelle 482: Anteile an der Emissionsentwicklung in Deutschland, nach Treibhausgas und Kategorie, in Prozent [%] 961
Tabelle 483: Emissionen von direkten und indirekten Treibhausgasen und SO_2 in Deutschland seit 1990 962
Tabelle 484: Veränderungen der Emissionen direkter und indirekter Treibhausgase und SO_2 in Deutschland seit 1990/1995 963
Tabelle 485: Veränderungen der Emissionen direkter und indirekter Treibhausgase und SO_2 in Deutschland, seit dem jeweiligen Vorjahr, in Prozent [%] 964
Tabelle 486: Veränderungen der Emissionen in Deutschland nach Kategorien, seit 1990 / seit dem jeweils letzten Jahr, in Prozent [%] 965
Tabelle 487: Zur Erstellung der Energiebilanzen für die Bundesrepublik Deutschland verwendete Erhebungen des StaBA 979
Tabelle 488: Aktionsplan Energiedaten Inventarverbesserung 987
Tabelle 489: Vergleich der CO_2-Emissionsfaktoren für die Steinkohlen 991
Tabelle 490: Vergleich der CO_2-Emissionsfaktoren für den fossilen Kraftstoffanteil 996

Tabelle 491: Für die Emissionsberichterstattung abgeleitete Emissionsfaktoren für CO_2 ab 1990, Energie 1002
Tabelle 492: Für die Emissionsberichterstattung abgeleitete Emissionsfaktoren für CO_2 ab 1990, Industrieprozesse 1004
Tabelle 493: Emissionsfaktoren 2024 für Flugbenzin, in [kg/TJ] 1007
Tabelle 494: Übersicht der Emissionsfaktoren für Kerosin, in [kg/TJ] 1007
Tabelle 495: Energieeinsätze im Straßenverkehr seit 1990 1008
Tabelle 496: mittlere Heizwerte Dieselkraftstoffe und Flüssiggas im Straßenverkehr, in MJ/kg 1009
Tabelle 497: Korrekturfaktoren zur Anpassung an die Energiebilanz 1011
Tabelle 498: implizite Emissionsfaktoren für CH_4 und N_2O aus PKW, in kg/TJ 1013
Tabelle 499: implizite Emissionsfaktoren für CH_4 und N_2O aus leichten Nutzfahrzeugen, in kg/TJ 1013
Tabelle 500: implizite Emissionsfaktoren für CH_4 und N_2O aus schweren Nutzfahrzeugen, in kg/TJ 1014
Tabelle 501: implizite Emissionsfaktoren für CH_4 und N_2O aus motorisierten Zweirädern, in kg/TJ 1014
Tabelle 502: Ableitung der EF(CO_2) für Zweitaktgemische, in kg/TJ 1016
Tabelle 503: CO_2 aus in Zweitakt-Ottomotoren mitverbrannten Schmierstoffen, in Kilotonnen 1016
Tabelle 504: revidierte Mengen mitverbrannter Schmierstoffe ab 2003, in Terajoule 1016
Tabelle 505: revidierte Emissionensfaktoren, in [kg/TJ] 1016
Tabelle 506: revidierte Kohlendioxid-Emissionen, in Kilotonnen 1017
Tabelle 507: CO_2 aus dem Einsatz von Biodiesel und Bioethanol, in Kilotonnen 1017
Tabelle 508: CO_2 aus den fossilen Anteilen der eingesetzten Biokraftstoffe, in Kilotonnen 1018
Tabelle 509: revidierte fossile CO_2-Emissionen aus Biokraftstoffen 2004-2023, in Kilotonnen 1018
Tabelle 510: Häufigkeitsverteilungen von Tierhaltungsverfahren(in %) sowie zugehörige Einstreumengen und NH_3-Emissionsfaktoren 1020
Tabelle 511: Häufigkeitsverteilungen von Lagerverfahren (in %), Mengen an vergorenen Energiepflanzen sowie zugehörige Emissionsfaktoren 1023
Tabelle 512: Häufigkeitsverteilungen von Ausbringungsverfahren (in %) sowie zugehörige Emissionsfaktoren 1026
Tabelle 513: Legehennen, haltungsspezifische partielle NH_3-Emissionsfaktoren 1031

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
AbfAblV	Abfallablagerungsverordnung
ABL	alte Bundesländer
AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen
AGEE-Stat	Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik
AK	Arbeitskreis
ALH	alle anderen Laubbäume hoher Lebenserwartung (BWI-Baumartengruppe)
ALN	alle anderen Laubbäume niedriger Lebenserwartung (BWI-Baumartengruppe)
ANCAT	Abatement of Nuisances from Civil Air Transport
AR	Aktivitätsrate
ARD	Afforestation, reforestation, deforestation (Aufforstung, Wiederbewaldung, Entwaldung)
ARR	Annual Review Report
ATKIS	Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem
AWMS	Animal Waste Management System
BAFA	Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle
BAT	Best Available Technique
BDSI	Bundesverband der Deutschen Süßwarenindustrie e.V.
BDZ	Bundesverband der Deutschen Zementindustrie
BEF	Biomasseexpansionsfaktoren
BEU	Bilanz der Emissionsursachen für stationäre und mobile Verbrennungsprozesse
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BGS	Brennstoff-. Gas-, und Stromwirtschaft der Hochofen-, Stahl- und Walzwerke sowie Schmiede-, Press- und Hammerwerke einschließlich der öffentlichen verbundenen sonstigen Betriebe (ohne eigene Kokereien)
BGW	Bundesverband der deutschen Gas- und Wasserwirtschaft
BHD	Brusthöhendurchmesser (Stammdurchmesser eines Baumes in 1,30 m Höhe über dem Boden)
BHKW	Blockheizkraftwerk
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
BImSchV	Rechtsverordnung nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz
BML	siehe BMEL
BMLEH	Bundesministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Heimat
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BMUB	siehe BMU
BMUK	Siehe BMU
BMU	siehe BMUVBundesumweltministerium, aktuell jeweils siehe https://www.bundesumweltministerium.de/impressum
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft

Abkürzung	Erläuterung
BMELV	siehe BMEL
BMVEL	siehe BMEL
BMVG	Bundesministerium der Verteidigung
BMWA	siehe BMWi
BMWE	siehe BMWi
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
BMWi	Bundeswirtschaftsministerium
BoHE	Bodennutzungshaupterhebung
BREF	BAT (Best Available Technique) Reference Documents
BSB	Biologischer Sauerstoffbedarf
BSB_5	Biologischer Sauerstoffbedarf innerhalb von 5 Tagen
BV Kalk	Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie
BÜK	Bodenübersichtskarte
BWI	Bundeswaldinventur
BWP	Bundesverband Wärmepumpe e.V.
BZE	Bodenzustandserhebung im Wald
CAPIEL	Coordinating Committee for the Associations of Manufacturers of Industrial Electrical Switchgear and Controlgear in the European Union
CEFIC	Verband der Europäischen chemischen Industrie (französisch: Conseil Européen des Fédérations de l'Industrie Chimique)
CFC	Fluorchlorkohlenwasserstoffe (engl.: Chlorofluorocarbons) = FCKW
CFI	Continuous Forest Inventory (Kontrollstichprobe)
CH_4	Methan
C_{org}	im Boden gespeicherter organischer Kohlenstoff
CO	Kohlenstoffmonoxid, Kohlenmonoxid
CO_2	Kohlenstoffdioxid, Kohlendioxid
CORINAIR	Coordination of Information on the Environment, Teilprojekt: Air
CORINE	Coordinated Information on the Environment
CRF	Common Reporting Format (=gemeinsames Berichtsformat gemäß UNFCCC)
CRT	Common Reporting Table (= gemeinsame Berichtstabellen gemäß UNFCCC)
CSB	Chemischer Sauerstoff Bedarf
CVD	chemische Gasphasenabscheidung (engl.: Chemical Vapour Deposition)
D	Deutschland
DBFZ	Deutsches Biomasseforschungszentrum
DEHSt	Deutsche Emissionshandelsstelle
DESTATIS	Statistisches Bundesamt Deutschland, offizielle Abkürzung StBA
DFIU	Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung an der Universität Karlsruhe
DG	Deponiegas
DGMK	Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle eV.

Abkürzung	Erläuterung
DIN	Deutsche Industrienorm
DIW	Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DME	Dimethylether
DMKW	Dieselmotorkraftwerke
D_N	Stickstoff im Abwasser
DOC	Anteil des organisch abbaubaren Kohlenstoffs (engl.: Degradable Organic Carbon)
DOC_F	Anteil des in Deponiegas umgewandelten DOC (engl.: Fraction of DOC dissimilated)
DSWF	Datenspeicher Waldfonds
DTKW	Dampfturbinenkraftwerke
DVGW	Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfachs eV.
D7	Stammdurchmesser eines Baumes in 7 m Höhe über dem Boden
EBZ	Energiebilanzzeile in der BEU
EEA	Europäische Umweltagentur (engl.: European Environment Agency)
EECA	European Electronic Component Manufacturers Association
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz, Gesetzestext (BGBl. Teil I Nr. 40 v. 31.07.2004, Seite 1918 ff.)
EF	Emissionsfaktor
EI	Emissionsindex = Emissionsfaktor
E_{KA}	Einwohner mit Kläranlagenanschluss
EL	Heizöl EL (extra leicht flüssig)
EM	Emission / Emissionen
EMEP	Co-operative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long-Range Transmission of Air Pollutants in Europe
EMEV	Emissionsrelevanter Energieverbrauch
ERT	Expert Review Team
ESIA	European Semiconductor Industry Association
ETS	Emisionshandelssystem mit Treibhausgasen in der EU (engl. Emissions Trading Scheme)
EU	Europäische Union
EU-EH	Europäischer Emissionshandel, auch ETS genannt
EUROCONTROL	Europäische Organisation zur Sicherung der Luftfahrt
EUROSTAT	Statistisches Amt der Europäischen Gemeinschaften
EW	Einwohnerzahl
EXIBA	European Extruded Polystyrene Insulation Board Association
FA	Feuerungsanlagen
FAP	Fachlicher Ansprechpartner im NaSE
FAL	Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (ab 2008: siehe TI)
FAO	Organisation für Ernährung und Landwirtschaft (engl.: Food And Agriculture Organisation) der Vereinten Nationen

Abkürzung	Erläuterung
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoffe (engl.: Chlorofluorocarbons, CFC)
F-Gase	Fluorierte Treibhausgase
FHW	Fernheizwerke
FKW	Vollfluorierte Kohlenwasserstoffe (engl.: Perfluorocarbons, PFC)
FKZ	Forschungskennzahl
FNN	Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE
FPX	Fachverband Polystyrol-Extruderschaumstoff e.V.
FV	Fachverantwortlicher im NaSE
FWL	Feuerungswärmeleistung
GEREF	GERman Emission Factor Database
GFA	Großfeuerungsanlagen
GG	Gesamtgewicht
GIS	Gasisolierte Schaltanlagen
GMBL	Gemeinsames Ministerialblatt
GMES	Global Monitoring for Environment and Security
GMKW	Gasmotorkraftwerke
GPG	Good Practice Guidance
GSE FM-INT	GMES Services Elements Forest Monitoring: Inputs für die Nationale Treibhausgasberichterstattung
GT	Gasturbinen
GTKW	Gasturbinenkraftwerke
GuD	Gas- und Dampfturbinenkraftwerke
GWP	Globales Treibhauspotential (engl.: Global Warming Potential)
HFC	Teilfluorierte Kohlenwasserstoffe (engl.: Hydrofluorocarbons) = HFKW
HFCKW	Teilhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe
HFE	Hydrofluorether (engl.: Hydrofluoroethers)
HFKW	Teilfluorierte Kohlenwasserstoffe (engl.: Hydrofluorocarbons, HFC)
Hi	Heizwert
HK	Hauptkategorie (engl.: key category) berücksichtigt sowohl Emissionsquellen als auch -senken.
HS	Hochspannung
HS-GIS	Hochspannungs- und Gasisolierte Schaltanlagen
IAI	International Aluminium Institute
ICE	Intercity-Express
ICR	In-Country-Review/ Vor-Ort-Überprüfung
IE	an anderer Stelle einbezogen (engl.: Included Elsewhere)
IEA	Internationale Energie Agentur (engl. International Energy Agency)
IEC	Internationale Elektrotechnische Kommission (engl.: International Electrotechnical Commission)

Abkürzung	Erläuterung
IEF	impliziter Emissionsfaktor (engl.: implied emission factor)
IfE	Institut für Energetik
IFEU	Institut für Energie- und Umweltforschung
IKW	Industriekraftwerke
IMA	Interministerielle Arbeitsgruppe
IPCC	Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen (engl.: Intergovernmental Panel On Climate Change)
IS08	Inventurstudie 2008
IVPU	Industrieverband Polyurethan-Hartschaum e. V.
K	Brennstoffeinsatz zur Krafterzeugung (Direktantrieb)
k.A.	keine Angabe
KCA	Key category Analysis (deutsch: Hauptkategorieanalyse)
KP	Kyoto-Protokoll
KS	Klärschlamm
KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (engl. : Association for Technology and Structures in Agriculture)
l	level (im Rahmen des "Level Assessment" nach den IPCC-Good Practice Guidance)
LF	Landwirtschaftlich genutzte Flächen
LKW	Lastkraftwagen
LTO	Landing/Take-off-Zyklus
LUCF	Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (engl.: Land Use Change and Forestry)
LULUCF	Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (engl.: Land Use, Land Use Change and Forestry)
MBA	Mechanisch-Biologische Abfallbehandlung
MCF	Methankonversionsfaktor (engl.: Methane Conversion Factor)
MDI	Dosieraerosole (engl.: Metered Dose Inhalers)
MMR	Europäische Monitoring Verordnung 525/2013
MS	Mittelspannung
MSW	Deponierte Menge an Siedlungsabfall
MVA	Müllverbrennungsanlage
MW	Megawatt
N	Stickstoff
N_2O	Distickstoffoxid, Lachgas
NA	nicht anwendbar (engl.: Not Applicable)
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NaSE	Nationales System Emissionsinventare
NBL	neue Bundesländer
NE	Nicht geschätzt (engl.: Not Estimated)
NEAT	Non-energy Emission Accounting Tables

Abkürzung	Erläuterung
NEC	EU-Richtlinie 2001/81/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2001, in der nationale Emissionshöchstmengen (engl.: National Emission Ceilings) für bestimmte Luftschadstoffe geregelt sind.
NEV	Nichtenergetischer Verbrauch
NF_3	Stickstofftrifluorid
NFR	Berichtsformat für die Berichterstattung an die UN ECE (engl.: New Format on Reporting, Nomenclature for Reporting)
NFZ	Nutzfahrzeuge
NH_3	Ammoniak
NIR	Nationaler Inventarbericht (engl.: National Inventory Report)
NID	Nationales Inventardokument (engl.: National Inventory Document)
NMVOC	Flüchtige organische Verbindungen ohne Methan (engl.: Non Methane Volatile Organic Compounds)
NO	nicht vorkommend (engl.: Not Occurring)
NO	Stickstoffmonoxid
NSCR	Nicht-selektive katalytische Reduktion
OCF	Montageschaum (engl.: One Component Foam)
ODS	Ozon abbauende Stoffe (engl. Ozone Depleting Substances)
ORC	Organischer Rankine Kreisprozess (engl.: Organic Rankine Cycle)
OX	Oxidationsfaktor
PAH	Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (engl.: Polycyclic aromatic hydrocarbons), auch PAK
PAK	Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (engl.: Polycyclic aromatic hydrocarbons), auch PAH
PARTEMIS	Measurement and prediction of emissions of aerosols and gaseous precursors from gas turbine engines
PCDD/F	Polychlorierte Dibenzodioxine und -furane
PF	Prozessfeuerungen
PFC	Vollfluorierte Kohlenwasserstoffe (engl.: Perfluorocarbons) = FKW
PFPE	Perfluorierte Polyether (engl.: Perfluoropolyether)
PFPMIE	Perfluorpolymethylisopropylether
PKW	Personenkraftwagen
PU	Polyurethan
Py-GAS-EM	Python-based GASeous EMissions (Programm zur Berechnung der landwirtschaftlichen Emissionen)
QK	Qualitätskontrolle
QS	Qualitätssicherung
QSE	Qualitätssystem Emissionsinventare
REA	Rauchgasentschwefelungsanlage
ROE	Rohöleinheiten
RSt	Rohstahl

Abkürzung	Erläuterung
RWI	Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung
S	Brennstoffeinsatz zur Stromerzeugung
S	Heizöl S (schwer flüssig)
S&A report	Synthesis and Assessment Report
SA	Heizöl SA (schwer flüssig, schwefelarm)
SCR	Selective Catalytic Reduction
SE	Stichprobenfehler (sampling error)
SF_6	Schwefelhexafluorid
SKE	Steinkohleneinheiten
SNAP	Selected Nomenclature for Air Pollution
SO_2	Schwefeldioxid
StBA	Statistisches Bundesamt Deutschland
STEAG	STEAG Aktiengesellschaft (ein großer Stromerzeuger in Deutschland)
T	Trend (im Rahmen des "Trend Assessment" nach den IPCC-Good Practice Guidance) in den Übersichtstabellen der Quellgruppen
TA Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft; Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz
TAN	Total Ammoniacal Nitrogen
TFT	Dünnschichttransistor (engl.: Thin-Film Transistor)
THG	Treibhausgase
TI	Johann Heinrich von Thünen-Institut
TI-AK	Johann Heinrich von Thünen-Institut, Institut für Agrarklimaschutz
TI-WO	Johann Heinrich von Thünen-Institut, Institut für Waldökosysteme
TM	Trockenmasse
TOC	Gesamtkohlenstoff (engl.: Total Organic Carbon)
TREMOD	Emissionsberechnungsmodell für den Verkehr (engl.: Traffic Emission Estimation Model)
TS	Trockenstoff
TÜV	Technischer Überwachungsverein
TVF	Tonne verwertbare Förderung
UBA	Umweltbundesamt
UN ECE	Europäische Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen (engl.: United Nations Economic Commission for Europe)
UN FCCC	Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen (engl.: United Nations Framework Convention on Climate Change)
UN	Vereinte Nationen (engl.: United Nations)
UStatG	Umweltstatistikgesetz
VDA	Verband der Automobilindustrie e.V.
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.
VDEh	Verein Deutscher Eisenhüttenleute, seit 2003 in Stahlinstitut VDEh umbenannt (Eisen/Stahlverband)

Abkürzung	Erläuterung
VDEW	Verband der Elektrizitätswirtschaft e.V.
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
VDKL	Verband Deutscher Kühlhäuser und Kühllogistikunternehmen e.V.
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.
VDN	Verband der Netzbetreiber e.V.
VDZ	Verein Deutscher Zementwerke e.V.
VGB	Technische Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber e.V.
VIK	Verband der Industriellen Energie- und Kraftwirtschaft e.V.
VOC	Volatile Organic Compounds
VRF	Variabler Kältemittelmassenstrom (engl.: Variable Refrigerant Flow)
VS	Glühverlust, Gehalt an organischer Substanz (engl. Volatile Solids)
W	Brennstoffeinsatz zur Wärmeerzeugung
WS	Anteil eines bestimmten Systems der Abwasserbehandlung (z.B. aerob, anaerob)
WZ	Wirtschaftszweig
XPS	Extrudiertes Polystyrol
ZSE	Zentrales System Emissionen
ZVEI	Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie e.V.

Einheiten und Größen

Tabelle 1: Multiplikationsfaktoren, Abkürzungen, Vorsilben und Symbole

Multiplikationsfaktor	Abkürzung	Vorsatz	
		Name	Symbol
1.000.000.000.000.000	10^{15}	Peta	P
1.000.000.000.000	10^{12}	Tera	T
1.000.000.000	10^{9}	Giga	G
1.000.000	10^{6}	Mega	M
1.000	10^{3}	Kilo	k
100	10^{2}	Hekto	h
0,1	10^{-1}	Dezi	d
0,01	10^{-2}	Zenti	c
0,001	10^{-3}	Milli	m
0,000.001	10^{-6}	Mikro	µ

Tabelle 2: Einheiten und Abkürzungen

Abkürzung	Einheit
°C	Grad Celsius
a	Jahr
cal	Kalorie
g	Gramm
h	Stunde
ha	Hektar
J	Joule
m^3	Kubikmeter
ppm	parts per million; Anteile pro Millionen
ppb	parts per billion, Anteile pro Milliarde
t	Tonne
W	Watt

Tabelle 3: Standardentsprechungen

Einheit	entspricht
1 Tonne (t)	1 Megagramm (Mg)
1 Kilotonne / Tausend Tonnen (kt)	1 Gigagramm (Gg)
1 Megatonne / Million Tonnen (Mt)	1 Teragramm (Tg)

Erklärung der Einleitenden Informationstabellen

Die Einleitenden Informationstabellen finden sich am Beginn jedes Quellgruppen-Kapitels. Sie sollen einen schnellen Überblick über die Relevanz der Quellgruppe und die verwendeten Methoden geben. Es werden die Treibhausgaspotentiale (engl. Global Warming Potentials, kurz GWP) des IPCC Assessment Report 5 (IPCC AR5) verwendet.

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	fraction (%)	2024 (kt CO_2-e.)	fraction (%)	Trend [%] 1990-2024
L/T	1A1c Manufacture of Solid Fuels and Other Energy Industries	all fuels	CO_2	65.289,1	5,1 %	8.645,5	1,1 %	-86,8 %
-/-	1A1c Manufacture of Solid Fuels and Other Energy Industries	all fuels	N_2O	103,0	0,0 %	139,8	0,0 %	35,7 %
-/-	1A1c Manufacture of Solid Fuels and Other Energy Industries	all fuels	CH_4	586,2	0,1 %	114,0	0,0 %	-80,6 %

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	benutzte Emissionsfaktoren
CO_2	CS	NS	CS
CH_4	Tier 2	NS	CS
N_2O	Tier 2	NS	CS
NO_X, CO, NMVOC, SO_2			CS

Hauptkategorie

Im oberen Teil der Tabelle werden die für die Quellgruppe relevanten Zeilen der Hauptkategorien-Analyse die Emissionen absolut (kt CO_2-äquivalent) und als prozentualen Anteile im Jahr 1990 und im letzten berichteten Jahr sowie der Emissionstrend zwischen Basisjahr (1990 oder 1995 für die F-Gase) und dem letzten berichteten Jahr in übersichtlicher Form dargestellt. Der Begriff Hauptkategorie wird im NIR synonym mit dem englischen „key category“ verwendet.

L = Hauptkategorie nach Emissionshöhe (Level)
T = Hauptkategorie nach dem Emissions-Trend
2 = Hauptkategorie ausschließlich nach der Methode-2-Analyse (inkl. Unsicherheiten)

Schadstoff

Der untere Teil der Tabelle liefert Informationen über angewandte Methode, die Quelle der Aktivitätsdaten und die verwendeten Emissionsfaktoren (EF).

Angewandte Methode

D = IPCC Default
RA = Reference Approach (Referenz-Verfahren)
Tier 1 = IPCC tier 1
Tier 2 = IPCC tier 2
Tier 3 = IPCC tier 3
C = CORINAIR
CS = Country specific (landesspezifisch)
M = Model (Modell)

Quelle der Aktivitätsdaten

M = Model (Modell)
Q = Questionaires, surveys (Fragebögen, Umfragen)

PS = Plant specific data (Anlagenspezifische Daten)
AS = Associations, business organizations (Verbände-Informationen)
RS = Regional Statistics (regionale oder föderale Statistiken)
NS = National Statistics (Nationale Statistiken)
IS = International Statistics (Internationale Statistiken)

Emissionsfaktor (EF)

D = IPCC Default
C = CorinAir
CS = Country specific (landesspezifisch)
PS = Plant specific (anlagenspezifisch)
M = Model (Modell)

ES ZUSAMMENFASSUNG

Als Vertragsstaat der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC) ist Deutschland seit 1994 dazu verpflichtet, Inventare zu nationalen Treibhausgasemissionen zu erstellen, zu veröffentlichen und regelmäßig fortzuschreiben. Zur Umsetzung ihrer National Determinated Contribution nutzt die europäische Staatengemeinschaft die Möglichkeit der gemeinsamen Erfüllung aller EU-Staaten unter dem Übereinkommen von Paris und der Klimarahmenkonvention. Dies erfolgt durch europäische Regelungen, zuletzt durch die Festlegungen der EU-Verordnung 2018/842[1] und ihrer Durchführungsverordnung 2020/2126[2]. Durch die aktuelle europäische Umsetzung auf dem Verordnungsweg sind die Anforderungen für Deutschland rechtsverbindlich geworden.

Gemäß Entscheidung 24/CP.19 müssen alle im ANNEX I der Klimarahmenkonvention aufgeführten Staaten jährlich und gemäß Entscheidung 18/CMA.1 alle Staaten die das Übereinkommen von Paris unterzeichtnet haben alle zwei Jahre einen Nationalen Inventarbericht (National Inventory Report, NIR) erstellen und übermitteln, die detaillierten und vollständigen Angaben über den gesamten Prozess der Erstellung der Treibhausgasinventare bereitstellt. Durch diesen Bericht soll die Transparenz, Konsistenz und Vergleichbarkeit der Inventare sichergestellt und der unabhängige Überprüfungsprozess unterstützt werden.

Deutschland legt zusammen mit den Inventartabellen den Nationalen Inventarbericht (NID) vor, der sich auf den Zeitraum der Inventartabellen bezieht und die Methoden sowie die Datenquellen beschreibt, auf denen die Berechnungen basieren. Der Bericht und die Inventartabellen wurden gemäß der UNFCCC Richtlinie zur Berichterstattung über jährliche Inventare (FCCC/CP/2013/10/Add.3) und in Übereinstimmung mit den 2006 IPCC-Guidelines for national Greenhouse Inventories (IPCC, 2006a) und den IPCC Good Practice Guidance (IPCC, 2000) erstellt.

Der **NID** beinhaltet in den Kapiteln 1 bis 10 alle Informationen zum jährlichen Treibhausgasinventar.

Kapitel 1 gibt Hintergrundinformationen zum Klimawandel und den Treibhausgasinventaren. Danach werden die nationalen Inventararrangements beschrieben, welches gemäß Paragraph 20 der Vertragsstaatenentscheidung 24/CP.19 die Erfüllung aller Berichtspflichten zu atmosphärischen Emissionen und zu Einbindungen in Senken unterstützen und sicherstellen sollen. Weiterhin werden in diesem Kapitel die grundlegenden Prinzipien und Methoden, mit denen die Emissionen und Senken der IPCC-Kategorien berechnet werden, eine Kurzfassung der Hauptkategorienanalyse sowie das Qualitäts-System Emissionsinventare (QSE) beschrieben. Abgeschlossen wird das Kapitel durch Texte zur Unsicherheiten-Analyse und einer Analyse der Vollständigkeit.

Kapitel 2 gibt einen generellen Überblick über die Entwicklung der Emissionen von direkten und indirekten Treibhausgasen sowie der Einbindung von Kohlendioxid in Senken.

In den **Kapiteln 3 bis 9** werden Angaben zu den einzelnen Quell- und Senkengruppen gemacht, neben einer allgemeinen Beschreibung und Informationen zur angewendeten Methodik finden sich in den Unterkapiteln auch Informationen zu den Unsicherheiten, zu Qualitätssicherung und

[1] VERORDNUNG (EU) 2018/842 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 30. Mai 2018 zur Festlegung verbindlicher nationaler Jahresziele für die Reduzierung der Treibhausgasemissionen im Zeitraum 2021 bis 2030 als Beitrag zu Klimaschutzmaßnahmen zwecks Erfüllung der Verpflichtungen aus dem Übereinkommen von Paris sowie zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 525/2013

[2] DURCHFÜHRUNGSBESCHLUSS (EU) 2020/2126 DER KOMMISSION vom 16. Dezember 2020 zur Festlegung der jährlichen Emissionszuweisungen an die Mitgliedstaaten für den Zeitraum 2021 bis 2030 gemäß der Verordnung (EU) 2018/842 des Europäischen Parlaments und des Rates

–kontrolle, durchgeführten Rückrechnungen und geplanten Verbesserungen in der jeweiligen Quell- oder Senkengruppe.

In Reflexion auf die Ergebnisse der in den letzten Jahren durchgeführten Überprüfungen wurden Inventare, Nationales System und das Qualitäts-System Emissionsinventare weiter verbessert. Genauere Angaben zu Rückrechnungen und Informationen zu den durchgeführten Verbesserungen und Änderungen gegenüber dem letzten Treibhausgasinventar sind in **Kapitel 10** zu finden.

Die **Anhänge 1 bis 7** enthalten detailliertere Beschreibungen von Hauptkategorien, den einzelnen Quellgruppen, dem CO_2-Referenzverfahren, der Vollständigkeit, dem Nationalen System und dem Qualitätssystem, zur Emissionsdatenbank ZSE und den Unsicherheiten.

Detailliertere Angaben zu einzelnen Bereichen sind der angegebenen weiterführenden Literatur in **Kapitel 11** zu entnehmen.

Das Treibhausgasinventar wird durch das Umweltbundesamt berechnet und zusammengestellt. Daten zu Emissionen und Senken aus der Landwirtschaft, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft werden vom Johann Heinrich von Thünen-Institut (TI) bereitgestellt. Die Koordination der Berichterstattung liegt beim Umweltbundesamt.

ES.1 Hintergrundinformationen zu Treibhausgas-Inventaren und Klimawandel

ES.1.1 Hintergrundinformationen zum Klimawandel

Seit Beginn der Industrialisierung werden deutliche überregionale bzw. globale Änderungen im Stoffhaushalt der Atmosphäre als Folge menschlicher Aktivitäten beobachtet. Der sechste Sachstandsbericht der Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC, 2023) verdeutlicht den Einfluss des Menschen auf das Klima. So stiegen weltweit die Konzentrationen von Kohlendioxid (CO_2) auf 410 parts per million (ppm), Methan erreichte 1866 parts per billion (ppb) und Distickstoffmoxid (N_2O) stieg auf 332 ppb. Zum Teil gelangen völlig neue Stoffe wie Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), Halone, vollfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW), teilfluorierte Kohlenwasserstoffe (HFKW) Schwefelhexafluorid (SF_6) oder Stickstofftrifluorid (NF_3) in die Atmosphäre, die in der Natur praktisch nicht vorkommen, sondern fast ausschließlich durch den Menschen erzeugt werden.

ES.1.2 Hintergrundinformationen zu den Treibhausgas-Inventaren

Mit dem Inkrafttreten des Kyoto-Protokolls im Februar 2005 war die internationale Staatengemeinschaft verpflichtet, verbindliche Handlungsziele und Umsetzungsinstrumente für den globalen Klimaschutz zu realisieren. Die Europäische Gemeinschaft (damals mit 15 Mitgliedstaaten) hatte im Rahmen der ersten Verpflichtungsperiode von 2008 bis 2012 die Verpflichtung übernommen, ihre Treibhausgasemissionen gegenüber dem Basisjahr (1990 bzw. 1995[3]) um 8 % zu mindern. Diese Verpflichtung wurde innerhalb der EU im Rahmen einer Lastenteilung[4] zwischen den beteiligten Mitgliedstaaten aufgeteilt und erfüllt. Deutschland hatte mit der Verpflichtung zu einer Emissionsminderung von 21 % gegenüber dem Basisjahr einen erheblichen Beitrag zur Erfüllung der EU-Verpflichtung übernommen. Dieses Ziel wurde bis 2012 mit einer Minderung von über 26 % übertroffen.

[3] Für HFC, PFC und SF_6

[4] burden sharing agreement, beschlossen mit Entscheidung 2002/358/EG des Rates vom 25. April 2002 über die Genehmigung des Protokolls von Kyoto zum Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen im Namen der Europäischen Gemeinschaft sowie die gemeinsame Erfüllung der daraus erwachsenden Verpflichtungen [Amtsblatt L 130 vom 15.5.2002]

Im Rahmen der zweiten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls hat sich die europäische Staatengemeinschaft verpflichtet, die Freisetzung der Treibhausgas Emissionen bis 2020 um 20 % zu mindern. Gleichzeitig wurde aber auch erklärt, dass unter bestimmten Voraussetzungen dieser europäische Beitrag auf eine Minderung von 30 %[5] gegenüber 1990 erhöht werden könnte. Auch dieses Ziel wurde bis 2020 mit einer Minderung von 34,3% übertroffen.

Mit dem Übereinkommen von Paris hat sich die Europäische Union im Rahmen ihres nationalen Klimaschutzbeitrags (NDC) dazu verpflichtet ihre Emissionen bis 2030 um 40% gegenüber 1990 und bis 2035 zwischen 66,25% und 72,5% zu senken.

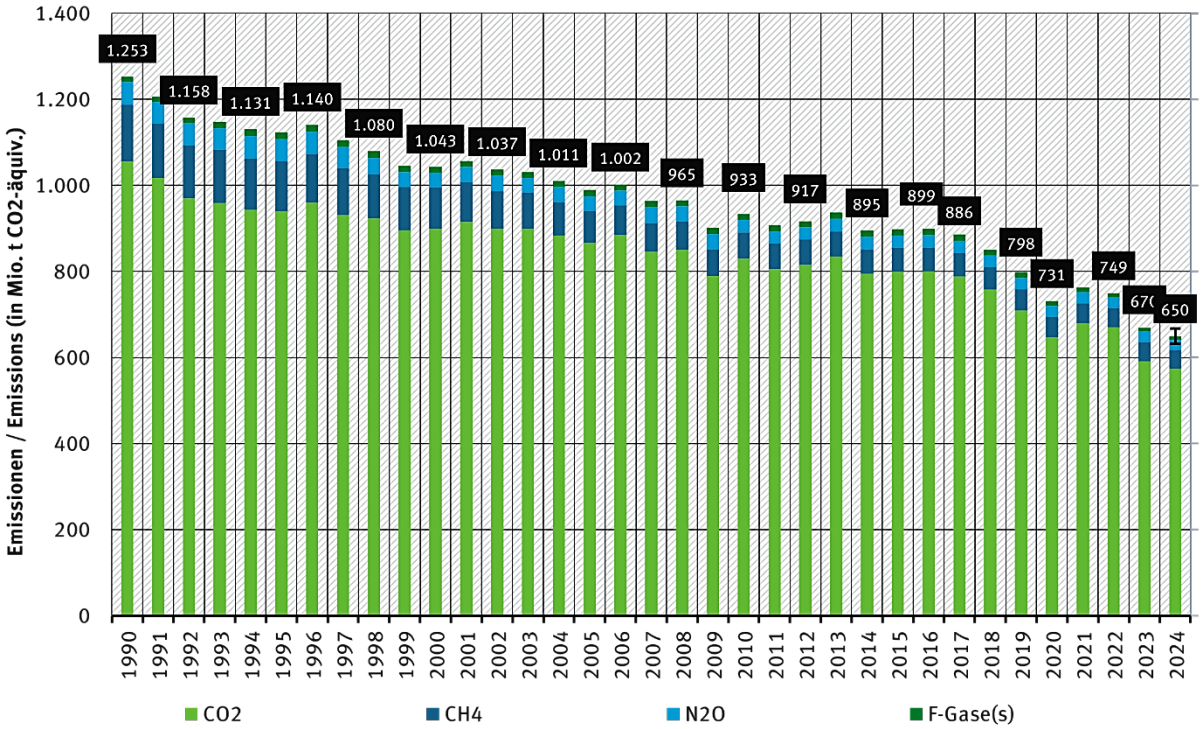
ES.2 Zusammengefasste Emissionen von Treibhausgasen sowie deren Einbindung in Senken

In der ersten Verpflichtungsperiode von 2008 bis 2012 konnte die Verpflichtung Deutschlands im Rahmen der o.g. europäischen Lastenteilung gegenüber den 2007[6] für die erste Verpflichtungsperiode festgelegten Basisjahremissionen in Höhe von 1.232.429,543 Gg CO_2-Äquivalent voll erfüllt werden. Die Emissionen im Folgejahr 2013 sind gegenüber dem Vorjahr 2012 deutlich gestiegen, vor allem die kalte Winter-Witterung in 2013 führte zu diesem Anstieg. Die Emissionen der folgenden Jahre liegen wieder deutlich unter dem Niveau von 2013 und folgten weitestgehend der Konjunkturentwicklung und der Witterung. Seit dem Jahr 2017 weisen die Emissionen generell einen deutlich sinkenden Trend auf (vgl. Kapitel 2.1). Wobei in 2021 wieder ein Anstieg der Emissionen zu verzeichnen war.

[5] Information on the quantified emission limitation or reduction objectives (QELROs) for the second commitment period under the Kyoto Protocol; SUBMISSION BY DENMARK AND THE EUROPEAN COMMISSION ON BEHALF OF THE EUROPEAN UNION AND ITS MEMBER STATES, Copenhagen, 19 April 2012

[6] Im Ergebnis der 2007 erfolgten Überprüfung des Initial Reports und der Berichterstattung des Jahres 2006 entsprechend Artikel 8 des Kyoto-Protokolls sind – unabhängig von weiteren möglichen Verbesserungen der Datengrundlagen – die Bezugsgrößen für die Erreichung der Minderungsverpflichtung des Kyoto-Protokolls festgelegt. Die Minderungsverpflichtung für Deutschland liegt gemäß den Verpflichtungen des Kyoto-Protokolls und der EU-Lastenteilung (Ratsentscheidung 2002/358/EG) bei 21 %.

Abbildung 1: Entwicklung der Treibhausgase in Deutschland seit 1990, nach Treibhausgasen



* ohne LULUCF; Tier-2-Unsicherheiten ohne LULUCF (s. Kap. 1.6.1.2)

Quelle: eigene Darstellung, UBA

Die einzelnen Treibhausgase[7] trugen dabei in unterschiedlichem Maße zu dieser Entwicklung bei (siehe Tabelle 4). Dies ist bei der Berücksichtigung der unterschiedlichen Anteile der einzelnen Treibhausgase an den Gesamtemissionen eines Jahres auch nicht verwunderlich (siehe Tabelle 5). Detaillierte Tabellen finden sich im Anhang 5.2.

Die Freisetzung von Kohlendioxid ist auch 2024 mit einem Anteil von 88,3 % Hauptverursacher der Treibhausgasemissionen. Diese stammten größtenteils aus der stationären und mobilen Verbrennung fossiler Energieträger. Durch den überdurchschnittlichen Rückgang der Emissionen der anderen Treibhausgase ist der relative Anteil der CO_2-Emissionen an den gesamten Treibhausgasemissionen seit 1990 um 4,2 Prozentpunkte gestiegen. Die überwiegend durch Tierhaltung, Brennstoffverteilung und Deponiewirtschaft verursachten Methanemissionen (CH_4) hatten 2024 einen Anteil von 6,8 %. Lachgasemissionen (N_2O) wurden hauptsächlich durch die Landwirtschaft, Industrieprozesse und die Verbrennung fossiler Brennstoffe verursacht und trugen zu 3,5 % zu den Treibhausgasfreisetzungen bei. Die fluorierten Treibhausgase (die sogenannten F-Gase) trugen etwa 1,4 % zu den Gesamtemissionen bei, das neu berichtete Treibhausgas NF_3 ist dabei vernachlässigbar, die geringen Emissionen sind zudem teilweise vertraulich, so dass ein Teil an anderer Stelle berichtet werden muss. Die Verteilung der Treibhausgasemissionen in Deutschland ist typisch für ein hoch entwickeltes und industrialisiertes Land.

Informationen zu den Trends finden sich in Kapitel 2, alle detaillierten Tabellen zur Trenddiskussion finden sich im Anhang 5.2.

[7] Alle Treibhausgas-Emissionen in Kohlendioxid-Äquivalenten werden - wenn nicht anders angegeben - mit den Treibhausgaspotentialen des 5. Sachstandsbericht des IPCC berechnet.

Tabelle 4: Emissionsentwicklung in Deutschland, nach Treibhausgas und Kategorie, in [kt CO_2-Äquivalent]

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023	2024
CO_2 emissions (without LULUCF)	1.054.796	939.933	898.974	866.910	829.787	798.771	646.683	679.946	670.017	591.373	573.925
Net CO_2 emissions/removals	1.081.618	926.712	897.408	869.065	831.511	796.508	686.158	715.588	719.867	654.005	622.132
CH_4 (without LULUCF)	4.775	4.178	3.469	2.628	2.178	2.024	1.706	1.667	1.628	1.605	1.576
CH_4 (with LULUCF)	5.076	4.468	3.759	2.913	2.481	2.299	1.960	1.963	1.866	1.950	1.881
N_2O (without LULUCF)	197	190	129	131	109	108	96	97	91	91	86
N_2O (with LULUCF)	202	195	133	136	113	112	100	101	95	95	90
F-Gases sum (CO_2 equi.) 1995 base year	12.325	16.023	12.707	13.608	13.683	14.617	11.165	10.499	9.571	9.035	8.867
Total Emissions without LULUCF	1.253.128	1.123.404	1.042.998	988.947	933.250	898.606	730.972	762.773	749.266	669.578	649.770
Total Emissions/Removals with LULUCF	1.289.623	1.119.487	1.050.728	1.000.238	944.562	905.194	778.619	807.721	806.865	742.849	707.608
Emission source and sink categories	**1990**	**1995**	**2000**	**2005**	**2010**	**2015**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**
1. Energy	1.044.283	922.715	872.684	835.758	835.758	768.670	612.720	643.676	637.851	561.904	543.295
2. Industry	93.216	94.745	76.592	72.752	72.752	59.880	54.933	56.827	51.446	47.022	47.889
3. Agriculture	74.078	64.880	64.150	60.606	60.606	61.612	57.201	56.360	54.320	55.203	53.308
4. Land-Use Change and Forestry	36.495	-3.917	7.730	11.290	11.290	6.589	47.646	44.949	57.599	73.271	57.839
CO_2 (net emissions)	26.822	-13.220	-1.566	2.155	2.155	-2.262	39.475	35.642	49.850	62.632	48.207
N_2O + CH_4	9.673	9.303	9.296	9.136	9.136	8.851	8.171	9.307	7.749	10.638	9.632
5. Waste	41.550	41.065	29.572	19.831	19.831	8.443	6.118	5.909	5.650	5.449	5.277

Tabelle 5: Anteile an der Emissionsentwicklung in Deutschland, nach Treibhausgas und Kategorie, in [%]

GHG Emission Fractions	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023	2024
CO_2 emissions (without LULUCF)	84,17	83,67	86,19	87,66	88,91	88,77	88,47	89,14	89,42	88,32	88,33
CH_4 (without LULUCF)	10,67	10,41	9,31	7,44	6,54	6,40	6,54	6,12	6,08	6,71	6,79
N_2O (without LULUCF)	4,17	4,49	3,28	3,52	3,08	3,25	3,47	3,36	3,22	3,62	3,52
F-gases sum	0,98	1,43	1,22	1,38	1,47	1,59	1,53	1,38	1,28	1,35	1,36
GHG Emission Fractions for Categories (ohne LULUCF)	**1990**	**1995**	**2000**	**2005**	**2010**	**2015**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**
1. Energy	83,33	82,14	83,67	84,51	84,71	85,54	83,82	84,39	85,13	83,92	83,61
2. Industry	7,44	8,43	7,34	7,36	7,11	6,66	7,52	7,45	6,87	7,02	7,37
3. Agriculture	5,91	5,78	6,15	6,13	6,69	6,86	7,83	7,39	7,25	8,24	8,20
5. Waste	3,32	3,66	2,84	2,01	1,49	0,94	0,84	0,77	0,75	0,81	0,81

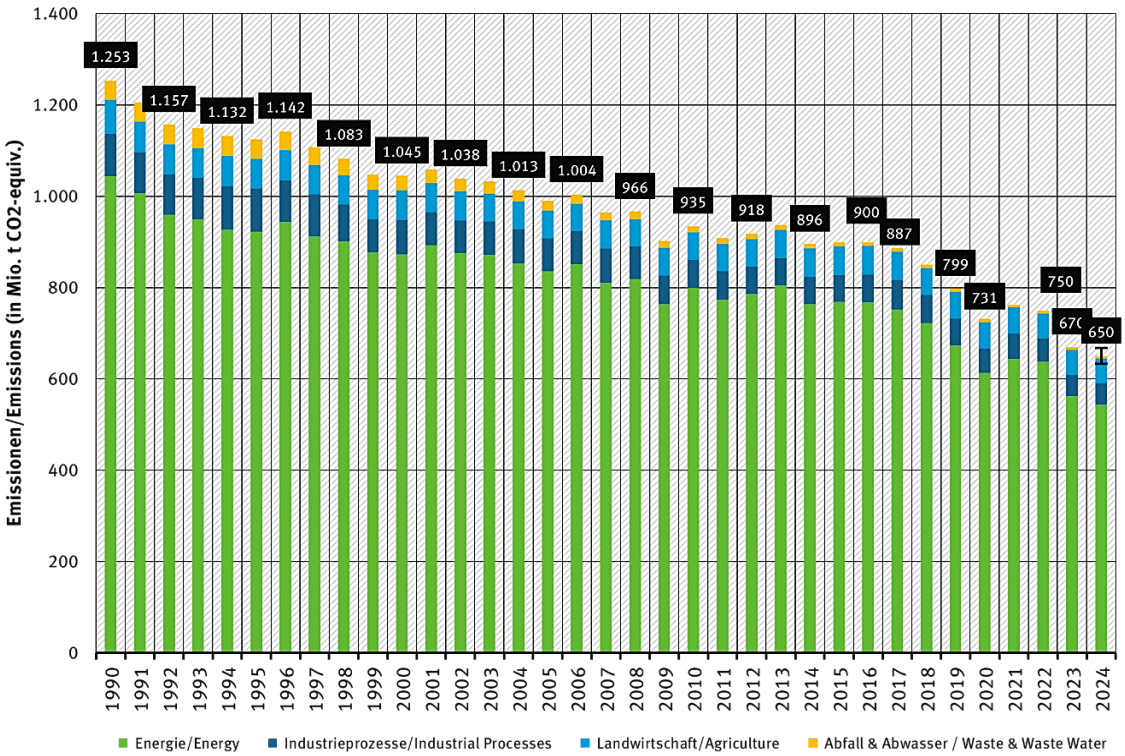
* Informationen zur Gliederung des Common Reporting Format (CRF): http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/guidelin/ch1ri.pdf

ES.3 Zusammengefasste Emissionsschätzungen und Trends der Quell- und Senkengruppen

In Abbildung 2 ist der Beitrag der einzelnen Kategorien an den Gesamtemissionen der Treibhausgase dargestellt. Hier werden die weitgehend konstanten relativen Anteile der einzelnen Kategorien und die absolute Dominanz der energiebedingten Emissionen deutlich. Letztere nahmen absolut im zeitlichen Verlauf kontinuierlich ab. Diesen Trend überlagernde Variationen sind größtenteils temperaturbedingt. Unterschiedliche Temperaturverläufe insbesondere im Winter beeinflussen das Heizverhalten und damit den Energieverbrauch zur Erzeugung von Raumwärme, mit großen Auswirkungen auf den jährlichen Trend der energiebedingten CO_2-Emissionen.

Insgesamt gingen im Jahr 2024 die Emissionen der Treibhausgase gegenüber 1990 um 48,1 % zurück[8]. Betrachtungen der einzelnen Komponenten belegen diesen Trend in unterschiedlicher Ausprägung. Die Emissionsveränderungen betragen bei den mengenmäßigen Haupttreibhausgasen Kohlendioxid (CO_2) -45,6 %, bei Methan (CH_4) -67,0 % und bei Lachgas (N_2O) -56,3 %. Bei den so genannten F-Gasen, die insgesamt etwa 1,9 % zu den Treibhausgasemissionen beitragen ist diese Entwicklung dagegen nicht ganz so einheitlich. In Abhängigkeit von der Einführung neuer Technologien sowie der Verwendung dieser Stoffe als Substitute sanken die Emissionen seit dem Basisjahr 1995 bei SF_6 und bei FKW, wohingegen sie bei den H-FKW anstiegen. In Summe sanken die Emissionen der F-Gase seit 1995 jedoch um 44,7 %. Gegenüber dem Vorjahr 2023 sanken die Gesamtemissionen um 3,0 %.

Abbildung 2: Emissionsentwicklung in Deutschland seit 1990, nach Kategorien



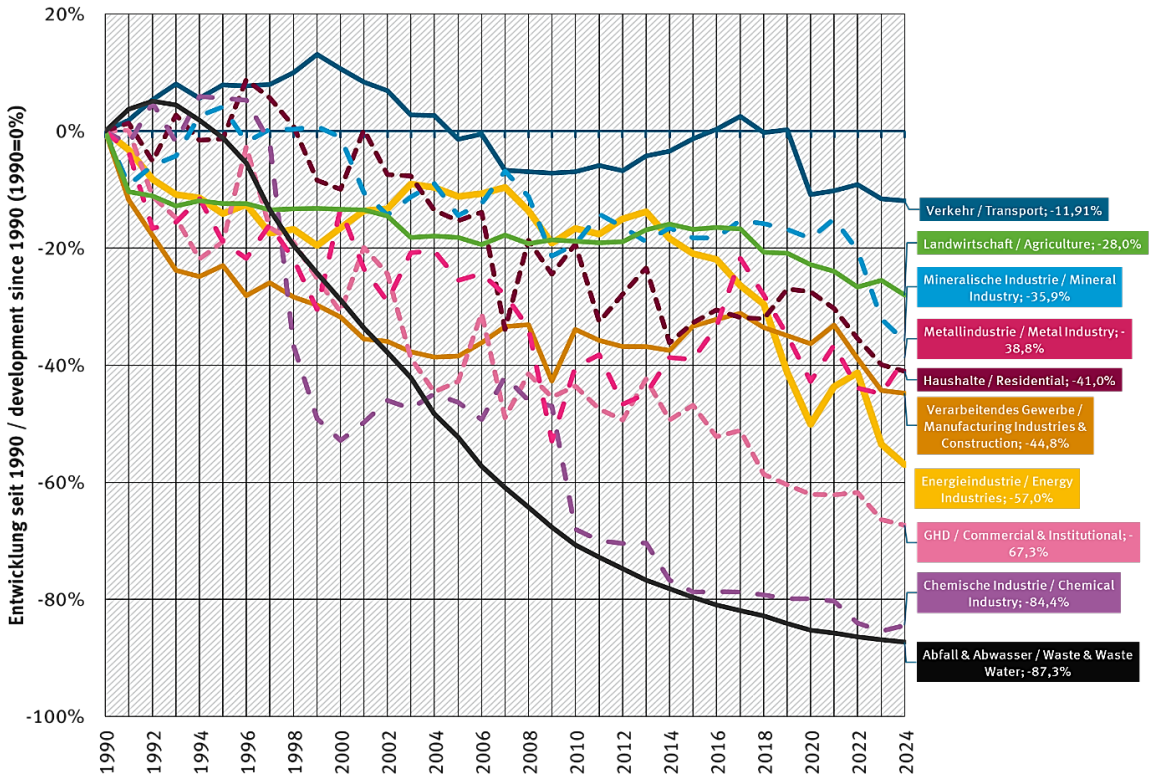
Ohne LULUCF; Tier-2-Unsicherheiten ohne LULUCF (s. Kap. 1.6.1.2)
Quelle: eigene Darstellung, UBA

In Abbildung 3 wird die relative Entwicklung der Emissionen aus den Kategorien seit 1990 dargestellt. Die deutlichsten Minderungen traten hier bei der Chemischen Industrie sowie den

[8] Alle Angaben ohne Berücksichtigung der Emissionen aus der Kategorie Landnutzung, Landnutzungsänderung & Forstwirtschaft (LULUCF)

Abfallemissionen auf. Insbesondere die emissionsmindernden Maßnahmen im Bereich der Adipinsäureproduktion 1997 und 2009 einen großen Effekt auf die Emissionen der Chemischen Industrie, ebenso wie die sinkenden Emissionen der Lösemittel- und Produktverwendung vor allem durch die zurückgehende Anwendung von N_2O zu Narkosezwecken. Im Bereich Abfall haben die Einführung eines verstärkten Recyclings von wiederverwertbaren Stoffen (Verpackungsverordnung) und die Verwertung als Kompost (Bioabfallverordnung) zu einem starken Rückgang der zu deponierenden Abfallmenge und damit zu einer kontinuierlichen Minderung der Deponieemissionen geführt. Auch die Emissionen der Energiewirtschaft sanken vor allem in den letzten Jahren deutlich. In den Haushalten und dem Bereich Gewerbe Handel Dienstleistung sinken die Emissionen bereits seit Mitte der 1990er Jahre, die Emissionen fluktuieren jedoch wetterbedingt stark. Eine detaillierte Betrachtung der Emissionsentwicklung findet sich in Kapitel 2.

Abbildung 3: Relative Entwicklung der Treibhausgasemissionen seit 1990, nach Kategorien



*Emissionen von Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft werden im entsprechenden Kapitel detailliert berichtet
Quelle: eigene Darstellung, UBA

ES.4 Sonstige Informationen zu indirekten Treibhausgasen und Vorläufersubstanzen

Indirekte CO_2-Emissionen aus CO und NMVOC werden im Inventar nicht explizit berechnet. Sie werden aber mittelbar über die vorgegebene/verwendete Berechnungsmethodik als Kohlendioxid berücksichtigt. Weitere Informationen finden Sie in Kapitel 9.

ES.5 Analyse der Hauptkategorien

Eine Beschreibung der Hauptkategorien finden Sie im Anhang 1. Die Hauptkategorienanalyse wurde nach den beiden Methode-1-Verfahren (Level und Trend), dem Methode-2-Verfahren und der Bewertung qualitativer Kriterien durchgeführt.

ES.6 Durchgeführte Verbesserungen

Eine Beschreibung der Rückrechnungen und Verbesserungen finden Sie in Kapitel 10.

1 Einleitung

1.1 Hintergrundinformationen zu Treibhausgas-Inventaren und Klimawandel

1.1.1 Hintergrundinformationen zum Klimawandel

Klimawandel ist die Veränderung der durchschnittlichen Witterungsverhältnisse und der Extremereignisse über einen längeren Zeitraum in einem bestimmten Gebiet oder global.

Klimaänderungen können folgende Ursachen haben:

1. Veränderungen so genannter geoastrophysikalischer Parameter wie Solarkonstante, Erdbahnelemente u.a.
2. Veränderungen der Erdoberfläche
3. Änderungen des Energiehaushaltes im System "Erdoberfläche und Atmosphäre"
4. Änderungen des Stoffhaushaltes der Atmosphäre (wie die Änderungen der Treibhausgaskonzentration).

Treibhausgase, zu denen neben Kohlendioxid, Lachgas, Methan, Ozon und andere Gase insbesondere auch Wasserdampf, als das wichtigste natürliche Treibhausgas gehört, haben eine besondere Eigenschaft: sie lassen die von der Sonne (vor allem im sichtbaren, kurzwelligen Bereich) auf die Erde fallende, energiereiche Strahlung nahezu ungehindert passieren, absorbieren aber teilweise die im Gegenzug von der erwärmten Erde ausgehende langwellige Strahlung. Hierdurch werden sie in einen energetisch angeregten Zustand versetzt, um nach kurzer Zeit unter Aussendung infraroter Strahlung wieder in den ursprünglichen Grundzustand zurückzukehren. Die Aussendung von Wärmestrahlung erfolgt gleichwertig in alle Raumrichtungen, d.h. zu einem erheblichen Anteil auch zurück zur Erdoberfläche (thermische Gegenstrahlung). Damit diese zusätzlich zugeführte Energiemenge dennoch abgestrahlt werden kann (aus Gründen des dynamischen, energetischen Gleichgewichts, in dem sich Erde und Atmosphäre im Mittel befinden, muss dies erfolgen), muss die Erde eine entsprechend höhere Temperatur aufweisen. Dies ist eine vereinfachte Darstellung des Treibhauseffektes.

Ohne die natürlicherweise vorkommenden Treibhausgase wäre ein Leben auf unserem Planeten nicht möglich. Statt einer globalen Erdmitteltemperatur von ca. 15°C würde eine mittlere Temperatur von etwa -18°C auf der Erde herrschen. Der natürliche Treibhauseffekt sichert also unser irdisches Leben.

Treibhausgase sind so genannte Spurengase, aber ihre Wirkung ist erheblich. Durch ihre Konzentrationszunahme kommt es zum anthropogenen (durch den Menschen verursachten) Treibhauseffekt der eine Verstärkung des (natürlichen) Treibhauseffektes darstellt.

Der Sechste Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC, 2023) bestätigt eindeutig, dass sich das Klima gegenwärtig ändert: Im gesamten Klimasystem finden seit Mitte des letzten Jahrhunderts vielfältige Veränderungen statt. Nicht nur die Temperatur der unteren Atmosphäre steigt, auch die Ozeane erwärmen sich, Gletscher tauen, Permafrostböden werden wärmer, Eisschilde verlieren an Masse, der Meeresspiegel steigt weiter an.

Umfassendere Beobachtungen, erweiterte Modelle und ein tiefergehendes Verständnis der Zusammenhänge zeigen: Die Aktivitäten des Menschen sind mit großer Sicherheit die Hauptursache des aktuellen Klimawandels.

Einige markante Beispiele der beobachteten Klimaänderungen sind (WMO, 2025):

- Die **globale Mitteltemperatur** in Bodennähe ist gegenüber der Basisperiode 1850-1990 bereits um 1,55°C gestiegen. Jedes der Jahr der letzten 10 Jahre, 2015 bis 2024, war jeweils eines der 10 die wärmsten Jahre seit Beginn der Wetteraufzeichnung.
- Die **Ozeane** erreichten 2024 den höchsten Wärmegehalt in der 65-jährigen Aufzeichnungsgeschichte. Jedes der letzten 8 Jahre setzte dabei einen neuen Rekord.
- Durch die Erwärmung der Weltmeere und das Abschmelzen von Gletschern und Eisflächen erreichte der **mittlere globale Meeresspiegel** seinen höchsten Stand seit dem diesbezüglichen Beginn der Satellitenaufzeichnungen im Jahr 1993.
- Die **Ausdehnung des arktischen Meereises** 2024 war die siebt niedrigste seit Beginn der Aufzeichnungen in 1979. Die 18 niedrigsten Jahresminima fanden alle in den letzten 18 Jahren statt.

Die Veränderung des Klimas hat weitreichende Auswirkungen auf ökologische und gesellschaftliche Systeme mit bedrohlichen Folgen.

Um gefährliche Auswirkungen des Klimawandels zu verhindern, hat die internationale Staatengemeinschaft im Übereinkommen von Paris 2015 beschlossen, die globale Erwärmung auf deutlich unter 2 °C, sofern möglich aber auf 1,5 °C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen (laut (WMO, 2025)) ist eine Erwärmung um 1,2 °C bereits erreicht. Nur bei einem Szenario mit sehr ambitionierter Klimapolitik ist davon auszugehen, dass die Erwärmung auf deutlich unter 2 °C zu begrenzen ist.

Es ist technisch und ökonomisch nach wie vor möglich, die globale Erwärmung entsprechend des Übereinkommens von Paris auf 1,5 °C bis zum Jahr 2100 zu begrenzen. Dafür ist allerdings eine sofortige globale Trendwende mit tiefgreifenden Treibhausgasminderungen in allen Weltregionen und Sektoren nötig. Mit Solar- und Windenergie sind besonders kostengünstige Technologien im Energiesektor verfügbar. Sofortige und mit dem Übereinkommen von Paris kompatible Klimaschutzmaßnahmen würden auch das globale Wachstum des Bruttoinlandsproduktes (BIP) nur geringfügig verringern. Dabei sind die so potenziell vermiedenen Schäden durch den Klimawandel noch gar nicht berücksichtigt, genauso wenig, wie die vermiedenen Anpassungskosten. Allerdings übersteigen schon allein die Emissionen aus bestehenden und derzeit geplanten Infrastrukturen für fossile Energie bereits das globale CO_2-Budget für 1,5 °C.

1.1.2 Hintergrundinformationen zu den Treibhausgas-Inventaren

Die Staaten der Welt haben früh erkannt, dass aufgrund der zu erwartenden Temperaturänderungen Gefahren für die Ökosysteme und die menschliche Zivilisation drohen, weil diese Änderungen relativ schnell erfolgen und sich die bestehenden Systeme nicht so schnell ohne Schäden an die neuen Klimaverhältnisse anpassen können.

1992 wurde in Rio de Janeiro das Rahmenabkommen über Klimaänderungen (Klimarahmenkonvention) von fast allen Staaten der Welt verabschiedet. Seit 1994 müssen die in ANNEX I der Klimarahmenkonvention benannten Staaten jährlich zum 15. April ein Inventar der Treibhausgase an das Sekretariat der Klimarahmenkonvention übermitteln. Es sind Angaben zu den Emissionen und Senken des Basisjahres (1990 für CO_2, N_2O, CH_4; 1995 für HFKW, FKW, SF_6, NF_3) für alle Jahre bis zwei Jahre vor dem Jahr der Berichterstattung vorzulegen (UNFCCC, 2014).

Auf der dritten Vertragsstaatenkonferenz zur Klimarahmenkonvention in Kyoto wurden erstmals rechtsverbindliche Begrenzungs- und Reduktionsverpflichtungen für die im ANNEX I

genannten Staaten festgelegt. In der ersten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls mussten die Industrieländer ihre Emissionen der sechs Treibhausgase Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4), Distickstoffoxid (N_2O), teilfluorierte Kohlenwasserstoffe (HFKW), vollfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW) und Schwefelhexafluorid (SF_6) im Zeitraum der Jahre 2008 bis 2012 um durchschnittlich 5,2 Prozent[9] vermindern. In der zweiten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls wurden die bisherigen Gase um das Gas Stickstofftrifluorid (NF_3) sowie sechs teilfluorierte Kohlenwasserstoffe (HFKW-152, HFKW-161, HFKW-236cb, HFKW-236ea, HFKW-245fa, HFKW-365mfc) und zwei vollfluorierte Kohlenwasserstoffe (c-C_3F_6, $C_{10}F_{18}$) erweitert.

Nach einer übernommenen Reduktionsverpflichtung um 8 % gegenüber dem Basisjahr in der ersten Verpflichtungsperiode, hat die Europäische Union im Rahmen der zweiten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls die Verpflichtung übernommen, ihre Treibhausgasemissionen bis 2020 gegenüber dem Basisjahr um 20 % zu mindern. Diese Verpflichtung wurde in der Europäischen Effort Sharing Decision[10] zwischen den Mitgliedsstaaten und der Europäischen Union aufgeteilt. Während die Emissionsminderungen der emissionshandelspflichtigen Teile der Inventare auf der europäischen Ebene umgesetzt wurden, waren die Mitgliedsstaaten für Emissionsminderungen in den nicht-emissionshandelspflichtigen Teilen national verantwortlich. Deutschland war zu einer Minderung seiner nicht-emissionshandelspflichtigen Emissionen auf 451,33 Mio. Tonnen CO_2-äquivalent bis 2020 verpflichtet. Dieses Ziel wurde erreicht. Um höhere Emissionen aus vorherigen Jahren auszugleichen, mussten jedoch auch Emissionsberechtigungen anderer EU-Mitgliedstaaten verwendet werden. Das Minderungziel der Europäischen Union von mindestens 20 % Reduktion gegenüber dem Basisjahr wurde mit einer Reduktion von 34 % deutlich übererfüllt.

Ab dem Jahr 2021 ist die Minderungszusage der Europäischen Union bis 2030 in ihrem National Determinated Contribution (NDC) mit der Europäischen Effort Sharing Regulation auf die 27 Mitgliedsstaaten plus Norwegen und Island aufgeteilt. Deutschland ist hier zu einer Minderung seiner nicht-emissionshandelspflichtigen Emissionen um 50 % bis 2030 verpflichtet[11].

Wie schon unter dem Kyoto-Protokoll ist die Wirksamkeit und der Erfolg auch des Übereinkommens von Paris hinsichtlich der Senkung von weltweiten Treibhausgasemissionen von zwei kritischen Faktoren abhängig: Ob die Vertragsstaaten sich an die Regeln des Übereinkommens halten und ihre zugesagten Beiträge erfüllen bzw. ihre Ambition steigen und ob die Emissionsdaten, die zur Erfüllungskontrolle genutzt werden, zuverlässig sind. Damit kommt der nationalen Berichterstattung und der anschließenden internationalen Überprüfung von Emissionsinventaren eine Schlüsselrolle zu.

1.2 Eine Beschreibung der nationalen Umstände und institutionellen Regelungen

Die Entscheidung 18/CMA.1 fordert alle Vertragsstaaten zum Aufbau und Beschreibung nationaler institutioneller Festlegungen für die Erstellung von Treibhausgasinventaren auf. Die nationalen institutionellen Festlegungen in Deutschland wurden als Nationales System Emissions-berichterstattung gemäß der Regelungen des Art. 5.1 KP bereits bis 2011 aufgebaut und haben seit dem Bestand. Sie erfüllen, wie auch schon in den Jahren bis 2020 die des Artikels

[9] Die durchschnittliche Minderung von 5,2 ist ein rechnerischer Wert, der in der Anlage B des Kyoto-Protokolls eingetragenen Emissionsbegrenzungen und –minderungen der jeweiligen Vertragsparteien.

[10] Entscheidung Nr. 406/2009/EC des Europäischen Parlaments und des Europäischen Rates vom 23.04.2009

[11] VERORDNUNG (EU) 2018/842 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 30. Mai 2018 zur Festlegung verbindlicher nationaler Jahresziele für die Reduzierung der Treibhausgasemissionen im Zeitraum 2021 bis 2030 als Beitrag zu Klimaschutzmaßnahmen zwecks Erfüllung der Verpflichtungen aus dem Übereinkommen von Paris sowie zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 525/2013

5.1 des Kyoto-Protokolls, die Anforderung der Entscheidung 18/CMA.1, sowie der Europäischen Governance Verordnung für die Energieunion und für den Klimaschutz[12]

Die nationale Institutionalisierung dient dazu, die Inventarerstellung in Übereinstimmung mit den Prinzipien der Transparenz, Konsistenz, Vergleichbarkeit, Vollständigkeit und Genauigkeit sicherstellen. Dies wird durch die Anwendung der methodischen Vorschriften aus den 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, durch ein ständiges Qualitätsmanagement und eine kontinuierliche Inventarverbesserung erreicht.

Auf ministerieller Ebene ist das Nationale System 2007 federführend vom damalig zuständigen Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) durch eine Vereinbarung der Staatssekretäre der beteiligten Ressorts als Grundsatzpapier „Nationales System zur Emissionsberichterstattung“ vom 05.06.2007 etabliert worden. Mit der Einbeziehung der damaligen Bundesministerien für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL); für Wirtschaft und Energie (BMWi); für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI); des Innern, für Bau und Heimat (BMI); der Finanzen (BMF) und der Verteidigung (BMVg) wurden alle wesentlichen Institutionen und Organisationen in die Erstellung der Emissionsinventare eingebunden, die einen fachlich hochwertigen Beitrag hierfür leisten können. Im Grundsatzpapier wurden die Zuständigkeiten der Bundesministerien definiert und beschlossen die Institutionalisierung auf bestehenden Institutionen und Datenströmen aufzubauen.

Weiterhin legt der Beschluss fest, dass auftretende Datenlücken, die in den Zuständigkeitsbereich der benannten Bundesministerien fallen, diese durch geeignete Aktivitäten des Ministeriums geschlossen werden sollen. Dies erfolgt, soweit notwendig, in Form der Bereitstellung von vorhandenen Daten bzw. Berechnungen oder gegebenenfalls durch die gesicherte Bereitstellung der erforderlichen Daten durch Dritte. Zur Begleitung des Prozesses der Berichterstattung richteten die beteiligten Ministerien einen Koordinierungsausschuss ein (siehe Kapitel 1.2.1.1). Dem Umweltbundesamt wurden die Aufgaben der Nationalen Koordinierungsstelle für Deutschland übertragen.

Das Grundsatzpapier „Nationales System zur Emissionsberichterstattung“ vom 05.06.2007 ist im Anhang 5.1.1 zu finden.

Später wurde die weitere Institutionalisierung vorwiegend durch den Abschluss von Vereinbarungen mit anderen Bundesinstitutionen bzw. mit Industrieverbänden und Einzelunternehmen komplettiert (siehe Kapitel 1.2.1.3). In den Jahren 2013 und 2014 wurde das damalige Nationale System an die Anforderungen der zweiten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls angepasst und erweitert.

Die anforderungskonforme Institutionalisierung und Funktionsweise wurde von allen bisherigen internationalen Überprüfungen wiederholt bestätigt.

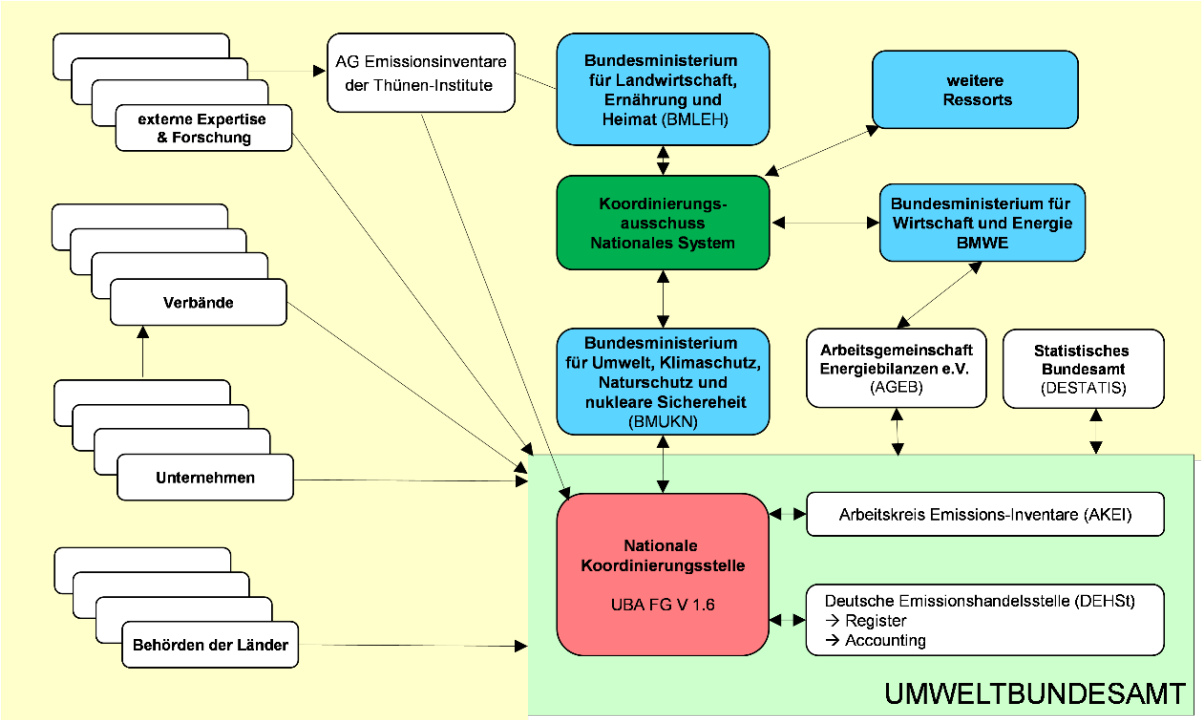
In Artikel 13 des Übereinkommens von Paris wurde die Bedeutung der Berichterstattung nochmals hervorgehoben und für alle Länder verplichtend. 2024 berichtete Deutschland daher erstmals nach den in den Entscheidungen 18/CMA.1 und 5/CMA.3 festgelegten Regeln für die Berichterstattung nach dem Übereinkommen von Paris.

Auch für die Berichterstattung unter dem Übereinkommen von Paris behält die Institutionalisierung unter der Klimarahmenkonvention und dem Kyoto-Protokoll ihre Gültigkeit.

[12] VERORDNUNG (EU) 2018/1999 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 11. Dezember 2018 über das Governance-System für die Energieunion und für den Klimaschutz

Die folgende Abbildung 4 zeigt die Struktur der drei Ebenen des Nationalen Systems in Deutschland im Überblick.

Abbildung 4: Struktur des Nationalen Systems Emissionen (NaSE)



Quelle: eigene Darstellung, UBA

1.2.1 Nationaler Koordinierungsausschuss und Nationale Koordinierungsstelle

1.2.1.1 Der nationale Koordinierungsausschuss der Bundesregierung zur Treibhausgasemissionsberichterstattung

Der Staatssekretärsbeschluss vom 05.06.2007 legt in § 2 die Einrichtung eines Koordinierungs-auschusses unter Federführung des BMUKN und Einbezug aller an der Emissionsberichterstattung beteiligten Bundesministerien fest.

Der Koordinierungsausschuss soll den Prozess der Emissionsberichterstattung begleiten und alle zu klärenden Fragen der Institutionalierung erörtern. Insbesondere berät der Ausschuss Fehlstellen in den Datenströmen und klärt Zweifelsfragen zu Zuständigkeiten.

Des Weiteren entscheidet der Koordinierungsausschuss über die Freigabe der Inventare und dedes Nationalen Inventarberichts.

Der Koordinierungsausschuss trat am 21.12.2007 erstmalig zusammen. Er tagt mindestens einmal jährlich. Zwischen den Sitzungen findet die Abstimmung zwischen den beteiligten Bundesministerien durch elektronische Kommunikation statt.

Der Koordinierungsausschuss ist auch nach der zweiten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls ein fester Bestandteil der Institutionalisierung der Emissionsberichterstattung in Deutschland.

1.2.1.2 Die Nationale Koordinierungsstelle im Umweltbundesamt

Das Umweltbundesamt (UBA) wurde durch das Grundsatzpapier der Staatssekretäre vom 05.06.2007 mit der Wahrnehmung der Aufgaben der nationalen Koordinierungsstelle zur

Emissionsberichterstattung (Single National Entity) betraut. Im Umweltbundesamt wurde das Fachgebiet Emission- und Klimaschutzberichterstattung mit der Wahrnehmung der Aufgaben betraut. Die Nationale Koordinierungsstelle bindet auf der Ebene des Umweltbundesamtes andere Facheinheiten in das System der nationalen institutionellen Festlegungen ein und koordiniert die Beiträge der übrigen in die Emissionsberichterstattung eingebundenen Institutionen und Organisationen. Zur Koordinierung der Arbeiten innerhalb des Umweltbundesamtes wurde ein Arbeitskreis Emissionsinventare eingerichtet (siehe Kapitel 1.2.1.3). Zur Umsetzung der IPCC Richtlinien zur Qualitätskontrolle und -sicherung innerhalb des Umweltbundesamtes wurde im Jahre 2005 durch eine Hausanordnung ein Qualitätssystem Emissionen etabliert (siehe Kapitel 1.2.2.3.1.1).

Zu den Aufgaben der Nationalen Koordinierungsstelle gehört die Planung, Erstellung, und Archivierung der Inventare und die Beschreibung dieser in den Inventarberichten sowie die Qualitätskontrolle und –sicherung bei allen relevanten Prozessschritten. Die Nationale Koordinierungsstelle dient als zentrale Anlaufstelle, koordiniert und informiert alle Teilnehmer an der Emissionsberichterstattung. Im Zeitraum 2003 bis 2007 hat die Koordinierungsstelle prioritär neue Datenquellen erschlossen. Seit 2008 liegt der Fokus auf der Verbesserung und langfristigen Sicherung vorhandener Datenquellen und der Aufrechterhaltung der Institutionalisierung der Datenströme. In die Berichterstattung einzubindende Institutionen und Organissationen wurden identifiziert und sukzessive eingebunden (siehe Kapitel 1.2.1.4). In den Jahren 2014 bis 2016 lag der Schwerpunkt auf der Umsetzung der zweiten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls und der Revised UNFCCC Reporting Guidelines in das System der Berichterstattung. Seit dem Jahr 2021 konzentrieren sich die Arbeiten auf Umsetzung der in der Decision 18/CMA.1 festgelegten Modalities, Procedures and Guidelines des Erweiterten Transparenzrahmens und der Berichterstattung unter dem Übereinkommen von Paris. Weitere wesentliche Arbeiten beziehen sich auf die Umsetzung des Qualitätssystems Emissionsinventare.

Die Nationale Koordinierungsstelle hat zur Erfüllung ihrer Aufgaben zwei zentrale Instrumente entwickelt:

Die Datenbank „Zentrale System Emissionen“ (ZSE) des Umweltbundesamtes ist die zentrale, nationale Datenbank zur Emissionsberechnung und -berichterstattung. Sie wird für die zentrale Datenhaltung aller für die Emissionsberechnung benötigten Informationen (Methoden, Aktivitätsraten, Emissionsfaktoren) verwendet. Das ZSE ist das wesentliche Instrument für die Dokumentation und die Qualitätssicherung auf der Datenebene.

Das Qualitätssystem Emissionsinventare (QSE) schafft innerhalb und außerhalb des Umweltbundesamt die erforderlichen Rahmenbedingungen für die Einhaltung einer guten Inventarpraxis und die Durchführung einer routinemäßigen Qualitätssicherung. Es wurde im Umweltbundesamt über die Hausanordnung 11/2005 im Jahr 2005 installiert und umfasst die notwendigen Prozesse, um eine kontinuierliche Qualitätsverbesserung der Treibhausgasemissionsinventare zu ermöglichen. Hierzu gehört die Festlegung der Verantwortlichkeiten sowie der Qualitätsziele hinsichtlich der Methodenwahl, der Datengewinnung, der Berechnung von Emissionen und der Unsicherheitsbestimmung und die Erfassung der durchgeführten Qualitätsprüfungen sowie deren Ergebnisse (Bestätigung der Zielerreichung oder bei Nichterreichung von Zielen Benennung der geplanten Maßnahmen zur zukünftigen Abhilfe). Zur Umsetzung der kontinuierlichen Qualitätsverbesserung im Rahmen des QSE dient eine Datenbank. Hierin werden alle tabellarischen Dokumente der nationalen QK/QS vorgehalten (QK/QS-Plan, Checklisten, Listen über Verantwortlichkeiten etc.).

Die Verfahren der Qualitätskontrolle sind unter besonderer Berücksichtigung der Arbeitsstrukturen des UBA, unter generellen Gesichtspunkten der Qualitätssicherung und nach

den *IPCC Good Practice Guidance* unter Einbindung externer Experten entwickelt worden. Für die zweite Verpflichtungsperiode wurden die Verfahren der Qualitätskontrolle an die Anforderungen der 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories angepasst.

Seit 2008 ist durch die Einbeziehung weiterer Behörden, Institutionen und Inventarexperten in das Qualitätsmanagement über die Vorgabe von Mindestanforderungen an die Datendokumentation, QK/QS und Archivierung das QSE auf das gesamte Nationale System erweitert worden. Das Verfahren erlaubt es anderen Organisationen, auf Ihren vorhandenen Strukturen aufbauend eigene hausspezifische Systeme zur Qualitätssicherung zu entwickeln. Das QSE ist in Kapitel 1.2.2.3 ausführlich beschrieben.

1.2.1.3 Arbeitskreis Emissionsinventare im Umweltbundesamt

Wesentliche Zuarbeiten zu den Inventaren – insbesondere zu den Emissionsfaktoren – erhält die Nationale Koordinierungsstelle aus anderen Arbeitseinheiten des Umweltbundesamtes und den an der Inventarerstellung beteiligten Thünen-Instituten. Die datenseitige Einbindung von Verbänden, Unternehmen und anderen unabhängigen Organisationen in das System der Berichterstattung erfolgt ebenfalls in erster Linie über die für konkrete Fragestellungen zuständigen Facheinheiten des Umweltbundesamtes.

Für die Koordinierung der Arbeiten innerhalb des Umweltbundesamtes wurde im Jahr 2003 ein Arbeitskreis Emissionsinventare eingerichtet, über den seither alle an der Inventarerstellung beteiligten Experten eingebunden werden.

Die Nationale Koordinierungsstelle lädt mindestens einmal jährlich zu Sitzungen des Arbeitskreises ein. Weiterhin finden zur Erörterung spezifischer Fragestellungen und zur ggf. erforderlichen Festlegungen von Hauslösungen Treffen der betroffenen Mitglieder des Arbeitskreises statt.

Die Bereitstellung notwendiger Informationen erfolgt neben den Veranstaltungen des Arbeitskreises auch über ein Intranetangebot der Nationalen Koordinierungsstelle zur Emissionsberichterstattung und einen von der Nationalen Koordinierungsstelle erstellten Newsletter zur Datenbank Zentrales Systems Emissionen (ZSE).

1.2.1.4 Zusammenarbeit der Nationalen Koordinierungsstelle mit anderen Bundesinstitutionen und Nichtregierungsorganisationen im Rahmen der Berichterstattung

Wie weiter ober beschrieben legt das Grundsatzpapier „Nationales System zur Emissionsberichterstattung“ vom 05.06.2007 die Zuständigkeiten der beteiligten Bundesministerien für alle Quell- und Senkengruppen fest.

Für einige Datenströme anderer Bundeseinrichtungen zur Nationalen Koordinierungsstelle sind spezielle Vereinbarungen zwischen der jeweiligen Einrichtung und der Nationalen Koordinierungsstelle getroffen worden.

So wurde im Jahr 2009 für die Datenlieferung des Statistischen Bundesamtes zur Emissions-berichterstattung im Rahmen eines Artikelgesetzes (3. Mittelstandsentlastungsgesetzes, MEG 3) eine gesetzliche Regelung u.a. für das Energiestatistikgesetz (EnStatG) getroffen, die nach der Novellierung des EnStatG im Jahr 2017 Bestand in § 13 (2) Eingang gefunden hat. Die Regelungen des MEG 3 ermöglichen die Bereitstellung von Daten der Energie-, Umwelt- und Produktionsstatistik für die Emissionsberichterstattung, die der statistischen Geheimhaltung unterliegen. Auf dieser Grundlage trat am 13. Januar 2010 eine Verwaltungsvereinbarung zwischen dem Umweltbundesamt und dem Statistischen Bundesamt in Kraft, die die Datenlieferungen für die Emissionsberichterstattung spezifiziert. Die Vereinbarung sieht eine jährliche Überprüfung des Datenbedarfs des Umweltbundesamtes vor. Darüber hinaus wurde

ein direkter Austausch zwischen der Nationalen Koordinierungsstelle und dem Statistischen Bundesamt zu Fragen der Emissionsberichterstattung institutionalisiert.

Durch das Grundsatzpapier „Nationales System zur Emissionsberichterstattung“ wurde die Zuständigkeit für den Bereich Landwirtschaft und den Bereich LULUCF dem BMLEH übertragen. Das BMLEH hat seinen nachgeordneten Bereich mit der Durchführung der für die Emissionsberichterstattung erforderlichen Aufgaben beauftragt. Dies geschah mit Erlass vom 29.08.2007 an die damalige Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL). Nach der zum 01.08.2008 erfolgten Umstrukturierung des Geschäftsbereiches werden diese Aufgaben nun vom Thünen–Institut (TI) durchgeführt. Zu den Aufgaben gehören alle Arbeiten aus dem Bereich der Land- und Forstwirtschaft, die zur Sicherstellung der jährlichen Emissionsinventare erforderlich sind, einschließlich der Abfassung des Berichtes. Das TI übersendet Daten und Bericht an die Nationale Koordinierungsstelle. Die Erstellung der Emissions- und Kohlenstoffinventare der Quell- und Senkengruppen 3 und 4 (Land- und Forstwirtschaft), sowie für KP-LULUCF (Art. 3.3. und 3.4 KP), inklusive des Qualitätssicherungskonzepts wurde von BMLEH und TI in einem Konzept kodifiziert, das alle Prozesse und Akteure und deren Rollen benennt und spezifiziert.

Weiterhin hat das TI am 13. Februar 2008 eine Vereinbarung mit dem Statistischen Bundesamt zur Bereitstellung von Emissionsdaten auf Basis der landwirtschaftlichen Statistiken abgeschlossen. Seit dem 07.07.2009 besteht eine Forschungs- und Entwicklungs-Zusammenarbeit zwischen dem TI und dem Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), die die benötigten Zuarbeiten durch das KTBL für die Emissionsberichterstattung regelt.

Als Schnittstelle zur Nationalen Koordinierungsstelle im UBA wurde eine Arbeitsgruppe Emissionsberichterstattung am TI eingerichtet, die auch die Zuständigkeit für Planung und QK/QS für die Kategorien CRF 3 und CRF 4 inne hat.

Die Koordination der Arbeitsgruppe Emissionsberichterstattung obliegt im TI dem Institut für Agrarklimaschutz (AK). Die Berichterstattung für Landwirtschaft und LULUC obliegt dem selbigen Institut, während die Berichterstattung für Wald unter der Konvention und Artikel 3.3 und 3.4 unter dem Kyoto Protokoll dem TI für Waldökosysteme untergestellt ist. Das TI für Holzforschung hat ab der zweiten Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls die Zuständigkeit für die Berichterstattung der Emissionen aus Holzwirtschaftsprodukten (HWP).

Die Einbindung der Arbeitsgruppe Emissionsberichterstattung am TI erfolgt über die direkte (ressortübergreifende) Integration der Arbeitsgruppe in die Kommunikationsstrukturen der Nationalen Koordinierungsstelle. Die Arbeitsgruppe am TI ist ebenso Bestandteil des Arbeitskreises Emissionsinventare (AKEI) im Umweltbundesamt und ist vollständig in das QSE der Nationalen Koordinierungsstelle integriert.

Die Einbindung von Wirtschaftsverbänden, Unternehmen und anderen unabhängigen Organisationen erfolgt in erster Linie über die für konkrete Fragestellungen zuständigen Facheinheiten des Fachbereichs I, III und V aus dem Umweltbundesamt. Die Nationale Koordinierungsstelle leistet den Facheinheiten bei der Diskussion von Berichtsanforderungen und der Bestimmung von erforderlichen Datenflüssen mit den Verbänden Unterstützung. Die Datenströme werden kontinuierlich von der Nationalen Koordinierungsstelle überprüft und soweit nötig durch geeignete Vereinbarungen der Nationalen Koordinierungsstelle mit Verbänden bzw. Unternehmen aktualisiert und abgesichert.

Die Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB) ist vertraglich durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) zur Bereitstellung der Energiebilanzen verpflichtet. Ein abgestimmter Zeitplan sichert die rechtzeitige Erstellung einer vorläufigen Energiebilanz für das

letzte Berichtsjahr und ihre Übermittlung zum 01. September eines jeden Jahres an das Umweltbundesamt für die Inventarerstellung. Eine Übermittlung der endgültigen Energiebilanz erfolgt bis zum 15. Februar des Jahres x+2. Der aktuelle Vertrag endet im Jahr 2025 mit der Erstellung der endgültigen Energiebilanz 2022. Beginnend mit der vorläufigen Energiebilanz 2018 ist die Verantwortung für die Bereitstellung der Daten zu den Erneuerbaren Energien im Jahr 2019 an die Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) übergegangen.

Mit Erlass vom 29.August 2024 wurde das Umweltbundesamt als nationale Kontaktstelle gegenüber der EU Kommission im Rahmen der EU Methanverordnung (EU, 2024a) benannt. Eine Wesentliche Aufgabe ist es dabei, die Emissionsberichte einzelner Unternehmen für die internationale Emissionsberichterstattung zu verwenden. Die Verordnung verpflichtet u.a. die Unternehmen der Öl- und Gasindustrie (komplette Bereitstellungskette bis zum Endverbraucher) sowie Betreiber aktiver obertägiger und Verantwortliche stillgelegter und aufgegebener untertägiger Kohlebergwerke, regelmäßig über die Quantifizierung und Messung von Methanemissionen an der Quelle zu berichten. Die Daten werden gemäß Artikel 30 der Verordnung zum 5.Februar 2026 in einer Transparenzdatenbank auf den Seiten der EU Kommisison veröffentlicht. Für wesentliche Teile der Kategorien 1.B.1 und 1.B.2 wurden diese Daten in der nationalen Berichterstattung 2026 verwendet bzw. – falls nicht vollständig bzw. nicht den Anforderungen von UNFCCC genügend – zu Verifikationszwecken herangezogen.

Für die Einbeziehung von nicht behördlichen Einrichtungen in das Nationale System wurde im Jahr 2008 eine Mustervereinbarung entworfen, über die relevante Akteure verbindlich in die Erstellung der Inventare eingebunden werden. Die Mustervereinbarung wird an die Erfordernisse und Bedürfnisse der jeweiligen Datenlieferanten angepasst. Im Juli 2009 haben das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie und das Umweltbundesamt mit dem Verband der Chemischen Industrie (VCI) und den deutschen Produzenten eine Vereinbarung zur Datenbereitstellung in den Kategorien Ammoniak (2.B.1) und Salpetersäure (2.B.2) abgeschlossen, die im Frühsommer 2014 an die Erfordernisse der Revised UNFCCC Reporting Guidelines und der 2006 IPCC Guidelines angepasst wurde. Ebenso konnten 2009 mit den in Deutschland ansässigen Produzenten von Adipinsäure (2.B.3) Vereinbarungen zur Datenbereitstellung erzielt werden. Weiterhin wurde eine Verbändevereinbarung mit dem Industrieverband Bitumen Dach- und Dichtungsbahnen (vdd) in der Kategorie Bitumen für Dachbahnen (2.D.3.c) abgeschlossen. Auf Basis dieser Vereinbarungen erfolgt seit 2009 die Datenbereitstellung in den genannten Kategorien für die Emissionsberichterstattung. Im Jahre 2021 konnten mit beiden Herstellern von Soda (für alle drei Produktionsstätten in Deutschland) Kooperationsvereinbarungen geschlossen werden. Im UBA werden die gemeldeten Daten zur Produktionsmenge zusammengeführt und als Zeitreihe ab 2013 genutzt.

Im Juni 2011 hat die Nationale Koordinierungsstelle mit Unterstützung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie als zuständiges Ressort eine Kooperationsvereinbarung mit der Wirtschaftsvereinigung Stahl geschlossen. Diese Vereinbarung wurde erforderlich, da zum 31.12.2009 das Statistische Bundesamt aufgrund des Auslaufens der entsprechenden gesetzlichen Grundlage (Rohstoffstatistikgesetz) die Datenerhebung und Veröffentlichung der Fachserie 4 Reihe 8.1 (Eisen- und Stahlstatistik) eingestellt hat. Damit traten in der Verfügbarkeit der Berechnungsgrundlagen für diesen Bereich ein deutlicher Rückschritt und eine erhebliche Fehlstelle in den Datenströmen ein, die durch die neue Kooperationsvereinbarung gelöst werden konnte. Die Kooperationsvereinbarung stellt neben der Datenlieferung der Mitgliedsunternehmen auch die der Nicht-Mitglieder sicher.

Am 31.12.2010 lief die Selbstverpflichtung der Halbleiterproduzenten mit Produktionsstätten in Deutschland, die auch die Grundlage für die Datenbereitstellung für die Kategorie 2.F.6 bildet, aus. Die Nationale Koordinierungsstelle hat im August 2012 zur Schließung einer potentiellen

Datenlücke eine Kooperationsvereinbarung mit dem Fachverband Electronic Components and Systems (ECS) im Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie e.V. (ZVEI) zur langfristigen Sicherung der Datenlieferung an das UBA für die Kategorie 2.E.1 abgeschlossen.

Diese Vereinbarungen haben zu einer langfristigen Sicherung der Datenbereitstellung und einer erheblichen Verbesserung der Datenqualität in den betreffenden Kategorien geführt.

1.2.2 Inventarerstellung

Die Inventarerstellung folgt, wie in der Übersicht in Kapitel 1.2.2.4 dargestellt, einem regelmäßigen, jährlich ablaufenden Schema. Die Prozesse zur Treibhausgas-Inventarerstellung und zur Erstellung des Nationalen Inventarberichtes und der Durchführung von Maßnahmen der Qualitätskontrolle und -sicherung sind sehr eng mit einander verknüpft.

Grundsätzlich ist zwischen den vorgelagerten Abläufen bei der Inventarerstellung (siehe Kapitel 1.2.2.1.1) der Festlegung der Berechnungsgrundlagen (siehe Kapitel 1.2.2.2.1) , der Sammlung, Verarbeitung und Speicherung von Daten (siehe Kapitel 1.2.2.2) und der Qualitätskontrolle und -sicherung (siehe Kapitel 1.2.2.3) zu unterscheiden.

1.2.2.1 Treibhausgas-Inventar

1.2.2.1.1 Vorgelagerte Abläufe

Unabhängig von den in Abbildung 8 dargestellten Teilprozessen der Emissionsberichterstattung bestehen vorgelagerte Abläufe, die jeweils zwischen zwei Zyklen der Emissionsberichterstattung durchgeführt werden.

Als vorgelagerte Abläufe werden die folgenden Teilprozesse gezählt:

- kontinuierliche Überprüfung und Sicherstellung der Datenströme von den Datenlieferanten zum Umweltbundesamt durch die Verbesserung der Institutionalisierung des Nationalen Systems;
- Umsetzung von Verbesserungen in der Inventarplanung und Inventarerstellung;
- die Bestimmung der Hauptkategorien (gemäß Methode 1 nach Kapitel 4.3.1, Vol. 1 der 2006 IPCC GL);
- die Berechnung und Aggregation der Unsicherheiten der Emissionen mittels Monte Carlo Simulation (gemäß Approach 1- oder Approach 2-Verfahren nach den *IPCC Good Practice Guidance*);
- die erweiterte Bestimmung der Hauptkategorien mittels Monte Carlo Simulation (gemäß Methode 2 nach Kapitel 4.3.2, Vol. 1 der 2006 IPCC GL).

1.2.2.1.1.1 Verbesserung der nationalen institutionellen Festlegungen

Durch die Form der Institutionalisierung der Berichterstattung, die insbesondere auf bestehenden Datenströmen aufbaut und bei fehlender langfristiger Absicherung der Datenbereitstellung geeignete Maßnahmen zur Absicherung vorsieht (siehe Kapitel 1.2.1), ist eine stetige Überprüfung der Datenströme zwischen zwei Zyklen der Berichterstattung nötig.

Bei auslaufenden Selbstverpflichtungen sind Gespräche mit den Datenlieferanten über deren Verlängerung bzw. Überführung in eine Kooperationsvereinbarung zu führen. Nicht abgesicherte Datenströme sind mit verbindlichen Zusagen oder Kooperationsvereinbarungen zu unterlegen. Im Zweifelsfall sind gesetzliche Regelungen zur Datenbereitstellung zu prüfen und umzusetzen.

Bestehende Vereinbarungen müssen ggf. an neue Gegebenheiten und Berichterstattungserfordernisse (z.B. Wechsel des Berichterstattungsverfahrens) angepasst werden. Damit wird zu einer stetig hohen Qualität des Nationalen Systems und der Inventarerstellung beigetragen.

1.2.2.1.1.2 Umsetzung von Verbesserungen in der Inventarplanung und Inventarerstellung

Das Qualitätssystem dient sowohl der Gewährleistung einer hohen Inventarqualität, als auch der stetigen Inventarverbesserung und Verbesserung der Inventarplanung. Erkannte Verbesserungsnotwendigkeiten aus der zurückliegenden Qualitätskontrolle und -sicherung, zurückliegende Review-Ergebnisse und im NID ausgewiesene geplante Verbesserungen werden wenn möglich im jeweils nächstenBerichterstattungszyklus umgesetzt.

Eine detaillierte Beschreibung der Prozeduren zur Qualitätskontrolle und -sicherung ist im Kapitel 1.2.2.3 zu finden. Die in den Kategorien erzielten Verbesserungen dieser Berichterstattung sind in den jeweiligen Kategorien-Kapiteln zu finden.

1.2.2.1.1.3 Bestimmung der Hauptkategorien (gemäß Tier 1-Verfahren)

Um die für die Inventarerstellung und -verbesserung notwendigen, vielfältigen und detaillierten Aktivitäten und Kapazitäten auf die wesentlichen Kategorien der Inventare konzentrieren zu können, wurde durch IPCC die Definition einer Hauptkategorie eingeführt. Als solche werden Quell- bzw. Senkengruppen bezeichnet, die im nationalen Inventar herausgehoben sind, da ihre Emissionen bzw. Einbindungen einen signifikanten Einfluss auf die Gesamtemission der direkten Treibhausgase haben, entweder in der absoluten Höhe der Emissionen, im Beitrag zum zeitlichen Emissionstrend, ihrer Unsicherheiten oder aufgrund ihrer Einschätzung als relevante Quelle durch einen Experten.

Die Bestimmung der Hauptkategorien wird von der Nationalen Koordinierungsstelle einmal jährlich vor dem Durchlaufen des Prozesses der Emissionsberichterstattung durchgeführt. Die Ergebnisse werden im Rahmen der Berichterstattung für das Jahr x berichtet, können aber erst bei der Inventarerstellung für das Jahr x+1 fachlich berücksichtigt werden. Die Zugehörigkeit zu den Hauptkategorien dient als Kriterium dafür, welche Berechnungsmethode (Tier-Ansatz) und in Folge dessen welcher Detaillierungsgrad bei der Emissionsmodellierung für die Kategorie angewandt werden muss. Darüber hinaus wird das Ergebnis der Bestimmung der Hauptkategorien zur Ermittlung von Kategorien mit prioritärem Handlungsbedarf bei der Inventarverbesserung genutzt.

In der 2000 *IPCC Good Practice Guidance* (Vol. 1, Ch. 4) sind die für die Bestimmung der Hauptkategorien anzuwendenden Methoden festgelegt. Diese ermöglichen es, durch die Analyse des Inventars für ein Jahr im Hinblick auf die Emissionshöhe der einzelnen Kategorien (Tier 1 Level Assessment), die Analyse einer Zeitreihe der Inventarangaben (Tier 1 Trend Assessment) sowie durch eine detaillierte Analyse der fehlerbewerteten Inventarangaben (Tier 2 Level and Trend Assessment unter Berücksichtigung der Unsicherheiten) die jeweiligen Hauptkategorien zu identifizieren.

Zur Festlegung der Hauptkategorien wurden für die deutschen Treibhausgasemissionen die beide Methode 1-Verfahren Level (für das Basisjahr sowie das letzte berichtete Jahr) sowie Trend (für das letzte berichtete Jahr gegenüber dem Basisjahr) angewendet. Entsprechend den IPCC-Vorgaben wurde dabei neben den Emissionen aus Quellen auch die Einbindung der Treibhausgase in Senken in den Analysen berücksichtigt.

1.2.2.1.1.4 Berechnung und Aggregation der Unsicherheiten der Emissionen

Unsicherheiten sind elementarer Bestandteil der Emissionsinventare und ihre Bestimmung soll zu einem quantitativen Ausdruck für die Genauigkeit der Emissionsinventare führen. Während die Bestimmung der Unsicherheiten mit der Datenerhebung und damit im Prozessablauf der

Emissionsberichterstattung unter dem Punkt Datengewinnung erfolgt, kann ihre Aggregation erst im Anschluss an die Inventarerstellung beziehungsweise den Zyklus der Emissionsberichterstattung erfolgen.

Bei der Berechnung und Aggregation der Unsicherheiten werden die Unsicherheiten der Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren, welche in der Regel auf der untersten Ebene der Kategorien im ZSE von Experten geschätzt wurden, in Unsicherheiten von Emissionen umgerechnet und aggregiert. Die Aggregation der Unsicherheiten wird jährlich am Ende des Berichtserstattungszyklus für das aktuelle Berichtsjahr durchgeführt.

Zur Ermittlung der Unsicherheiten des Inventars wurden die Einzelunsicherheiten, soweit bisher möglich, durch die Daten liefernden Experten der Facheinheiten im UBA sowie externe Einrichtungen geschätzt.

1.2.2.1.1.5 Erweiterte Bestimmung der Hauptkategorien

Die aggregierten Unsicherheiten dienen als Grundlage zur erweiterten Bestimmung der Hauptkategorien (Tier-2-Hauptkategorienbestimmung).

1.2.2.2 Sammlung, Verarbeitung und Speicherung der Daten

1.2.2.2.1 Festlegung der Berechnungsgrundlagen

Die Auswahl, Überprüfung und ggf. Änderung der Berechnungsmethoden zur Emissionsermittlung hat Auswirkungen auf den gesamten Emissionsberichterstattungsprozess. Daher steht die Prüfung der Angemessenheit der verwendeten Methoden am Anfang des Hauptprozesses „Festlegung der Berechnungsgrundlagen“. Die 2006 *IPCC Guidelines* geben für die jeweiligen Kategorien mit Hilfe von Entscheidungsbäumen (Decision Trees) vor, welche Methoden anzuwenden sind. Dies erfolgt auch in Abhängigkeit davon, ob es sich um eine Hauptkategorie handelt oder nicht. Kommt statt der vorgeschriebenen Methode eine andere – länderspezifische – Methode zur Anwendung, so ist dies im NID zu begründen. Die Gleich- oder Höherwertigkeit der Methode ist darzulegen und nachvollziehbar zu dokumentieren.

Weiter stellen auch die Auswahl, Überprüfung und ggf. Änderung der Datenquellen einen kritischen Erfolgsfaktor dar, denn die Ergebnisse der gesamten Folgeprozesse (Datenaufbereitung, Berechnung, Berichterstattung) können nicht besser als die Qualität der Primärdaten sein. Datenquellen können sich auf Aktivitätsraten, Emissionsfaktoren oder Emissionen einer bestimmten Kategorie beziehen. In vielen Fällen wird es sich um bereits seit mehreren Jahren genutzte Datenquellen handeln. Die Auswahl neuer Datenquellen kann z.B. auf Grund einer erforderlichen Methodenumstellung, des Wegfalls einer bisherigen Datenquelle, der Notwendigkeit zusätzlicher Daten oder aufgrund von Ergebnissen der Qualitätskontrolle bei bisher genutzten Datenquellen erforderlich sein.

Verschiedene Kriterien beeinflussen die Eignung einer Datenquelle. Hierzu zählen u.a.:

- langfristige Verfügbarkeit,
- Institutionalisierung der Datenbereitstellung,
- gute Dokumentation,
- Durchführung von Maßnahmen der Qualitätskontrolle und –sicherung seitens der Datenlieferanten,
- Angabe von Unsicherheiten,
- Repräsentativität der Daten und

- Vollständigkeit der zu erwartenden Daten.

Wichtig ist, dass in jedem Fall die Entscheidung für die Auswahl einer Datenquelle dokumentiert wird und dass bei erheblich reduzierter Eignung der verwendeten Datenquellen geeignete Verbesserungsmaßnahmen geplant werden.

Die Weitergabe von Anforderungen zur Qualitätskontrolle, -sicherung und Dokumentation an Datenlieferanten wird angestrebt und ist insbesondere bei der Vergabe von Forschungsvorhaben von besonderer Relevanz, da das Umweltbundesamt als Auftraggeber in diesem Fall einen erheblichen Einfluss auf den Auftragnehmer ausüben kann.

1.2.2.2.2 Datengewinnung

Die Datengewinnung und -dokumentation erfolgt durch den jeweiligen Fachverantwortlichen. Dies kann durch die Auswertung von amtlichen oder Verbände-Statistiken, Studien, Periodika sowie von Forschungsvorhaben erfolgen. Zu den letzteren kanndie Durchführung eigener Forschungsvorhaben oder die Heranziehung fremder Forschungsvorhaben gehören Ebenso kann die Datengewinnung über die Verwendung persönlicher Informationen, sowie über einen Bund/Länder-Datenaustausch gewonnene Daten erfolgen. Unter dem Strich werden häufig anderweitig gewonnene Arbeitsergebnisse für die Emissionsberichterstattung weitergenutzt.

Die Datengewinnung umfasst die Teilschritte:

1. Festlegung der Anforderungen,
2. Festlegung der kategoriespezifischen Qualitätskriterien für die Daten,
3. Anforderung der Daten durch die zuständige Facheinheit bei den Datenlieferanten sowie
4. Erhalt der Daten

Über die Nationale Koordinierungsstelle wird die Anforderung zur Zuarbeit zu den Inventaren unter Information der Fachvorgesetzten an die kategoriespezifischen Fachverantwortlichen geschickt. Für die Fertigung des NID wird eine Master-Datei bereitgestellt, die die Struktur für die Zuarbeiten vorgibt. Als Anforderung für die späteren Dateneingaben gelten die Vorgaben aus dem ZSE (direkte Eingabe oder Befüllung des Importformats). Über Informationsveranstaltungen des UBA AK Emissionsinventare, die Intranet- und Share-Point-Seiten zur Emissionsberichterstattung des UBA und einer elektronischen Inventarbeschreibung (siehe Kapitel 1.2.2.3.1.5) werden den Fachverantwortlichen die Anforderungen an die Berichterstattung einschließlich der durchzuführenden Maßnahmen zur QK/QS, die Ergebnisse aller Inventarüberprüfungen sowie kategoriespezifisch der Datenbestand jeder Kategorie und die aktuellen Ergebnisse aus der Bestimmung der Hauptkategorien bekannt gemacht. Auf dieser Basis sind durch den Fachverantwortlichen die Anforderungen bezüglich der Datenquellen sowie der Berechnungsmethoden festzulegen.

Die Anforderungen beeinflussen den vorgelagerten Prozess der Festlegung von Berechnungsgrundlagen (Überprüfung und Auswahl der Methoden und Datenquellen), der immer dann stattfindet, wenn die Anforderungen noch nicht erfüllt sind oder sich verändert haben.

Nach Festlegung der Anforderungen an Datenquellen und Methoden soll vor der Einleitung der Datengewinnung bei Dritten eine Festlegung der kategoriespezifischen Qualitätskriterien für diese Daten erfolgen, um den Prozess der QK auf der Datenebene zu unterstützen. Die Durchführung dieses Schrittes ist derzeit optional da für die meisten Kategorien keine Auswahl- bzw. Differenzierungsmöglichkeiten bei den zur Verfügung stehenden Daten exisitieren, da es in der Regel einfach nicht genug Datenquellen gibt.

Erfolgt die Anforderung der Daten durch den Fachverantwortlichen bei Dritten, soll der vom Datenlieferant erwartete Umfang, die Anforderungen an die Datenqualität und an die Dokumentation der Daten angegeben werden. Beim Erhalt der Daten werden diese auf

Vollständigkeit, Einhaltung der Qualitätskriterien und Aktualität geprüft. Die Validierung der Daten erfolgt durch den Fachverantwortlichen.

1.2.2.2.3 Datenaufbereitung und Emissionsberechnung

Die Datenaufbereitung und Emissionsberechnung umfasst die Schritte:

- Dateneingabe,
- Datenbearbeitung (Modellbildung, Disaggregation, Aggregation),
- Emissionsberechnung,
- Erstellung der Berichtsteile (Texte) sowie
- Freigabe auf der Fachebene

Große Teile der Datenimport, -eingabe und –bearbeitung (Bearbeitung von Daten und Emissionsberechnung) laufen im ZSE ab, wodurch die Transparenz und Konsistenz erheblich erhöht wird und sich für die Durchführung von allgemeinen Maßnahmen der Qualitätskontrolle auf der Datenebene die Möglichkeit eröffnet, im ZSE eine Automatisierung vorzunehmen (z.B. Prüfung von Größenordnungen und Vollständigkeit etc.). In solchen Fällen wird die manuelle Durchführung bestimmter QK-Maßnahmen sinnvoll ergänzt. Um Berechnungsergebnisse komplexer Modelle zu plausibilisieren, sollten zur Überprüfung außerhalb des ZSE Cross-Checks mit vereinfachten Annahmen erfolgen.

Nach Durchlaufen der Prüfungen und evtl. Rücksprachen erfolgt die Emissionsberechnung im ZSE durch ein automatisiertes Verfahren nach dem Prinzip:

Aktivitätsrate x Emissionsfaktor = Emission.

Sind auch vorgelagerte Rechenwege im ZSE abgelegt, so werden diese Berechnungen ebenfalls automatisiert angestoßen und fließen in die eigentliche Emissionsberechnung ein.

Im Anschluss zu den Arbeiten mit Zeitreihen für Aktivitätsraten, Emissionsfaktoren, Unsicherheiten und Emissionen werden auch die Berichtsteile erstellt. Insofern wird der Begriff Daten in einem weiten Sinne verstanden. Er umfasst neben Zahlenwerten, Zeitreihen, etc. auch Kontextinformationen wie Quellen einer Zeitreihe sowie Wege der Berechnung und bezieht sich ebenfalls auf die Erstellung der Berichtsteile für den NID und die Dokumentation von Rückrechnungen.

Die Freigabe auf der Fachebene durch die jeweiligen QK-Verantwortlichen hat sowohl für Texte als auch für Ergebnisse der Berechnungen vor der weiteren Verwendung durch die nationale Koordinierungsstelle zu erfolgen. Dies geschieht in der Regel mit der Übermittlung an die Nationale Koordinierungsstelle und durch die Freigabe der vollständig ausgefüllten QK/QS-Checklisten.

1.2.2.2.4 Berichterstellung

Zur Berichterstellung gehören:

- die Aggregation der Emissionsdaten zu den Berichtsformaten: hierzu gehört der Export der JSON-Dateien für das ETF Inventory Reporting Tool aus dem ZSE sowie der Import der JSON-Dateien in den ETF Inventory Reporting Tool, die Erstellung der Datentabellen für das NFR, sowie die Aggregation der Emissionsdaten zu den nationalen Trendtabellen

- die Zusammenfassung der zugelieferten Berichtstexte zum Berichtsentwurf (NID) sowie die Gesamtredaktion des NID,
- die UBA-interne Überprüfung des Entwurfs (nationale Trendtabellen und NID) mit anschließender Freigabe,
- die Übergabe an das BMUKN zur Ressortabstimmung mit abschließender Freigabe durch den Koordinierungsausschuss, sowie abschließend
- die Übergabe an das UNFCCC-Sekretariat, die EU-Kommission bzw. das UNECE Sekretariat und
- die abschließende Archivierung

Nach der Fertigstellung der Daten, Berichtsteile und QK/QS-Checklisten durch die Fachexperten und die Übermittlung derselben an die Nationale Koordinierungsstelle werden sie von den kategoriespezifischen fachlichen Ansprechpartnern in der Nationalen Koordinierungsstelle anhand einer QK-Checkliste überprüft. Die Ergebnisse dieser Überprüfung werden den Fachverantwortlichen zur Verfügung gestellt, so dass diese (ggf. nach einer Rücksprache) ihren Beitrag entsprechend überarbeiten können.

Bevor die Emissionsdaten in die Berichtsformate für die Klimarahmenkonvention (CRT= *Common Reporting Tables*) bzw. die Genfer Luftreinhaltekonvention (NFR= *New Format on reporting*) übertragen werden können, muss eine Aggregation der Emissionsdaten aus den Zeitreihen des ZSE (im Erfassungsformat) zu den Berichtsformaten CRF- bzw. NFR-Kategorien erfolgen. Dies wird über eine hierarchische Zuordnung im ZSE realisiert, die im Anhang 3 für die einzelnen Hauptkategorien genauer beschrieben ist. Die Aggregationen erfolgen automatisiert, sofern keine Änderungen gegenüber dem Vorjahr auftreten.

Nach der rechnerischen Aggregation werden Aktivitätsdaten und Emissionen über den Export in JSON-Dateien in das *ETF Inventory Reporting Tool* eingelesen, in dem automatisiert die CRT-Berichtstabellen des IPCC erstellt werden. Dennoch sind Qualitätskontrollen erforderlich, die eine Übereinstimmung der Werte sowie der durch den *ETF Inventory Reporting Tool* berechneten *Implied Emission Factors* zwischen dem Emissionsinventar und den CRF-Reporter Tabellen sicherstellen. Zudem ist eine hinreichende Kommentierung etwaiger Rekalkulationen sowie von *Notation Keys* erforderlich.

Parallel hierzu erfolgt die Zusammenfassung der geprüften Berichtstexte zum Berichtsentwurf des NID durch den Berichtskoordinator.

Die UBA-Interne Überprüfung und Freigabe der fertig gestellten Berichtstabellen und des NID, sowie dem zukünftig darin enthaltenen Inventarplan erfolgt durch die Mitzeichnung im Rahmen der Hausabstimmung im UBA. Danach erfolgt die Übermittlung an das BMUKN zur zweiten Phase der Freigabe im Rahmen der Ressortabstimmung**.** Der Koordinierungsausschuss gibt die Berichtstabellen und den NID abschließend zur Übermittlung an das UNFCCC-Sekretariat frei.

Die Datentabellen und der dazugehörige NID werden in der Inventarbeschreibung (siehe auch Kapitel 1.2.2.3.1.5) gesichert archiviert. Der zur Berechnung verwendete Inhalt der ZSE-Datenbank wird ebenfalls archiviert.

1.2.2.3 Prozeduren zur Qualitätskontrolle und -sicherung (QK/QS) und ausführliche Überprüfung der Treibhausgas-Inventare

1.2.2.3.1 Das Qualitätssystem Emissionsinventare

Im QSE werden die Anforderungen der 2006 *IPCC Guidelines (Vol.1, Kapitel 6)*, die nationalen Gegebenheiten in Deutschland sowie die internen Strukturen und Abläufe der berichterstattenden Institution UBA berücksichtigt. Das QSE ist in seinen Verfahrensabläufen soweit flexibel gestaltet, dass auch zukünftige veränderte Anforderungen routinemäßig berücksichtigt werden können. Der Geltungsbereich des QSE umfasst den gesamten Prozess der Emissionsberichterstattung.

Das QSE umfasst alle Teilnehmer des NaSE. Im Umweltbundesamt wurde die Verbindlichkeit über die UBA-Hausanordnung 11/2005 hergestellt. Einzelheiten bezüglich der Regelung der Verbindlichkeit für andere NaSE-Teilnehmer können dem Anhang 5.1.1 entnommen werden.

1.2.2.3.1.1 Hausanordnung 11/2005 des UBA

Im Jahr 2005 hat das Umweltbundesamt über die Hausanordnung 11/2005 ein Qualitätssystem Emissionsinventare im Umweltbundesamt installiert, das die erforderlichen Rahmenbedingungen für die Einhaltung einer guten Inventarpraxis und die Durchführung einer routinemäßigen Qualitätssicherung schafft. Es entspricht den Anforderungen der 2006 *IPCC Guidelines (Vol.1, Kapitel 6)* und ist den nationalen Gegebenheiten in Deutschland sowie den internen Strukturen und Abläufe der berichterstattenden Institution UBA angepasst. Mit der Hausanordnung 11/2005 wurden verbindliche Zuständigkeitsregelungen innerhalb des UBA, die Terminkette bei der Erstellung der Inventare und die durchzuführenden Prüfhandlungen zur Qualitätskontrolle und -sicherung festgeschrieben.

Mit der Hausanordnung erfolgte die nach Paragraph 20 der *Reporting Guidelines* (24/CP.19) geforderte prozedurale Festlegung und die nach Paragraph 23 (a) erforderliche Festlegung spezifischer Verantwortlichkeiten auf der Amtsebene.

1.2.2.3.1.2 Mindestanforderungen an ein System zur Qualitätskontrolle und –sicherung

Die Anforderungen an das System zur Qualitätskontrolle und Qualitätssicherung (QK/QS-System) und an die Maßnahmen zur Qualitätskontrolle und Qualitätssicherung werden im Wesentlichen durch das Kapitel 6 der 2006 *IPCC Guidelines (Vol.1)* definiert.

Aus den vormals geltenden *Good Practice Guidance* (Kapitel 8) wurden bereits 2007 vom UBA „Allgemeine Mindestanforderungen an die Qualitätskontrolle und Qualitätssicherung bei der Treibhausgasemissionsberichterstattung“ abgeleitet (siehe Anhang 5.1.2). Für die externen Teilnehmer des Nationalen Systems ist die Übernahme der Mindestanforderungen, nach Beschlussfassung über diese Mindestanforderungen durch die Vertreter der beteiligten Bundesministerien im Koordinierungsausschuss des Nationalen Systems Emissionsinventare (siehe Anhang 5.1.1erfolgt.

Weiterführende Informationen, welche organisatorischen Festsetzungen im UBA die Voraussetzung für die Umsetzung dieser Anforderungen bilden, können den folgenden Kapiteln und in Ergänzung hierzu dem Anhang 5.1.2.1.11 entnommen werden.

1.2.2.3.1.3 Aufbauorganisation des Qualitätssystems Emissionsinventare

Im Rahmen des QSE wurde ein Konzept zur Aufbauorganisation entwickelt, dass die Zuständigkeiten für die Umsetzung der erforderlichen QK und QS-Maßnahmen verbindlich für das UBA festlegt. Die festgelegten Rollen und Verantwortlichkeiten sollen einen effektiven Informationsaustausch und die anforderungskonforme Durchführung der QK und QS sicherstellen (siehe folgende Tabelle).

Tabelle 6: QSE - Rollen und Verantwortlichkeiten

Rolle	Aufgabe	Verantwortlich
Fachverantwortlicher auf operativer Ebene (FV)	• Erstellung von Teilen des Nationalen Inventarberichts (NID) • Datengewinnung und Dateneingabe in das ZSE und Berechnung entsprechend der gewählten/vorgegebenen Methoden • Durchführung von systematischen QK-Maßnahmen in NID, ZSE und Inventarbeschreibung • Durchführung von Verifikationsmaßnahmen • Archivierung aller kategoriespezifischen Inventar-informationen (Inventarbeschreibung und dezentrale Dokumentation) • Wenn erforderlich (für kategoriespezifische QK): Festlegung von kategoriespezifischen Qualitätszielen und den Kriterien ihrer Zielerreichung in Abstimmung mit dem QK-Verantwortlichen, dem Fachlichen Ansprechpartner und dem QSEK. • Prüfung, Aufbereitung und Beantwortung von Review-ergebnissen • Aktive Teilnahme bei Reviewprozessen. Dies umfasst das Halten von Vorträgen, geben von Erläuterungen und die Erreichbarkeit für Nachfragen (im Vorfeld, während dessen und im Nachgang). • Initiierung, Ausarbeitung (Leistungsbeschreibung) und fachliche Begleitung von FE-Projekten	Alle vom Fachgebietsleiter (FGL) kategorie-spezifisch benannten Mitarbeiter
QK/QS-Verantwortlicher für das Fachgebiet (QKV)	• Durchführung von systematischen Maßnahmen zur Sicher-stellung der Qualität der an die Nationale Koordinierungs-stelle zu liefernden Daten und Berichtsteile • Freigabe der Daten und Berichtsteile • Sicherstellung dass die erforderlichen Inventararbeiten, Qualitätskontrollen sowie die Dokumentation und Archivierung erfolgt sind • Festlegung von fachlichen Verantwortlichkeiten zur Emissionsberichterstattung im Fachgebiet und Bereitstellung der notwendigen zeitlichen Ressourcen • Unterstützung und Teilnahme bei Reviewprozessen	Alle zuständigen FGL
Fachliche Ansprechpartner (kategoriespezifisch) in der Nationalen Koordinierungsstelle (FAP)	Kategoriespezifische Betreuung von FV und QKV Unterstützung/Anleitung der FV/QKV bei der: • Umsetzung der internationalen Anforderungen • fachlichen Zuarbeit von Daten und Berichtstexten • Qualitätskontrolle/Qualitätssicherung: ➢ Erstellung fehlender Teile des Nationalen Inventar-berichts (NID) ➢ Gewinnung und Eingabe fehlender Daten in das ZSE und Berechnung entsprechend der gewählten/vorgegebenen Methoden ➢ Sicherstellung dass die erforderlichen Inventararbeiten, Qualitätskontrollen sowie die Dokumentation und Archivierung erfolgt sind ➢ Durchführung von systematischen QK-/QS-Maßnahmen in NID, ZSE und Inventarbeschreibung ➢ Archivierung fehlender kategorie-spezifischer Inventarinformationen (Inventarbeschreibung und dezentrale Dokumentation) • Initiierung und Begleitung von FE-Projekten • Durchführung sämtlicher Arbeiten mit dem CRT-Reporter und Qualitätskontrolle • Übernahme der Aufgaben von abwesenden FV bzw. bei nicht besetzten Stellen • Prüfung, Aufbereitung und tlw. Beantwortung von Reviewergebnissen • Unterstützung, Begleitung, Teilnahme und tlw. Übernahme von FV-Aufgaben bei Reviewprozessen • Durchführung von Kategorieübergreifenden Arbeiten • Wenn erforderlich (für kategoriespezifische QK): Festlegung von kategoriespezifischen Qualitätszielen und den Kriterien ihrer Zielerreichung in Abstimmung mit dem QK-Verantwortlichen dem FAP und dem QSEK.	kategoriespezifisch benannte Mitarbeiter aus der Nationalen Koordinierungsstelle
Berichtskoordinator (NIRK)	• Koordination von textlichen Zuarbeiten • Erstellung des NID aus den einzelnen Zuarbeiten • Übergreifende QK und QS für den NID und in Teilen auch Abgleich mit den CRF	Ein benannter Mitarbeiter aus der Nationalen Koordinierungsstelle
ZSE-Koordinator (ZSEK)	• Übergreifende QK und QS bei der Eingabe und Berechnung des Inventars (Daten) • Sicherstellung der Integrität der Datenbanken und der Berichtstabellen (Common Reporting Tables (CRT)) • Emissionsberechnung und Aggregation zu Berichtsformaten • Unterstützung der Facheinheiten bei Fragen zum ZSE und zu den Berichtstabellen • Bestimmung der Unsicherheiten (nach Approach 2) mittels Monte Carlo Simulation	Ein benannter Mitarbeiter der nationalen Koordinierungsstelle
QSE-Koordinator (QSEK)	• Übergreifende QK und QS im gesamten Berichterstattungsprozess • Aufrechterhaltung und Fortentwicklung des QSE • Pflege und Fortschreibung von QK-, QS-Plan, QK-Checklisten und QSE-Handbuch • Federführung für Pflege und Fortschreibung Inventarplan sowie Verbesserungsplan	Ein benannter Mitarbeiter aus der Nationalen Koordinierungsstelle

Rolle	Aufgabe	Verantwortlich
	• Wenn erforderlich (für kategoriespezifische QK): Festlegung von kategoriespezifischen Qualitätszielen und den Kriterien ihrer Zielerreichung in Abstimmung FV, QK-Verantwortlichen und dem FAP.	

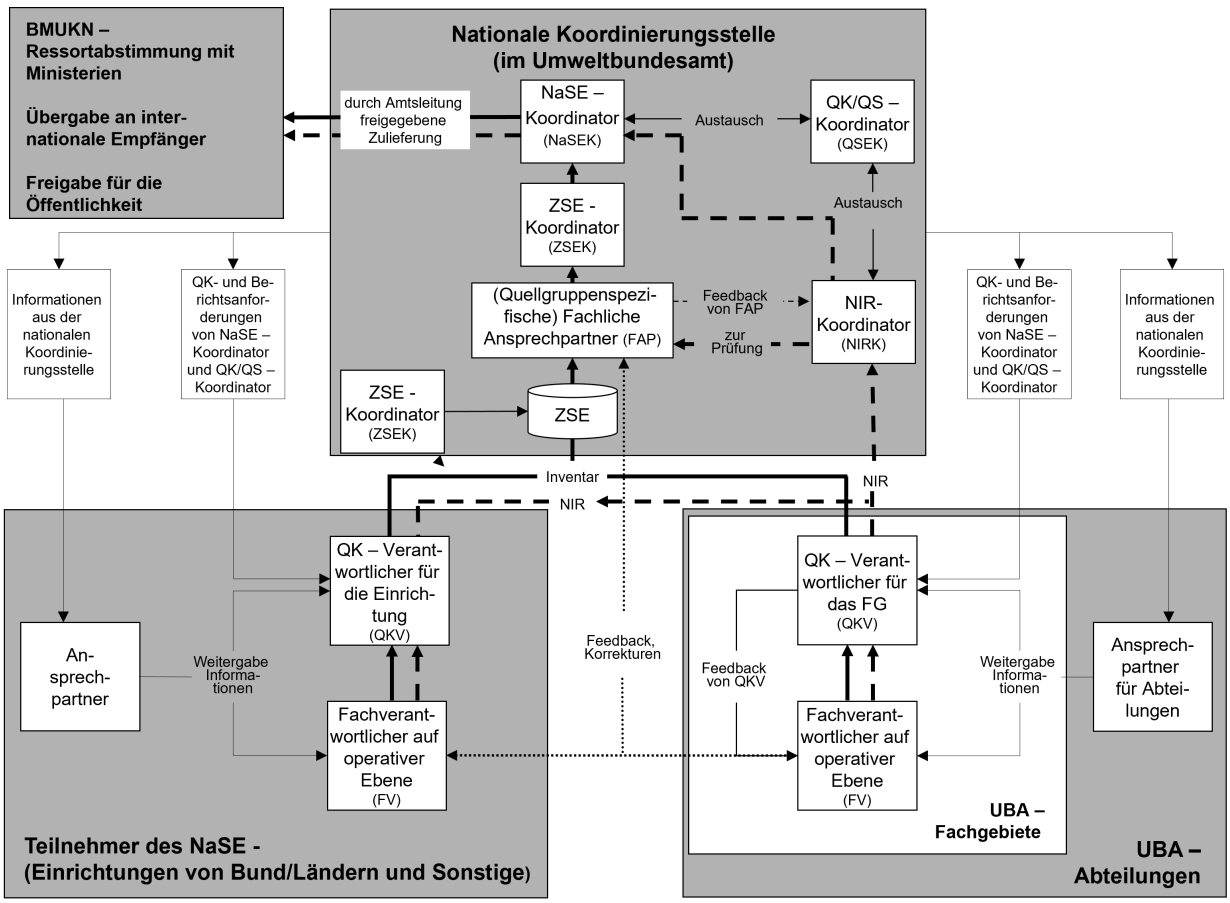
In sehr seltenen Ausnahmefällen kann es vorkommen, dass im UBA die Rolle des Fachverantwortlichen auf operativer Ebene (FV) für eine Kategorie nicht besetzt werden kann. In einem solchen Fall wird das Rollensystem des QSE vollständig von der Nationalen Koordinierungsstelle übernommen, indem es die Rollen des FV, des FAP und des QKV bereitstellt - durch jeweils unterschiedliche Personen.

Nur für den Fall, dass eine Kategorie seitens ihres Beitrags zu den Gesamtemissionen von außerordentlich geringer Relevanz ist, wird dieses Rollenkonzept aus Ressourcengründen vereinfacht. In diesem Fall stellt die Nationale Koordinierungsstelle die Rollen des FV und des QKV. Im Gegenzug wird für die betroffenen Quellgruppen in regelmäßigen Abständen eine von extern durchgeführte Qualitätssicherung durchgeführt. Die beschriebene Situation und Vorgehensweise ist derzeit nicht in Anwendung.

1.2.2.3.1.4 Ablauforganisation des Qualitätssystems Emissionsinventare

Der Ablauf der QK- und QS-Maßnahmen im QSE richtet sich am Prozess der Emissionsberichterstattung aus, wie er in Kapitel 1.2.2.4 beschrieben wird. Dabei ist das Qualitätsmanagement direkt mit den Arbeitsschritten in der Inventararbeit verzahnt. Jedem Schritt im Prozessablauf der Inventarerstellung wurden geeignete QK-Maßnahmen zugeordnet, die den einzelnen Akteuren zugewiesen sind (siehe folgende Abbildung).

Abbildung 5: QSE - Rollen Aufgaben und Arbeitsabläufe



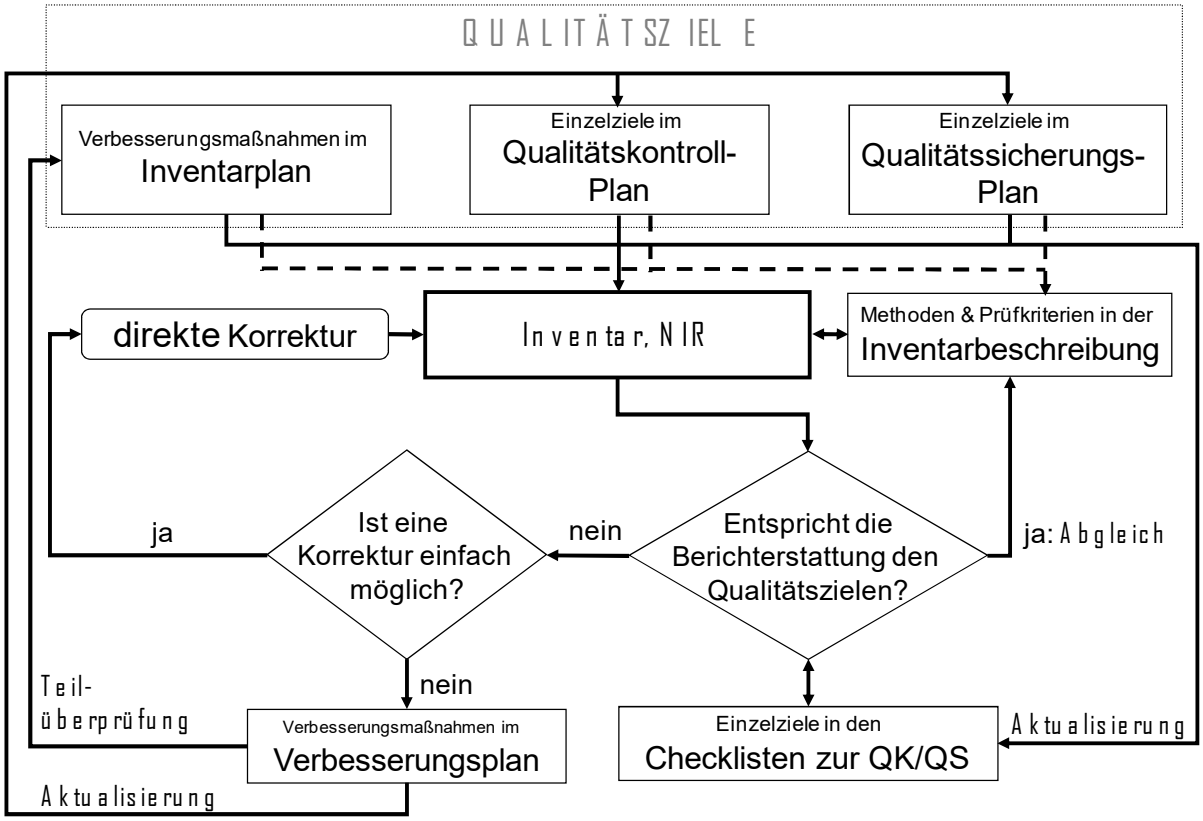
Quelle: eigene Darstellung, UBA

Die durchzuführenden Qualitäts-Prüfungen gemäß Paragraph 25 (f) der *Reporting Guidelines* (24/CP.19) werden den FV, QKV, FAP und dem NIRK (siehe Tabelle 6) in Form von Qualitäts-Checklisten zusammen mit der Datenanforderung zur Verfügung gestellt und im Verlauf der Zuarbeiten ausgefüllt.

1.2.2.3.1.5 Durchführung von QK/QS-Maßnahmen sowie deren Steuerung und Dokumentation im Qualitätssystem Emissionsinventare

Die mit den Mindestanforderungen an ein QK/QS-System (siehe Anhang 5.1.2.1) formulierten Anforderungen zur Durchführung, Beschreibung und Dokumentation der QK/QS-Maßnahmen werden weitgehend gemeinsam mit den entsprechenden Inventarbeiträgen umgesetzt. Für das QSE wurde ein Konzept entwickelt, das zielgruppenorientiert und aufgabenspezifisch die Maßnahmen in integrierter Form darstellt. Die einzelnen Bestandteile sind in (einer bezüglich Inventarplan und Qualitätskontrollplan; siehe hierzu auch Kapitel 1.5.1.1 geringfügig vereinfachten) Abbildung 6 dargestellt.

Abbildung 6: Steuerung und Dokumentation von QKQS-Maßnahmen



Quelle: eigene Darstellung, UBA

Die allgemeine Beschreibung der Qualitätsziele erfolgt im QSE-Handbuch und leitet sich aus den 2006 *IPCC Guidelines (Vol.1, Kapitel 6)* ab. Darüber hinaus sind für die einzelnen Kategorien operative Einzelziele zur Qualitätskontrolle und Qualitätssicherung aus dem Vergleich zwischen den Anforderungen aus den 2006 *IPCC Guidelines*, den Ergebnissen der unabhängigen Inventarüberprüfung, den im NID gemeldeten Verbesserungsnotwendigkeiten und der Inventarrealität abzuleiten.

Gemäß den Anforderungen der IPCC 2006 *IPCC Guidelines (Vol.1, Kapitel 6)* und Paragraph 19 der *Reporting Guidelines* (24/CP.19) sollen die für die Emissionsberichterstattung notwendigen QK/QS-Maßnahmen in einem QK/QS-Plan zusammengefasst werden. Dabei ist die primäre Aufgabe eines QK/QS-Plans, diese Maßnahmen zu organisieren, zu planen und zu überwachen.

Um die Durchführung und Kontrolle von Maßnahmen zur Erreichung der Qualitätsziele transparent und effektiv zu steuern, sind sie im Qualitätskontrollplan (QK-Plan) und Qualitätssicherungsplan (QS-Plan) rollenspezifisch sowie kategoriespezifisch vorgegeben. Dabei können die Qualitätsziele das Inventar, den Prozess der Berichterstattung oder das QSE selbst zum Gegenstand haben. Im Qualitätssicherungsplan erfolgt zusätzlich die zeitliche Planung von Qualitätssicherungs-maßnahmen, die sowohl durch interne, im Wesentlichen aber durch unabhängige und externe Dritte vorgenommen werden. Beide Pläne haben den Charakter eines Vorgabedokuments.

In ihrer Struktur sind QK- und QS-Plan mit den Checklisten zur Qualitätskontrolle und Qualitätssicherung kombiniert, die zur Überprüfung und Dokumentation der erfolgreichen Durchführung der QK/QS dienen. Hierbei sind die Qualitäts-Checks nicht als Prüfungen sondern als Qualitätsziele (*data quality objective* gemäß 2006 IPCC GL, Vol. 1, Kapitel 6.5) definiert, deren Einhaltung jeweils zu bestätigen oder deren Nichteinhaltung zu begründen ist. Die Checklisten zur QK/QS sind von den Teilnehmern des NaSE[13] parallel zur Inventarerstellung auszufüllen und dienen zum einen der sofortigen Verbesserung. Falls eine sofortige Verbesserung aber nicht möglich ist, geben sie stattdessen wichtige Auskunft über die Güte der dem Inventar zugrunde liegenden Daten, Methoden und Texte). Die systematische QK/QS in Form von Checklisten wurde vom UBA erstmalig für die Berichterstattung 2006 mit den Teilnehmern des NaSE durchgeführt. Seitdem werden die Checklisten der allgemeinen Qualitätskontrolle in jedem Berichtsjahr und für alle berichteten Kategorien ausgefüllt, also sowohl für Hauptkategorien, als auch für solche, die dies nicht sind. Seit der Berichterstattung 2007 sind die Checklisten in elektronischer Form im Einsatz. Ebenfalls mit der Berichterstattung 2007 wurden die allgemeinen QK-Prüfungen (ehemals Tier 1) um einige kategoriespezifische QK-Prüfungen (ehemals Tier 2), bezogen auf Hauptkategorien, erweitert. Mit den Berichterstattungen 2008, 2009 und 2010 wurden die Checklisten für die Fachexperten und die fachlichen Ansprechpartner umfassend überarbeitet. Ziel der Überarbeitung war es, die Verständlichkeit, Anwendbarkeit und Übersichtlichkeit der Checklisten weiter zu verbessern. Um den Erfolg dieser Verbesserungsaktivität zu gewährleisten wurde eine Auswahl des betroffenen Personenkreises in die Überarbeitung einbezogen. Inhaltliche Anforderungen, sind dabei nicht verändert worden. Die CHKL werden seitdem jährlich auf etwaigen Aktualisierungsbedarf überprüft und ggf. überarbeitet oder ergänzt. Im gleichen Maße wie die Checklisten werden auch QK- und QS-Plan kontinuierlich weiterentwickelt. Mit Berichterstattung 2013 wurden erstmalig die vormals kategoriespezifischen Checklisten der QKV auf eine einzelne übergeordnete Checkliste je QKV umgestellt. Dies geschah im Wesentlichen um die Übersichtlichkeit über den QK/QS-Prozess für das Führungspersonal zu verbessern/erleichtern und aus Gründen der Ressourceneffizienz.

Mit der Berichterstattung 2015 wurden sichergestellt, dass die allgemeinen Checklisten die überarbeiteten Anforderungen der 2006 *IPCC Guidelines (Vol.1, Kapitel 6)* erfüllen. Fehlende Anforderungen wurden ergänzt.

Beide Pläne und die QK/QS-Checklisten stellen Instrumente zur Überprüfung der Erfüllung der internationalen Anforderungen dar und ermöglichen die Steuerung der Inventarqualität über die Initiierung von Maßnahmen zur Qualitätssicherung gemäß Paragraph 13 der *Guidelines for National Systems*.

Im Verbesserungsplan werden zunächst alle erkannten Verbesserungsmöglichkeiten (aus Checklisten, NID-Angaben zu geplanten Verbesserungen, ggf. Auditergebnissen sowie sonstigen Verbesserungsnotwendigkeiten) und zusätzlich die Beanstandungen aus den Ergebnissen der

[13] Hierzu gehören Fachverantwortliche (FV), Fachliche Ansprechpartner (FAP), Qualitätskontrollverantwortliche (QKV) und der NIRK (Koordinator für den Nationalen Inventar Report)

unabhängigen Inventarüberprüfung gesammelt und mit möglichen Korrekturmaßnahmen hinterlegt. Diese Korrekturmaßnahmen werden durch die Nationale Koordinierungsstelle kategorisiert, mit Prioritäten versehen und in Rücksprache mit den Fachverantwortlichen in der Regel vollständig in den Inventarplan überführt. Dort werden sie mit Terminen und Verantwortlichkeiten hinterlegt. Der Inventarplan durchläuft als Anhang des NID den Abstimmungs- und Freigabeprozess und stellt somit ein verbindliches Vorgabedokument für die im kommenden Berichtsjahr umzusetzenden Verbesserungsmaßnahmen dar.

Die Inventarbeschreibung wird in der Nationalen Koordinierungsstelle als zentrale Dokumentation für die einzelnen Kategorien geführt. In ihr werden alle wesentlichen Aspekte der Inventarerstellung beschrieben. Alle kategoriespezifischen Arbeiten, die relevant für die Inventarerstellung sind, sind hierin zu dokumentieren. Die Inventarbeschreibung besteht aus einem serverbasierten Ordnersystem, das sowohl auf mobilen Geräten, als auch auf den Arbeitsplatzrechnern der im Rahmen der Emissionsberichterstattung tätigen Personen verfügbar ist. Die Pflicht zur Erstellung der beschriebenen Dokumentationen wurde über eine Hausanordnung (siehe Kapitel 1.2.2.3.1.1) im UBA festgeschrieben und bildet die wesentliche Grundlage für die Archivierung der Inventarinformationen gemäß den Anforderungen aus Paragraph 27 (a) der *Reporting Guidelines* (24/CP.19).

- Aus vielfältigen Gründen sieht das Dokumentationskonzept, ein überwiegend, aber nicht ausschließlich zentrales Archiv vor. Ausschlaggebend für diese Entscheidung waren der umfangreiche und teilweise dezentrale Datenbestand, auf dessen Grundlage das deutsche Inventar berechnet wird,
- die teilweise externen Zuständigkeit für diese Daten,
- Aspekte der Geheimhaltung, die aus rechtlichen Gründen einer Weitergabe von Einzeldaten zum Zwecke der Archivierung an einer zentralen Stelle entgegenstehen.

In der Inventarbeschreibung werden Informationen vorgehalten, wo solche nicht zentral hinterlegten Dokumente zu finden sind.

1.2.2.3.1.6 Das QSE-Handbuch

Mit dem „Handbuch zur Qualitätskontrolle und Qualitätssicherung bei der Erstellung von Emissionsinventaren und der Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen sowie der EU Entscheidung 525/2013/EG“ wurden die internationalen Anforderungen an die Qualitätskontrolle und Qualitätssicherung bei der Emissions-berichterstattung für das Nationale System Emissionsinventare (NaSE) in Deutschland spezifiziert. Es gilt verbindlich für das Umweltbundesamt und beschreibt das Qualitätssystem Emissionsinventare (QSE).

Das QSE-Handbuch wurde über eine Hausanordnung im Umweltbundesamt in Kraft gesetzt (siehe Kapitel 1.2.2.3.1.1). Es ist mit seinen mitgeltenden Unterlagen im Intranet des UBA veröffentlicht.

1.2.2.3.1.7 Unterstützung UNFCCC-Review

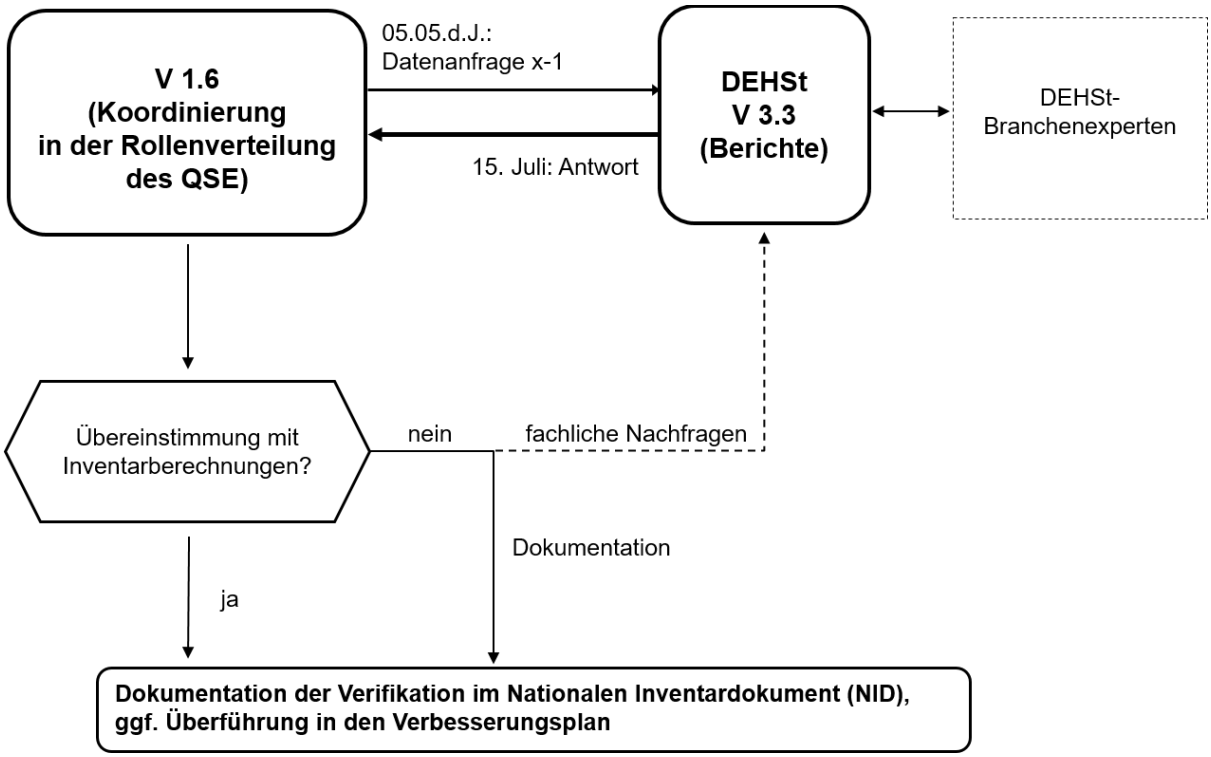
Neben den eigenen Maßnahmen der Qualitätskontrolle und -sicherung geben die Ergebnisse des UNFCCC-Review wichtige Impulse für die Inventarverbesserung. Insofern liegt die Erfüllung der Anforderungen zur Bereitstellung archivierter Inventarinformationen für den Überprüfungs-prozess (gemäß Paragraph 27 (b) der *Reporting Guidelines* (24/CP.19)) und der Beantwortung von Fragen der sachkundigen Überprüfungsgruppen (gemäß Paragraph 27 (c) der *Reporting Guidelines* (24/CP.19)) im Eigeninteresse der Nationalen Koordinierungsstelle. Mit entsprechender Priorität wurden diese Aspekte bei der Konzeption des QSE berücksichtigt.

1.2.2.3.1.8 Nutzung der Monitoring-Daten des Europäischen Emissionshandels zur Verbesserung der THG-Emissionsinventare

Für Kategorien, die berichtspflichtige Anlagen unter dem CO_2-Emissionshandelsregime (ETS) beinhalten, werden die Monitoring-Daten des Europäischen Emissionshandels zur Qualitätsverbesserung der jährlichen nationalen Emissionsinventare genutzt.

Durchgeführte Vergleiche haben die Nutzbarkeit zur Verifizierung einzelner Kategorien und Identifikation von Fehlstellen prinzipiell bestätigt. Für die regelmäßige Nutzung wurde für den jährlich erforderlichen Datenaustausch ein formalisiertes Verfahren mit terminlichen und ablaufmäßigen Festlegungen vereinbart. Zu Details der Datenverwendung in der QK/ QS siehe auch Kapitel 1.5.2.1.

Abbildung 7: Verfahrensablauf für die jährliche Inventar-Verifikation mit ETS-Monitoring-Daten



Quelle: eigene Darstellung, UBA

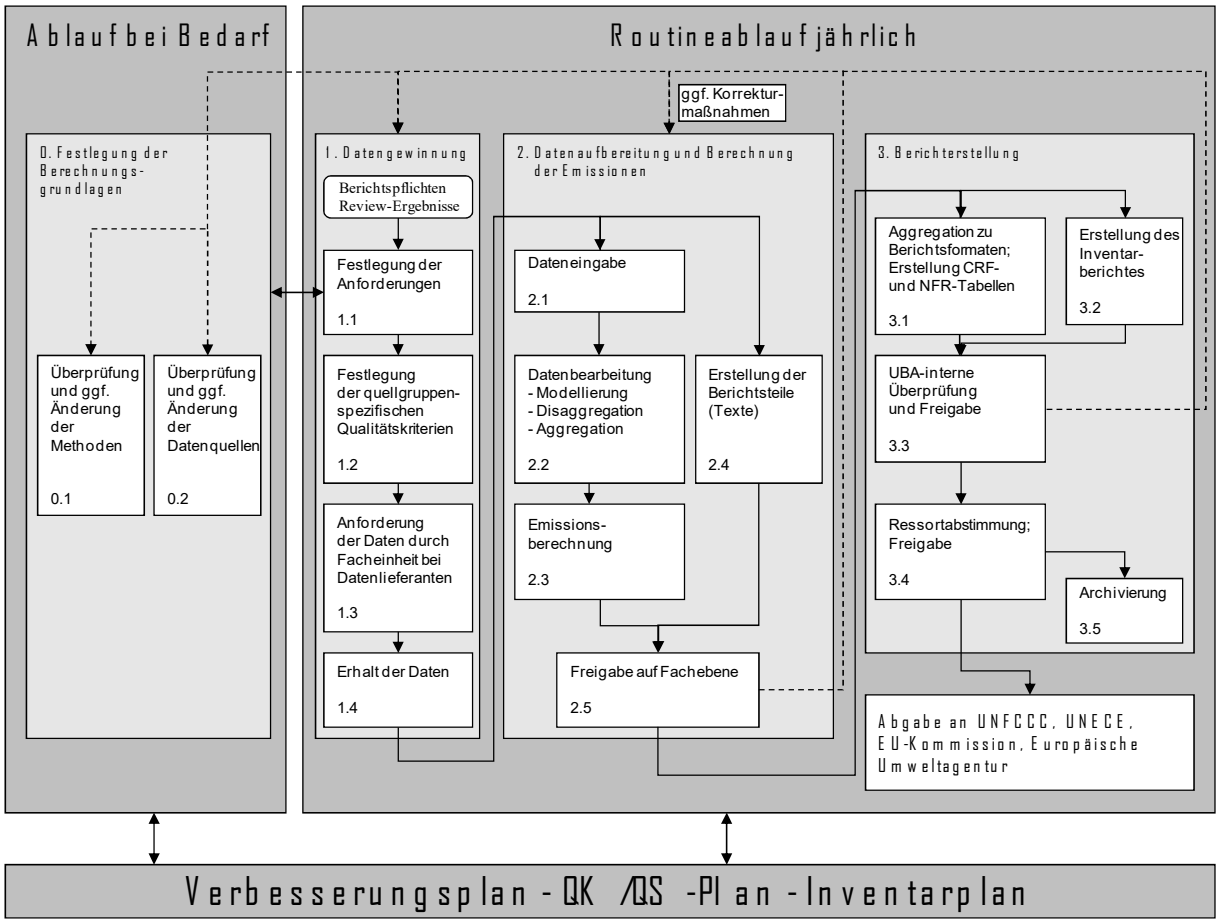
1.2.2.4 Übersicht der Inventarerstellung und –management

Bei der Emissionsberichterstattung handelt es sich um einen regelmäßig jährlich ablaufenden Vorgang, der allerdings, da dezentral und von verschiedenen Personen durchgeführt, für verschiedene Teile des Inventars unterschiedlich sein kann. Vor der Einführung des QSE (im Jahre 2005) wurde dieser Prozess daher intensiv untersucht und analysiert. Im Ergebnis unterscheidet das QSE im Gesamtprozess der Emissionsberichterstattung die folgenden Hauptprozesse, die in Kapitel 1.2.2.2 näher erläutert werden:

- Festlegung der Berechnungsgrundlagen,
- Datengewinnung,
- Datenaufbereitung und Emissionsberechnung sowie die
- Berichterstellung.

Die Hauptprozesse untergliedern sich in Teilprozesse gemäß der folgenden Abbildung.

Abbildung 8: Übersicht über den Prozess der Emissionsberichterstattung



Quelle: eigene Darstellung, UBA

Es hat sich gezeigt, dass sich der Ablauf der Inventarplanung und -erstellung auf die Qualität der Inventare auswirken kann. Die Reihenfolge des Vorgehens ist somit nicht unwesentlich für die Inventarqualität. Der Prozess der Inventarerstellung erfolgt auch aus diesem Grund in enger Verzahnung mit der Durchführung von Maßnahmen der Qualitätskontrolle und -sicherung. Jedem Teilprozess wurden hierfür geeignete QK/QS-Maßnahmen zugewiesen, um bei der Qualitätsprüfung nicht nur die Endqualität der Inventardaten sicherzustellen, sondern diese bereits auf dem Wege dorthin zu gewährleisten. Auf diese Weise können auch periodische interne Evaluationen des Prozesses der Inventarerstellung nach Paragraph 26 der *Reporting Guidelines (*24/CP.19) durchgeführt werden.

Der Ablauf inklusive der QK/QS-Maßnahmen deckt die Anforderungen des Paragraphen 21 (b) der *Reporting Guidelines* (24/CP.19) an die Inventarerstellung ab.

Der Ablauf der Inventarerstellung ist detailliert im Kapitel 1.2.2 beschrieben.

1.2.3 Archivierung von Informationen

Die Archivierung der für die Erstellung der Inventarberichterstattung genutzten Informationen, sowie deren Ergebnisse, inklusive ggf. notwendiger Erläuterungen, findet im Wesentlichen auf Basis der sog. Inventarbeschreibung statt. Relevante Informationen zur Inventarbeschreibung sind umfänglich in Kapitel 1.2.2.3.1.5 zu finden. Am Ende jeder Berichterstattung wird die Inventarbeschreibung mittels frei verfügbarer Software archiviert (.zip) und auf ein separates Serverlaufwerk verschoben. Ein lesender Zugriff auf das Archiv ist jederzeit möglich. Ergänzend werden die von den Fachexperten zugelieferten Textbausteine sowie die zugehörigen

QKQS-Checklisten des QSE in einem separaten elektronischen Vorgangsbearbeitungssystem des UBA von den Fachverantwortlichen (FV), den Fachlichen Ansprechpartnern (FAP) sowie den QK/QS-verantwortlichen (siehe Tabelle 3: QSE - Rollen und Verantwortlichkeiten des QSE, Kapitel 1.2.2.3.1.3) freigegeben und archiviert.

1.2.4 Verfahren für die offizielle Prüfung und Genehmigung des Inventars

Die offizielle Prüfung und Genehmigung des Inventars finden in Deutschland, neben den Aktivitäten im Rahmen des QSE (siehe Kapitel 1.2.2.3) in einem zweistufigen Verfahren auf der Ebene des Umweltbundesamtes und der beteiligten Ressorts der Bundesregierung statt (Kapitel 1.2.4.1).

Der gesamte Prozess der Inventarerstellung, Prüfung und Genehmigung des Inventars, Übermittlung an die UNFCCC und die Inventarüberprüfung ist in einem sich jährlich wiederholenden Terminplan festgelegt (Kapitel 1.2.4.1).

1.2.4.1 Verfahren der UBA-internen Prüfung und Verbindlicher Terminplan im Rahmen der Erstellung der Emissionsinventare

Der verbindliche Zeitplan für die Erstellung der Emissionsinventare und des NID wird allen internen und externen Akteuren über die Intranet-Seite des UBA und durch Veröffentlichung im NID bekannt gemacht. Die nachfolgenden Termine können kalenderbedingt um 1-2 Tage variieren und weichen für Zulieferungen fertiger Energiedaten für die Inventare ab, um weitgehende Konsistenz mit der Energieberichterstattung an EUROSTAT und IEA herzustellen:

15. Mai	Anforderung zur Daten und Berichtstextlieferung durch die Nationale Koordinierungsstelle im UBA an die Fachverantwortlichen
31. Juli	Zulieferung der Energiedaten der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, der statistischen Daten des Statistischen Bundesamtes und der Daten aus den Vereinbarungen mit Verbänden und Unternehmen, die Grundlage für weiterführende Berechnungen sind
bis 01. September	Zulieferungen fertiger Inventardaten aus dem UBA und externer Einrichtungen des NaSE
ab 02. September	Validierung / Rücksprachen der Zulieferungen der Fach- und Qualitätsverantwortlichen unter Berücksichtigung der Überprüfungsergebnisse
30. September	Zulieferungen der Energiedaten zu stationären Anlagen Inventare in Zeitreihe von 2003-2024 an ZSE
bis 01. Oktober	Erste Emissionsberechnungen und Erstellung der nationalen Trendtabellen, Endredaktion durch die Nationale Koordinierungsstelle im UBA
ab 01. Oktober	Validierung / Rücksprachen der Zulieferungen zu den Energiedaten zu stationären Anlagen der Fach- und Qualitätsverantwortlichen unter Berücksichtigung der Überprüfungsergebnisse
06 November	Hausabstimmung UBA
ab 17. November	Abschließende Qualitätssicherung durch QSE-, ZSE- und NID-Koordinator
25. November	Bericht der Nationalen Koordinierungsstelle zur Einleitung der Ressortabstimmung für die Emissionsdaten und den Nationalen Inventarbericht an das BMUKN

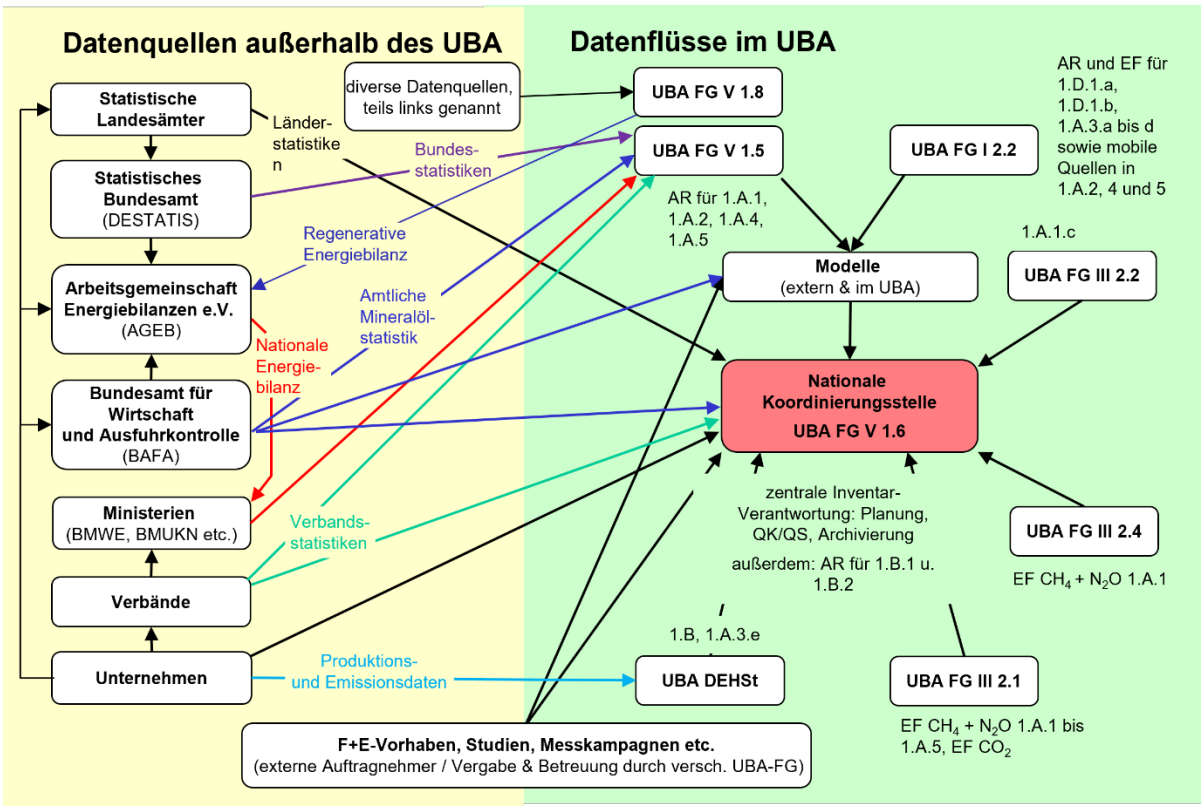
bis 20. Dezember	Freigabe durch Ressortabstimmung (Einleitung durch BMUKN)
ab 02. Januar	Endredaktion durch die Nationale Koordinierungsstelle im UBA
15. Januar	Bericht (CRT und bestimmte Teile des NID) an die Europäische Kommission (im Rahmen des CO_2 Monitoring Mechanismus) und die Europäische Umweltagentur
15. März	Bericht (korrigierte CRT und vollständiger NID) an die Europäische Kommission (im Rahmen des CO_2 Monitoring Mechanismus) und die Europäische Umweltagentur
15. April	Bericht an das Klimasekretariat
Mai	Initial Check durch das Klimasekretariat
September - Oktober	Inventarüberprüfung durch das Klimasekretariat

1.3 Allgemeine Beschreibung der angewandten Methodik und Datenquellen

1.3.1 Datenquellen

1.3.1.1 Energie

Abbildung 9: Verantwortlichkeiten und Datenfluss für die Berechnung der Treibhausgasemissionen im Energiebereich



Quelle: eigene Darstellung, UBA

Die zentrale Datenquelle für die Ermittlung der Aktivitätsraten für die Kategorie 1.A ist die „Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland“ (nachfolgend: Energiebilanz), die von der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB) herausgegeben wird und überwiegend auf den amtlichen Statistiken des Statistischen Bundesamtes fußt. Für die erneuerbaren Energien werden der AGEB die Daten für die Energiebilanz von der Arbeitsgruppe Erneuerbare-Energien-Statistik (AGEE-Stat) bereitgestellt. Die Energiebilanz bietet eine Übersicht über die

energiewirtschaftlichen Verflechtungen innerhalb der Bundesrepublik und erlaubt eine Aufteilung nach Energieträgern sowie nach deren Aufkommen, Umwandlung und Verwendung.

Die Beauftragung der AGEB für die Erstellung der Energiebilanzen erfolgte seit 2007 durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Im Rahmen von mehrjährigen Aufträgen wurde die AGEB vertraglich zur Anwendung der Mindestanforderungen zur Qualitätssicherung des Nationalen Systems Emissionen verpflichtet. Seit 2012 legt die AGEB einen Qualitätsbericht für die Energiebilanz vor (siehe Anhang 6.4.1) und erarbeitet einen Aktionsplan „Energiedaten Inventarverbesserung“ (s. Anhang 6.5). Seit dem Jahr 2023 erstellt die AGEB alle zwei Jahre Revisionen in der Zeitreihe für die Energiebilanzen. Hieraus resultierende Rückrechnungen wurden erstmals für die Berichterstattung 2024 durchgeführt.

Die wichtigste Datenquelle für die Ermittlung der Aktivitätsraten ist das Statistische Bundesamt, das auch die wesentliche Datenquelle für die Erstellung der Energiebilanzen darstellt. Für die Inventarerstellung wird die Fachserie 4 (Reihe 4.1.1 und Reihe 6.4) verwendet[14]. Ab dem Jahr 2018 sind die Daten über die Datenbank Genesis des Statistischen Bundesamtes ungefähr ein Jahr nach Datenerhebung verfügbar und bieten insbesondere eine feine Untergliederung des Verarbeitenden Gewerbes. Zur weiteren Differenzierung der Daten und für Detailfragen werden vom Statistischen Bundesamt Sonderauswertungen zur Verfügung gestellt. Für die Bilanzierung der Abfalldaten werden vom Statistischen Bundesamt Energiestatistiken sowie der Statistische Bericht Abfallentsorgung verwendet, der alle zwei Jahre veröffentlicht wird (Statistisches Bundesamt, 2022b).

Seit dem Jahr 2022 stellt das Statistische Bundesamt fast finale Energiedaten für das Vorjahr schon im August zur Verfügung, die auf Basis vorliegender Erhebungsdaten mittels eines sogenannten Imputationsverfahrens hochgerechnet wurden. Auf Basis dieser Daten kann eine wesentlich verbesserte vorläufige Energiebilanz für die Inventarerstellung durch die AGEB bereitgestellt werden. Die Verwendung dieser Daten ermöglicht es eine weitgehende Konsistenz mit der Energieberichterstattung an EUROSTAT und IEA herzustellen.

Für den Bereich Eisen und Stahl werden seit der Berichterstattung 2012 Daten der (Wirtschaftsvereinigung Stahl) genutzt, die u.a. den sogenannten „BGS-Bogen“ (Brennstoff-, Gas- und Stromwirtschaft der Hochofen-, Stahl- und Walzwerke sowie Schmiede-, Press- und Hammerwerke einschließlich der örtlich verbundenen sonstigen Betriebe (ohne eigene Kokerei)) der zum 31.12.2009 eingestellten „Fachserie 4, Reihe 8.1“ ersetzen sowie die vom Verband Wirtschaftsvereinigung Stahl (2025b) veröffentlichten monatlichen Produktionsmengen.

Als zusätzliche Datenquelle wird die Statistik der Kohlenwirtschaft, insbesondere deren jährliche Veröffentlichung "Der Kohlenbergbau in der Energiewirtschaft der Bundesrepublik Deutschland" genutzt. Weiterhin werden vom Bundesverband Braunkohle *(Debriv, 2025)* Sonderauswertungen zur genaueren Differenzierung der eingesetzten Rohbraunkohlen verwendet. Zusätzlich liefert DEBRIV die nötigen Daten zur Berechnung der Brennstoffeinsätze zur Braunkohlentrocknung.

Eine weitere Datenquelle sind die Mineralöl-Zahlen des Wirtschaftsverband Fuels & Energie (*en2x*), die Angaben zum Mineralölaufkommen und –verbrauch in Deutschland, differenziert nach verschiedenen Erzeugungs-, Umwandlungs- und Anwendungssektoren, enthalten. Die Statistik, die eine wesentliche Grundlage der nationalen Energiebilanz darstellt, wird nur wenige Monate nach Erhebung der Daten veröffentlicht..

[14] Überblick zu finden: https://www.destatis.de/DE/Service/Bibliothek/_publikationen-fachserienliste-4.html#149352

Die zur Energieerzeugung eingesetzten Mengen an Sekundärbrennstoffen (verbucht unter CRF 1.A.2) werden der Energiebilanz, dem Leistungsbericht des Verbandes der Papierindustrie und Berichten der Verbände der Zementindustrie (VDZ) und Kalkindustrie (BV Kalk) entnommen.

Eine weitere wichtige Datenquelle ist der Emissionshandel (ETS). Dort liegen sehr detaillierte, anlagenspezifische Daten vor, die ebenfalls für das Inventar verwendet werden. Vor allem für die Bereiche, die nicht von der nationalen Statistik erfasst werden, wird auf Emissionshandelsdaten zurückgegriffen:

- brennstoffbezogene CO_2-Emissionsfaktoren für stationäre Feuerungsanlagen,
- Brennstoffeinsätze für Erdgasverdichter,
- Emissionen aus dem Katalysatorabbrand und der Kalzinierung in Raffinerien und
- diffuse Emissionen in Kokereien.

Für die Erhebung der Emissionen des Verkehrs (1.A.3) werden neben den Angaben aus den Energiebilanzen und den Mineralöl-Zahlen des *en2x* auch die Amtlichen Mineralöldaten des Bundesamtes für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) verwendet.

Für den Flugverkehr kommen neben den oben genannten Quellen für Verbrauchsdaten u.a. auch Daten des Statistischen Bundesamtes zum Einsatz: Die Aufteilung der Kraftstoffverbräuche und Emissionen auf nationale und internationale Flüge erfolgt anhand realer Flugbewegungsdaten. Diese werden vom Statistischen Bundesamt erfasst und zur Verfügung gestellt und im Modell TREMOD AV, einem eigenständigen Modul der Datenbank TREMOD („Transport Emission Estimation Model“) weiterverarbeitet. Ebenfalls anhand der vom Statistischen Bundesamt erfassten Flugbewegungen erfolgt die Aufteilung von Verbräuchen und Emissionen auf die Flugphasen LTO-Zyklus (Landung und Start; unterhalb 3.000 Fuß) sowie Reiseflug (oberhalb 3.000 Fuß).

Lediglich zu Verifikationszwecken werden zudem von Eurocontrol bereitgestellte landesspezifische Verbrauchs- und Emissionsdaten herangezogen.

Für den Straßenverkehr werden die Erhebungen dabei überwiegend mit Hilfe des Modells TREMOD durchgeführt. Für die hier stattfindenden Berechnungen werden zahlreiche Basisdaten aus allgemein zugänglichen Statistiken und speziellen Untersuchungen verwendet, aufeinander abgestimmt und ergänzt. Eine genaue Beschreibung der Datenquellen zu den Emissionsfaktoren findet sich im „Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs“ (HBEFA, Version 4.1).

TREMOD wird dabei ebenfalls zur Modellierung der Emissionen aus der Verbrennung von Kraftstoffen in Schienenfahrzeugen und Binnenschiffen verwendet. Die durch historische Dampfbahnen verursachten Emissionen aus der Verbrennung von Kohle und Koks werden außerhalb TREMOD anhand von Betreiberangaben berechnet.

Im Gegensatz dazu erfolgt die Modellierung der spezifischen Verbräuche und Emissionen des von deutschen Seehäfen ausgehenden Schiffsverkehrs innerhalb eines am Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) entwickelten Modells. Die Aufteilung der Kraftstoffverbräuche und Emissionen auf nationale und internationale Fahrten basiert hier auf Daten, die sich u.a. aus den AIS-Meldungen der Schiffe ableiten.

Hinsichtlich der weiteren mobilen Quellen (in 1.A.4. und 1.A.5.) wird ebenfalls auf die Angaben von AGEB, BAFA sowie MWV zurückgegriffen. Eine Sonderstellung nimmt hier der militärische Verkehr (1.A.5.b) ein, für den die ab 1995 nicht mehr in den Energiebilanzen ausgewiesenen Verbrauchsdaten direkt den BAFA-Statistiken entnommen werden können.

Da gesicherte Angaben zum Einsatz von Biokraftstoffen in mobilen Quellen in Bau-, Land- und Forstwirtschaft sowie Haushalten und Militär fehlen, werden die jährlichen Mengen anhand der offiziellen Beimengungsraten berechnet.

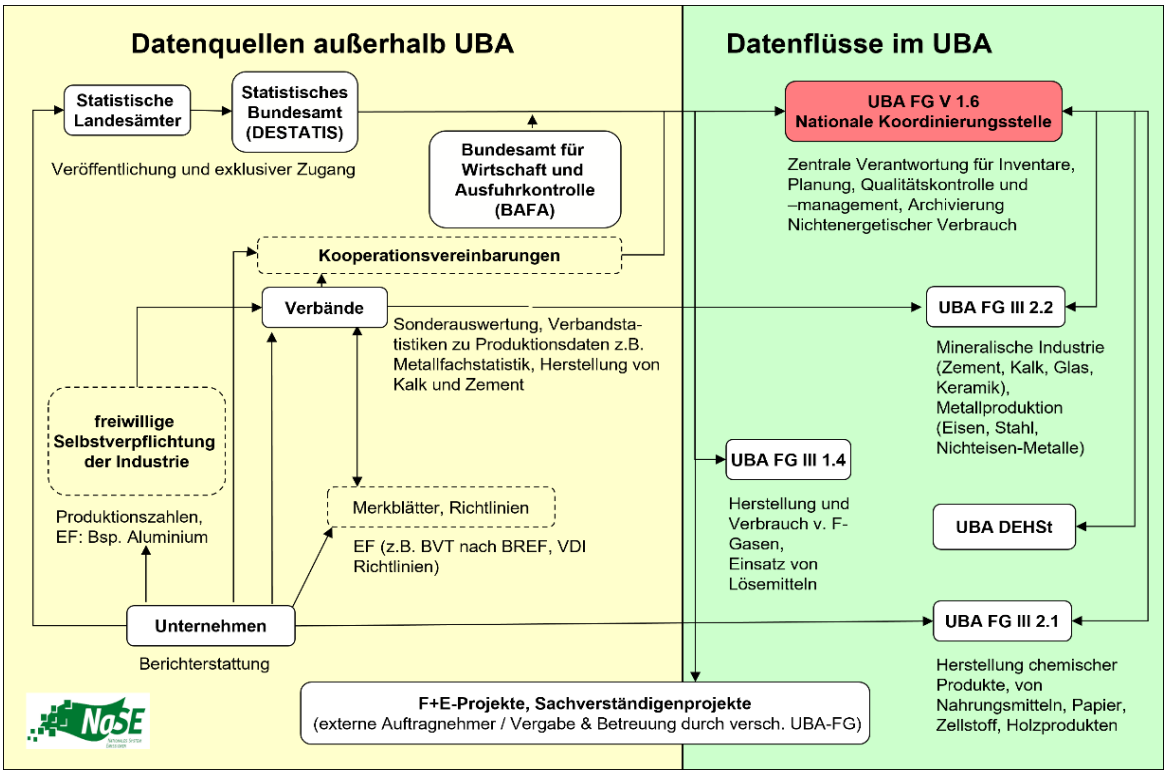
Daten zu den Kategorien der Kategorie 1.B.1 werden aus den Veröffentlichungen der Statistik der Kohlenwirtschaft e.V., , des Deutsche Braunkohlen-Industrie-Vereins (DEBRIV) und der Deutschen Montan Technologie GmbH (DMT), herangezogen.

Daten zu den Kategorien der Kategorie 1.B.2 werden aus den Veröffentlichungen des Statistischen Bundesamtes , des Wirtschaftsverbandes Fuels und Energie e. V. (en2x), der Deutschen Wissenschaftlichen Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V. (DGMK), des Bundesverbandes Erdgas, Erdöl und Geoenergie (BVEG), der Deutschen Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW), der Gasstatistik des Bundesverbandes der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) , der Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) sowie dem Monitoringbericht der Bundesnetzagentur und des Bundeskartellamts und Betreiberbefragungen im Bereich Gastransport, herangezogen. Ferner fließen Informationen gemäß der EU Methanverordnung (EU) 2024/1787 in die Inventarerstellung mit ein.

1.3.1.2 Industrieprozesse

Für die Aktivitätsdaten der Mineralischen Industrie werden überwiegend Verbandsstatistiken herangezogen. Die Daten für die Zementindustrie (2.A.1) stammen vom Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ) in Austausch mit der Deutschen Emissionshandelsstelle. Die Produktionszahlen für Kalk und Dolomitkalk (2.A.2) werden vom Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie e.V. (BV Kalk) anlagenscharf erhoben und jährlich in aggregierter Form bereitgestellt. Die Produktionszahlen für die Herstellung von Glas (2.A.3) werden den regelmäßig erscheinenden Jahresberichten des Bundesverbandes Glasindustrie entnommen, wobei Hilfsgrößen zum Glasrecycling anderen Statistiken entstammen. Die Produktions-entwicklung der Keramischen Industrie (2.A.4.a) wird unter Verwendung der amtlichen Statistik und Umrechnungsfaktoren eines Sachverständigen-Projektes berechnet. Die Verwendung von Soda (2.A.4.b) erfolgt durch eine Bilanzrechnung des Umweltbundesamtes.

Abbildung 10: Verantwortlichkeiten und Datenfluss für die Berechnung der Treibhausgasemissionen der Industrieprozesse



Quelle: eigene Darstellung, UBA

Für die Emissionsfaktoren der Mineralischen Industrie werden vielfältige Quellen genutzt. Der für die Emissionsberechnung der Zementklinkerherstellung (2.A.1) verwendete Emissionsfaktor beruht auf einer Berechnung des Vereins Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ) durch Aggregierung anlagenspezifischer Daten. Die Berechnung der CO_2-Emissionen der Kalkherstellung (2.A.2) und der Sodaverwendung (2.A.4.b) erfolgt über stöchiometrische Faktoren. Die CO_2-Emissions-faktoren für verschiedene Glassorten (2.A.3) sind von Fachverantwortlichen aus der Glaszusammensetzung und für die Keramische Industrie (2.A.4.a) aus Analysen der ETS-Daten im UBA abgeleitet worden.

In der Kategorie 2.B Chemische Industrie werden die Aktivitätsdaten aus Daten des Statistischen Bundesamtes (FS 4, R 3.1) und direkten Hersteller- und Verbandsangaben ermittelt. Teilweise sind diese Daten vertraulich. Die Emissionsfaktoren sind von Experten im UBA, in Forschungsvorhaben oder von den Herstellern ermittelt worden. Für 2.B.1 Ammoniak-Produktion und 2.B.2 Salpetersäure-Produktion wurden bis 2008 die Aktivitätsdaten vom Statistischen Bundesamt erhoben. Seit 2009 werden die Daten für Ammoniak- und Salpetersäureproduktion aufgrund einer Vereinbarung mit der chemischen Industrie für die gesamte Zeitreihe ab 1990 von den Herstellern anlagenspezifisch erhoben und an den Verband weiter gegeben, der diese anonymisiert an das UBA weiterleitet. Dafür ermitteln die Hersteller neben der Aktivitätsrate jeweils für 2.B.1 die Emissionen und für 2.B.2 die Emissionsfaktoren. Für 2.B.3 Adipinsäure-Produktion wurden bis Mitte der 90er Jahre anlagenspezifische Aktivitätsdaten geliefert. Für diese wurde der Default-EF für N_2O verwendet. Inzwischen liefern die Anlagenbetreiber auf vertraulicher Basis die Emissionsangaben direkt an das UBA. Auch für Adipinsäure ist durch eine Vereinbarung im Jahr 2009 die Datenlieferung langfristig gesichert worden. In 2.B.4 spielen nur N_2O-Emissionen aus der Herstellung von Caprolactam eine Rolle. Sie liegen aber unter dem Schwellenwert und werden deshalb nicht berichtet. Da es für die Calciumcarbid-Produktion (2.B.5) in Deutschland nur einen Hersteller gibt, sind die Daten

vertraulich. Das Umweltbundesamt erhält diese direkt vom Hersteller. Die CO_2-Emissionen aus der Titandioxidproduktion liegen unter dem Schwellenwert, weshalb sie nicht berichtet werden (2.B.6). Die Gesamtsumme an produziertem Soda (2.B.7) wird vom Statistischen Bundesamt erhoben, stammt aber am aktuellen Rand von den beiden Herstellern (mittels Kooperationsvereinbarung). Die Emissionsfaktoren für die Sodaherstellung wurden aus den ETS Monitoringdaten der DEHSt abgeleitet. Für die Herstellung der unter 2.B.8 Petrochemikalien- und Industrierußherstellung aufgeführten Produkte werden die Aktivitätsdaten aus Statistiken des Statistischen Bundesamtes entnommen; teilweise unterliegen sie einer Vetraulichkeit. Die Emissionsfaktoren stammen aus Experten-Schätzungen, Forschungsvorhaben und Default-Angaben der IPCC-Guidelines. Für die Industrierußproduktion werden die im ETS gemeldeten CO_2 Emissionen genutzt und bis zum Jahr 2021 werden die Aktivitätsraten über den Default-EF ermittelt. Seit 2022 erhält das UBA die Emissionensdaten direkt von den beiden Betreibern. Im Bereich der Produktion der halogenierten Kohlenwasserstoffe und SF_6 (2.B.9) werden die Daten über Herstellerangaben und Umfragen bei Herstellern ermittelt. Die Aktivitätsdaten werden zum überwiegenden Teil im Rahmen von Forschungsprojekten gezielt nach den Anforderungen des Inventars recherchiert, z.T. werden nur Emissionsdaten vom Hersteller zur Verfügung gestellt. Es sind in den einzelnen Unterkategorien jeweils nur wenige Unternehmen involviert, so dass diese Bereiche der Vertraulichkeit unterliegen. Unter 2.B.10 Sonstige werden Emissionen von Vorläufersubstanzen aus der Produktion von Schwefelsäure und Düngemittel berichtet. Die Aktivitätsdaten stammen aus Herstellerangaben, und Daten des Statistischen Bundesamtes. Die Emissionsfaktoren stammen aus Experten-Schätzungen und Forschungsvorhaben. Weiterhin fallen in die Kategorie (2.B.10) die N_2O-Emissionen aus der Produktion von 1,12-Dodecandisäure (DDS). Die Angaben stammen vom einzigen Hersteller von DDS. Aus Vertraulichkeitsgründen werden die Emissionen in 2.B.3 berichtet.

Die Aktivitätsdaten der Metallindustrie (2.C) werden vom Statistischen Bundesamt, den einschlägigen Verbänden (Stahlinstitut VDEh, Wirtschaftsvereinigung Metalle und Gesamtverband der Aluminiumindustrie) und Industriegasehändlern geliefert. Die Emissionsfaktoren der Metallindustrie (2.C) werden in der Regel durch die Fachexperten im Umweltbundesamt berechnet, z.T. werden Emissionsfaktoren von Industrieverbänden zur Verfügung gestellt oder auch IPCC Default Werte benutzt.

Eine Ausnahme bildet die Kategorie Ferroalloys, hier werden die Aktivitätsdaten aus einer Statistik des UK Geological Survey verwendet, die Emissionsfaktoren stammen aus einem Forschungsvorhaben bzw. es werden auch IPCC Default Werte genutzt.

In der Kategorie 2.D Nichtenergetische Produkte aus Brennstoffen und Lösemittel stammen die Aktiviätsraten aus veröffentlichten Erhebungen des Statistischen Bundesamtes und anderer Bundesbehörden (Produktions- und Außenhandelsstatistik, Mineralölstatistik) sowie von den einschlägigen Verbänden (Industrieverband Bitumen-Dach- und Dichtungsbahnen e.V. (vdd), Deutscher Asphaltverband (DAV). Die Aktivitätsdaten werden ergänzt durch Branchenstatistiken und Informationen von Fachexperten.

Die Emissionsfaktoren stammen aus unterschiedlichen Quellen: so werden die Emissionsfaktoren für die Paraffinwachsanwendung (2.D.2) mit Hilfe von IPCC-Default-Werten berechnet. Die Emissionsfaktoren für Schmierstoffanwendung (2.D.1) stammen aus einem Forschungsvorhaben, wobei NMVOC-Emissionen gemäß 2006 IPCC-Richtlinie als CO_2-Emissionen angegeben werden. Und die Emissionsfaktoren für die Herstellung und Verlegung von Dach- und Dichtungsbahnen (2.D.3) sowie für die Herstellung von Asphaltmischgut (2.D.3) beziehen sich nur auf NMVOC und sind Forschungsberichten entnommen.

Die Emissionsfaktoren und die anderen Parameter, die in die Berechnung der Emissionen aus der Lösemittelverwendung eingehen, sind nationalen Studien und Fachgutachten oder vom UBA

direkt beauftragten Forschungsprojekten entnommen, teilweise basieren sie auch auf Expertenangaben aus Branchendialogen.

Genauere Angaben zu den Emissionsfaktoren sind in der Methodenbeschreibung der einzelnen Kategorien zu finden.

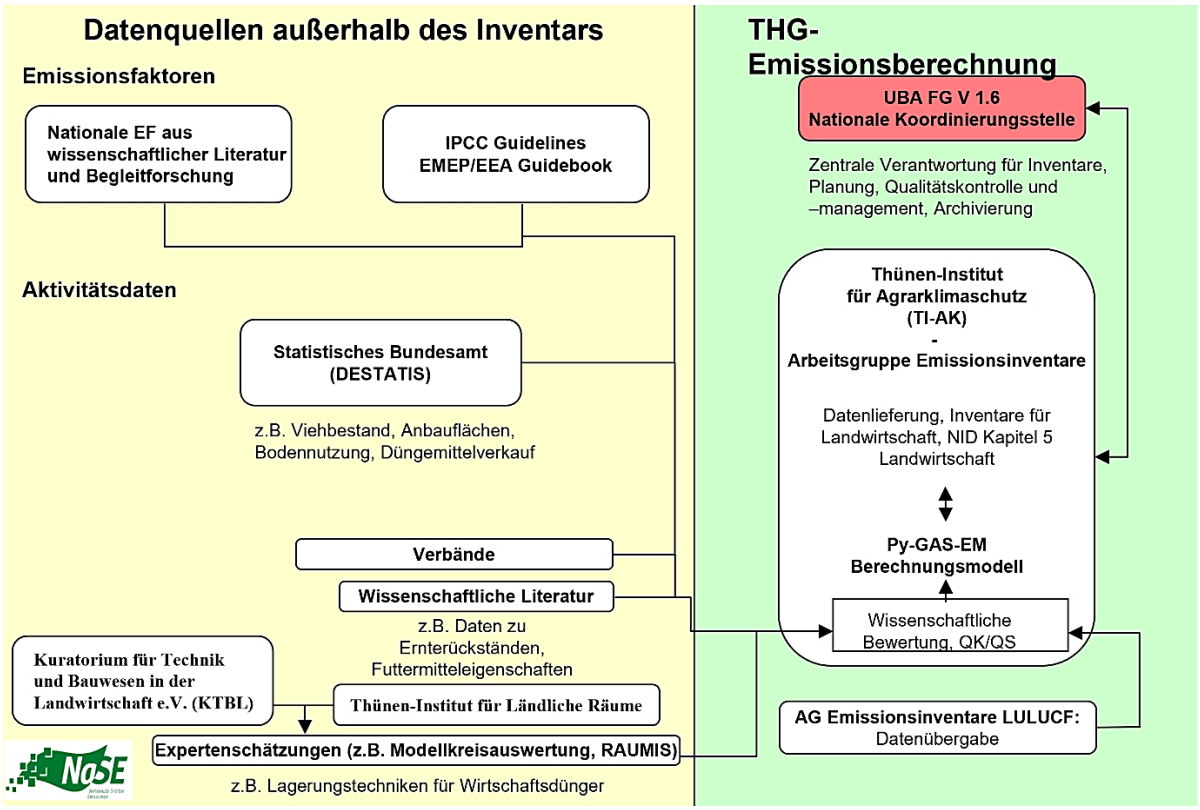
Die Aktivitätsdaten für die Elektronikindustrie (2.E), die Produktverwendung als Ersatz von ODS (2.F) und Andere Produktherstellung und –verwendung (2.G) werden aus Hersteller- und Verbandsangaben, aus Erhebungen des Statistischen Bundesamtes und anderer Bundesbehörden, sowie mit Hilfe von Berechnungsmodellen ermittelt. In Einzelfällen liegen auch direkt vom Hersteller Emissionsangaben vor. Die Daten unterteilen sich in mehrere Subkategorien. Die Produktverwendung als Ersatz von ODS unterteilt man außerdem in Herstellungs-, Anwendungs- und Entsorgungsemissionen. Auch in diesen Kategorien unterliegen die Daten in einigen Bereichen der Vertraulichkeit.

Die Emissionsfaktoren für die fluorierten Treibhausgase werden teilweise aus nationalen und internationalen Merkblättern und Richtlinien entnommen, aus Expertenbefragungen gewonnen oder es werden IPCC Default-Werte übernommen.

Im Bereich 2.H.1 Andere Produktionen: Zellstoff- und Papierherstellung werden die Daten des Leistungsberichtes des Verbandes Deutscher Papierfabriken verwendet. Im Bereich 2.H.2 Andere Produktionen: Nahrungsmittel und Getränke werden Daten der Bundesvereinigung der Deutschen Ernährungsindustrie (BVE), des Statistischen Bundesamtes und des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) genutzt. Emissionsfaktoren stammen aus einem Forschungsvorhaben, das 2008 abgeschlossen wurde.

1.3.1.3 Landwirtschaft

Abbildung 11: Verantwortlichkeiten und Datenfluss für die Berechnung der Treibhausgas-emissionen der Landwirtschaft



Quelle: eigene Darstellung, UBA

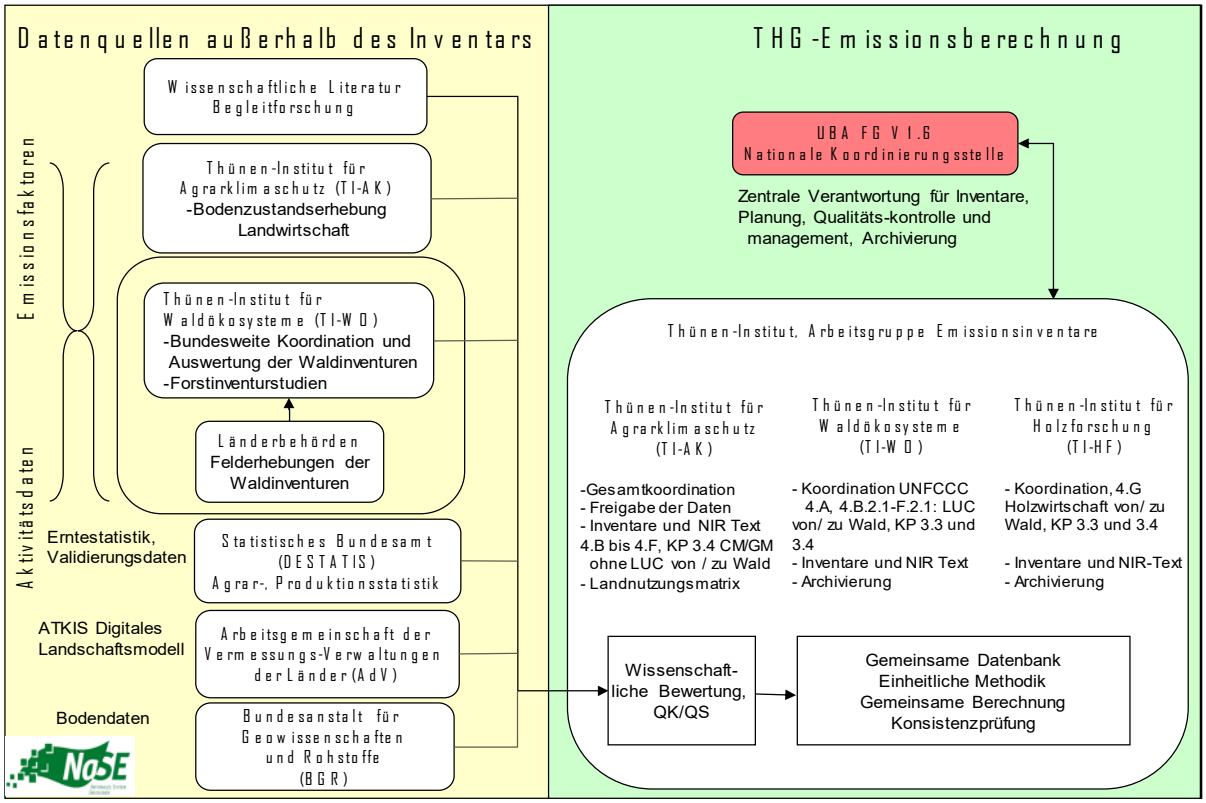
Die Berechnungen der Emissionen für die Kategorie 3 (Landwirtschaft) erfolgen durch das Thünen-Institut (TI). Zur Berechnung der landwirtschaftlichen Emissionen in Deutschland wurde von BMUKN und BMEL ein Projekt initiiert, wonach die damalige FAL ein modulares Tabellenkalkulations-Modell (GASeous EMissions, GAS-EM) entwickelte Dämmgen et al. (2002) und(Vos et al., 2026) und welches für die Submission 2022 in der Programmiersprache Python implementiert wurde (Py-GAS-EM).

Die Agrarstatistik des Statistischen Bundesamtes stellt eine wesentliche Datenquelle für die Berechnung der Landwirtschaftsemissionen dar. Die Tierzahlen sind der Fachserie 3, Reihe 4 des Statistischen Bundesamtes entnommen (Statistisches Bundesamt, FS 3, R 4), weitere Fachserien stellen die verkauften Düngermengen oder die Angaben zu landwirtschaftlichen Anbauflächen zur Verfügung. In einzelnen Bereichen werden diese Daten aus der Literatur ergänzt (z.B. Ernterückstände, Futtermittel). Daneben liegen Daten aus speziellen Expertenschätzungen vor (beispielsweise eine Auswertung von Modell-Landkreisen hinsichtlich Lagerungstechniken für Wirtschaftsdünger).

Die Berechnungen im Bereich Landwirtschaft basieren in vielen Bereichen auf stark differenzierten Aktivitätsdaten, die auf der Basis nationaler Datenquellen erhoben worden sind. Die Aktivitätsdaten werden in Abhängigkeit von den Emissionsquellen mit nationalen Emissionsfaktoren oder den Standard-Emissionsfaktoren der 2006 IPCC Guidelines, des 2019 IPCC refinements der 2006 IPCC guidelines und des EMEP/EEA-Handbuchs der United Nation Economic Commission for Europe (UN ECE) kombiniert.

1.3.1.4 Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft

Abbildung 12: Datenfluss für die Berechnung der Treibhausgasemissionen aus dem Bereich Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF) und KP-LULUCF



Quelle: eigene Darstellung, UBA

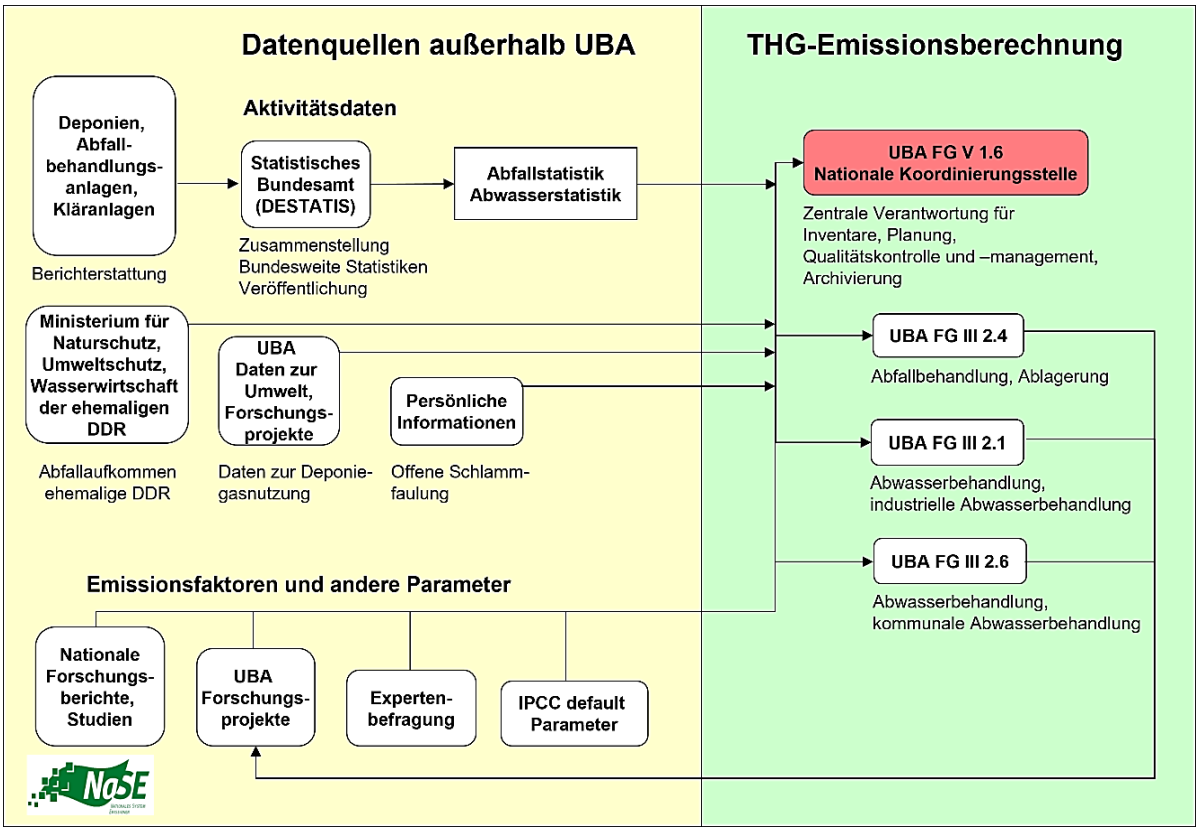
In der Submission 2012 wurde eine konsistente einheitliche Methodik zur Erfassung von Landnutzungsänderungen im LULUC-Sektor und der Forstwirtschaft eingeführt. Die Methodik erweitert das stichprobenbasierte System für die Erfassung der Waldfläche und der Landnutzungsänderungen von und zu Wald auf alle Landnutzungskategorien und –änderungen. In der Folge wurde die Methode zur Erstellung der Landnutzungsmatrix angepasst und erweitert und die Emissionsberechnung am Stichprobenpunkt eingeführt.

Die Bodenkohlenstoffvorratsschätzung wird an Hand von nutzungsdifferenzierten Bodenkarten und Bodenprofildaten und der Bodenzustandserhebungen im Wald und auf landwirtschaftlichen Flächen (BZE) vorgenommen und die Veränderungen dieser Vorräte infolge Nutzungsänderungen mittels Änderungen in den mittleren Vorräten je Landnutzungskategorie abgeschätzt.

Die Schätzung der Kohlenstoffvorratsänderungen in der Biomasse erfolgt anhand der Angaben der Erntestatistik, der Bodennutzungshaupterhebung, der Bundeswaldinventuren (BWI) und spezifischer Faktoren aus der wissenschaftlichen Literatur in Verbindung mit den Flächendaten.

1.3.1.5 Abfall und Abwasser

Abbildung 13: Datenfluss für die Berechnung der Treibhausgasemissionen aus dem Bereich Abfall und Abwasser



Quelle: eigene Darstellung, UBA

Für die Berechnung der Emissionen aus dem Bereich Abfall ist bezüglich der Methodik und der Wahl der Parameter und Daten für die Berechnungen das UBA-Fachgebiet „Abfalltechnik und Abfalltransfer“ (FG III 2.4) zuständig.

Für die Aktivitätsdaten im Bereich Abfall wird hauptsächlich auf veröffentlichte Daten des Statistischen Bundesamtes zurückgegriffen. Genaue Angaben, welche statistischen Quellen genutzt wurden, sind im Abschnitt Abfall enthalten. Das Statistische Bundesamt hat keine Daten

zu Abfallmengen der ehemaligen DDR veröffentlicht. Hier wurde auf eine offizielle Quelle des Ministeriums für Naturschutz, Umweltschutz und Wasserwirtschaft der ehemaligen DDR zurückgegriffen. Die Berechnungen der Deponiegasnutzung basieren auf Daten des Statistischen Bundesamtes. Im Rahmen des In-Country-Review 2010 wurde die Datenbasis für die Deponiegasnutzung aktualisiert. Daten der Gasfassung bei Deponien in der Nachsorgephase werden seit 2012 statistisch erfasst.

Die Emissionsfaktoren und die anderen Parameter, die in die Berechnung der Emissionen aus der Abfalldeponierung, der Mechanisch-Biologischen Abfallbehandlung und der Kompostierung sowie Vergärung eingehen, stammen aus nationalen Studien und Forschungsberichten, aus vom UBA direkt beauftragten Forschungsprojekten. Darüber hinaus wurden auch IPCC default Parameter genutzt. Zu einigen wenigen Parametern (z.B. Wahl der Halbwertszeit) wurden einzelne Experten befragt. Im entsprechenden Kapitel ist genauer dokumentiert, welche Parameter aus welchen Quellen stammen.

Für die Berechnung der Emissionen aus dem Bereich der industriellen Abwasser- und Schlammbehandlung (5.D.2) ist bezüglich der Methodik und der Wahl der Parameter und Daten für die Berechnungen das UBA-Fachgebiet „Übergreifende Angelegenheiten, Chemische Industrie, Feuerungsanlagen“ (III 2.1) zuständig. Für die Berechnung der Emissionen aus dem Bereich der kommunalen Abwasser- und Schlammbehandlung (5.D.1) ist bezüglich der Methodik und der Wahl der Parameter und Daten für die Berechnungen das UBA-Fachgebiet „Abwassertechnikforschung, Abwasserentsorgung“ (FG III 2.6) zuständig.

Für die Aktivitätsdaten im Bereich Abwasser wird hauptsächlich auf veröffentlichte Daten des Statistischen Bundesamtes zurückgegriffen. Genaue Angaben, welche statistischen Quellen genutzt wurden, sind im Abschnitt Abwasser enthalten.

Die Emissionsfaktoren und die anderen Parameter, die in die Berechnung der Emissionen aus der Abwasserbehandlung eingehen, stammen aus nationalen Studien und aus vom UBA direkt beauftragten Forschungsprojekten. Zudem werden IPCC default Parameter genutzt.

1.3.2 Methoden

Die verwendeten Methoden für die einzelnen Kategorien werden in den Übersichtstabellen der einzelnen Kategorien und in der CRT-Berichtstabelle Summary3 dargestellt. Zudem sind ausführliche Beschreibungen in den jeweiligen Kategorienkapiteln zu finden.

Unterschieden werden Berechnungen nach länderspezifischen Methoden (CS – *country specific*) und nach in den einzelnen Kategorien unterschiedlich detaillierten IPCC-Berechnungsmethoden (engl. *Tier)*[15]. Die Zuordnung der Berechnung zu den verschiedenen IPCC-Methoden hängt vom Anteil der Äquivalentemissionen der Kategorie an den Gesamtemissionen ab. Diese Zuordnung wird durch das Instrument der *Key-Category*-Analyse getroffen (siehe hierzu Kapitel 1.4).

Die in indirektes CO_2 umgerechneten NMVOC Emissionen der Lösemittelverwendung werden auf Basis eines produktverbrauchs-orientierten Ansatzes gemäß den 2006 *IPCC Guidelines* berechnet. Ein ähnliches Verfahren wird bei der Schmiermittelanwendung eingesetzt.

1.4 Kurzbeschreibung der Hauptkategorien

Zur Festlegung der Hauptkategorien wurden beide Methode-1-Verfahren, also „*Level*“ (für Basisjahr und aktuellstes Jahr) und „*Trend*“ (aktuellstes Jahr versus Basisjahr), angewendet.

[15] Tier 1 bezeichnet die jeweils einfacheren, mit weniger Eingangsdaten benutzbaren Berechnungsmethoden, während Tier 2 bzw. Tier 3 differenziertere Eingangsdaten benötigen und somit üblicherweise zu genaueren Ergebnissen führen.

Zusätzlich wurde auch das Methode-2-Verfahren umgesetzt.

Entsprechend den IPCC-Vorgaben für das Methode-1-Verfahren wurden hierbei nicht nur die Emissionen aus Quellen, sondern auch die Einbindung der Treibhausgase in Senken berücksichtig. Dazu wurden die Analysen zunächst nur für die Emissionen aus den Quellen des Anhang 1 der Klimarahmenkonvention durchgeführt und in einem zweiten Durchlauf die Senken einbezogen.

Alle festgelegten Hauptkategorien ergaben sich entweder durch die Levelanalysen oder die Trendbewertung oder die Methode -2-Hauptkategorienanalyse auf Basis der aktuellen Unsicherheitenbestimmung. Durch die Bewertung qualitativer Aspekte sind keine neuen Hauptkategorien hinzugekommen (Erläuterungen hierzu siehe Anhang 1).

Im Ergebnis wurden in der aktuellen Berichterstattung im Methode-1-Verfahren insgesamt 50 der untersuchten 173 Quell- bzw. Senkengruppen als Hauptkategorie identifiziert. 36 hiervon wurden gleichzeitig durch die Trend- und Levelanalysen als Hauptkategorie ermittelt. Zusätzlich wurden 8 Kategorien nur durch die Trend- bzw. 6 Kategorien nur durch die jeweiligen Levelanalysen als Hauptkategorie identifiziert. Im Methode-2-Verfahren wurden 16 weitere Hauptkategorien identifiziert (s. Tabelle 9).

Letztendlich wurden damit 66 Hauptkategorien festgelegt, die in Tabelle 7 zusammengefasst dargestellt sind.

Tabelle 7: Number of categories and key categories

Kategorie		**173**	
			Hauptkategorien
nach Level	Level & Trend	Trend	
6	36	8	**50 (Methode 1)**
			+16 (Methode 2)
			66 (gesamt)

Eine Übersicht der Ergebnisse der Hauptkategorienanalyse nach Methode 1 ist in Tabelle 8 zusammengestellt. In Tabelle 9 sind die aufgrund der Methode 2 Analyse hinzugekommenen Hauptkategorien dargestellt. Detaillierte Darlegungen zur durchgeführten Hauptkategorien-Analyse sind im Anhang 1 dieses Berichts zusammengestellt.

Gegenüber den im vergangenen Jahr ermittelten Ergebnissen haben sich nur geringe Änderungen ergeben. Die Anzahl der Hauptkategorien nach Methode-1-Analyse hat sich auf 50 Hauptkategorien erhöht.

Folgende Hauptkategorien sind hinzugekommen:

- *N_2O 1.A.1.a Public Electricity and Heat Production*
- *CO_2 4.E Settlements*

Folgende Hauptkategorien sind weggefallen:

- *CH_4 4.B Cropland*

Deutschland wendet alle empfohlenen Verfahren für die Ermittlung bzw. Bewertung der Quellkategorien an. Die 2006 *IPCC-Guidelines* ((IPCC, 2006a): Vol. 1, Ch. 4.3) schreiben vor, dass

95 % der Emissionen aus Quellen bzw. Einbindungen in Senken als Hauptkategorien festgelegt werden müssen. Da die Festlegung der Hauptkategorien in Deutschland durch die Kombination der Ergebnisse aller Analysenverfahren und Bewertungen erfolgt, werden insgesamt die verursachenden Aktivitäten für ca. 98 % des Inventars als Hauptkategorien identifiziert.

Ein Vergleich der Hauptkategorienanalyse des CRF Tools mit der von Deutschland hat ergeben, dass diese nur geringfügig voneinander abweichen. Im Ansatz bestehen kleine Unterschiede, so wird im Energiebereich von Deutschland in Unterkategorien unterschieden und beim CRF Tool in Brennstofftypen differenziert. Die Anzahl der Hauptkategorien ist nahezu gleich.

Tabelle 8: Hauptkategorien für Deutschland gemäß Methode 1-Ansatz, mit GWP des IPCC AR5

			Level						Trend		
IPCC Categories	**Activity**	**Emissions of**	**Base Year**	**Base Year +LULUCF**	**1990**	**1990 +LULUCF**	**2024**	**2024 +LULUCF**	**2024**	**2024 +LULUCF**	**KCA decission**
1 A 1 a, Public Electricity and Heat Production	fossil fuels	CO_2	•	•	•	•	•	•	•	•	L/T
1 A 1 a, Public Electricity and Heat Production		CH_4	-	-	-	-	•	•	•	•	L/T
1 A 1 b, Petroleum Refining	fossil fuels	CO_2	•	•	•	•	•	•	•	•	L/T
1 A 1 c, Manufacture of Solid Fuels and Other Energy Industries	fossil fuels	CO_2	•	•	•	•	•	•	•	•	L/T
1 A 2 a, Iron and Steel	fossil fuels	CO_2	•	•	•	•	•	•	•	•	L/T
1 A 2 b, Non-ferrous Metals	fossil fuels	CO_2	-	-	-	-	•	-	-	-	L/-
1 A 2 e, Food Processing, Beverages and Tobacco	fossil fuels	CO_2	-	-	-	-	-	-	•	-	-/T
1 A 2 f, Non-metallic Minerals	fossil fuels	CO_2	•	•	•	•	•	•	-	-	L/-
1 A 2 g, Other Manufacturing Industries and Construction	fossil fuels	CO_2	•	•	•	•	•	•	•	•	L/T
1 A 3 b, Road transport	fossil fuels	CO_2	•	•	•	•	•	•	•	•	L/T
1 A 3 c, Rail Transport	fossil fuels	CO_2	•	•	•	•	-	-	•	•	L/T
1 A 3 d, National Shipping	fossil fuels	CO_2	•	•	-	-	-	-	-	-	L/-
1 A 4 a, Commercial/Institutional	fossil fuels	CO_2	•	•	•	•	•	•	•	•	L/T
1 A 4 a, Commercial/Institutional		CH_4	-	-	-	-	-	-	•	-	-/T
1 A 4 b, Residential	fossil fuels	CO_2	•	•	•	•	•	•	•	•	L/T
1 A 4 c, Agriculture/Forestry/Fishing	fossil fuels	CO_2	•	•	•	•	•	•	•	•	L/T
1 A 5, Military	fossil fuels	CO_2	•	•	•	•	-	-	•	•	L/T
1 B 1, Solid Fuels		CH_4	•	•	•	•	-	-	•	•	L/T
1 B 2 b, Fugitive Emissions from Natural Gas		CH_4	•	•	•	•	•	•	•	•	L/T
2 A 1, Cement Production		CO_2	•	•	•	•	•	•	•	•	L/T
2 A 2, Lime Production		CO_2	•	•	•	•	•	•	•	-	L/T

			Level						Trend		
2 B 1, Ammonia Production		CO_2	•	•	•	•	•	•	-	-	L/-
2 B 2, Nitric Acid Production		N_2O	-	-	-	-	-	-	•	•	-/T
2 B 3, Adipic Acid Production		N_2O	•	•	•	•	-	-	•	•	L/T
2 B 9 a, By-Product Emissions		HFC23	•	•	•	•	-	-	•	•	L/T
2 C 1, Iron and Steel Production		CO_2	•	•	•	•	•	•	•	•	L/T
2 F, Product Uses as Substitutes for ODS		HFC125	-	-	-	-	•	•	•	•	L/T
2 F, Product Uses as Substitutes for ODS		HFC134a	-	-	-	-	•	•	•	•	L/T
2 F, Product Uses as Substitutes for ODS		HFC143a	-	-	-	-	-	-	•	•	-/T
2 G, Other Product Manufacture and Use		SF_6	•	•	•	•	-	-	•	•	L/T
3 A, Enteric Fermentation	dairy cows	CH_4	•	•	•	•	•	•	•	•	L/T
3 A, Enteric Fermentation	non-dairy cattle	CH_4	•	•	•	•	•	•	•	•	L/T
3 A, Enteric Fermentation	other animals	CH_4	-	-	-	-	•	•	-	-	L/-
3 B, Manure Management	dairy cows	CH_4	-	-	-	-	•	•	•	•	L/T
3 B, Manure Management	swine	CH_4	•	•	•	•	•	•	-	-	L/-
3 D, Agricultural Soils		N_2O	•	•	•	•	•	•	•	•	L/T
3 G, Liming		CO_2	-	-	-	-	•	•	•	-	L/T
3 J, Other Agriculture		CH_4	-	-	-	-	-	-	•	•	-/T
4 A, Forest Land		CO_2	-	•	-	•	-	•	-	•	L/T
4 B, Cropland		CO_2	-	•	-	•	-	•	-	•	L/T
4 C, Grassland		CO_2	-	•	-	•	-	•	-	•	L/T
4 C, Grassland		CH_4	-	-	-	-	-	•	-	•	L/T
4 D, Wetlands		CO_2	-	•	-	•	-	•	-	•	L/T
4 D, Wetlands		CH_4	-	•	-	•	-	•	-	•	L/T
4 E, Settlements		CO_2	-	•	-	•	-	•	-	•	L/T
4 G, Harvested Wood Products		CO_2	-	-	-	-	-	-	-	•	-/T
5 A, Solid Waste Disposal		CH_4	•	•	•	•	•	•	•	•	L/T

			Level						Trend		
5 B, Biological Treatment of Solid Waste		CH_4	-	-	-	-	-	-	•	•	-/T
5 D 1, Domestic Wastewater		CH_4	•	•	•	•	-	-	•	•	L/T
5 D 1, Domestic Wastewater		N_2O	-	-	-	-	-	-	•	•	-/T

Tabelle 9: Hauptkategorien für Deutschland, die sich nur aufgrund des Methode-2-Ansatzes ergeben

IPCC Source Categories	Activity	Emissions of
1 A 1 a, Public Electricity and Heat Production		N_2O
1 A 4 b, Residential		CH_4
1 A 4 b, Residential		N_2O
1 B 1, Solid Fuels		CO_2
1 B 2 c, Venting and Flaring (oil, gas, combined oil and gas)		CO_2
2 C 6, Zinc Production		CO_2
2 D 2, Paraffin Wax Use		CO_2
2 G, Other Product Manufacture and Use		N_2O
3 B, Manure Management	other animals	N_2O
3 B, Manure Management	dairy cows	N_2O
3 B, Manure Management	Non dairy cattle	N_2O
3 B, Manure Management	deposition and leaching	N_2O
4 A, Forest Land		N_2O
4 B, Cropland		N_2O
4 E Settlements		N_2O
5 B, Biological Treatment of Solid Waste		N_2O

1.5 Informationen zum Qualitätssicherungs- und –kontrollplan sowie zum Inventarplan inklusive Verifizierung und zum Umgang mit vertraulichen Informationen

1.5.1 Prozeduren zu Qualitätssicherung- und –kontrolle

1.5.1.1 QK/QS-Plan

Gemäß den Anforderungen der *2006 IPCC Guidelines* sollen die für die Emissionsberichterstattung notwendigen QK/QS- und Verifikationsmaßnahmen in einem QK/QS-Plan zusammengefasst werden. Dabei ist die primäre Aufgabe eines QK/QS-Plans, diese Maßnahmen zu organisieren, zu planen und die Durchführung sicherzustellen.

Das grundlegende Ziel des QK-Plans, sowie des Nationalen Systems ist es, das gesamte Inventar, in jedem Jahr einer vollständigen QK entsprechend den Guidelines zu unterziehen, unabhängig davon, ob es sich um Hauptkategorien handelt oder um solche, die dies nicht sind. Der QK-Plan besteht daher aus den Checklisten zur QK/QS (siehe Kapitel 1.5.1.2) und dem Inventarplan (siehe Kapitel 1.5.1.3). Eine nahezu identische Herangehensweise wird auch beim QS-Plan verfolgt, was bedeutet, dass, wie auch von den Guidelines gefordert, in jedem Jahr entsprechende Qualitätsprüfungen erfolgen, die aber hinsichtlich der geforderten *Peer-Reviews* einen periodischen Ansatz verfolgen (siehe auch weiter unten).

Der QS-Plan besteht somit aus den Checklisten zur QK/QS (siehe Kapitel 1.5.1.2) und dem Terminplan der Emissionsberichterstattung (siehe Kapitel 1.2.4.1) mit den damit verbundenen Aufgaben. Letztere und die vom QSE vorgegebenen Freigabeprozesse stellen sicher, dass die Inventare jährlich eine Vielzahl von internen, vor allem aber externen qualitätsichernden

Prüfinstanzen durchlaufen. Dazu gehören auch jährlich von den beteiligten Ministerien durchzuführende *basic Expert Peer-Reviews*, deren Ergebnisse, inkl. möglicher Korrekturen, im Rahmen der etablierten Routinen, vor Fertigstellung der Berichterstattung in die Inventare einfließen. Abgerundet werden diese qualitätssichernden Aktivitäten durch periodisch durchgeführte *Peer Reviews* (siehe Kapitel 1.5.1.4).

Durch regelmäßige Anpassung und Überarbeitung der genannten Instrumente, auch unter Berücksichtigung landesspezifischer Bedürfnisse, ist sichergestellt, dass die Anforderungen der *2006 Guidelines* auch hinsichtlich einer angemessenen Berücksichtigung nationaler Besonderheiten erfüllt werden.

Eine allgemeine Beschreibung der Aufbau- und Ablauforganisation, der Qualitätssicherung und -kontrolle findet sich in Kapitel 1.2.2.3.1. Dort sind auch die Prinzipien zur Steuerung und Dokumentation dieser Maßnahmen beschrieben.

Im „Handbuch zur Qualitätskontrolle und Qualitätssicherung bei der Erstellung von Emissionsinventaren und der Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen sowie der EU Entscheidung 525/2013/EG“ sind die Anforderungen an die Qualitätskontrolle und Qualitätssicherung bei der Emissionsberichterstattung detailliert beschrieben. Qualitätsprüfungen, die überwiegend vor Abschluss der Inventarerstellung erfolgen, bilden das Herzstück der im Handbuch gemachten Vorgaben.

1.5.1.2 QK/QS-Checklisten

Die Qualitätsprüfungen werden mit Hilfe von Checklisten umgesetzt (zum Inhalt siehe Kapitel 1.2.2.3.1.5 und im Anhang 5.1.2.1.11). Diese bestehen zurzeit aus ca. 88 rollenspezifischen Einzelzielen sowie rund 40 optionalen Zielen.

Aktuell sind etwa 55 UBA- und externe Mitarbeiter in unterschiedlichen funktionalen Rollen in vier aufeinander aufbauenden QK/QS-Prüfebenen in die Emissionsberichterstattung eingebunden. Die Prüfebenen werden repräsentiert durch den eigentlichen Experten (FV), seinen Fachvorgesetzten (QKV), einen fachlichen Ansprechpartner für die jeweilige Kategorie in der Nationalen Koordinierungsstelle (FAP) und schließlich durch die Koordinatoren, die gemeinsam für das konsistente Gesamtergebnis NID, Inventar, QSE und Unsicherheitenschätzung zuständig sind.

Die rollenspezifischen QK/QS-Prüfungen werden generell den allgemeinen Qualitätszielen (siehe Anhang 5.1.2.1.10.3) und den einzelnen Prozessschritten (siehe Kapitel 1.2.2.4) bei der Inventarerstellung zugeordnet, damit die anschließende Auswertung wann immer notwendig auch nach diesen Gesichtspunkten erfolgen kann. In der Summe decken die Prüfungen den gesamten Prozess der Inventarerstellung ab.

Die anschließende Auswertung der Checklisten zeigt bei einzelnen Kategorien bestimmte Aspekte auf, die hinsichtlich der Einhaltung spezifischer Inventaranforderungen zu überprüfen und ggf. zu überarbeiten sind. Zu diesem Zweck werden sie um weiterführende Informationen ergänzt. Die überwiegende Mehrzahl aller identifizierten Prüfbedarfe wird in den verbindlichen Inventarplan überführt. Dieser wird haus- und ressortabgestimmt und anschließend in aggregierter Form veröffentlicht.

1.5.1.3 Inventarplan

Für die jährliche Erstellung des Inventarplans werden die Ergebnisse der QK/QS-Checklisten aller Kategorien ausgewertet und die nicht erreichten Ziele mit notwendigen Verbesserungs-maßnahmen, sowie Terminen zu ihrer Umsetzung hinterlegt (*Follow-up-procedure*). Diese werden ergänzt um die im NID benannten Verbesserungsaktivitäten (s. Kapitel 10.4.1), die

Ergebnisse der verschiedenen Reviewprozeduren der UNFCCC und der EU-Kommission, um Auditergebnisse (siehe 1.5.1.4) sowie sonstige Verbesserungsbedarfe. Der Inventarplan umfasst damit eine Vielzahl von Einzelmaßnahmen, die von unterschiedlichen Rollen des QSE (siehe Rollenkonzept des QSE Kapitel 1.2.2.3.1.3) und den in die Emissionsberichterstattung eingebundenen Bundesministerien Deutschlands bzw. deren nachgeordneten Behörden umzusetzen sind. Die enthaltenen Maßnahmen sind innerhalb der im Inventarplan festgelegten Zeiträume umzusetzen, wobei die Bereitstellung der erforderlichen personellen und finanziellen Ressourcen den jeweils zuständigen Teilnehmern des NaSE obliegt.

Bei der Erstellung des jeweils aktuellen IP wird vom QSE-Koordinator auch die Abarbeitung der in den Vorjahren begebenen Handlungsbedarfe überprüft. Anhand der dadurch gewonnenen Informationen wird der IP zusätzlich aktualisiert. Handlungsbedarfe deren Termine nicht gehalten werden konnten, werden in ihrem Status auf „überfällig“ gesetzt und in ihrer Priorität heraufgesetzt (*Follow-follow-up-procedure*).

Da die einzelnen Maßnahmen des Inventarplans aufgrund ihrer großen Anzahl hier nicht darstellbar sind, wurden sie zu den in Tabelle 10 dargestellten übergeordneten Maßnahmen zusammengefasst. Der Inventarplan wird in einem fortlaufenden Prozess mindestens jährlich aktualisiert.

Im Zuge der Umsetzung der im Inventarplan enthaltenen Maßnahmen können regelmäßig große Teile der enthaltenen Einzelmaßnahmen bearbeitet und damit aufgelöst werden.

Tabelle 10: Inventarplan – offene Handlungsbedarfe

Haupt-kategorie	Kategorie (CRT-Code)	Planung zur Inventarverbesserung / Handlungsbedarf	Quelle	Quellenbezug_Berichtsjahr
Energy	1.A.3.d+e	Überprüfung, ob die Anforderungen der IPCC-Guidelines an die Auswahl der Berechnungsmethode und die Verfahren bei vorliegenden Methodenwechsel erfüllt sind oder ob bestehende Berechnungsmethoden/Modelle ggf. angepasst werden müssen.	CHKL, NIR	2017, 2025
LULUCF	4		NID	2023-26
Energy	1.A.3.d.(a), 1.A.4., 1.A.4.a.i-b.i-c.i. & 1.A.5.a.	Überprüfung, ob Datenlücken in Zeitreihen vorliegen.	CHKL	2020, 2023+25
LULUCF	4., 4.C.		CHKL, NID	2025+26
Energy	1.A.1+2, 1.A.4.a.i-b.i-c.i. & 1.A.5.a.	Überprüfung, ob die Quellgruppe vollständig durch die Datenquelle abgedeckt wird und die Datenzuschnitte der EF und AR übereinstimmen.	CHKL	2026
Industrial Processes	2.C.2, 2.C.3.a		Audit	2016
Energy	1.A.1+2, 1.A.3.e.i., 1.A.4.a.i-b.i-c.i. & 1.A.5.a., 1.A.4.c.iii, 1.A.5.b.(iii)	Überprüfung, ob die Unsicherheiten ermittelt wurden und vollständig und aktuell sind.	CHKL	2024+26
Industrial Processes	2.C.3.a., 2.D.3.(b)+(j)		Audit, CHKL	2012, 2016, 2026
Waste	5.A.1, 5.D.1, 5.E.1.(a)		CHKL, Sonstige	2020+24+25+26
General	0.	Überprüfung, ob die geforderten Aufzeichnungs- und Dokumentationspflichten erfüllt werden und die jeweiligen Unterlagen vollständig, nachvollziehbar und aktuell sind.	CHKL	2015, 2018
Energy	1.A., 1.A.1., 1.A.2., 1.A.2.a+g.vii+iii.,1.A.3., 1.A.4., 1.A.5.a+b.		CHKL	2018+20, 2024-26
Industrial Processes	2.A.1-3+4a, 2.B.3+8, 2.C.2+3.a., 2.D, 2.D.1.(a+b), 2.D.2, 2.D.3.(a,d,e,f,g,h,i)+j, 2.G.3.a+4.(c)		Audit, CHKL	2016, 2020, 2023, 2025+26
Agriculture	3.A+B+D+G+H+J		CHKL	2026
LULUCF	4.(V), 4.G		CHKL	2026
Waste	5.A.1, 5.B.1+2, 5.D.1, 5.E.1.(a)		Audit, CHKL	2016, 2019, 2022, 2024+26

Haupt-kategorie	Kategorie (CRT-Code)	Planung zur Inventarverbesserung / Handlungsbedarf	Quelle	Quellenbezug_Berichtsjahr
Energy	1.A.3.b+d (a), 1.A.4.c.iii, 1.A.5, 1.A.5.b(iii)	Überprüfung, ob Datenlieferanten bzw. Auftragnehmer geeignete routinemäßige Qualitätskontrollen durchführen und ob die durch die Nationale Koordinierungsstelle festgelegten Anforderungen an die Emissonsberichterstattung an diese weitergegeben und umgesetzt werden.	Audit, CHKL	2012, 2016, 2021, 2023 +26
Industrial Processes	2.B.8.a, 2.B.10.(i), 2.C.2, 2.D.1.(b)		Audit, CHKL	2012, 2016+17, 2026
Waste	5.B.1+2		Audit	2016
General	0.	Überprüfung, ob die Anforderungen zum Abgleich und zur Verifizierung von Daten bzw. zugrunde liegender Annahmen erfüllt werden.	ARR, CHKL, Sonstige	2015, 2018, 2025+26
Energy	1.A, 1.A.1., 1.A.2.+a+g.viii., 1.A.3.d.(a)+e.+e.i, 1.A.4.a.i.+b.i.+c., 1.A.5.a+b.		CHKL	2023-26
Industrial Processes	2.B.7, 2.C.1+2+3a+5+6, 2.D.1.(b), 2.D.3.(a,d,e,f,g,h,i), 2.G.3.(a)		Audit, CHKL	2016, 2023-26
LULUCF	4.G.		CHKL	2025
Waste	5.A.1, 5.B.1+2, 5.D.1+2, 5.E.1.(a)		CHKL, Sonstige	2018, 2020, 2024-26
General	0.	Überprüfung, ob die Hinweise aus den Inventarüberprüfungen berücksichtigt werden konnten.	ARR	2010
Energy	1.A.1, 1.A.3.d(b), 1.A.3.e		CHKL	2022, 2026
Energy	1.A., 1.A.1.+2., , 1.A.2.g.vii., 1.A.3.a+e., 1.A.4.a.i+ii.+b.i+ii+c.i+ii, 1.A.5.b(i)+(ii)	Überprüfung, ob die Anforderungen an die Datenkonsistenz erfüllt werden und die jeweiligen Unterlagen vollständig und nachvollziehbar sind.	CHKL	2018+19, 2021+22, 2025+26
Industrial Processes	2.D.3.(a,d,e,f,g,h,i)		CHKL	2026
Waste	5.A.1		CHKL	2024
Industrial Processes	2.H.2.	Überprüfung, ob die EF vollständig und plausibel (ohne Fehlstellen, vollständig dokumentiert) und aktuell sind.	NIR	2021
LULUCF	4., 4.D.1		ESR, NID	2025, 2026
Energy	1.A.2.g.vii.	Überprüfung, ob die AR vollständig (ohne Fehlstellen, vollständig dokumentiert) und aktuell sind.	CHKL	2026
LULUCF	4., 4.A.		ESR, NID	2025+26
Industrial Processes	2.D.1.(b)	Überprüfung, ob Dateneingaben in das ZSE richtig im Sinne einer fehlerfreien Eingabe von Zahlen, Einheiten, Umrechnungsfaktoren und korrekter Einbindung sind.	CHKL	2026
General	0.	Überprüfung, ob die Quellgruppe für den NIR entsprechend der geforderten sechs Unterkapitel des NIR ("Beschreibung der Quellgruppe", "Methodische Aspekte" etc.) vollständig und nachvollziehbar beschrieben ist.	ARR	2022
Energy	1.A.1, 1.A.2.+ g.vii+iii, 1.A.3.e.+e.i, 1.A.4.a.i.+b.i+c.i, 1.A.5.a, 1.AD, 1.D.1+.2		ARR, CHKL	2022, 2024+25
Industrial Processes	2.C.2+5+6, 2.D.1.(b), 2.D.3.(a,d,e,f,g,h,i)+(j)		CHKL	2019, 2026
LULUCF	4., 4.D.1		ESR	2025
Waste	5.A.1, 5.D.1, 5.E.1.(a)		CHKL	2026
General	0.	Handlungsbedarfe unterschiedlichen Inhalts.	Sonstige	2014, 2016
Energy	1.A.1, 1.A.2., 1.A.2.g.vii, 1.A.3.c+d(a+b)+e, 1.A.4.a.i+ii+b.i+ii+c., 1.A.5.a+b.		CHKL, NID, Sonstige	2015, 2017-19, 2022-26
Industrial Processes	2.D.3.(a,d,e,f,g,h,i)		CHKL	2025
Waste	5.A.1, 5.D.2		ARR, Sonstige	2015+16, 2018
Energy	1.A.3.b+e+e.i	Überprüfung ob Zuständigkeiten aktualisiert werden müssen.	Audit, CHKL	2016, 2024
Industrial Processes	2.A.4.b, 2.D.1.(a), 2.D.2, 2.D.3.(a,b,d,e,f,g,h,i), 2.D.3.(b), 2.G.3.a.+b(ii), 2.G.4.(c)		CHKL, NIR	2012, 2024+25

Seit erstmaliger Veröffentlichung eines Inventarplanes mit der Berichterstattung 2007 sind mehrere tausend Handlungs- bzw. Verbesserungsbedarfe im Qualitäts-System zur Verbesserung adressiert worden.

Zum Ende des aktuellen Berichterstattungsjahres besteht der Inventarplan aus rund 380 aktiven Handlungs- bzw. Verbesserungsbedarfen. Sie verteilen sich auf etwa 77 Kategorien.

Die Schwerpunkte der offenen bzw. in Bearbeitung befindlichen Verbesserungsbedarfe liegen in den Bereichen Dokumentation, Verifizierung und verschiedene Verbesserungen.

In der Übersicht der Tabelle 11 werden detailliertere Informationen zu den erledigten Verbesserungsbedarfen gegeben. In beiden Tabellen (Tabelle 10 & Tabelle 11) sind Review-Ergebnisse ab 2010, im NIR getroffene Aussagen zu geplanten Verbesserungen ab 2012, sonstige Verbesserungsbedarfe ab 2014 sowie CHKL-Ergebnisse der Jahre ab 2012 enthalten.

Detailinformationen zu einzelnen Verbesserungen hinsichtlich Kategorie, Priorität, Terminierung, Zuständigkeit, Gas, Brennstoff, Handlungsbedarf etc. können aufgrund des Umfangs der Informationen hier nicht dargestellt werden. Weiterführende Auszüge aus dem Inventarplan können für die erledigten Review-Ergebnisse unter Tabelle 467 und für die im NIR/NID getroffenen Aussagen zu geplanten Verbesserungen unter Tabelle 468 eingesehen werden.

Tabelle 11: Inventarplan - erledigte Handlungsbedarfe/Verbesserungen

Haupt-kategorie	Kategorie (CRF-Code)	Planung zur Inventarverbesserung / Handlungsbedarf	Quelle	Quellenbezug _Berichtsjahr
LULUCF	4, 4.A.1, 4.E.2	Überprüfung, ob die Anforderungen der IPCC-Guidelines an die Auswahl der Berechnungsmethode und die Verfahren bei vorliegenden Methodenwechsel erfüllt sind oder ob bestehende Berechnungsmethoden/Modelle ggf. angepasst werden müssen.	ESR, NIR	2023+25
Energy	1.B.2.b.iv-vi	Überprüfung, ob Datenlücken in Zeitreihen vorliegen.	CHKL	2025
Industrial Processes	2.B.7., 2.B.10.(i)	Überprüfung, ob die Unsicherheiten ermittelt wurden und vollständig und aktuell sind.	CHKL	2023+24
General	0.	Überprüfung, ob die geforderten Aufzeichnungs- und Dokumentationspflichten erfüllt werden und die jeweiligen Unterlagen vollständig, nachvollziehbar und aktuell sind.	CHKL	2015
Energy	1.A.5.b.(i), 1.B.1, 1.B.2.b.iv-vi		CHKL	2025
Industrial Processes	2.B.7, 2.B.9, 2.B.10.(i), 2.C.3.a+b, 2.C.4, 2.E.1+3+4, 2.F.1-5, 2.G.1+2+2.(c+d)		CHKL	2024+25
LULUCF	4 (V)		CHKL	2024
Waste	5.D.2, 5.E.1.(a)		CHKL	2025
General	0.	Überprüfung, ob Datenlieferanten bzw. Auftragnehmer geeignete routinemäßige Qualitätskontrollen durchführen und ob die durch die Nationale Koordinierungsstelle festgelegten Anforderungen an die Emissionsberichterstattung an diese weitergegeben und umgesetzt werden.	Sonstige	2016
Energy	1.A.3., 1.A.4.c.iii., 1.A.5.b.		CHKL	2015, 2024+25
Industrial Processes	2.D.1.(b)		CHKL	2025
General	0	Überprüfung, ob die Anforderungen zum Abgleich und zur Verifizierung von Daten bzw. zugrunde liegender Annahmen erfüllt werden.	CHKL	2024+25
Energy	1.A.4.a.ii+b.ii.+c.ii, 1.A.5.b.(iii), 1.B.1, 1.B.2.b.iv-vi		CHKL	2022, 2025
Industrial Processes	2.B.1+2, 2.G.2.(c), 2.G.4.(d)		CHKL	2023-25
LULUCF	4.G		CHKL	2025
Waste	5.D.1+2		CHKL	2025
Energy	1.B.1, 1.B.2.b.iv-vi		CHKL	2025

Haupt-kategorie	Kategorie (CRF-Code)	Planung zur Inventarverbesserung / Handlungsbedarf	Quelle	Quellenbezug _Berichtsjahr
Industrial Processes	2.B.10.(i)	Überprüfung, ob die Anforderungen an die Datenkonsistenz erfüllt werden und die jeweiligen Unterlagen vollständig und nachvollziehbar sind.	NID	2024
Agriculture	3.D.2	Überprüfung, ob die EF vollständig und plausibel (ohne Fehlstellen, vollständig dokumentiert) und aktuell sind.	ESR	2025
LULUCF	4.E.2, 4.G	Überprüfung, ob die AR vollständig (ohne Fehlstellen, vollständig dokumentiert) und aktuell sind.	ESR, NID	2025
General	0.	Überprüfung, ob die Quellgruppe für den NIR entsprechend der geforderten sechs Unterkapitel des NIR ("Beschreibung der Quellgruppe", "Methodische Aspekte" etc.) vollständig und nachvollziehbar beschrieben ist.	ARR	2022
Energy	1, 1.A.1.a, 1.B.1+2.a, 1.B.2.b.i-iii, 1.B.2.b.iv-vi, 1.B.2.c. - Flaring		ARR, CHKL	2015+16, 2022, 2025
LULUCF	4		ESR	2025
LULUCF	4	Überprüfung, ob Rekalkulationen durchzuführen sind. Falls dies der Fall ist, sind sie nachvollziehbar zu dokumentieren.	NID	2025
General	0.	Handlungsbedarfe unterschiedlichen Inhalts.	Sonstige	2016
Energy	1.A.3.b, 1.A.3.d.(b), 1.B.2.b.iv-vi		CHKL	2020, 2025
Industrial Processes	2.B.10	Initiierte Forschungsprojekte zur Inventarverbesserung.	NID	2025

1.5.1.4 Audit

Im April 2016 wurde das Qualitätssystem (QSE) des Umweltbundesamtes von externer Stelle auditiert. Ziele waren:

- Prüfung ob das QSE mit den Qualitätsvorgaben der *2006 IPCC Guidelines* übereinstimmt
- Identifizierung von Verbesserungspotentialen
- Identifizierung von möglichen Risiken für die Aufrechterhaltung der Datenqualität.

Es wurde ein Auditprogramm erarbeitet, welches deutlich mehr als nur einen repräsentativen Querschnitt über alle Emissionskategorien bietet, da die auditierten Mitarbeiter in den meisten Fällen weitere Kategorien betreuen und deren Vorgehen dort sich wenig von den herangezogenen Fällen unterscheidet.

Mit dem erarbeiteten Auditplan wurde im Februar 2016 ein Voraudit für zwei Kategorien sowie den Koordinatoren für das Qualitätssystem (QSE), das Zentrale System Emissionen (ZSE; Datenbank) und das Nationale System (NaSE) durchgeführt, um die Anwendbarkeit und den Zeitbedarf zu testen und um die Notwendigkeit von Anpassungen des Auditplanes zu ermitteln. Parallel zur Überarbeitung des Auditplans wurde ein Zeitplan für die Durchführung der Audits bei Einsatz von insgesamt 5 Auditoren erstellt. Beim Audit wurden an drei Tagen im Regelfall paarweise die Fachverantwortlichen (FV) und deren fachliche Ansprechpartner (FAP) für 44 von 148 Kategorien auditiert. Die überprüften Vorgehensweisen und Abläufe in den auditierten Kategorien repräsentieren mehr als 80 % der Gesamtemissionen des deutschen Treibhausgas-inventars. Darüber hinaus wurden, soweit diese noch nicht im Voraudit erfasst waren, alle Koordinatoren in Einzelaudits in das Auditprogramm aufgenommen.

Der Auditplan umfasste folgende Themenfelder:

1. Rollen und Zuständigkeiten
2. Anwendung allgemeiner Verfahren der Qualitätskontrolle
3. Umsetzung der Vorgaben des QSE-Handbuches (Inventarbeschreibung, Inventraplan, NIR)
4. Kategorie-spezifische Qualitätskontrolle für

- Emissionsfaktoren
- Messungen
- Aktivitätsraten
- Berechnungsverfahren und Bestimmung der Unsicherheiten

Die wesentlichen Ergebnisse des Audits sind:

1. Die Mindestanforderungen an die Qualitätskontrolle/Qualitätssicherung (QK/QS), die durch die IPCC 2006 Guidelines vorgegeben werden, werden vorbehaltlos eingehalten. Alle Soll-Anforderungen werden mit der Ausgestaltung und Umsetzung des QSE erfüllt.
2. Die vorgegebenen QK/QS-Verfahren des QSE sind wirksam, um die Datenqualität entsprechend den Anforderungen der IPCC-Guidelines zu gewährleisten, und einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess voranzutreiben. Voraussetzung hierfür ist die konsistente Umsetzung der Vorgaben des QSE durch die eingebundenen Mitarbeiter und Fachbereiche.
3. Das QSE geht über den eigenen Anspruch der Erfüllung der Mindestanforderungen weit hinaus und kann für viele Aspekte selbst Best-Practice-Beispiele in Anlehnung an die IPCC 2006 Guidelines bieten. Besonders hervorzuheben sind dabei die Ausgestaltung und der Umfang der Inventarbeschreibung, welche in fast allen untersuchten Kategorien ein umfassendes und transparentes Instrument für die Dokumentation von Daten, dem Bearbeitungsstand und den angewandten Verfahren darstellt. Lediglich im Bereich der Kategorie-spezifischen Qualitätskontrolle gibt es an einigen Stellen Verbesserungspotential, welches langfristig umgesetzt werden könnte (z.B. die Erstellung von einheitlichen Vorlagen für Tabellenkalkulationsblätter)
4. Das Risiko hinsichtlich einer Verringerung der Datenqualität ist aufgrund der Ausgestaltung des QSE und insbesondere des hohen Informationsgehalts der in den Inventarbeschreibungen abgelegt ist, als sehr gering einzustufen. Risiken bestehen eher im Hinblick auf temporäre Lücken in der kontinuierlichen Anwendung von Erhebungs- und Berechnungsverfahren, da im Falle des Ausfalles von Erfahrungsträgern teilweise als Ersatz Extrapolationsrechnungen in der Berichterstattung herangezogen werden müssten. Ein solcher Ausfall bedeutet aber keinesfalls einen Informationsverlust, so dass der Datenbestand mit der üblichen Datenqualität nachträglich wiederhergestellt werden könnte.
5. In einzelnen Kategorien lässt sich noch eine Verbesserung der Datenqualität durch eine häufigere Prüfung der Aktualität der genutzten Daten erreichen. So könnte es sinnvoll sein, dass in einem verpflichtenden Mindestzeitraum zu prüfen ist, ob Faktoren noch aktuell sind, oder ob inzwischen Daten zur Nutzung eines höherwertigen Ansatzes (z.B. national statt IPCC-Default) zur Verfügung stehen, bzw. beschafft werden können. Bei vorhandenem Aktualisierungsbedarf wären die notwendigen Studien in das Forschungsbudget einzuplanen.
6. Individuelle Verbesserungspotentiale für die untersuchten Kategorien und für allgemeine Belange konnten ebenfalls ermittelt werden. Sie wurden in die bestehenden Verbesserungsinstrumente (Inventarplan) übernommen.

1.5.1.5 Workshops zum Nationalen System (Peer Review)

Das Umweltbundesamt hat im November 2004 erstmals einen Workshop zum Nationalen System Emissionsinventare durchgeführt. Damit wurde ein Forum geschaffen, das die Einbindung von Verbänden und anderen unabhängigen Organisationen wesentlich förderte und

der Umsetzung des Paragraphen 15 (b) der *Guidelines for National Systems* diente, die Inventare durch Dritte (*Peer Review*) prüfen zu lassen.

In der Folge wurden in mehrere Workshops durchgeführt, die jeweils der Überprüfung der Inventare durch unabhängige Dritte entsprechend des Paragraphen 15 (b) der *Guidelines for National Systems* dienten. 2009 fokussierte sich ein zweiter Workshop auf spezifische Kategorien des Inventars, wie N_2O aus der Produktverwendung, Emissionen aus der nicht-energetischen Verwendung fossiler Brennstoffe und SF_6-Emissionen aus der Photovoltaik-Industrie. Die umfangreichen und intensiven Diskussionen während des Workshops haben wesentlich zur Verbesserung der Datenlage und damit zur Verbesserung der Qualität der Berichterstattung beigetragen.

2011 wurde ein internationaler Experten-Workshop zum deutschen LULUCF-Berichtssystem durchgeführt, der die methodischen Änderungen in Folge des *In-Country-Reviews* vom September 2010 begutachtete. Die Expertenempfehlungen wurden in der weiteren Umsetzung vollständig berücksichtigt.

Jeweils ein Fachgespräch mit dem Statistischen Bundesamt mit dem Thema Erdgasstatistik wurde in 2012 und im Sommer 2015 durchgeführt. An dem Fachgespräch 2012 nahmen neben dem Statistischen Bundesamt und dem Umweltbundesamt auch der BDEW, Vertreter einzelner Gasunternehmen und das DIW (AGEB) teil. In Vorbereitung der Überarbeitung der nationalen Energiebilanz wurden die verfügbaren Erdgasstatistiken diskutiert. Dabei wurden zum einen Maßnahmen beschlossen, die zu einer direkten Verbesserung der Energiebilanz und damit auch zur Verbesserung des Emissionsinventars führen. Zum anderen wurden weitere Recherchen vereinbart, die der Verifikation der statistischen Daten dienen sollen. Das Fachgespräch in 2015 diente der Abstimmung des Datenaustauschs zwischen dem Statistischen Bundesamt und dem Umweltbundesamt auch im Hinblick auf die neuen Berichtsanforderungen aus den *2006 IPCC Guidelines* (IPCC, 2006a) und der europäischen Monitoring Verordnung 525/2013 (EU, 2013a).

Bereits im März 2014 wurde ein Workshop mit europäischen Inventarexperten zur Umsetzung der *2006 IPCC Guidelines* in der deutschen Treibhausgasemissionsberichterstattung durchgeführt. Der Workshop mit ca. 60 Teilnehmenden fokussierte sich insbesondere auf die Sektoren Energie (CRF 1) und Industrieprozesse und Produktverwendungen (CRF 2). Durch den Erfahrungsaustausch konnte die Umsetzung der neuen Methoden in den deutschen Treibhausgasinventaren erheblich verbessert werden.

1.5.1.6 Ländervergleich zu fluorierten Gasen (*Cross-Country-Review*)

Im Februar 2011 fand in Wien ein Expertentreffen zu einer gegenseitigen länderübergreifenden Überprüfung speziell zur Berichterstattung der F-Gase statt. Teilnehmer waren Großbritannien, Österreich und Deutschland. Nach einer grundsätzlichen Vorstellung der Datenerhebung in den drei Ländern wurden die einzelnen Anwendungsbereiche detailliert betrachtet und hinsichtlich Datenquellen, Genauigkeit, Emissionsfaktoren und anderer Kriterien verglichen. Dabei wurde deutlich, dass Deutschland über das meiste fachliche Hintergrundwissen verfügt und damit die Vollständigkeit und Plausibilität der vorhandenen Daten vermutlich am besten einschätzen kann.

Wesentliches Ergebnis der länderübergreifenden Überprüfung ist, dass alle drei Länder einen hohen Aufwand der Berichterstattung für die F-Gase betreiben müssen. Eine Verringerung des Aufwandes führt zu einer nicht mehr IPCC-konformen Berichterstattung.

Als Ergebnis des Treffens wurde ein Bericht erarbeitet, der in die deutsche Berichterstattung der F-Gase eingeflossen ist.

1.5.2 Aktivitäten zur Verifizierung

1.5.2.1 Verifizierung ausgewählter Kategorien

Im Berichterstattungsjahr 2015/2016 wurde in Umsetzung der *2006 IPCC Guidelines (Vol.1, Chapter 6)* ein Verifizierungsprojekt durchgeführt. Hierfür wurden alle Kategorien des Inventars auf ihren Bedarf für eine Verifizierung untersucht. Folgende Kategorien wurden ermittelt:

- *1.A.2.a Iron & Steel*
- *1.A.3.e Other Transportation*
- *1.B.1.a.ii Surface Mining*
- *1.B.2.b.v.i Natural Gas: Other*
- *2.A Mineral Industry*
- *2.B.1 Ammonia Production*
- *2.B.2 Nitric Acid Production*
- *2.B.3 Adipic Acid Production*
- *3 Agriculture*
- *4 Land Use Matrix*
- 4 Konsistenz der Beschreibungen im NID zu den CRT-Tabellen
- *4.A Forest Land*
- *5.A.1 Managed Waste Disposal*

Für die genannten Kategorien wurde vom Projektnehmer eine Verifizierung durchgeführt. Die Ergebnisse sind nach Fertigstellung dem Verifizierungskapitel der jeweiligen Kategorie zu entnehmen.

1.5.2.2 Verifizierung des nationalen Inventars mit Hilfe unabhängiger Daten

Die Verifikation des zeitlichen Verlaufs der drei wichtigsten Treibhausgase (CO_2, N_2O and CH_4) für das deutsche Emissionsinventar wurde mit Hilfe jener Datensätze durchgeführt, die auch in den *2019 IPCC Refinements* empfohlen wurden (IPCC, 2019). Dies sind besonders die *Emission Database for Global Atmospheric Research* (EDGAR) (Crippa et al., 2025a) des JRC und Daten des *Copernicus Atmospheric Monitoring Service* (CAMS) des ECMWF (ECMWF, 2025). Zusätzlich wurden Daten des *Pollution Release and Transfer Register* (PRTR) (Umweltbundesamt, 2025), sowie Daten des *European Emission Trade System* (ETS) der *European Environment Agency* (EEA, 2025) herangezogen. Diese vier Datensätze sind unabhängig von den „*national totals*“ des deutschen Inventars und können daher als unabhängige Verifikationsdatenbasis dienen, wie in den IPCC Richtlinien unter 6.10.1-6.10.2 beschrieben (IPCC, 2019). Die EDGAR Datenbank dient hierbei zum Vergleich der Trends in den drei obig benannten Treibhausgasen im Zeitraum von 1990-2024, welcher direkt erfolgen kann da EDGAR sowohl räumlich verteilte als auch aggregierte Daten für einen Vergleich mit der nationalen Gesamtemissionsmenge anbietet (Crippa et al., 2025b). Die CAMS Daten müssen hierfür sowohl räumlich als auch zeitlich aggregiert werden, um einen Vergleich mit der nationalen Gesamtemissionsmenge durchzuführen. Im bereits erwähnten Zeitraum kann jedoch nur ein Vergleich mit den CAMS CO_2 Daten (Chevallier, 2020), sowie den Methandaten (Seegers, Houweling and Tokaya, 2020)

erfolgen, während der Lachgasdatensatz erst ab 1996 verfügbar ist (Thompson, 2021). Die PRTR Daten und die Daten des ETS sind für eine Verifikation nur ab 2007 (Umweltbundesamt, 2025) bzw. 2005 (EEA, 2025) verfügbar. Weitere Informationen zu den Datensätzen, mitsamt der vertiefenden Verifikationsanalyse des temporalen Trends des deutschen Inventars (inklusive LULUCF und AFOLU), können dem Anhang 5.1.4. entnommen werden. Die Zeitspanne für den Vergleich wurde durch die größte überlappende Zeitspanne zwischen den analysierten Datensätzen festgelegt und umfasst den Zeitraum 1990-2022/2023 (je nach zeitlichem Umfang des Vergleichsdatensatzes). Der EDGAR Datensatz bildet in diesem Falle die Daten des deutschen nationalen Inventars sehr gut nach, wie im Anhang 5.1.4 zu sehen. Die Daten des CAMS Dienstes bilden auch den zeitlichen Trend der deutschen Inventardaten nach, mit Ausnahme der Lachgasdaten (Thompson, 2021). Dies zeigt deutlich wie wertvoll Daten inverser Modellierungen für die Verifikationsarbeit am nationalen Emissionsinventar sein können, wie in den *IPCC 2019 Refinements* erwähnt (IPCC, 2019). Jedoch ist noch weitere wissenschaftliche Entwicklungsarbeit von Nöten, um diese Resultate noch weiter zu verbessern. Auf der europäischen Ebene greifen Initiativen wie Verify und COCO2, sowie viele zukünftige Projekte diese Arbeit auf, um in Zukunft noch bessere Resultate und Datenprodukte zu liefern. Sobald diese Datensätze der Inventarcommunity zur Verfügung gestellt werden, werden diese in zukünftige Verifikationsaktivitäten einfließen. Die PRTR und die ETS Daten zeigen einen ähnlichen zeitlichen Verlauf, wenn sie mit den nationalen Inventardaten verglichen werden, mit Korrelationswerten um 0.8 für beide Datensätze. Weitere Analysen finden sich im Anhang 5.1.4.

1.5.2.3 Verfahren zur Nutzung der Monitoring-Daten des Europäischen Emissionshandels

Zur Erfüllung von obligatorischen Qualitätskriterien wird besonders innerhalb der EU eine Verbesserung der THG-Emissionsinventare durch Erkenntnisse aus dem Europäischen Emissionshandel (ETS genannt) gefordert.

Seit dem Beginn des ETS-Monitorings liegt für die jährlich verursachten Emissionen eine gesicherte Datenbasis des Emissionshandels vor. Diese Daten gestatten in aggregierter Form kategorienspezifische Aussagen über Vollständigkeit und Konsistenz für Teile des Emissionsinventares. Darüber hinaus bilden sie eine Grundlage für die Überprüfung der verwendeten Emissionsfaktoren und für die Verifikation der Aktivitätsdaten. Da die Emissionsberechnung im Emissionsinventar für alle Komponenten auf den gleichen Aktivitätsdaten aufbaut, hat diese Verifikation für alle zu berichtenden Schadstoffe Bedeutung.

Die für die Verbesserung berichtspflichtiger Inventardaten benötigten Daten aus dem Emissionshandel liegen elektronisch in der Anlagendatenbank der Deutschen Emissionshandelsstelle (DEHSt) vor. 2005 wurde ein genereller Verfahrensablauf für einzelne gezielte Datenanfragen für die Inventarerstellung vereinbart. Dieser läuft im Wesentlichen durch direkte Kommunikation zwischen der Nationalen Koordinierungsstelle und der für die Berichte zuständigen Facheinheit V 3.3 der Emissionshandelsstelle (siehe Kapitel 1.2.2.3.1.8). Um die Potentiale regelmäßig nutzen zu können, ist für den jährlich erforderlichen Datenaustausch dieses formalisierte Verfahren mit terminlichen Festlegungen vereinbart worden.

Für Kategorien, die berichtspflichtige Anlagen unter dem CO_2-Emissionshandelsregime (ETS) beinhalten, werden die Monitoring-Daten des Europäischen Emissionshandels zur Qualitätsverbesserung der jährlichen nationalen Emissionsinventare genutzt. Informationen finden sich in den Kategoriekapiteln zur Verifikation, wobei nur in Einzelfällen die detaillierten Vergleiche aufgeführt sind. Aus Geheimhaltungsgründen, hier insbesondere für einige Inventardetails, sind die Ergebnisse der Vergleiche meist textlich beschrieben. Tabellen mit den verwendeten Daten können nur im Zuge von Inventarüberprüfungen zur Kenntnis gegeben

werden. Einen exemplarischen Überblick über eine erfolgreiche Verifikation bietet der Vergleich der brennstoffbezogenen CO_2-Emissionsfaktoren im Anhang 6.6.

Die Bereitstellung der Datenbasis von der DEHSt an die Fachverantwortlichen der Inventare erforderte bereits mehrmals projektbasierte Unterstützung. Es wurden Zuordnungsregeln erarbeitet, die die Vergleichbarkeit der Daten der verifizierten Emissionsberichte mit der Struktur der Inventardatenbank jahresweise ermöglichen (Öko-Institut, 2006). Dabei wurde deutlich, dass die Menge an Daten aus dem ETS für die Inventarberechnungen ressourcen- und zeitkritisch ist. Bei Abweichungen in den gebildeten Aggregaten, die den Anforderungen an die Vertraulichkeit von Betriebs- und Geschäftsgeheimnissen genügen, ist eine Prüfung der einzelbetrieblichen Datensätze notwendig. Diese Hürde wurde auch bei einem internationalen Workshop innerhalb des Projektes von den Experten anderer Länder für die deutsche Situation bestätigt (Handke et al., 2013). In einem weiteren Projekt wurde die Situation hinsichtlich der Anpassung der Anforderungen im ETS für die dritte Handelsperiode untersucht (Herold et al., 2016).

Aktuell liegen regelmäßig standardisierte Vergleichdaten vor, deren Erstellung vor allem auf Berichtspflichten innerhalb der EU-Regularien zu Treibhausgasen basiert. Folgende Datensätze werden in der Inventardatenbank ZSE bereit gestellt:

- Daten in der Aufteilung des deutschen Treibhausgasemissionshandelsgesetzes (TEHG): Es handelt sich Emissionsaggregate aus Betreibermeldungen an das Unionsregister, die über die DEHSt zur Verfügung gestellt werden. Wegen der Summenausweisung brennstoffbezogener und Prozessemissionen nicht direkt für CRF-Vergleiche geeignet.
- Daten gegliedert nach CRF: Daten aus geprüften Emissionsberichten der Betreiber werden von der DEHSt in Absprache mit der Nationalen Koordinierungsstelle zur Verfügung gestellt, um EU-Berichtspflichten zu erfüllen. Gemäß der Durchführungsverordnung zur Europäischen Governance Verordnung für die Energieunion und für den Klimaschutz[16] ermöglichen diese Daten den quantitativen Vergleich von EU-ETS-Emissionen mit dem THG-Inventar.

Die Methodiken zur Erstellung der oben genannten Aggregate werden kontinuierlich verbessert und in fachlichen Rücksprachen diskutiert.

1.5.3 Umgang mit vertraulichen Informationen

Nach Inkrafttreten der Novellierung des Energiestatistikgesetzes vom 26. Juli 2002 über das 3. Mittelstandsentlastungsgesetzes erhielt das Umweltbundesamt für Zwecke der Inventarerstellung Zugriff auf Daten des Statistischen Bundesamtes, die der statistischen Geheimhaltung unterliegen. Dieser Zugriff wurde auch in der Novelle des Energiestatistikgesetz vom 6. März 2017 (BGBl. I S. 392) in § 13 sichergestellt.

Ebenso erhält die Nationale Koordinierungsstelle von Verbänden und Unternehmen Aktivitätsraten, Emissionsfaktoren und Emissionsdaten, die Betriebs- und Geschäftsgeheimnisse enthalten und anderweitig vertraulich sind.

Hierzu sind in der Nationalen Koordinierungsstelle bei der Datenhaltung und beim Umgang mit den Daten besondere Vorkehrungen zu treffen und Prozeduren einzuhalten, die eine Wahrung der Vertraulichkeit sicherstellen.

[16] VERORDNUNG (EU) 2018/1999 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 11. Dezember 2018 über das Governance-System für die Energieunion und für den Klimaschutz

Insbesondere muss eine strikte Trennung (räumlich und personell) von Statistik / Analyse und dem Vollzug gewährleistet sein.

Die Nationale Koordinierungsstelle und die betroffenen Facheinheiten des Umweltbundesamtes haben verschiedene Vorkehrungen zur Umsetzung dieser Erfordernisse getroffen. Dabei gilt immer der Grundsatz, dass Personen mit Vollzugsaufgaben keine fachverantwortlichen Aufgaben für die Emissionsberichterstattung in diesem Bereich übernehmen können.

Um eine genaue Einschätzung der Erfordernisse und der Möglichkeiten beim Umgang und der Nutzung der Datenbestände der Emissionsberichterstattung vornehmen zu können, hat die Nationalen Koordinierungsstelle 2008 einen Auftrag zur Erstellung eines juristischen Gutachtens erteilt. Die Ergebnisse flossen in die Überarbeitung und Weiterentwicklung eines Konzepts der Nationalen Koordinierungsstelle zum Umgang mit vertraulichen Daten ein und wurden über die Hausanordnung Nr. 04/2019 - Sicherstellung der Geheimhaltungs-anforderungen nach BStatG, EnStatG, UStatG, ProdGewStatG sowie vertraglichen Reglungen im Fachbereich V auch formal umgesetzt.

Schon vorher implementiert wurde eine personenscharfe Zugangsregelung zur Datenbank Zentrales System Emissionen (ZSE), die einen Datenzugriff nur dem dafür berechtigten Personenkreis erlaubt. Diese Maßnahme stellt den Kern der bestehenden Vorkehrungen zum Umgang mit vertraulichen Daten dar. Damit kann insbesondere die erforderliche personelle Trennung von Statistik und Vollzug praktisch umgesetzt werden. Darüber hinaus wurde 2009 für vertrauliche elektronische Daten, die nicht zentral im ZSE gehalten werden (z.B. Energiedaten, die der statistischen Geheimhaltung unterliegen, Emissionsschutzerklärungen, Daten zu Großfeuerungsanlagen, Informationen zu Produktionsverfahren, etc.) ein speziell zugangsbeschränkter Bereich auf einem zentralen Server des Umweltbundesamtes eingerichtet.

Weiterhin werden Daten des Statistischen Bundesamtes auf einem personenbezogen passwortgeschützten Server beim Statistischen Bundesamt bereitgestellt und im Umweltbundesamt in einer Datenbank mit personenscharfe Zugangsregelung weiter verarbeitet.

1.6 Generelle Unsicherheitenschätzung, einschließlich Daten über die Gesamtunsicherheit der nationalen Gesamtemissionen

Die *IPCC Guidelines 2006* ((IPCC, 2006a): Vol. 1, Kap. 3) charakterisieren die Bestimmung von Unsicherheiten als ein wesentliches Element eines vollständigen Inventars. Durch den Anspruch zur kontinuierlichen Inventarverbesserung kommt dem Aspekt der Unsicherheiten in den Inventaren eine hohe Priorität zu. Die Information über die Unsicherheit wird dabei vorrangig als Hilfe zur zukünftigen Verbesserung der Genauigkeit des Inventars sowie der Methodenwahl und der Rekalkulation betrachtet. Dabei ist es erklärtes Ziel, die Unsicherheiten so weit wie praktikabel zu reduzieren um möglichst genaue Inventare zu erhalten. Dazu werden die Unsicherheiten aller Kategorien und Senken zunächst quantifiziert, um eine bessere Übersicht über die Inventarqualität zu schaffen, die wiederum Voraussetzung für eine effektive Inventarplanung ist.

Es werden grundsätzlich zwei Methoden zur Ermittlung von Unsicherheiten unterschieden. Die Approach-1-Methode kombiniert auf einfache Weise die Unsicherheit von Aktivitätsrate und Emissionsfaktor je Kategorie und Treibhausgas und aggregiert diese über alle Kategorien und Treibhausgaskomponenten zur Gesamt-Unsicherheit des Inventars. Die Approach-2-Methode zur Ermittlung von Unsicherheiten geht prinzipiell ebenso vor, berücksichtigt jedoch die Verteilungsfunktion der Unsicherheit und aggregiert mittels einer Monte Carlo Simulation. Dies erfordert für die Approach-2-Methode zusätzlich die Ermittlung einer Wahrscheinlichkeits-

dichtefunktion für alle Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren. Im Idealfall können diese Funktionen über die statistische Auswertung von Einzeldaten bestimmt werden (z.B. Messergebnisse einer größeren Zahl von Anlagen). Oft stehen jedoch nur wenige Werte zur Verfügung, so dass die Unsicherheit auf der Grundlage von Expertenschätzungen ermittelt wird.

Im Forschungsvorhaben 202 42 266 (Handke et al., 2004) ist erstmals eine Ermittlung der Unsicherheiten nach Approach 1 und nach Approach 2 gemäß Kap. 6 der *Good Practice Guidance 2000* (IPCC, 2000) vorgenommen worden. Für die aktuelle Berichterstattung ist diese Datengrundlage kontinuierlich verbessert und die Unsicherheitsangaben für das Treibhausgasinventar weiter vervollständigt worden. Darüber hinaus wurden die Vorgaben der *2006 Guidelines* (IPCC, 2006a) übernommen. In Deutschland werden die Unsicherheiten jährlich sowohl nach Approach 1 als auch nach der Approach 2 Methode ermittelt. Die Angaben zur Unsicherheit der verwendeten Aktivitätsraten, Emissionsfaktoren und Emissionen stammen dabei aus der Datenbank ZSE. Diese basieren auf Literaturangaben und Expertenschätzungen der UBA-Facheinheiten sowie externer Einrichtungen.

1.6.1.1 Vorgehen zur Unsicherheitenbestimmung

Die Ermittlung der Unsicherheiten gemäß Kapitel 3 der 2006er Guidelines (IPCC, 2006a) erfolgt auf Grundlage der auf unterster Subkategorienebene ermittelten Unsicherheiten von AR, EF und EM, wie sie im ZSE hinterlegt sind. Bei vorliegenden asymmetrischen Unsicherheiten-Angaben wird für die Approach-1-Methode der größere der beiden Schrankenwerte, bei Annahme einer Normalverteilung, sowohl als obere als auch als untere Schranke verwendet. Die Approach-2-Methode verwendet dagegen den vollen Datensatz. In jedem Sektor werden die Unsicherheiten der einzelnen Zeitreihen zu einer Gesamtunsicherheit des Sektors aggregiert. Aus der Aggregation der Sektoren ergibt sich dann schließlich die Unsicherheit des Gesamtinventars.

Aufgrund fehlender Daten aus dem Jahr der deutschen Wiedervereinigung (1990) und daraus resultierender technischer Beschränkungen wird generell, abweichend von den Guidelines, das Jahr 1995 als Basisjahr für die Berechnung der Basisjahr- und Trendunsicherheiten verwendet.

Bei der Berechnung von Unsicherheiten ist grundsätzlich davon auszugehen, dass die Aktivitätsraten geringere Unsicherheiten besitzen als die Emissionsfaktoren. Insbesondere die Aktivitätsraten, die sich aus dem Einsatz von Brennstoffen ableiten und die sich auf die bundesdeutsche Energiebilanz stützen, weisen geringe Unsicherheiten auf. Mit der zunehmenden Disaggregation der Brennstoffeinsätze nehmen die Unsicherheiten der daraus abgeleiteten Aktivitätsraten jedoch in der Regel wieder zu.

Die folgende Aufzählung listet einge sektor-spezifische Details, die bei der Berechnung der jeweiligen Unsicherheiten zu Grunde liegen:

- Gemäß der Ergebnisse aus (Rentz et al., 2002) sind die Unsicherheiten der Emissionsfaktoren für indirekte Treibhausgase in stationären Feuerungsanlagen (CRF 1.A.1) als Folge ihrer regelmäßigen Überwachung vergleichsweise gering. Für die N_2O-Emissionsfaktoren werden höhere Unsicherheiten ausgewiesen, da diese Emissionen in der Regel nicht überwacht werden. Gleiches gilt auch für die Emissionsfaktoren von CH_4.
- In der Kategorie der eisenschaffenden Industrie (CRF 1.A.2.a) haben die Unsicherheiten für das Jahr 2017 zugenommen, da aufgrund fehlender Zulieferung von Brennstoffeinsätzen (BGS-Bogen) des Verbandes eine Berechnung der Entwicklung auf der Grundlage der Entwicklung der Produktionsdaten aus dem Emissionshandel vorgenommen werden musste. Die fehlende Zulieferung des Verbandes hat kartellrechtliche Hintergründe.

- Für die Kategorie Verkehr (überwiegend CRF 1.A.3) ist generell von geringen Unsicherheiten auszugehen: Treibstoffeinsätze und Fahrzeugflotten sind aufgrund ihrer Steuerpflicht sehr genau bekannt und die Emissionsfaktoren sehr differenziert modelliert und in der Regel messtechnisch ermittelt worden. Hier ergeben sich möglicherweise Unsicherheiten aus systematischen Messfehlern oder aus falscher Disaggregation.
- In der Kategorie der diffusen Emissionen (CRF 1.B) wird aufgrund der Steuerpflicht von nur geringen Unsicherheiten der Aktivitätsraten zu flüssigen und gasförmigen Brennstoffen (CRF 1.B.2) ausgegangen. Eine Ausnahme bildet lediglich die Abfackelung von Gasen. Die Aktivitätsraten der Kohleförderung (CRF 1.B.1) sind ebenfalls durch die Produktionsmenge gut erfasst.
- Für die Emissionsfaktoren ist, bedingt durch Vielzahl und Heterogenität der für die diffusen Emissionen relevanten technischen Sachverhalte bei Transport, Lagerung und Aufarbeitung von Erdgas und Erdöl, dagegen mit höheren Unsicherheiten zu rechnen.
- Im Bereich der Industrieprozesse (CRF 2) sind in vielen Branchen höhere Unsicherheiten festzustellen. Aktivitätsraten, welche auf Produktionszahlen beruhen, die gegenüber dem Statistischen Bundesamt meldepflichtig sind, können vor allem aufgrund von gegenüber den Berichtsstrukturen abweichenden Branchendefinitionen Unsicherheiten aufweisen. Aktivitätsraten, welche aus Verbandsangaben ermittelt werden, sind in Abhängigkeit des Organisationsgrades der jeweiligen Industriebranche in diesem Verband mit entsprechenden Unsicherheiten behaftet. Bei den Emissionsfaktoren sprechen insbesondere die hohe Technikabhängigkeit einerseits und der hohe Grad der technischen Diversifizierung andererseits für je nach Treibhausgas höhere Unsicherheiten. Ferner ist zu bemerken, dass insbesondere in Branchen mit wenigen Marktakteuren (z.B. Herstellung chemischer Produkte, CRF 2.B) technikspezifische Emissionsfaktoren oftmals Betriebsgeheimnisse berühren, was wiederum zu einer prinzipiellen Zurückhaltung der Betreiber hinsichtlich der Veröffentlichung solcher Daten oder zu pauschalierten Angaben führt. Darüber hinaus erhöhen die teilweise sehr komplexen Entstehungsprozesse der Emissionen aus nicht-verbrennungsbedingten Aktivitäten und die unzureichenden Erkenntnisse bezüglich bestimmter Emissionen verursachender Vorgänge sowie das eingeschränkte Wissen über die Beiträge einzelner Aktivitäten, die Unsicherheiten.
- Für die Kategorien der Abfallbehandlung (CRF 5.A.1, 5.B und 5.E) und der Abwasserbehandlung (CRF 5.D) sind die Unsicherheiten der dort anzusetzenden Emissionsparameter als hoch anzunehmen. Das gilt insbesondere für die Bereiche der Kompostierung und MBA sowie auch für die Abfalldeponierung, da sich dort die Vielfalt der verschiedenen Abfallarten negativ auf die Datensicherheit der Emissionsparameter auswirkt. Bei den Aktivitätsraten lassen sich höhere Unsicherheiten u.a. darauf zurückführen, dass die zugrunde gelegten statistischen Daten uneinheitliche Abfall- bzw. Verwertungsbegriffe nutzen. Diese generellen Annahmen zu den Unsicherheiten der Aktivitätsraten gelten auch für die thermische Behandlung von Abfällen.

Weitere Informationen zu den Unsicherheiten einzelner Quellgruppen finden sich auch in den entsprechenden sektor-spezifischen Kapiteln dieses Berichts.

1.6.1.2 Ergebnisse der Unsicherheitenschätzung

Die Gesamtunsicherheit des Inventars nach Approach 1 für das Jahr 2024 beträgt 3,1 %, bei Approach 2 ergeben sich -2,15/+2,2%. Die folgende Tabelle bietet eine kompakte Übersicht der Unsicherheiten des Gesamtinventars:

Tabelle 12: Übersicht Unsicherheiten Gesamtinventar

	Base year	2024	Trend	Method	Base year uncertainty		2024 uncertainty		Trend uncertainty	
	kt	kt	%		%		%		%	
National total incl. LULUCF	1.293.321	707.608	-45,29	EP	3,00		3,10		3,07	
				MC	-2,63	+2,67	-2,58	+2,53	-6,68	+6,76
National total w/o LULUCF	1.256.826	649.769	-48,30	EP	3,05		2,68		2,09	
				MC	-2,15	+2,20	-1,70	+1,76	-4,62	+4,79

Die Übersicht zeigt die Unsicherheiten des deutschen Gesamtinventars jeweils inklusive sowie ohne CRF 4 (LULUCF). Für beide Fälle sind Unsicherheiten für das Basisjahr, für 2024 und den Trend angegeben. Die Ermittlung erfolgt jeweils sowohl mittels Approach 1 als auch unter Verwendung der Monte-Carlo-Simulation (Approach 2). Letztere bietet einen deutlich besseren Einblick, zum Beispiel kommt nur bei den Approach-2-Unsicherheiten der Unterschied zwischen den beiden Zeilen (mit und ohne LULUCF) korrekt zur Geltung.

Detaillierte Angaben zu den vorliegenden Unsicherheiten nach Sektoren können dem Anhang 2 entnommen werden. Im folgenden werden einige Sektoren genauer beschrieben, die großen Einfluss auf die Unsicherheit des Gesamtinventars haben:

- Die CO_2-Emissionen des Sektors Verbrennung von Brennstoffen (1.A) steuern einen wichtigen Anteil zur Gesamtunsicherheit bei, dabei dominieren die festen Brennstoffe des Sektors Öffentliche Elektrizitäts- und Wärmeversorgung (1.A.1.a) sowie die mobilen Quellen (1.A.3) mit Schwerpunkt Straßenverkehr (1.A.3.b) und die Feuerungen der Haushalte und Kleinverbraucher (1.A.4.a/b/c).
- Bedeutsame Beiträge zur Gesamtunsicherheit liefern die Lachgasemissionen insgesamt, die merklich durch die Lachgasemissionen aus dem Wirtschaftsdüngermanagement (3.B) und den landwirtschaftlichen Böden (3.D) bestimmt werden.
- Die CO_2-Senken und -Quellen des Sektors 4 LULUCF haben an der Gesamtunsicherheit ebenfalls einen maßgeblichen Anteil.

Nennenswerte Beiträge zur Gesamtunsicherheit liefern weiter die Methan-Emissionen aus der Nutztierhaltung (Fermentation bei der Verdauung, 3.A) sowie die Energieeinsätze im Industriebereich unter 1.A.2.a und 1.A.2.g.

1.7 Generelle Prüfung der Vollständigkeit

1.7.1 Informationen über die Vollständigkeit, einschließlich Datenlücken und nicht berichtete Kategorien

Die nachfolgenden Angaben zur Vollständigkeit der einzelnen Kategorien stellen eine textliche Ergänzung zu den in CRT-Tabelle 9 bereitgestellten Infomationen dar.

Im deutschen Emissionsinventar wird unterschieden in:

1. *nicht auftretende* kategoriespezifische Emissionen und Senken (NO: *not occurring*) und

2. aufgrund fehlender Relevanz oder nicht (mit vertretbarem Aufwand) zu erlangender Eingangsdaten *nicht berechnete* und berichtete kategoriespezifische Emissionen und Senken (NE: *not estimated*).

Im Folgenden wird kategoriespezifisch auf einige Ansatzpunkte zur Verbesserung des Inventars hinsichtlich seiner Vollständigkeit eingegangen:

Die verbrennungsbedingten Aktivitäten (1.A) aus dem Bereich der Energie werden als vollständig erfasst betrachtet. Für den Fall, dass in Teilbereichen keine vollständige Abdeckung durch die Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland gegeben ist, wird diese punktuell ergänzt (z.B. nicht kommerzieller Holzeinsatz, Sekundärbrennstoffe, Festbrennstoffe im Schienenverkehr). In einigen Kategorien ist zudem die Trennung in verbrennungsbedingte Emissionen und nicht verbrennungsbedingte Prozessemissionen noch weiter zu verifizieren; die Vermeidung von Doppelzählungen ist hier jedoch generell Bestandteil der Qualitätssicherung.

Im Bereich der Industrieprozesse wird teilweise auf Produktionsdaten aus Verbandsstatistiken und Herstellerangaben zurückgegriffen. Basiert die Emissionsberichterstattung auf diesen Quellen, wird zur Sicherstellung der Vollständigkeit und Zuverlässigkeit des Inventars auch in Zukunft Wert auf die Prüfung des Kategorien-Zuschnitts und der Methodik der Datenerhebung gelegt.

1.7.2 Beschreibung der unbedeutenden Kategorien

Als „not estimated“ (NE) berichtete Emissionen sind gemäß 18/CMA.1 für das Gesamtniveau und die Entwicklung der nationalen Emissionen von untergeordneter Bedeutung, da ihre wahrscheinliche Höhe jeweils unter 0,05 Prozent der nationalen Gesamtemissionen an Treibhausgasen liegt und 500 kt CO_2-Äquivalent nicht überschreitet.

Einige dem UBA zur Verfügung stehende Emissionsdaten, unterliegen aus Gründen des Datenschutzes der Geheimhaltung und werden daher zwar vollständig, aber nur aggregiert berichtet.

Die folgende Tabelle enthält die im deutschen Inventar noch nicht direkt berichteten Emissionsquellen, also Quellen, für die die notwendigen Berechnungsgrundlagen nicht zur Verfügung stehen oder nur mit großem Aufwand ermittelt werden könnten. Diese müssen jedoch den mit der Definition des notation keys „NE“ vorgegebenen Kriterien der Vernachlässigbarkeit entsprechen. Die hierfür erforderlichen Schätzungwerte sind ebenfalls aufgelistet.

Tabelle 13: Vollständigkeit: Übersicht der Quellen und Senken, deren Emissionen nicht in Zeitreihen geschätzt werden (not estimated, NE), Emissionsangaben in [kt CO_2-Äq.]

THG-Emissionen 2024			
National Total (ohne LULUCF)		649.770	
thereof 0,1 %		650	
thereof 0,05 %		325	
CRF-Code	**CRF-Name**	**erwartete bzw. abgeschätzte Emissionen**	**Referenz siehe NID-Kapitel:**
1.B.1.b	transformation processes	< 0	3.3.1.3
1.B.1.b	biochar	< 0,054	3.3.1.3
1.B.2.a.6 / 1.B.2.b.6	Abandoned wells	< 0	emissions considered insignificant; no method provided in the 2006 GL; planned to provide a NID-chapter in a future submission
1.B.2.d	Geothermal Energy	< 1	3.3.2.4
2.A.4.c	Non-metallurgical magnesium production	< 100	4.2.4.3.2
2.B.4.a	Caprolactam	< 15,9	4.3.4.2
2.B.6	Titan dioxid production	< 270	4.3.6
2.D.3	Asphalt - asphalt roofing	< 0,2	4.5.4.2
2.D.3	Asphalt - road paving	< 2,5	4.5.5.2
5.A	Flaring	< 0,8	7.2.1.2.9
5.E.	accidental fires (buildings, cars ...)	< 100	7.6
Summe		**490**	

Auf eine Zusammenfassung der CRT-Tabelle 9 mit den an anderer Stelle im Inventar als „IE“ berichteten Emissionen wird aus Konsistenz- und Platzgründen verzichtet.

1.7.3 Gesamtmenge der als nicht signifikant betrachteten Emissionen

Aus den oben aufgeführten erwarteten bzw. konservativ überschlägig geschätzten Emissionen ergibt sich eine Gesamtmenge von im deutschen Inventar bisher nicht berichteten THG-Emissionen in Höhe von maximal 490 Kilotonnen CO_2-Äquivalenten. Diese Menge entspricht weniger als 0,1 % des für das Jahr 2024 berichteten National Totals.

1.8 Metriken

Deutschland verwendet gemäß den Entscheidungen 7/CP.27 und 18/CMA.1 die Treibhausgaspotenziale mit einem 100 Jahreszeitraum des Fünften IPCC Sachstandsberichts Tabelle 8.A.1

1.9 Zusammenfassung der angewendeten Flexibilitäten

Deutschland kann keinen Gebrauch von Flexibilitäten machen.

2 Trends der Treibhausgas-Emissionen und -Senken

In der folgenden Tabelle werden die für dieses Inventar ermittelten Gesamtemissionen der direkten und indirekten Treibhausgase sowie des Säurebildners SO_2 zusammengestellt. Der gegenüber 1990 erreichte jährliche Fortschritt wird in der im zeitlichen Verlauf abgebildet. Bei allen Substanzen bis auf einzelne F-Gase konnten deutliche Emissionsminderungen erreicht werden. Insgesamt sanken die Emissionen der Treibhausgase als CO_2-Äquivalente gegenüber 1990 um 48,1 %[17].

Alle detaillierten Tabellen zur Trenddiskussion finden sich im Anhang 5.2.

Trendverlauf unter Beachtung von Änderungen zum Vorjahr des Berichtszeitraumes

Gegenüber dem Vorjahr 2023 sanken die Gesamtemissionen um 3,0 %. Gründe sind der gestiegene Anteil erneuerbarer Energien, ein Rückgang der fossilen Energieerzeugung und eine gesunkene Energienachfrage bei Wirtschaft (auch Rückgang der Industrieproduktion) und bei Verbrauchern (geringerer Heizbedarf).

[17] Alle Angaben ohne Berücksichtigung der Emissionen aus der Kategorie Landnutzung, Landnutzungsänderung & Forstwirtschaft (LULUCF)

Tabelle 14: Emissionen von direkten und indirekten Treibhausgasen und SO_2 in Deutschland seit 1990, in Kilotonnen [kt]

	1990 (kt)	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023	2024
CO_2 emissions (without LULUCF)	1.054.796	939.933	898.974	866.910	829.787	798.771	646.683	679.946	670.017	591.373	573.925
Net CO_2 emissions/removals	1.081.618	926.712	897.408	869.065	831.511	796.508	686.158	715.588	719.867	654.005	622.132
CH_4 (without LULUCF)	4.775	4.178	3.469	2.628	2.178	2.024	1.706	1.667	1.628	1.605	1.576
CH_4 (with LULUCF)	5.076	4.468	3.759	2.913	2.481	2.299	1.960	1.963	1.866	1.950	1.881
N_2O (without LULUCF)	197	190	129	131	109	108	96	97	91	91	86
N_2O (with LULUCF)	202	195	133	136	113	112	100	101	95	95	90
F-Gases sum (CO_2 equivalent, 1995 base year)	**12.325**	**16.023**	**12.707**	**13.608**	**13.683**	**14.617**	**11.165**	**10.499**	**9.571**	**9.035**	**8.867**
Total Emissions (without LULUCF) (CO_2 equi.)	**1.253.128**	**1.123.404**	**1.042.998**	**988.947**	**933.250**	**898.606**	**730.972**	**762.773**	**749.266**	**669.578**	**649.770**
Total Emissions/Removals with LULUCF (CO_2 equi.)	**1.289.623**	**1.119.487**	**1.050.728**	**1.000.238**	**944.562**	**905.194**	**778.619**	**807.721**	**806.865**	**742.849**	**707.608**
NO_X	2.850	2.173	1.871	1.634	1.468	1.381	983	969	928	841	809
SO_2	5.461	1.743	643	468	397	341	239	249	247	210	199
NMVOC	3.942	2.361	1.813	1.497	1.367	1.140	1.032	1.052	1.044	968	953
CO	13.319	7.187	5.096	3.825	3.461	3.033	2.428	2.551	2.507	2.340	2.322

Tabelle 15: Veränderungen der Emissionen direkter und indirekter Treibhausgase und SO_2 in Deutschland seit dem jeweiligen Bezugsjahr (1990/1995)

Emissions Trends Changes compared to base year/prev. year (%)	Base Year	Base Year to 2023	Base Year 2024	Compared to prev. Year (2023-2024)
CO_2 emissions (without LULUCF)	1990	-43,9	-45,6	-3,0
Net CO_2 emissions/removals	1990	-39,5	-42,5	-4,9
CH_4 (without LULUCF)	1990	-66,4	-67,0	-1,8
N_2O (without LULUCF)	1990	-53,7	-56,3	-5,7
F-Gases sum	1995	-43,6	-44,7	-1,9
Total Emissons (without LULUCF)	1990	-46,6	-48,1	-3,0
NO_X	1990	-70,5	-71,6	-3,8
SO_2	1990	-96,1	-96,4	-5,3
NMVOC	1990	-75,4	-75,8	-1,6
CO	1990	-82,4	-82,6	-0,8

2.1 Beschreibung und Interpretation des Emissionsverlaufs für aggregierte Treibhausgasemissionen

Von 1990 bis zum Jahr 2024 konnten die Treibhausgasemissionen mit einem Rückgang von 48,1 % deutlich reduziert werden[18]. Die einzelnen Treibhausgase trugen dabei in unterschiedlichem Maß zu dieser Entwicklung bei (siehe Tabelle 4). Bei den direkten Treibhausgasen konnten die Emissionen der mengenmäßig dominierenden Gase deutlich gemindert werden, am stärksten bei Methan. Die Hauptursachen für diese Entwicklungen sind im Folgenden benannt:

- Umstellungen der Nutzung fester Brennstoffe auf emissionsärmere flüssige und gasförmige Brennstoffe im Zeitraum seit 1990;
- Steigende Bedeutung der Nutzung der Erneuerbaren Energien und damit verbundene Substitution fossiler Brennstoffe;
- Gesteigerte Anlageneffizienz, aber auch Rückgang der Industrieproduktion in den letzten Jahren;
- Veränderung von Tierhaltungsbedingungen und der Abbau von Tierbeständen;
- Erfüllung gesetzlicher Regelungen im Bereich der Abfallwirtschaft;

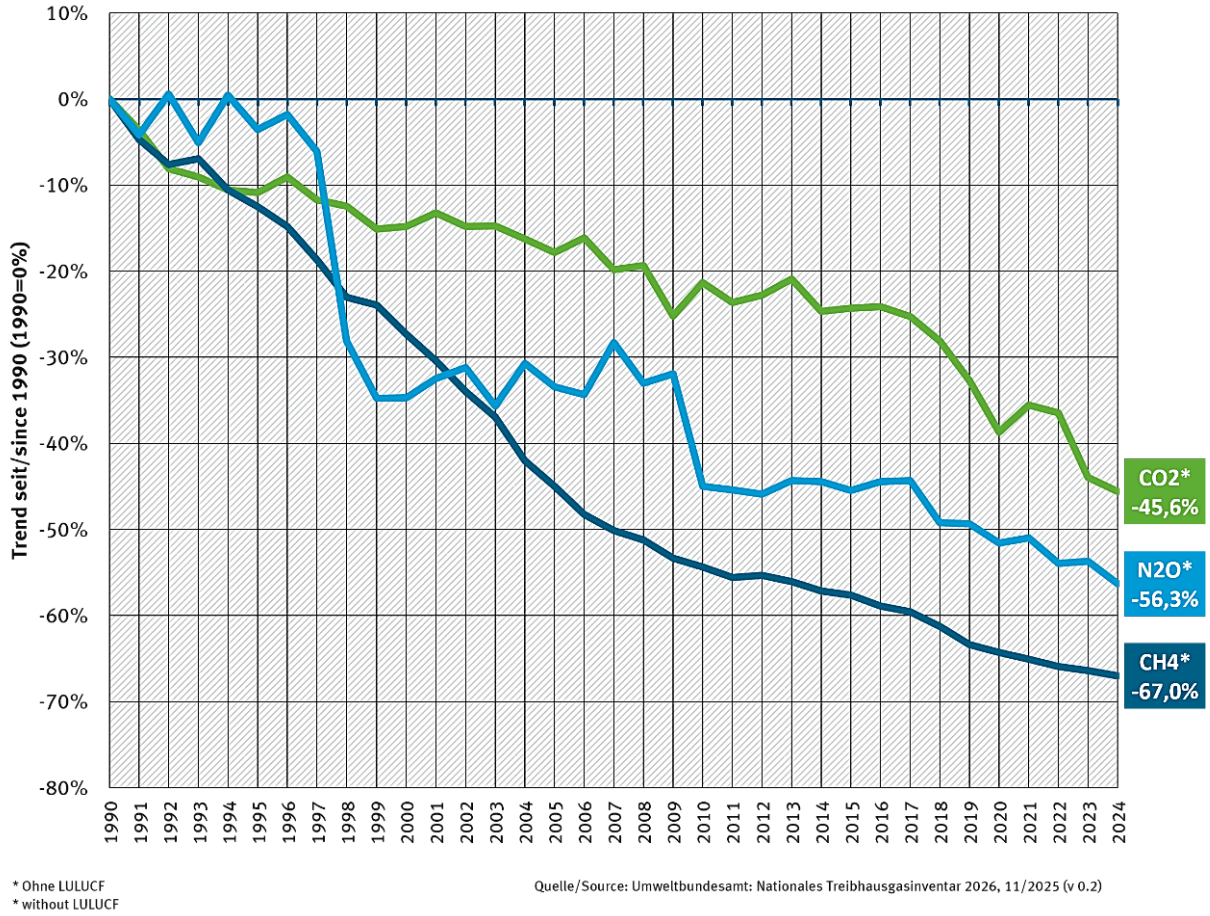
Die Ursachen werden nachfolgend in der Trenddiskussion der einzelnen Treibhausgase näher ausgeführt.

Die Freisetzung von Kohlendioxid - weit überwiegend verursacht durch die Prozesse der stationären und mobilen Verbrennung – dominiert das Gesamtbild der aggregierten Treibhausgasemissionen. Durch den überdurchschnittlichen Rückgang der anderen Treibhausgase ist der Anteil der CO_2-Emissionen an den Gesamttreibhausgasen seit 1990 gestiegen (s. Tabelle 5). Alle anderen Treibhausgase verursachen zusammen nur etwas über ein Zehntel der Gesamttreibhausgasemissionen. Das Verteilungsspektrum der Treibhausgasemissionen ist typisch für ein hoch industrialisiertes Land.

[18] Alle Angaben ohne Berücksichtigung der Emissionen aus der Kategorie Landnutzung, Landnutzungsänderung & Forstwirtschaft (LULUCF)

2.2 Beschreibung und Interpretation des Emissionsverlaufs nach Kategorien und nach Treibhausgasen

Abbildung 14: Relative Entwicklung von Kohlendioxid, Methan und Lachgas gegenüber 1990



In Abbildung 14 wird die relative Entwicklung der Emissionen der einzelnen Treibhausgase seit 1990 dargestellt. Die Trendentwicklung jedes dieser Treibhausgase wird weitgehend durch spezifische Entwicklungen in einzelnen Kategorien dominiert. In den folgenden Unterkapiteln wird daher auf die Emissionsentwicklung nach Kategorien eingegangen.

2.2.1 Beschreibung und Interpretation des Emissionsverlaufs nach Kategorien

Energie

Die Emissionsminderung im Energiebereich resultiert im Wesentlichen aus dem starken Rückgang der verbrennungsbedingten CO_2 Emissionen (siehe hierzu auch die Ergebnisse der Key-Category-Analyse). Demgegenüber können in diesem Bereich die Emissionen der anderen Treibhausgase vernachlässigt werden. Dies stellt sich lediglich bei den nichtverbrennungs-bedingten Emissionen (Kategorie 1.B.) anders dar. Hier sind die CO_2-Emissionen sehr gering, während die Emissionsentwicklung deutlich durch die aus der Verteilung flüssiger und gasförmiger Brennstoffe verursachten CH_4-Emissionen geprägt wird.

Insgesamt nahmen die energiebedingten Emissionen aller Treibhausgase seit 1990 um 48 % ab. Die darin enthaltenen Emissionen des Verkehrs sanken vor allem aufgrund von Sonder-effekten im Zeitraum um etwa 11,9 %. Bei den Emissionen aus stationären Feuerungen resultieren die Minderungen aus Umstellungen im Mix der eingesetzten Brennstoffe, der Erhöhung der

Energieeffizienz und technischer Wirkungsgrade. Außerdem wirkt sich die zunehmende Nutzung erneuerbarer Energiequellen aus, weil dadurch vor allem fossile Stromerzeugung ersetzt wird, wobei Kohlendioxid aus dem Einsatz von Biomasse nicht in den Emissionstrends abgebildet wird. Dagegen wirken sich bei den Verteilungsemissionen die verstärkte Grubengasnutzung, die Sanierung der Gasverteilungsnetze sowie die Einführung von Gaspendelungsanlagen bei der Kraftstoffverteilung aus.

In Tabelle 486 im Anhang werden für den Zeitraum seit 1990 die jeweiligen Emissionsveränderungen gegenüber dem Vorjahr zusammengestellt. Für CO_2 aus dem Energiebereich wird zum Beispiel deutlich, dass größtenteils temperaturbedingte Fluktuationen im Zeitverlauf - besonders unterschiedliche Temperaturverläufe im Winter - das Heizverhalten und damit den Energieverbrauch zur Erzeugung von Raumwärme die jährlichen energiebedingten Emissionen beeinflussen, so dass eine Trendbetrachtung immer mehrere Jahre umfassen sollte.

Industrieprozesse (inkl. Produktverwendung)

Der Bereich der Emissionen aus den Industrieprozessen wird von den Treibhausgasen Kohlendioxid und Lachgas dominiert. Relativ auffällige Änderungen bei den Emissionen von F-Gasen haben dagegen auf Grund des geringen Anteils an den Gesamtemissionen keinen großen Einfluss auf den Gesamttrend.

Die Emissionen aus Industrieprozessen sind stark an das Produktionsniveau gekoppelt. Speziell die CO_2-Emissionen bilden hauptsächlich den Konjunkturverlauf der mineralischen, chemischen und metallherstellenden Industrien ab.

Ein nicht an die Produktion gekoppelter Trend konnte bei den N_2O-Emissionen erreicht werden, weil bei der Adipinsäureproduktion emissionsmindernde Maßnahmen der Hersteller wirksam wurden. Dies hat insbesondere in den Jahren 1997 und 2010 zu deutlichen Reduktionen der N_2O-Emissionen aus dieser Branche geführt. Insgesamt sanken hier die N_2O-Emissionen seit 1990 auf ca. ein Zwanzigstel.

Für alle Industrieprozesse und Produktverwendungen zusammen ergibt sich für die Treibhausgase seit 1990 somit eine Minderung an THG-Äquivalenten um 48,6 %, aber geringfügig gestiegene Emissionen im Vergleich zum Vorjahr 2023.

Landwirtschaft

Die Abnahme der landwirtschaftlichen Emissionen um 28 % seit 1990 geht im Wesentlichen auf eine Abnahme der Tierbestände, aber auch auf Reduktionen der Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden und Düngeranwendung zurück. Der Trend der letzten Jahre setzt sich somit fort.

Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft

Die Nettoemissionen des LULUCF-Sektors werden im Wesentlichen von der Waldbiomasse und dem dazu in Beziehung stehenden Holzproduktespeicher beeinflusst. Durch den Einfluss natürlicher Störungen (z.B. Kalamitäten wie Trockenheit, Sturmbruch, Insektenbefall) auf die Kohlenstoffvorräte der Waldbiomasse können die gleichbleibend hohen Gesamtemissionen aus den organischen Böden und den Gewässern in den vielen Jahren nicht ausreichend kompensiert werden. Dadurch wird der gesamte Sektor LULUCF über viele Jahre des Berichtszeitraums, insbesondere ab dem Jahr 2003, zur Quelle von Treibhausgasemissionen. Ab dem Jahr 2018 liegen die Emissionen aus dem LULUCF-Sektor in der Größenordnung der Emissionen aus dem Sektoren Industrie und Landwirtschaft. Gegenüber dem Basisjahr haben die Netto-Emissionen aus dem LULUCF-Sektor in 2024 um 58,5 % zugenommen.

Im Folgenden wird auf die Trendverläufe der Landnutzungskategorien eingegangen:

Wald: Die Abnahme der Einbindung von Treibhausgasen durch Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft ist im Wesentlichen auf eine veränderte Senkenfunktion in der Kategorie „Forest Land remaining Forest Land“ zurückzuführen. Dies ist zum einen das Resultat einzelner Sturmereignisse mit sehr hohem Schadholzanfall. So traf im Jahr 1990 eine Serie von Orkanen auf Deutschland, mit einem daraus resultierenden Sturmholzaufkommen von ca. 70 Mill. m^3. 2007 war es der Sturm Kyrill mit einem Sturmholzanfall von ca. 37 Mill m^3. Zum anderen ist durch das Zusammenspiel von Trockenheit, Sturmbruch und Insektenbefall im Zeitraum 2018 bis 2022 auf einer Fläche von über 500.000 ha der Waldbestand, vor allem Fichte, abgestorben (BMEL, 2024a).

Ackerland: Die Gesamtemissionen in 2024 sind im Vergleich zum Basisjahr um 35 % gesunken. Der Verlauf der Emissionen zeichnet qualitativ im Wesentlichen den Verlauf der Emissionen aus den mineralischen Böden nach, die hauptsächlich witterungsbedingt deutliche jährliche Unterschiede aufweisen. Trotz der starken jährlichen Ausschläge der Emissionskurve, zeigt der Trend für die THG-Emissionen aus Mineralböden unter Ackerland durchschnittlich eine deutliche Abnahme zwischen dem Basisjahr 1990 und 2024 (ca. 62 %), zurückzuführen auf die Änderung der Witterungsbedingungen (zunehmende Trocknis), die Abnahme der Ackerlandfläche (> 10.000 km2-Eq ≙ -8 %), als auch auf die deutliche Abnahme des Grünlandumbruchs (Fläche: ca. -26 %). Die Emissionen aus den organischen Böden weisen zwischen 1990 und 2024 kaum Unterschiede bezüglich der absoluten Höhe auf. Allerdings sorgte die zunehmende Trockenheit, insbesondere in extremen Jahren (z.B. 2018), einhergehend mit entsprechend niedrigen Grundwasserständen, zu absolut extremen Emissionsereignissen. Der Amplitudenverlauf der Emissionskurve der organischen Böden ist folgerichtig gegenläufig gegenüber dem der Mineralböden. Insgesamt bedingen die bodenbürtigen Nettoemissionen 94,5 % der Treibhausgassumme des Ackerlandsektors (CRF 4.B.; 4.B.1; 4.B.2, inkl. aller Subkategorien).

Grünland: Die Gesamtemissionen in 2024 haben im Vergleich zum Basisjahr um 4 % abgenommen. Die Emissionen bilden die Summe aus den Unterkategorien Grünland im engeren Sinne (i.e.S), Gehölzen und Hecken, die sich hinsichtlich der Emissionen sowohl quantitativ als auch qualitativ deutlich voneinander unterscheiden. Der Verlauf der Zeitreihe der Gesamtemissionen wird durch die Unterkategorie Grünland i.e.S. in der absoluten Emissionshöhe dominiert, insbesondere durch die Emissionen aus den organischen Böden. Ebenfalls beeinflußen die Emissionen bzw. Einbindungen aus der Biomasse sowie aus den Mineralböden den Verlauf. Während die Kohlenstoffeinbindungen der Biomasse bzw. CO_2-Emissionen zwischen den Jahren Schwankungen unterliegen, wirken die Mineralböden auf gleichbleibendem Niveau als Senke.

Feuchtgebiete/Wetlands: Die Emissionen aus der Kategorie Feuchtgebiet zeigen im gesamten Berichtszeitraum kaum Veränderungen. Die Emissionen der Kategorie sind im Wesentlichen auf die CO_2-Freisetzung aus organischen Böden und Methanemissionen aus fließenden und stehenden künstlichen Gewässern zurückzuführen. CO_2-Emissionen werden zu fast gleichen Teilen infolge des Torfabbaus sowie der Entwässerung terrestrischer organischer Böden verursacht. Die geringen Veränderungen der Emissionen werden hauptsächlich durch Wasserstandsänderungen in den organischen Böden verursacht.

Siedlungen: Der Trend in der Landnutzungskategorie Siedlungen ist ebenfalls uneinheitlich und wird im Wesentlichen von den Emissionen aus der Biomasse und den Mineralböden bestimmt, infolge von Landnutzungsänderungen von Wald, Acker- und Grünland zu Siedlungszwecken.

Gegenüber dem Basisjahr weisen die Emissionen der gesamten Siedlungskategorie im Jahr 2024 eine deutliche Zunahme (+1.312,8 kt CO_2-Äq. ≙ +39,4 %) auf. Die Zunahme der Siedlungsfläche betrug in diesem Zeitraum 28,3 %, eine wesentliche Ursache für die Zunahme der Emissionen.

Abfall und Abwasser

Die deutlichste Emissionsminderung von rund 87 % im Vergleich zum Basisjahr trat im Bereich Abfall & Abwasser auf. Hier hat die seit Juni 2005 nicht mehr zugelassene Deponierung von biologisch abbaubaren Abfällen (zum überwiegenden Teil realisiert durch die Mechanisch Biologische Abfallbehandlung) sowie die Einführung eines verstärkten Recyclings von wiederverwertbaren Stoffen (Gelber Sack, Verpackungsverordnung u.ä.) zu einer Verringerung der jährlich deponierten Abfallmengen geführt. Im Ergebnis resultiert im Bereich der Deponieemissionen eine Emissionsminderung von rd. 95 % gegenüber dem Basisjahr. Die ebenfalls zur Kategorie Abfall & Abwasser gehörenden Emissionen aus der Abwasserbehandlung treten mengenmäßig deutlich hinter den Deponieemissionen zurück, sanken jedoch ebenfalls sehr deutlich.

Die detaillierten Daten finden sich in Tabelle 486 in Anhang 5.2.

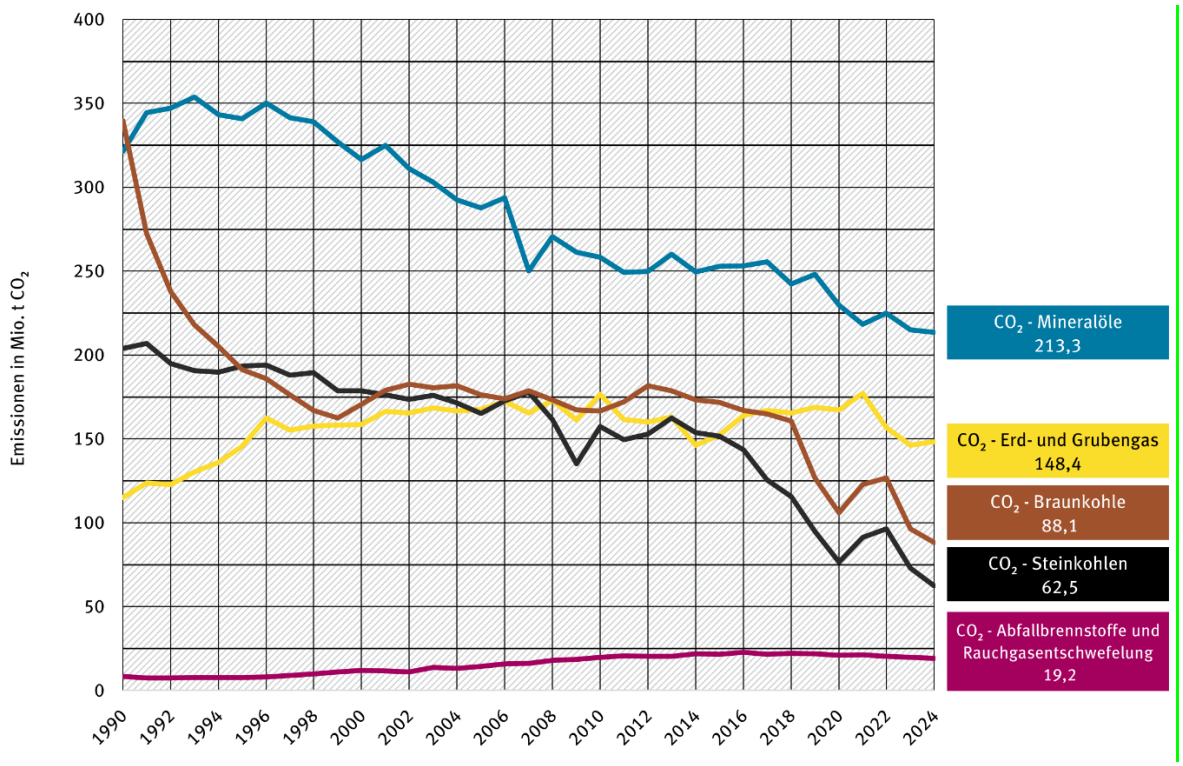
Tabelle 16: Prozentuale Veränderungen der deutschen THG-Emissionen, nach Kategorien

Entwicklung ggü. 1990	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023	2024
1. Energie	0,00%	-11,64%	-16,43%	-19,97%	-23,48%	-26,39%	-41,33%	-38,36%	-38,92%	-46,19%	-47,97%
2. Industrieprozesse	0,00%	1,64%	-17,83%	-21,95%	-33,65%	-35,76%	-41,07%	-39,04%	-44,81%	-49,56%	-48,63%
3. Landwirtschaft	0,00%	-12,42%	-13,40%	-18,19%	-18,80%	-16,83%	-22,78%	-23,92%	-26,67%	-25,48%	-28,04%
5. Abfall	0,00%	-1,17%	-28,83%	-52,27%	-70,66%	-79,68%	-85,28%	-85,78%	-86,40%	-86,89%	-87,30%
Entwicklung, ggü. dem jeweils letzten Jahr	**1990**	**1995**	**2000**	**2005**	**2010**	**2015**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**
1. Energie	/	-0,45%	-0,42%	-1,96%	4,67%	0,72%	-9,05%	5,05%	-0,91%	-11,91%	-3,31%
2. Industrieprozesse	/	-1,63%	4,33%	-4,16%	-3,49%	-1,35%	-6,99%	3,45%	-9,47%	-8,60%	1,84%
3. Landwirtschaft	/	-0,55%	-0,23%	-0,34%	-0,28%	-1,12%	-2,44%	-1,47%	-3,62%	1,62%	-3,43%
5. Abfall	/	-2,99%	-5,96%	-7,72%	-9,32%	-6,83%	-7,39%	-3,42%	-4,39%	-3,55%	-3,16%

2.2.2 Kohlendioxid (CO_2)

Die Minderung der CO_2-Emissionen ist stark mit der Entwicklung im Energiesektor verbunden. Der starke Rückgang der Emissionen in diesem Bereich in den frühen 90-er Jahren ist hauptsächlich auf die Umstrukturierungsprozesse in den neuen Bundesländern zurückzuführen. vor allem auf den damit einhergehenden Umstieg auf emissionsärmere Energieträger sowie auf die Stilllegung veralteter Anlagen. Die Änderungen im Energieträgermix setzen sich in etwas abgeschwächter Form bis zum aktuellen Berichtsjahr fort und werden nur in den Krisenjahren seit 2020 gestört:

Abbildung 15: CO_2-Emissionen in CRF 1.A, nach Brennstoffen und ohne Emissionen aus Biomasse und internationale Verkehre



Quelle: eigene Darstellung, UBA

Etwas anders sieht die Entwicklung nur im vom Straßenverkehr dominierten Verkehrssektor aus: Die CO_2-Emissionen stiegen hier bis 1999 auf fast 184 Mio. t. an, gingen dann aber durch Verbrauchssenkungen, die Verlagerung von Tankvorgängen ins Ausland[19], die Substitution von Benzin durch Diesel[20] sowie erhöhte Biokraftstoff-Quoten leicht zurück. U.a. durch den stetigen Anstieg der durchschnittlichen Motorleistung stellte sich seit etwa 2007 ein stagnierender Trendverlauf ein, der durch einen Wiederanstieg von Verkehrs- und Fahrleistungen sowie den Rückgang der eingesetzten Biokraftstoffe ab 2013 nach oben verlassen wurde. Nach dem 2017 erreichten Zwischenhoch (167 Mio. t) sanken die Emissionen erst geringfügig und liegen ab 2020, bedingt durch diverse Sondereffekte, deutlich unterhalb des langjährigen Trends.

Trendverlauf unter Beachtung von Änderungen zum Vorjahr des Berichtszeitraumes

Gegenüber dem Vorjahr sanken die CO_2-Emissionen der bezogen auf die Menge dominierenden Energiewirtschaft (-7,6% bzw. knapp 15 Mio. t). Die Emissionen des verarbeitenden Gewerbes (1.A.2) (-0,8% bzw. -0,8 Mio. t) und des Verkehrssektors (-0,4 % bzw. -0,6 Mio. t) gingen dabei nur geringfügig zurück. Die Emissionen aus Industrieprozessen (-2,9 % bzw. -1,1 Mio. t) und der Haushalte (-1,8 % bzw. -1,4 Mio. t) sanken dagegen deutlicher.

2.2.3 Lachgas (N_2O)

Die N_2O-Emissionen sanken seit 1990 um ca. 56,3 %. Hauptverursacher sind die Anwendung stickstoffhaltiger Dünger in der Landwirtschaft, die Brennstoffnutzung und die

[19] Die Berechnung der Emissionen erfolgt auf Basis des inländischen Kraftstoffabsatzes. Nicht in Deutschland getankte Mengen schlagen sich daher auch nicht deutschen Emissionsinventar nieder.

[20] Der Anteil von Dieselkraftstoff am Gesamtkraftstoffverbrauch im Straßenverkehr ist im gesamten Zeitraum stark gestiegen. Wurden die Emissionen im Straßenverkehr 1990 noch zu fast zwei Dritteln durch den Benzinverbrauch verursacht, hat sich dieses Verhältnis seitdem beinahe umgekehrt.

landwirtschaftliche Tierhaltung. Vergleichbar geringere Emissionen entstehen durch die Abwasserbehandlung, die chemische Industrie und die Produktverwendung von N_2O (z.B. als Narkosemittel). Den deutlichsten Einfluss auf die Emissionsminderung hat der Industriebereich, hier insbesondere die Adipinsäureproduktion durch die Installation von Abgasbehandlungsanlagen in den Jahren 1997 und 2009. Durch technische Minderungsmaßnahmen wurden die Emissionen aus der Chemischen Industrie bezogen auf 1990 um 99,2 % gemindert. Seit 1999 wird die Emissionsentwicklung der verbleibenden Emissionen stark durch die konjunkturelle Entwicklung in der chemischen Industrie beeinflusst.

Trendverlauf unter Beachtung von Änderungen zum Vorjahr des Berichtszeitraumes

Getrieben durch weiterhin sinkende Emissionen aus der auch mengenmäßig dominierenden Landwirtschaft (-4,5 %) gehen die Gesamtemissionen gegenüber dem Vorjahr leicht (-1,8 %) zurück.

2.2.4 Methan (CH_4)

Die Methanemissionen werden hauptsächlich durch die landwirtschaftliche Tierhaltung, die Abfalldeponierung und die Verteilung flüssiger und gasförmiger Brennstoffe verursacht. Dem gegenüber sind die energie- und prozessbedingten Emissionen, sowie die Emissionen aus der Abwasserbehandlung fast zu vernachlässigen. Die Emissionen konnten seit 1990 um 67,0 % gemindert werden. Dieser Trend wurde hauptsächlich im Ergebnis umweltpolitischer Maßnahmen (Abfalltrennung mit verstärktem Recycling und zunehmender energetischer Verwertung der Abfälle) durch den Rückgang der Deponierung organischer Abfallmengen verursacht. Eine zweite wesentliche Ursache besteht in der verstärkten energetischen Nutzung von Grubengas bei gleichzeitigem Rückgang des Aufkommens (Schließung von Steinkohlebergwerken). Die Emissionen der Kategorie 1.B „Diffuse Emissionen aus Brennstoffen“ sanken demenstprechend seit 1990 um 95 %. Insbesondere auch die in Deutschland durchgeführte Sanierung der veralteten Gasverteilungsnetze und die Verbesserungen bei der Verteilung der Kraftstoffe bewirkten weitere Minderungen der Gesamtemissionen. Ein weiterer Grund für die Emissionsminderung bestand in der Verringerung der Tierbestände, vorwiegend in der ersten Hälfte der 90er Jahre in den neuen Bundesländern.

Trendverlauf unter Beachtung von Änderungen zum Vorjahr des Berichtszeitraumes

Gegenüber dem Vorjahr sanken die Emissionen um 1,8 %. Die mengenmäßig größten Rückgange sind bei Emissionen aus der Landwirtschaft, den Deponien, und den Diffusen Emissionen aus Brennstoffen zu beobachten.

2.2.5 F-Gase

Die freigesetzten F-Gase machen im Jahr 2024 etwa 1,4 % der nationalen Gesamtemissionen aus. Davon entfielen 78 % auf HFKW, 20 % auf SF_6 und 2 % auf FKW. Insgesamt sanken die Emissionen seit 1995 (dem Basisjahr für die F-Gase) um 44,7 %, doch der Trend der einzelnen Substanzen bzw. Substanzgruppen ist recht inhomogen:

Die Emissionen der *HFKW* stiegen von 1995 bis 2015 vor allem aufgrund des verstärkten Einsatzes als Kältemittel in Kälte- und Klimaanlagen und der gleichzeitig zunehmenden Entsorgung dieser Anlagen. Emissionsreduzierungen durch den verminderten Einsatz in Dämm- und Schaumstoffen wurden dabei überkompensiert. Seit 2016 ist ein deutlicher Abwärtstrend zu verzeichnen, der hauptsächlich auf Verbote und Mengenbeschränkungen der europäischen F-Gas-Gesetzgebung zurückzuführen ist.

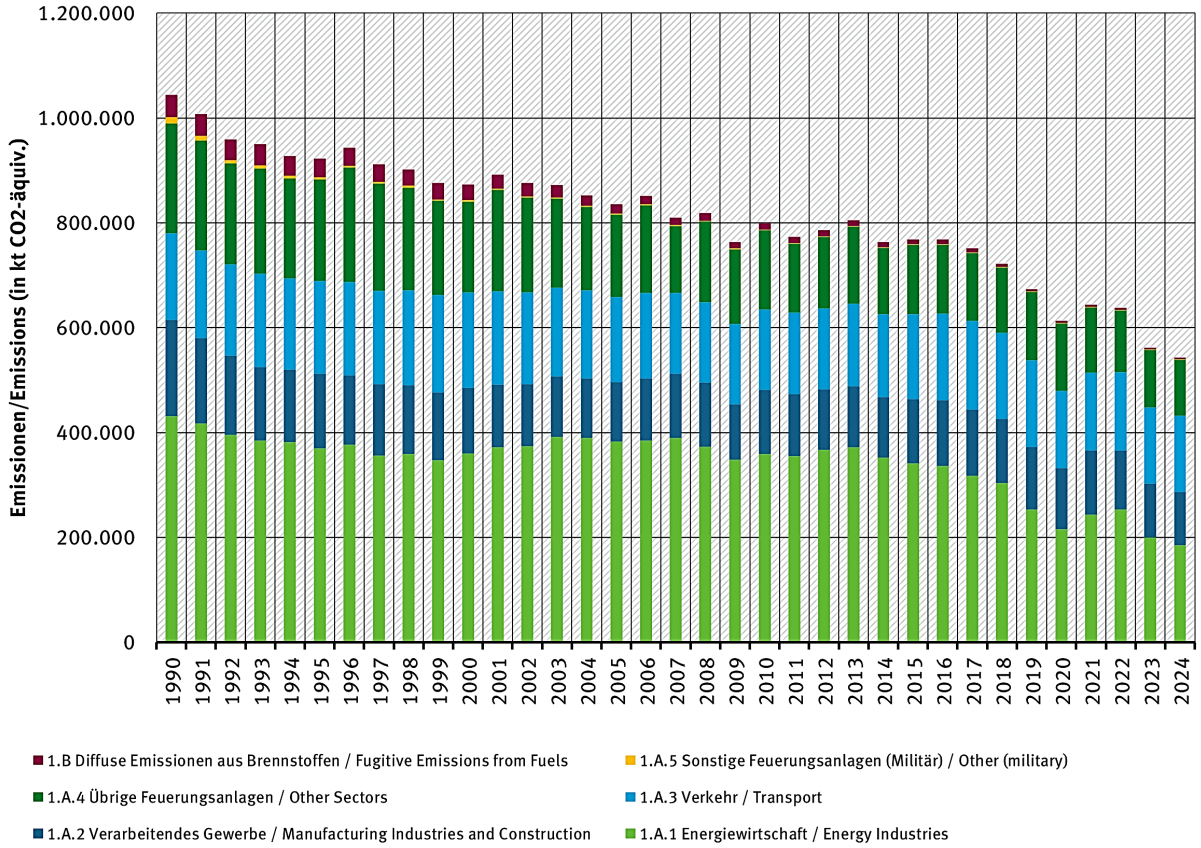
Die Emissionsminderungen bei den *FKW* wurden hauptsächlich durch Anstrengungen der Hersteller von Primäraluminium und der Halbleiterhersteller erreicht.

Der Rückgang bei den SF_6-Emissionen bis etwa 2003 geht in erster Linie auf das Auslaufen verschiedener Anwendungen seit Mitte der 1990er Jahre zurück. So ist der Einsatz in Schallschutzscheiben seit 2007/2008 verboten. Die heutigen und künftigen SF_6-Emissionen stammen zu einem Großteil aus der offenen Entsorgung alter Scheiben. Auch bei Anlagen zur Elektrizitätsübertragung sanken die Emissionen deutlich und stagnieren in den letzten Jahren. Wichtige Emissionsquellen sind der Einsatz in Teilchenbeschleunigern und die Emissionen aus der Halbleiterindustrie.

NF_3 wird in Deutschland seit 2015 in der Halbleiterproduktion mit steigenden Emissionen eingesetzt.

3 Energie - Sektor 1

Abbildung 16: Übersicht über die Treibhausgas-Emissionen des CRF-Sektors 1



Quelle: eigene Darstellung, UBA

3.1 Übersicht (CRF-Sektor 1)

Für die Ermittlung der Aktivitätsraten aus der Verbrennung werden für mobile und stationäre Quellen unterschiedliche Modelle verwendet: Stationäre Quellen werden in der „Bilanz der Emissionsursachen - BEU“ sowie in der Datenbank ENERDAT modelliert und für mobile Quellen wird das Modell „Transport Emission Estimation Model - TREMOD“ eingesetzt. In beiden Arbeitsprozessen werden verbrennungsbedingte Aktivitäten ermittelt und in die Emissionsdatenbank „Zentrales System Emissionen - ZSE“ übermittelt.

Mit diesen verbrennungsbedingten Aktivitäten erfolgt durch Multiplikation mit den zugehörigen Emissionsfaktoren (vgl. Anhang 6.6) innerhalb des ZSE die Berechnung der zugehörigen Emissionen. Hierbei wird von einer vollständigen Oxidation des in den Brennstoffen enthaltenen Kohlenstoffs ausgegangen.

3.2 Verbrennung von Brennstoffen (1.A)

Das vom Umweltbundesamt entwickelte Modell BEU sowie seit 2023 die neueren Berechnungen von Aktivitätsraten im Rahmen der Datenbank ENERDAT verwendet als wesentliche Datengrundlage die Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland, die vor allem auf Basis amtlicher Statistiken erstellt wird. Die Energiebilanz ist im Anhang 6.1 bis Anhang 6.4 ausführlich beschrieben.

Aus der Energiebilanz werden für die Ermittlung der emissionsrelevanten Brennstoffeinsätze aus stationären Quellen folgende Zeilen herangezogen:

A: Umwandlungseinsatz (umfasst die Energiebilanzzeilen 9 bis 19), daraus

1. **Wärmekraftwerke der allg. Versorgung** (Zeile 11) sind Anlagen, deren Betreiber zu den öffentlichen Versorgern gehören. Dazu zählen auch Industriebetriebe, die ihre Kraftwerke zusammen mit Elektrizitätsversorgungsunternehmen als Gemeinschaftskraftwerke betreiben. Ausgewiesen wird der Brennstoffeinsatz zur Stromerzeugung. In dieser Zeile der Energiebilanz enthalten ist auch der Brennstoffeinsatz in Heizkraftwerken der öffentlichen Versorgung, der der Stromerzeugung zuzuordnen ist.
2. **Industriewärmekraftwerke (nur für Strom)** (Zeile 12) umfassen folgende Betreibergruppen:
   - Kraftwerke des Steinkohlenbergbaus,
   - Kraftwerke des Braunkohlenbergbaus,
   - Kraftwerke der Mineralölverarbeitung (Raffineriekraftwerke),
   - Kraftwerke, die Einphasenstrom für die Deutsche Bahn AG erzeugen (bis 1999 werden die Einsatzmengen in den Bahnkraftwerken unter 1.A.2.g.vii berichtet (EBZ 12); ab 2000 werden sie mit den öffentlichen Kraftwerken unter 1.A.1.a berichtet (EBZ 11)),
   - Kraftwerke der Industrie (Gewinnung von Steinen und Erden, sonstiger Bergbau, verarbeitendes Gewerbe).
3. **Wasserkraft-, Windkraft-, Photovoltaik- u. a. Anlagen** (Zeile 14): u.a. Anlagen umfasst alle Anlagen, die aus Biogas, Deponiegas, Klärgas, fester oder flüssiger Biomasse Strom erzeugen und diesen in das öffentliche Netz einspeisen. Weiterhin werden in diesem Teil der Energiebilanz auch die Brennstoffeinsätze der Mini-KWK Anlagen, die mit Erdgas oder leichtem Heizöl betrieben werden, berichtet. Da es für die statistische Erfassung dieser Anlagen keine Abschneidegrenze gibt, fallen darunter auch Kleinstanlagen aus den Sektoren Haushalte und Gewerbe, Handel, Dienstleistungen.
4. **Heizkraftwerke der allg. Versorgung** (Zeile 15): hier wird der Brennstoffeinsatz angegeben, der der Fernwärmeerzeugung zuzuordnen ist. Die Addition der Zeilen 11 und 15 ergibt den gesamten Brennstoffeinsatz in öffentlichen Wärmekraftwerken. Die erzeugte Fernwärme wird in öffentliche Wärmenetze eingespeist. Diese Anlagen versorgen auch Industriekunden mit Prozesswärme.
5. **Fernheizwerke** (Zeile 16): hier wird der Brennstoffeinsatz für die öffentliche Fernwärmeversorgung aus Heizwerken angegeben.

B: Energieverbrauch im Umwandlungsbereich (Energiebilanzzeile 33 bis 40)

6. In den Zeilen 33 bis 39 bzw. in der Summenzeile 40 wird unter anderem der Brennstoffeinsatz zur Wärmeerzeugung angegeben, der zum Betrieb der Umwandlungsanlagen notwendig ist. Hierbei wird nicht nach Art der Wärmeerzeugung unterschieden. So sind Brennstoffeinsätze zur Wärmeerzeugung in Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlagen, Dampf- und Heißwasserkesseln und Prozessfeuerungen zusammengefasst.
   Eine Besonderheit im Umwandlungsbereich betrifft die Bilanzierung der Braunkohlengruben und -brikettfabriken. Der Eigenverbrauch von Braunkohlengruben

und -brikettfabriken wird gemeinsam mit dem Umwandlungseinsatz der Brikettfabriken zur Produktherstellung in der Zeile 10 verbucht. Damit ist der emissionsverursachende Einsatz des Eigenverbrauchs aus der Energiebilanz nicht ablesbar und muss aus dem Umwandlungseinsatz herausgerechnet werden.
Der Gesamtbrennstoffeinsatz setzt sich zusammen aus den Brennstoffeinsätzen zur Wärmeerzeugung in Kraft-Wärme-Kopplung und den Brennstoffeinsätzen zur Stromerzeugung der Kraftwerke des Steinkohlenbergbaus, des Braunkohlenbergbaus und der Raffineriekraftwerke. Nach Abzug der Brennstoffeinsätze zur Wärmeerzeugung in Kraftwerken vom gesamten Einsatz in Zeile 40 verbleibt die Brennstoffmenge, die in den Prozessfeuerungen, Dampf- und Heißwasserkesseln eingesetzt wird.

C: Endenergieverbrauch (Energiebilanzzeile 46 bis 67)

7. Im **Endenergieverbrauch der Industrie** (Bergbau, Gew. Steine u. Erden, Verarbeit. Gewerbe bzw. Zeile 60 der Energiebilanz) ist der Brennstoffeinsatz zur Wärmeerzeugung dargestellt, der für die Produktion und zur Raumheizung erforderlich ist. Nach der Art der Wärmeerzeugung wird nicht unterschieden. Ein Teil des Endenergieverbrauchs in diesen Kategorien bildet zusammen mit dem Brennstoffeinsatz der Industriekraftwerke zur Stromerzeugung den gesamten Brennstoffeinsatz in den Anlagen der Industrie.
8. Die Angaben zum **Endenergieverbrauch der Haushalte** (Energiebilanzzeile 66) beinhalten die Brennstoffeinsätze zur Wärmeerzeugung, das sind die Anwendungsbereiche Heizung, Warmwasserbereitung und Kochen.
9. Die Angaben zum Endenergieverbrauch von Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (Energiebilanzzeile 67) umfassen Brennstoffeinsätze zur Warmwasserbereitung, Raum- und Prozesswärmeerzeugung in diesem Sektor.

Für die vielfältigen Anforderungen der nationalen und internationalen Energie- und Emissionsberichterstattung reichen die Angaben der Energiebilanz nicht aus. So fasst die Energiebilanz Brennstoffeinsätze zusammen, die

- in Anlagen mit unterschiedlichen immissionsschutzrechtlichen Anforderungen eingesetzt werden (z.B. Großfeuerungsanlagen, mittelgroße Feuerungsanlagen, Kleinfeuerungsanlagen, Abfallverbrennungsanlagen)
- die nach unterschiedlichen technischen Prinzipien arbeiten (z.B. Dampfturbinenkraftwerke, Gasturbinenkraftwerke, Verbrennungsmotoranlagen)
- regionale Besonderheiten aufweisen (z.B. unterschiedliche Qualitäten der Rohbraunkohlen in den einzelnen Fördergebieten)
- bei der nationalen und internationalen Emissionsberichterstattung jeweils unterschiedlichen Kategorien zuzuordnen sind
- in verschiedenen Energiebilanzzeilen je nach ihrem Verwendungszweck (zur Strom- bzw. zur Wärmeerzeugung) angegeben, aber in einer Anlagengruppe (z.B. Dampfturbinenkraftwerke) eingesetzt werden.

Diese Charakteristika haben Auswirkungen auf das Emissionsverhalten. Um diesen verschiedenen Anforderungen Rechnung zu tragen, wurden die Daten der Energiebilanz im Modell *Bilanz der Emissionsursachen* (BEU) und im Rahmen der Datenbank ENERDAT unter

Verwendung weiterer Statistiken sowie mit eigenen Rechnungen und auf Basis verschiedener Annahmen disaggregiert und ergänzt, soweit dies für eine adäquate Emissionsdarstellung erforderlich ist. Die folgende Tabelle 17 gibt eine Übersicht über die Struktur:

Tabelle 17: Merkmale der UBA-Struktur der Bilanz der Emissionsursachen zur Disaggregierung der Energiebilanz

Bilanz der Emissionsursache (BEU)*	
Kategorien:	• Öffentliche Wärmekraftwerke • Steinkohlenbergbau • Braunkohlenbergbau • Deutsche Bahn AG (bis 1999) • Mineralölverarbeitung • Fernheizwerke • Übriger Umwandlungsbereich • Gewinnung von Steinen und Erden, sonstiger Bergbau und verarbeitendes Gewerbe (weitere Untergliederung der Prozessfeuerungen) *Haushalte und Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und übrige Verbraucher werden in der Datenbank Energiedaten (ENERDAT) bearbeitet
Anlagen:	• Dampfturbinenkraftwerke • Gasturbinenkraftwerke • Gas- und Dampfturbinenkraftwerke • Motorkraftwerke • Kesselfeuerungen (ohne Kraftwerkskessel) • Prozessfeuerungen (untergliedert in 12 Prozesse)
Immissionsschutzrechtliche Regelungen:	• Anlagen der 44.BImSchV • Anlagen der 13. BImSchV • Anlagen der 17. BImSchV • Anlagen der 1. BImSchV • Anlagen der TA-Luft • Nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen
Energieträgern:	• etwa 40 verschiedene Brennstoffe

Abkürzungen stehen für:

BImSchV Rechtsverordnung nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz,

TA-Luft Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz, Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft

Das BEU-Modell stellt eine Datenstruktur bereit, die für unterschiedliche Berichtspflichten verwendet werden kann. Insbesondere die Ermittlung der Emissionen klassischer Luftschadstoffe, aber auch die Berechnung von Lachgas und Methanemissionen macht diese Disaggregation in konsistenten Zeitreihen notwendig. Seit 2023 werden zu aktualisierende Berechnungsmethoden aus der BEU in der Datenbank ENERDAT neu aufgebaut und dort analog zur Datenhaltung der Eingangsdaten für diese Berechnungen dokumentiert und qualitätsgesichert. Mittel bis langfristig soll durch diese Überführung die BEU als Datenhaltungssystem abgelöst werden. Die aus diesem Vorgehen entstandene hybride Datenhaltung und -berechnung hat keine fachlichen Auswirkungen auf die oben dargelegte Strukturbeschreibung sondern allein IT-technische Gründe. Aus diesem Grund wird das Modell im Folgenden weiterhin unter der Bezeichnung BEU ganzheitlich beschrieben.

Für die beschriebene Untergliederung werden auch die Brennstoffe gemäß Energiebilanz in der Datenbank einzeln ausgewiesen. In einigen Fällen ist es nötig, mit Hilfe der Energiestatistik und der Statistik der Kohlenwirtschaft sowie einigen wenigen Verbandsstatistiken die Brennstoffe weiter zu untergliedern. Die verschiedenen Brennstoffqualitäten mit unterschiedlichen Kohlenstoffgehalten werden, gemäß der Berichtsvorgaben den fünf Kategorien Gase, flüssige Brennstoffe, feste Brennstoffe, Biomasse und sonstige Brennstoffe, zugeordnet. Aufgrund der Vielzahl der unterschiedlichen Brennstoffe, deren Anteile in den einzelnen Kategorien schwanken, kommt es häufig zu Änderungen der in den CRF-Tabellen ausgewiesenen impliziten Emissionsfaktoren.

Für die Ermittlung der Aktivitätsraten bei der Abfallverbrennung in Müllverbrennungsanlagen sowie der Mitverbrennung in Feuerungsanlagen in den Sektoren Öffentliche Strom- und Wärmerzeugung (1.A.1) und verarbeitendes Gewerbe (1.A.2) nutzt das UBA eine methodische Auswertung der Energiestatistik (Tabellen 060 und 066, (Statistisches Bundesamt, FS 3, R 3.1.7) und der Abfallstatistik (Statistisches Bundesamt, 2023) des Statistischen Bundesamtes.. Dabei werden die in beiden Statistiken ausgewiesenen Abfallmengen sektor- und wirtschaftszweigbezogen verglichen und den in der Energiestatistik verwendeten Brennstoffgruppen zugeordnet: feste Biomasse, Klärschlamm, Haus- und Siedlungsabfälle sowie Industriemüll. Seit Einführung des Energiestatistikgesetzes (2003) und des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (2012) ist eine verbesserte Abbildung der energetischen Abfallverwertung festzustellen.

Da die in der Energiestatistik ausgewiesenen Mengen in der Summe weiterhin unter denen der Abfallstatistik liegen, werden die Aktivitätsraten für Haus- und Industriemüll auf Basis der Energiebilanz berechnet und um den Differenzbetrag ergänzt. Altholz wird in der Energiebilanz als feste Biomasse ausgewiesen und daher in der Abfallstatistik vom Einsatz in Müllverbrennungs- und Feuerungsanlagen abgezogen, um Doppelzählungen zu vermeiden.

Hinsichtlich der stofflichen Zusammensetzung wird der fossile und der biogene Anteil von Hausmüll/Siedlungsabfall im Verhältnis 1:1 separat ausgewiesen. Dieser Split-Faktor wurde durch das Forschungsvorhaben, „Nutzung der Potenziale des biogenen Anteils im Abfall zur Energieerzeugung“ ((Hoffmann et al., 2011); Förderkennzeichen 3707 33 303) bestätigt. Der biogene Anteil des Industriemülls ist stark abhängig von Branche und Anlagentyp. Für die Wirtschaftszweige Eisen und Stahl, Papier, Zement- und Kalkindustrie im Sektor verarbeitendes Gewerbe (1.A.2) werden daher detaillierte Daten zu Ersatzbrennstoffen genutzt, die von den Fachverbänden Stahlinstitut (VDEh), Verband Deutscher Papierfabriken e.V. (VDP), Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie (BV Kalk) sowie dem Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ) bereitgestellt werden. Die Angaben zum biogenen Anteil des Industriemülls in diesen Branchen basieren auf dem Forschungsprojekt „Einsatz von Sekundärbrennstoffen“ (Lechtenböhmer, Nanning, et al., 2006b), Förderkennzeichen 20442203/02).

Die ursprünglich berichteten Aktivitätsraten stationärer Feuerungsanlagen der neuen Bundesländer des Jahres 1990 (und Folgejahre) wurden vor dem Hintergrund der Probleme der amtlichen Statistik der DDR im Jahr der Wiedervereinigung 1990 und der Schaffung einer einheitlichen gesamtdeutschen amtlichen Statistik im Forschungsvorhaben „Basisjahr und Aktualisierung“ (Zander & Merten, 2006) überarbeitet (siehe hierzu NIR 2010 (UBA et al., 2010)).

Für die Umrechnung von Brennstoffeinsätzen die nur in natürlichen Einheiten verfügbar waren, wurde bisher die von der „Arbeitsgemeinschaft für Energiebilanzen“ veröffentlichte Tabelle der Heizwerte verwendet.

Diese erschien mit einer zeitlichen Verzögerung von einem Berichtsjahr, sodass für das Randjahr die Heizwerte aus der Tabelle für das Jahr x-1 fortgeschrieben wurde. Ab den Berechnungen für das Inventar 2026 wurde diese Verfahrensweise umgestellt. Die Heizwerte der Energiebilanzzeile für den Primärenergieverbrauch (Energiebilanzzeile 8) werden für den Bereich der Energie pro Brennstoff zur Anwendung gebracht. Dies verbessert die Aktualität dieser Heizwerte auch hinsichtlich der Zuordnung zum Brennstoffeinsatz.

Die Heizwerte werden mit der Datenlieferung der Energiebilanzen zur Verfügung gestellt.

Die Umstellung erfolgte für Datensätze in der Zeitreihe ab dem Jahr 2003.

3.2.1 Verifikation des sektoralen Ansatzes zu CRF 1.A

3.2.1.1 Vergleich mit dem CO_2-Referenzverfahren

Im Rahmen des internationalen Klimaschutzes ist die Berichterstattung zu den verbrennungsbedingten CO_2-Emissionen auf Grund des dominierenden Anteils an den Gesamtemissionen von größter Bedeutung. Von den Industrieländern wird hierzu ein sektorales Verfahren angewendet, das auf der Ebene der einzelnen Energieverbrauchssektoren ansetzt und daher differenzierte Aussagen zur Struktur der Emissionen erlaubt.

Zusätzlich zu den Ergebnissen dieses sogenannten Sektoralen Ansatzes (1.AA) werden die CO_2-Emissionen auch anhand eines Referenzverfahrens (1.AB) gemäß der 2006 IPCC Guidelines ((IPCC, 2006a): Vol. 2, Ch. 6: Reference Approach) ermittelt, der auf Primärdaten zu Produktion, Importen und Exporten von Brenn- und Kraftstoffen sowie Bestandsänderungen beruht, die unmittelbar den Energiebilanzen von Eurostat entnommen werden.

Analog zum Sektoralen Ansatz wird von einer vollständigen Oxidation ausgegangen. In Übereinstimmung mit den 2006 IPCC Guidelines entsprechen die verwendeten Kohlenstoff-Emissionsfaktoren denen des sektoralen Ansatzes und umfassen damit national referenzierte Werte. Die so berechneten CO_2-Emissionen werden zur Verifikation des Sektoralen Ansatzes verwendet.

Das Referenzverfahren wird für alle Jahre ab 1990 durchgeführt. Als Basis dienen jeweils die Angaben der Nationalen Energiebilanzen zum Primärenergieverbrauch. Für das jeweils aktuelle Randjahr ist dabei zum Zeitpunkt der Inventarerstellung nur eine vorläufige Bilanz verfügbar.

Die Ergebnisse des Referenzverfahrens (1.AB) sind in den folgenden Abbildungen und Tabellen sowie im Anhang 3 dieses Berichtes zusammengestellt und werden in Abbildung 17 und Abbildung 18 mit weiteren verfügbaren Datensätzen verglichen.

3.2.1.2 Vergleich mit anderen für Deutschland verfügbaren Datensätzen

Die Ergebnisse der detaillierten sektoralen energiebedingten CO_2-Emissionen sind, entsprechend den Vorgaben der IPCC Guidelines, mit anderen für das berichtende Land verfügbaren Datensätzen zu vergleichen.

Im Rahmen dieser Verifizierung erfolgt hier eine Gegenüberstellung mit dem Datensatz *CO_2 emissions from fuel combustion: World CO_2 Emissions from Fuel Combustion (detailed estimates)* der International Energy Agency (IEA).

In Tabelle 18 und Abbildung 17werden die Ergebnisse der unterschiedlichen CO_2-Berechnungsansätze einander im zeitlichen Verlauf vergleichend gegenübergestellt. Die relevanten Entwicklungstrends werden in allen Berechnungsansätzen, inklusive dem Referenzverfahren – wenn auch auf unterschiedlichem Niveau – aufgezeigt. Um diese Niveauunterschiede zu

veranschaulichen, werden in Abbildung 18 die relativen Abweichungen zwischen den verschiedenen Datensätzen dargestellt.

Tabelle 18: Vergleich der CO_2-Inventare mit Angaben der IEA, Absolutwerte in [Mio. t]

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023	2024
UBA (1.AA)	988,1	879,0	835,9	810,8	778,8	749,8	599,9	630,6	625,0	550,1	531,5
IEA	955,5	873,6	829,8	804,1	776,0	742,5	605,1	630,7	622,6	560,5	524,2
Abweichung	32,6	5,41	6,08	6,69	2,76	7,27	-5,25	-0,10	2,47	-10,4	7,33
	3,42%	0,62%	0,73%	0,83%	0,36%	0,98%	-0,87%	-0,02%	0,40%	-1,85%	1,40%
UBA (1.AB)	982,8	870,8	829,5	808,5	776,0	749,2	599,3	629,2	622,7	543,2	518,3
Abweichung	5,28	8,20	6,34	2,29	2,81	0,60	0,57	1,37	2,30	6,92	13,2
	0,54%	0,94%	0,76%	0,28%	0,36%	0,08%	0,09%	0,22%	0,37%	1,27%	2,55%

Quelle: UBA(1.AA) & UBA (1.AB): eigene Berechnungen; IEA: CO_2 emissions from fuel combustion: World CO_2 Emissions from Fuel Combustion (detailed estimates), IEA, Paris, 2025[21]

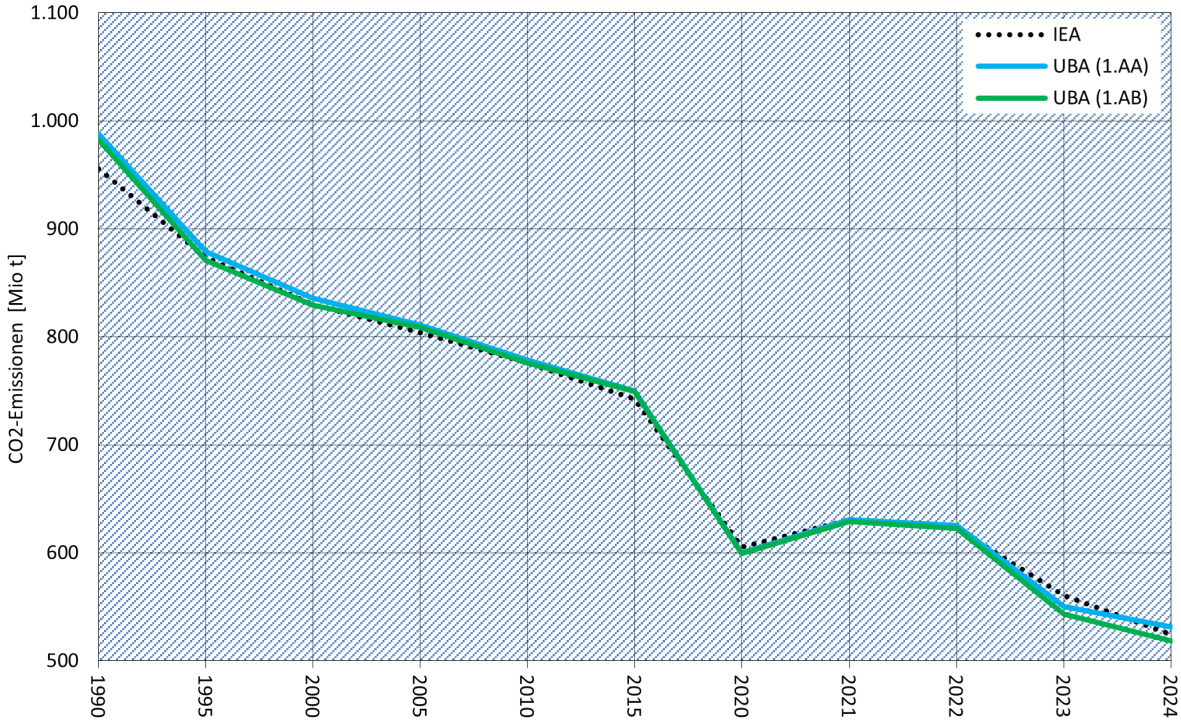
Die für den Vergleich verwendeten Daten werden durch die IEA erstellt und veröffentlicht. Da Datenermittlung, Aufbereitung und Bereitstellung der IEA-Fragebögen in Deutschland durch verschiedene Institutionen erfolgt und die IEA eigene Berechnungen für die Erstellung der IEA-Energiebilanzen anstellt, stimmen diese Ergebnisse nicht exakt mit den nationalen Energiebilanzen überein.

Mit einer durchschnittlichen Abweichung von lediglich 0,88 % bestätigt der Abgleich mit den IEA-Daten trotz dieser methodischen Einschränkungen die für Deutschland ermittelten CO_2-Emissionen.

Die nationalen Vergleichsemissionen liegen dabei für die Jahre bis 1995, 1999 bis 2017 sowie 2022 über den durch die IEA veröffentlichten Ergebnissen (min: +0,33 % (2017); max: +3,42 % (1990)), für alle anderen Jahren darunter (min: -0,16 % (2018); max: -1,85 % (2023)).

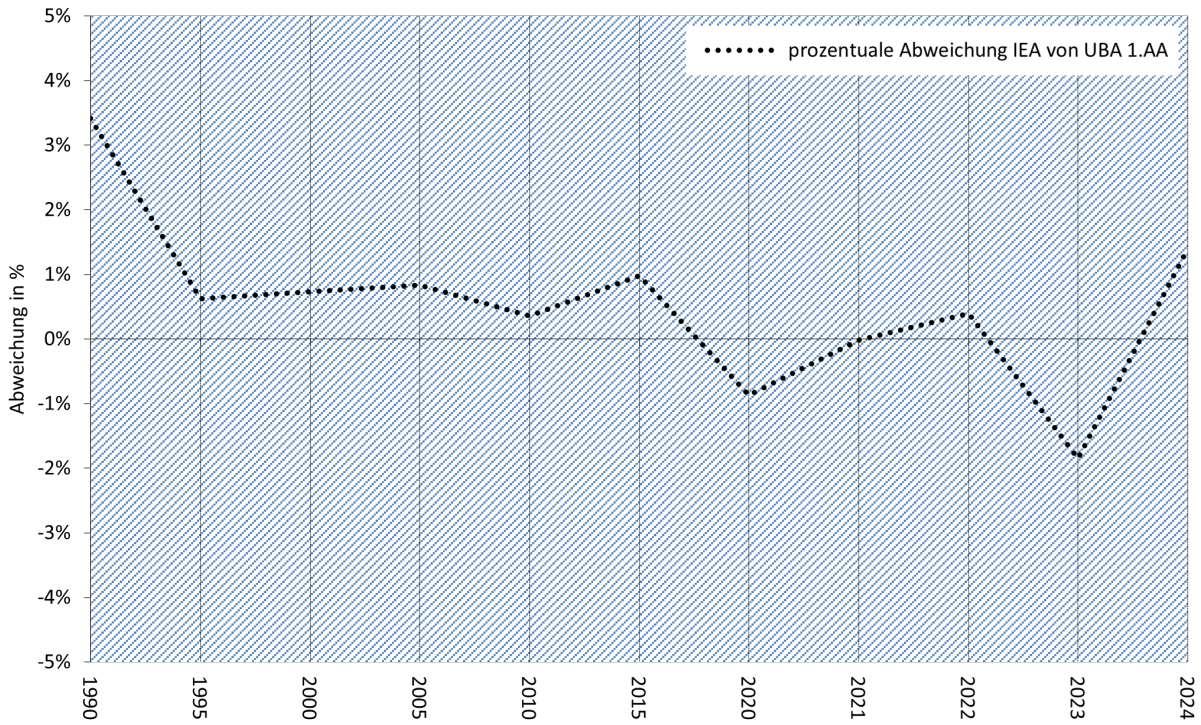
[21] https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/greenhouse-gas-emissions-from-energy#co2-emissions-from-fuel-combustion-detailed-estimates

Abbildung 17: CO_2-Emissionen in Deutschland – Vergleich nationaler und internationaler Berechnungsergebnisse



Quelle: eigene Darstellung, UBA

Abbildung 18: CO_2-Emissionen in Deutschland – relative Abweichung gegenüber IEA-Daten



Quelle: eigene Darstellung, UBA

3.2.2 Internationale Bunkerbrennstoffe

3.2.2.1 Emissionen aus dem internationalen Verkehr (1.D.1.a/1.D.1.b)

Der internationale Verkehr gliedert sich in den internationalen zivilen Luftverkehr (1.D.1.a) und den internationalen Seeverkehr (1.D.1.b).

3.2.2.2 Emissionen aus dem internationalen zivilen Flugverkehr (1.D.1.a)

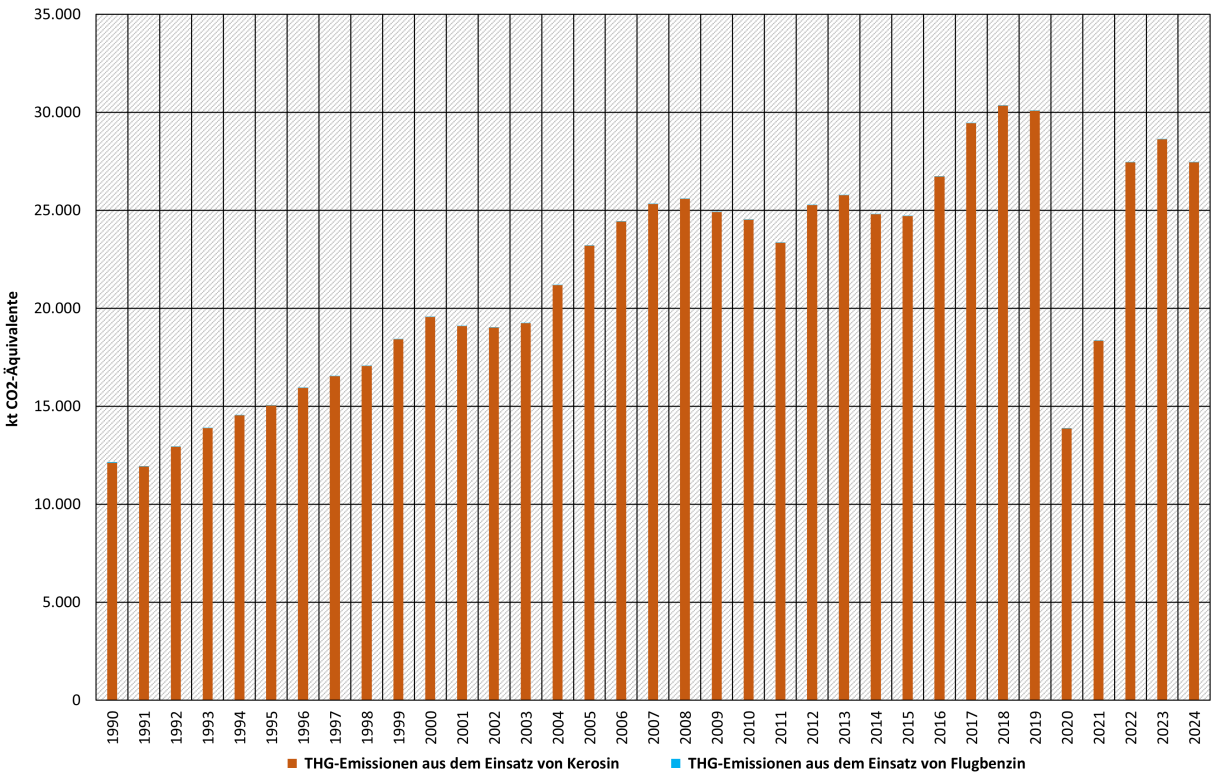
3.2.2.2.1 Beschreibung der Kategorie (1.D.1.a)

Gas	angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2	CS (Tier 3)	NS/IS/M	CS / D [a]
CH_4	CS (Tier 3)	NS/IS/M	CS (M)
N2O	CS (Tier 3)	NS/IS/M	CS (M)
NO_X, CO, NMVOC	CS (Tier 3)	NS/IS/M	CS (M)
SO_2	Tier 1	NS/IS/M	CS

[a] mitverbrannte Schmierstoffe

Die Emissionen aus dem Verbrauch von Kraftstoffen für den internationalen Luftverkehr sind in der Inventarberechnung berücksichtigt, werden jedoch nicht als Bestandteil der nationalen Gesamtinventare berichtet und sind damit auch nicht Teil der Hauptkategorienanalyse.

Abbildung 19: Treibhausgas-Emissionen des von Deutschland ausgehenden internationalen Flugverkehrs seit 1990



Quelle: eigene Darstellung, UBA

3.2.2.2.2 Methodische Aspekte (1.D.1.a)

Da weder die (AGEB, 2025c) noch die vom Bundesamtes für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle veröffentlichten Amtlichen Mineralöldaten (BAFA, 2025a) eine Aufteilung der jährlichen Kraftstoffmengen auf internationalen und innerdeutschen Flugverkehr ermöglichen, erfolgt diese nachträglich anhand des jährlichen Anteils des nationalen Flugverkehrs am Gesamt-Treibstoffeinsatz, der innerhalb von TREMOD AV (Knörr, Allekotte, et al., 2025) berechnet wird.

Die so implizit ermittelten Anteile des internationalen Flugverkehrs an den ausgewiesenen Treibstoffmengen der genannten deutschen Energiestatistiken stellen sich wie folgt dar:

Tabelle 19: jährliche Anteile der Auslandsflüge an den Treibstoff-Inlandsablieferungen, in %

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023	2024
Kerosin	84,7	87,2	89,0	91,2	91,6	92,4	93,8	96,3	96,4	93,6	96,2
Flugbenzin	14,0	14,1	13,9	13,8	13,7	13,8	2,54	7,22	7,20	20,8	19,5

Quelle: TREMOD AV (Knörr, Allekotte, et al., 2025)

Weitere Angaben zu den verwendeten Aktivitätsdaten und Emissionsfaktoren finden sich in Kapitel 3.2.8.1 zum nationalen zivilen Flugverkehr.

Zudem werden die Mengen mitverbrannter Schmierstoffe und die daraus resultierenden CO_2-Emissionen erfasst und berichtet. Gemäß Wallfarth (2014) wird dabei davon ausgegangen, dass die Menge mitverbrannter Schmierstoffe 0,01 % der eingesetzten Kraftstoffmenge entspricht (siehe Anhang 7.1.4).

3.2.2.2.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (1.D.1.a)

Siehe Nationaler Flugverkehr, Kapitel 3.2.8.1.3.

3.2.2.2.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (1.D.1.a)

Siehe Nationaler Flugverkehr, Kapitel 3.2.8.1.4.

3.2.2.2.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (1.D.1.a)

Gegenüber Submission 2025 resultieren Rückrechnungen einerseits aus der Revision der Energiebilanzen 2003 bis 2023, andererseits aus der Aktualisierung des Modells TREMOD Aviation.

Tabelle 20: revidierte Treibstoff-Inlandsablieferungen, in Terajoule [TJ]

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
Flugturbinentreibstoff / Kerosin										
Submission 2026	193.329	233.437	297.258	343.828	361.751	361.651	199.931	257.520	384.975	401.833
Submission 2025	193.329	233.437	297.258	343.828	361.751	361.651	199.931	257.520	384.975	402.121
Änderung absolut	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-289
Änderung relativ	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,07%
Flugbenzin										
Submission 2026	2.438	1.142	1.120	697	567	569	214	159	175	133
Submission 2025	2.438	1.142	1.120	698	568	570	214	159	175	130

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
Änderung absolut	0,00	0,00	0,00	-0,43	-0,35	-0,35	-0,13	-0,10	-0,11	3,05
Änderung relativ	0,00%	0,00%	0,00%	-0,06%	-0,06%	-0,06%	-0,06%	-0,06%	-0,06%	2,34%

Tabelle 21: revidierter Anteil an den Kerosin-Inlandsablieferungen 2023, in %

	2023
Submission 2026	96,3
Submission 2025	96,4
Änderung absolut	-0,003
Änderung relativ	-0,003%

Quelle: eigene Berechnungen, basierend auf TREMOD AV

Die resultierende Änderung des Treibstoffeinsatzes stellt sich wie folgt dar:

Tabelle 22: revidierte Treibstoffmengen für Flüge ins Ausland 1990-2023, in Terajoule

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
Flugturbinentreibstoff / Kerosin										
Submission 2026	163.828	203.448	264.512	313.568	331.542	334.046	187.577	247.979	371.062	387.156
Submission 2025	163.828	203.448	264.512	313.568	331.542	334.046	187.577	247.979	371.062	387.445
Änderung absolut	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-289
Änderung relativ	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,07%
Flugbenzin										
Submission 2026	340	161	156	96,2	77,9	78,6	5,43	11,5	12,6	27,6
Submission 2025	340	161	156	96,3	78,0	78,6	5,43	11,5	12,6	27,0
Änderung absolut	0,00	0,00	0,00	-0,06	-0,05	-0,05	0,00	-0,01	-0,01	0,63
Änderung relativ	0,00%	0,00%	0,00%	-0,06%	-0,06%	-0,06%	-0,06%	-0,06%	-0,06%	2,34%
GESAMT-TREIBSTOFFEINSATZ										
Submission 2026	164.168	203.609	264.668	313.664	331.620	334.125	187.582	247.991	371.074	387.184
Submission 2025	164.168	203.609	264.668	313.664	331.620	334.125	187.582	247.991	371.074	387.472
Änderung absolut	0,00	0,00	0,00	-0,06	-0,05	-0,05	0,00	-0,01	-0,01	-288
Änderung relativ	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,07%

Quelle: eigene Berechnungen, basierend auf TREMOD AV

Entsprechend kommt es auch für alle Jahre ab 2003 zu einer Neuberechnung der Emissionen, wobei diese für die Jahre bis 2022 so gering ausfällt, dass sie hier nicht dargestellt werden kann:

Tabelle 23: revidierte THG-Emissionen 1990-2023, in kt und kt CO_2-Äquivalenten

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
Kohlendioxid - CO_2										
Submission 2026	12.026	14.915	19.388	22.978	24.293	24.476	13.742	18.167	27.183	28.363
Submission 2025	12.026	14.915	19.388	22.978	24.293	24.476	13.742	18.167	27.183	28.385
Änderung absolut	0,000	0,000	0,000	-0,004	-0,003	-0,003	0,000	-0,001	-0,001	-21,10
Änderung relativ	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	0,000%	-0,074%
Methan - CH_4										
Submission 2026	0,192	0,158	0,133	0,133	0,138	0,149	0,070	0,072	0,108	0,113
Submission 2025	0,192	0,158	0,133	0,133	0,138	0,149	0,070	0,072	0,108	0,113
Änderung absolut	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Änderung relativ	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Lachgas - N_2O										
Submission 2026	0,382	0,470	0,611	0,728	0,769	0,774	0,435	0,576	0,862	0,8987
Submission 2025	0,382	0,470	0,611	0,728	0,769	0,774	0,435	0,576	0,862	0,8994
Änderung absolut	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,0007
Änderung relativ	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,07%
Gesamt-Treibhausgase										
Submission 2026	12.144	15.059	19.574	23.198	24.526	24.711	13.873	18.340	27.443	28.634
Submission 2025	12.144	15.059	19.574	23.198	24.526	24.711	13.873	18.340	27.443	28.655
Änderung absolut	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-21,3
Änderung relativ	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,07%

Quelle: eigene Berechnungen; [a] ohne CO_2 aus der Schmierstoff-Mitverbrennung

3.2.2.2.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (1.D.1.a)

Siehe Nationaler Flugverkehr, Kapitel 3.2.8.1.6.

3.2.2.3 Emissionen aus dem internationalen Seeverkehr/ Marine (1.D.1.b)

3.2.2.3.1 Beschreibung der Kategorie (1.D.1.b)

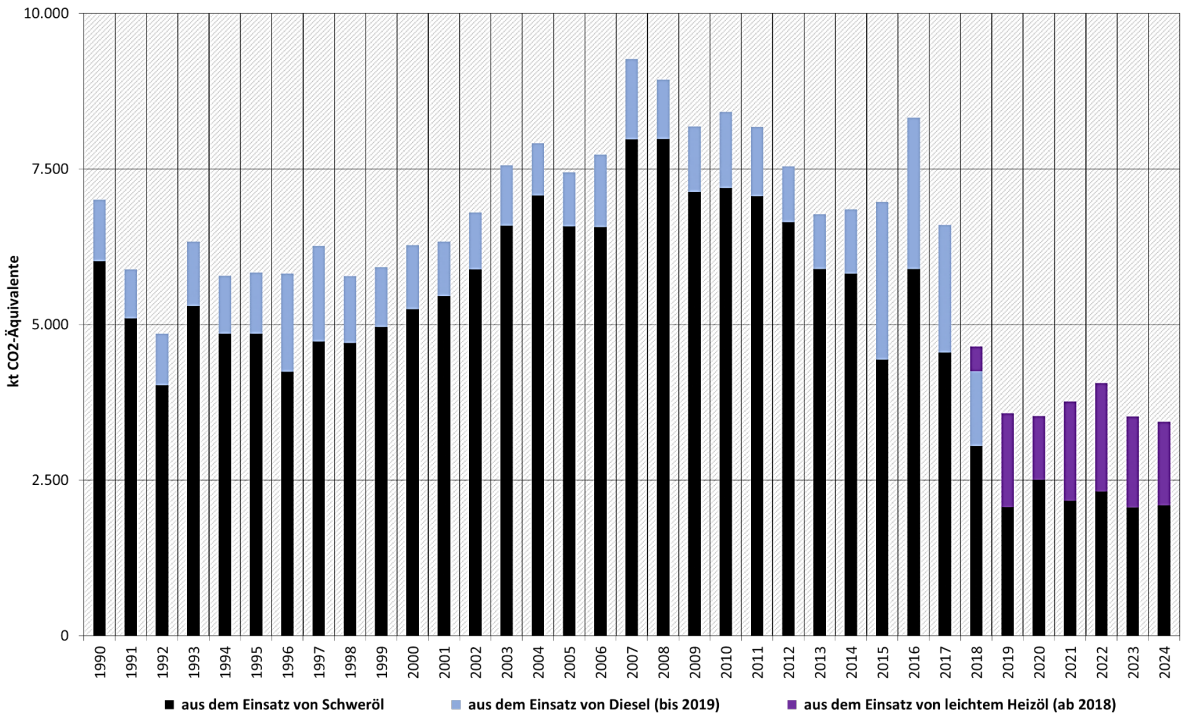
Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2	CS (Tier 2)	NS/IS/M	D [a] / CS
CH_4	CS (Tier 2)	NS/IS/M	CS (M)
N_2O	CS (Tier 2)	NS/IS/M	CS (M)
NO_X, CO, NMVOC, SO_2	CS (Tier 2)	NS/IS/M	CS (M)

[a] mitverbrannte Schmierstoffe

Die durch den von deutschen Seehäfen ausgehenden internationalen Seeverkehr verursachten Emissionen werden nicht als Bestandteil der nationalen Gesamtinventare berichtet und sind nicht Teil der Hauptkategorienanalyse.

Die abgesetzten Kraftstoffmengen und die aus deren Verbrennung resultierenden Emissionen unterliegen starken jährlichen Schwankungen. Dies kann zum Beispiel mit Preisunterschieden bei den Kraftstoffkosten zwischen Seehäfen erklärt werden: da Seeschiffe nicht bei jedem Hafenaufenthalt Kraftstoff bunkern müssen, können hohe Kraftstoffkosten vermieden werden. Darüber hinaus werden die Absätze durch Lagerhaltung in den Häfen beeinflusst.

Abbildung 20: Treibhausgas-Emissionen des internationalen Seeverkehrs seit 1990



Quelle: eigene Darstellung, UBA

3.2.2.3.2 Methodische Aspekte (1.D.1.b)

Deutschland berichtet gemäß Tier 1, das heißt, die Emissionen werden als Produkt aus den in Deutschland verkauften Kraftstoffmengen und landesspezifischen Emissionsfaktoren für CO_2 sowie Default-Emissionsfaktoren für CH_4 und N_2O berechnet.

Die Aktivitätsraten seegehender Schiffe stammen grundsätzlich aus den Energiebilanzen der Bundesrepublik Deutschland (AGEB, 2025c), in denen aufgrund abweichender Besteuerung in Energiebilanzzeile 6 (EBZ 6) Hochseebunkerungen IMO-registrierter Seeschiffe gesondert ausgewiesen werden.

Für Jahre, für die eine Energiebilanz nicht rechtzeitig vorliegt, wird auf eine Sonderauswertung der „Amtlichen Mineralöldaten für die Bundesrepublik Deutschland“ des Bundesamtes für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle zurückgegriffen (BAFA, 2025a), die in die Nationalen Energiebilanzen einfließen.

Die in diesen statistisch erfassten Mengen enthaltenen Bunkerungen national verkehrender Seeschiffe (Fracht und Passagiere (1.A.3.d), Fischerei (1.A.4.c iii) und Militär (1.A.5.b iii)) werden grundsätzlich gemäß Deichnik (2025) gesondert berechnet und von den in EBZ 6 geführten

Gesamtmengen abgezogen. Die sich ergebende Restmenge wird dem von Deutschland ausgehenden internationalen Seeverkehr zugeordnet.

Der zwischen 2014 und 2015 zu beobachtende starke Anstieg der eingesetzten Dieselmengen von rund 15 % auf über 30 % der gesamten Kraftstoffmenge resultiert dabei aus dem De-facto-Verbot von Schweröl in den sogenannten SECAs *(Sulphur Emission Control Areas)*, zu denen Nord- und Ostsee zählen, infolge des Inkrafttretens deutlich strengerer Grenzwerte für den Schwefelgehalt der Schiffskraftstoffe.[22]

Mit der Berichterstattung 2024 erfolgte die Einführung einer neuen Zeitreihe für „leichtes Heizöl“ im ZSE, welches seit 2018 als Kraftstoffsorte in der NEB aufgeführt wird, bis zur Submission 2023 aber unter „Diesel“ subsummiert wurde.

Zudem werden die Mengen mitverbrannter Schmierstoffe und die daraus resultierenden CO_2-Emissionen berichtet. Diese werden auf Grundlage der abgesetzten Kraftstoffmengen berechnet. Gemäß Wallfarth (2014) wird dabei davon ausgegangen, dass die Menge mitverbrannter Schmierstoffe 0,15 % der eingesetzten Kraftstoffmenge entspricht (siehe Kapitel 4.5.1).

Bezüglich der Emissionsfaktoren für Kohlendioxid wird auf Anhang 6.6 verwiesen.

Für die Berechnung der Methan- und Lachgas-Emissionen wird auf die für den nationalen Seeverkehr verwendeten Emissionsfaktoren aus Deichnik (2025) zurückgegriffen.

Hinsichtlich der Mitverbrennung von Schmierstoffen wird dagegen davon ausgegangen, dass die anfallenden N_2O- und CH_4-Emissionen bereits in den Emissionsfaktoren der verwendeten Kraftstoffe abgebildet und daher hier als IE *(included elsewhere)* zu berichten sind.

3.2.2.3.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (1.D.1.b)

Siehe Kapitel 3.2.8.4.3.

3.2.2.3.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (1.D.1.b)

Siehe Kapitel 3.2.8.4.4.

3.2.2.3.5 Kategoriespezifische Rückrechnung (1.D.1.b)

Gegenüber Submission 2025 resultieren Rückrechnungen aus der Revision der Energiebilanzen 2003 bis 2023 (siehe 3.2.8.4.5).

Tabelle 24: revidierte Energiemengen, in Terajoule

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
Dieselkraftstoff										
Submission 2026	13.162	13.096	13.709	11.546	16.273	33.836				
Submission 2025	13.162	13.096	13.709	11.546	16.273	33.836				
Änderung absolut	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				
Änderung relativ	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%				
Leichtes Heizöl										
Submission 2026							13.606	21.258	23.257	19.519
Submission 2025							13.606	21.260	23.267	18.657
Änderung absolut							-0,53	-2,12	-10,4	862

[22] seit 01.Januar 2015: 0,10 % anstelle bisher 1,00 % (https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Air-Pollution.aspx)

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
Änderung relativ							0,00%	-0,01%	-0,04%	4,62%
Schweröl										
Submission 2026	76.942	62.066	67.080	84.127	91.992	57.278	32.053	27.713	29.416	26.591
Submission 2025	76.942	62.066	67.080	84.127	91.992	57.278	32.053	27.713	29.414	26.633
Änderung absolut	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,00	2,46	-42,2
Änderung relativ	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	-0,16%
Submission 2026	76.942	62.066	67.080	84.127	91.992	57.278	32.053	27.713	29.416	26.591
GESAMT-ENERGIEEINSATZ										
Submission 2026	90.104	75.162	80.789	95.672	108.266	91.114	45.659	48.971	52.673	46.110
Submission 2025	90.104	75.162	80.789	95.672	108.266	91.114	45.660	48.973	52.681	45.290
Änderung absolut	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,54	-2,12	-7,92	820
Änderung relativ	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,02%	1,81%

Quelle: Deichnik (2025)

Gleichzeitig erfolgte für die Jahre 2022 und 2023 eine Korrektur der Emissionsfaktoren für CO_2 aus Schweröl gemäß (Deichnik, 2025):

Tabelle 25: revidierte CO_2-Emissionenfaktoren für Schweröl, in kg/TJ

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
Submission 2026	77.241	77.241	77.241	77.241	77.241	76.445	77.188	77.188	77.753	76.554
Submission 2025	77.241	77.241	77.241	77.241	77.241	76.445	77.188	77.188	77.188	77.188
Änderung absolut	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	565	-634
Änderung relativ	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,73%	-0,82%

Aus diesen Anpassungen resultiert eine Neuberechnung der Emissionsmengen ab 1990.

Tabelle 26: revidierte Treibhausgas-Emissionen, in kt und kt CO_2-Äquivalenten

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
Kohlendioxid [a]										
Submission 2026	6.927	5.772	6.205	7.363	8.322	6.893	3.486	3.718	4.015	3.486
Submission 2025	6.927	5.772	6.205	7.363	8.322	6.893	3.486	3.718	3.999	3.442
Änderung absolut	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,04	-0,16	16,03	43,79
Änderung relativ	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,40%	1,27%
Methan										
Submission 2026	0,168	0,139	0,149	0,179	0,201	0,174	0,129	0,121	0,134	0,118
Submission 2025	0,168	0,139	0,149	0,179	0,201	0,174	0,129	0,121	0,134	0,117
Änderung absolut	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001
Änderung relativ	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,01%	1,02%
Lachgas										
Submission 2026	0,309	0,257	0,277	0,328	0,371	0,315	0,159	0,169	0,183	0,159

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
Submission 2025	0,309	0,257	0,277	0,328	0,371	0,315	0,159	0,169	0,183	0,156
Änderung absolut	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003
Änderung relativ	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,01%	1,74%
GESAMT-TREIBHAUSGASE [a]										
Submission 2026	7.014	5.844	6.283	7.455	8.426	6.982	3.532	3.766	4.067	3.531
Submission 2025	7.014	5.844	6.283	7.455	8.426	6.982	3.532	3.767	4.051	3.487
Änderung absolut	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,04	-0,16	16,0	44,5
Änderung relativ	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,40%	1,28%

3.2.2.3.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (1.D.1.b)

Derzeit sind keine über die routinemäßige Revision des verwendeten Rechenmodells hinausgehenden Verbesserungen geplant.

3.2.3 CO_2-Emissionen aus der nichtenergetischen Verwendung von Energieträgern

In Deutschland werden Kohle, Öl und Gas weit überwiegend zu energetischen Zwecken genutzt. Ein Teil dieser Brennstoffe wird jedoch auch nicht-energetisch, als Rohstoff (Feedstock) für Herstellungsprozesse verwendet. In der deutschen Energiebilanz (EB) wird dieser nicht-energetische Verbrauch in Zeile 43 (EBZ 43) gesondert ausgewiesen.

Dominierender Verbraucher ist hier die chemische Industrie: So werden fossile Energieträger in Crackern, Reforming-Verfahren, der Synthesegasherstellung und der Herstellung von Graphitelektroden eingesetzt. Die wichtigsten Folgeprodukte aus Cracken und Reformieren sind Ethylen, Propylen, 1,3-Butadien, Benzol, Toluol und Xylole, aus der Erzeugung von Synthesegas Ammoniak und Methanol.

In Raffinerien werden Bitumen, Schmierstoffe und Paraffinwachse gewonnen: Ersterer wird u.a. für Straßenbeläge oder Bitumendachbahnen verwendet, Schmierstoffe u.a. im Straßenverkehr und in Maschinen eingesetzt.

Ein Vergleich zwischen den in EBZ 43 aufgelisteten Verbräuchen und den im Inventar unter *CRF 2 - Industrieprozesse* berichteten Emissionen von CO_2 und NMVOC aus nicht-energetischer Verwendung ist ohne Anpassung nicht möglich. U.a. werden bei den Industrieprozessen nur Emissionen bei der Herstellung oder Nutzung der Produkte betrachtet, während in EBZ 43 der gesamte Feedstock erfasst wird, der sich aus prozessspezifischen Emissionen und den Kohlenstoffmengen, die in den Produkten gespeichert werden, zusammensetzt. Letztere machen den weitaus größeren Anteil des Feedstocks aus.

Ein weiterer gravierender Unterschied ist, dass für die Berechnung der Emissionen aus der Nutzung der Produkte Import- und Exportmengen mit berücksichtigt werden. Um eine vollständige Bilanzierung zu ermöglichen, wurde in Tabelle 27 (s.u.) der in den Produkten gespeicherte Kohlen-stoff der fossilen Energieträger mitberücksichtigt. Die Zuordnung der Emissionen aus den stofflichen Anwendungen und Produkten zu den einzelnen Energieträgern orientiert sich an der Tabelle 1.3 aus Volume 3 der 2006 IPCC-GL und basiert auf Angaben von Verbänden, Produzenten und Experten. Teilweise mussten eigene Abschätzungen durchgeführt werden, wie sich der Einsatz auf die einzelnen Energieträger verteilt.

Die Produktionsmengen der in der Tabelle genannten Produkte wurden aus den gemeldeten Daten des Statistischen Bundesamtes und des Bundesamtes für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle übernommen und in CO_2-Äquivalente umgerechnet. Die Umrechnung erfolgt für die petro-

chemischen Produkte anhand des spezifischen Kohlenstoffgehaltes gemäß Tabelle 3.10 aus Volume 3 der 2006 IPCC-GL (IPCC, 2006a) und der molaren Masse von CO_2. Anschließend werden die CO_2-Äquivalent-Emissionen auf die drei in Deutschland eingesetzten Feedstocks Naphta, Flüssiggas und andere Mineralölprodukte nach internen Verbandsangaben aufgesplittet.

Für Industrieruß wird vereinfacht angenommen, dass dieser aus reinem Kohlenstoff besteht, der ebenfalls in CO_2-Äquivalente umgerechnet wird.

Die Produktionsmengen von Bitumen, Schmierstoffen und Paraffinwachsen stammen aus der amtlichen Mineralölstatistik und beziehen sich auf die Bruttoraffinerieerzeugung. Die Produktions-mengen wurden mit den folgenden IPCC Standardwerten (Tabelle 1.2 und Tabelle 1.4 aus Vol. 2 der 2006 IPCC GL (IPCC, 2006a)) in CO_2-Äquivalente umgerechnet.

Tabelle 27: IPCC-Standardwerte für EF & Unteren Heizwert

	EF in t CO_2/TJ	Unterer Heizwert in TJ/kt
Bitumen	80,6	40,2
Paraffinwachs	73,3	40,2

Die Summe des emittierten und in Produkten gespeicherten Kohlenstoffs entspricht für das Jahr 2021 107 % des Kohlenstoffs aus dem nicht-energetischen Verbrauch gemäß EBZ 43. Somit lassen sich die in der Energiebilanz ausgewiesenen Mengen gut in der stofflichen Verwendung nachweisen. Eine Lücke in der Erfassung von nicht-energiebedingten CO_2-Emissionen im Inventar ist nicht zu erkennen.

Tabelle 28: Verifikation der Vollständigkeit des berichteten CO_2 aus der nichtenergetischen Verwendung von fossilen Energieträgern, für 2021

			KOHLEN				MINERALÖLE					GAS	
			Steinkohle + Steinkohlekoks	Braun-kohlen	Andere Braunkohle-produkte	Summe Fest-brennstoffe	Rohbenzin (Naphtha)	Petrolkoks	Flüssiggas	Andere Mineralöl-produkte	Summe Flüssig-brennstoffe	Erdgas	Summe Gas
A: Ausgewiesene NEU-Menge (Energiebilanzzeile 43)		TJ	3.112,5	256,0	13.239,1	16.607,6	355.278,8	6.319,1	92.092,0	383.023,9	836.713,8	129.621,4	129.621,4
B: Kohlenstoffgehalt		kg C/GJ	26,8	30,2	26,9		20,0	27,8	18,1	19,0		15,2	
C: Summe des Einsatzes als Feedstock/Nicht-energetische Verwendung		kt C	83,4	7,7	356,6	447,8	7.102,3	175,4	1.666,0	7.276,9	16.220,7	1.973,1	1.973,1
D: Summe des Einsatzes als Feedstock/Nicht-energetische Verwendung		kt CO_2	305,9	28,4	1.307,5	1.641,8	26.041,9	643,3	6.108,8	26.682,1	59.476,1	7.234,8	7.234,8
E: Impliziter oxidierter Kohlenstoffanteil		%	147%				112%	109%	123%	105%	110%	98%	98%
	AR in [kt]	**EM in [kt CO_2]**	**AR + EM [C in Gg CO_2]**										
F: Summe berichtetes fossiles IPPU CO_2		7.003	449				29.270	702	7.527	28.037	65.536	7.115	7.115
2 Industrieprozesse		7.003	449				29.270	702	7.527	6.724	44.223	7.115	7.115
2.B: Chemische Industrie		5.859					29.270	6	7.527	6.724	43.527	7.115	7.115
2.B.1: Ammoniak Produktion	2.892	5.246										5.246	5.246
2.B.5: Karbid Produktion	C	6						6			**6**		
2.B.6: Titandioxid Produktion		NE											
2.B.8: Petrochemie (1)													
Methanol	1.359											1.869	1.869
Ethylene	5.196						11.416		2.935	1.957	16.308		
Propylen	3.553						7.809		2.008	1.339	11.155		
Butene und 1,3-Butadien	2.186						4.982		1.281	854	7.117		
Benzol	1.578						3.736		961	641	5.338		
Toluol	567						1.328		341	228	1.897		
Xylol													
Industrieruß	309	607								1.706	1.706		
	AR in [kt]	**EM in [kt CO_2]**	**AR + EM [C in Gg CO_2]**										

			KOHLEN				MINERALÖLE					GAS	
2.C: Metall Industrie		1.145						696			696		
2.C.1: Eisen- und Stahlproduktion (2)		IE	469										
2.C.2: Produktion von Ferrolegierungen	54	6											
2.C.3: Primäraluminiumproduktion	509	696	6					696			696		
2.C.5: Bleiproduktion (2)	C	IE											
2.C.6: Zinkproduktion (2)	C	IE											
2.D: Nichtenergetische Produkte aus Brennstoffen und Lösemitteln (1)													
Schmierstoffe	2.522									21.313	21.313		
Wachse, Paraffine, Vaseline, etc.	338									7.434	7.434		
Bitumen	3.972									998	998		
Lösemittel und andere Produktverwendungen (3)	IE	IE								12.881	12.881		

(1) Um eine vollständige Kohlenstoffbilanzierung zu gewährleisten, wird hier vom Berichtsformat der Quellgruppen im Inventar abgewichen. Darum sind die hier aufgeführten Produktionsmengen nicht mit dem Inventar in 2.B.8 und 2.D vergleichbar. Die Emissionen beziehen sich in der Tabelle auf eine vollständige Umwandlung der Produkte in CO_2 statt auf Emissionen in der Herstellung oder Anwendung wie in den Kategorien des Inventars.

(2) Aus Vertraulichkeitsgründen werden diese Daten aggregiert berichtet.

(3) Da ca. über 90% der Lösemittel aus Grundchemikalien aus Steamcrackern gewonnen werden, wird angenommen, dass der Kohlenstoff der im NMVOC emittiert aus den Produkten der Cracker stammt.

3.2.4 Öffentliche Elektrizitäts- und Wärmeversorgung (1.A.1.a)

3.2.4.1 Beschreibung der Kategorie (1.A.1.a)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
L/T	1 A 1 a, Public Electricity and Heat Production	fossil fuels	CO_2	338451,16	26,17	151375,41	21,40	-55,27
L/T	1 A 1 a, Public Electricity and Heat Production		CH_4	192,83	0,02	2637,87	0,38	1267,99
-/-/2	1 A 1 a, Public Electricity and Heat Production		N_2O	2140,86	0,17	1241,79	0,18	-42,00

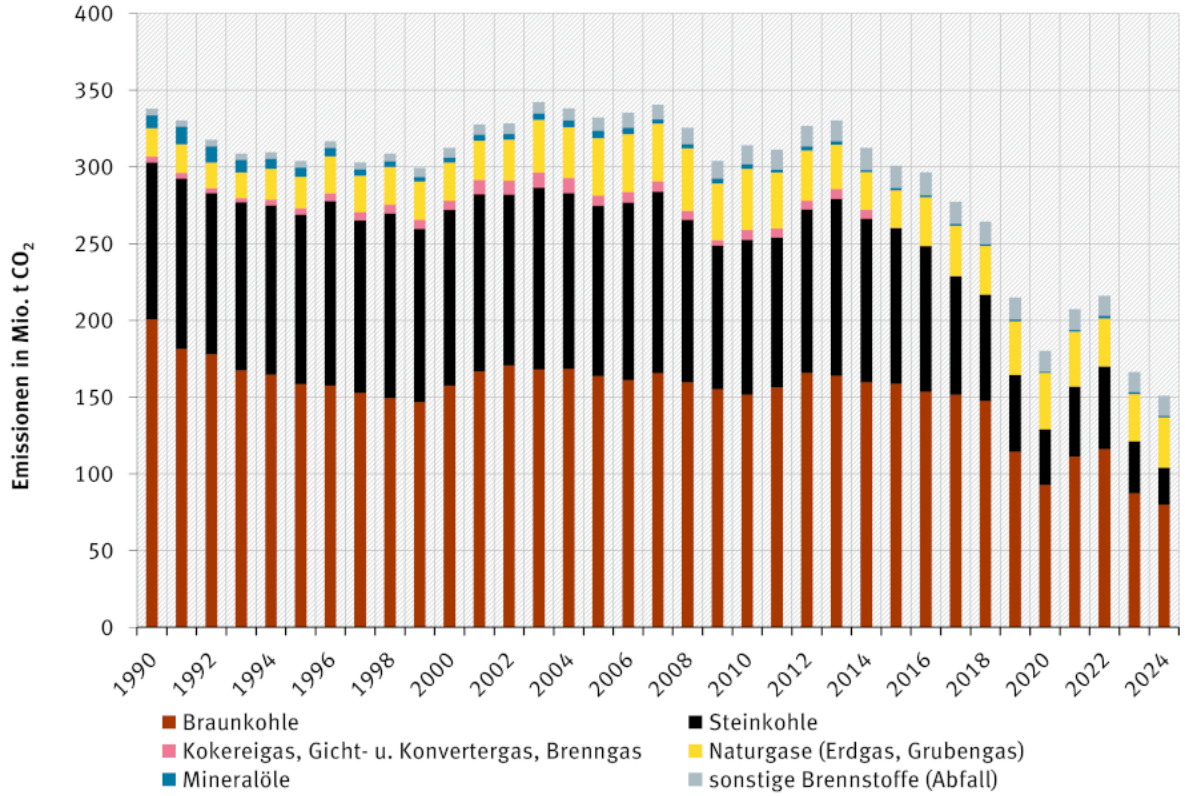
Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2	CS	NS	CS
CH_4	Tier 2	NS	CS
N_2O	Tier 2	NS	CS
NO_x, CO, NMVOC, SO_2	CS	NS	CS

Die Kategorie der „Öffentlichen Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung“ ist für CO_2- und CH_4-Emissionen eine Hauptkategorie nach der Emissionshöhe und dem Trend sowie nach Ansatz 2 für N_2O.

Unter der Kategorie 1.A.1.a „Öffentliche Elektrizitäts- und Wärmeversorgung“ sind die Fernheizwerke und die Strom- und Wärmeerzeugung der öffentlichen Kraftwerke zusammengefasst. Anlagen, die den aus Biomasse erzeugten Strom in das öffentliche Netz einspeisen, werden ebenfalls der Kategorie 1.A.1.a zugeordnet.

Die folgende Graphik zeigt eine Übersicht über die Entwicklung der CO_2-Emissionen in der Kategorie 1.A.1.a:

Abbildung 21: Entwicklung der CO_2-Emissionen der Kategorie 1.A.1.a



Quelle: eigene Darstellung, UBA

Der Emissionstrend wird im Wesentlichen von der Entwicklung und der Struktur der Stromerzeugungsanlagen geprägt, da diese den Hauptteil der Emissionen ausmachen. Wesentliche allgemeine Treiber für den Trend umfassen die Wirtschaftsentwicklung (wie der Zusammenbruch der Industrie in den neuen Bundesländern in den Neunzigerjahren, die Wirtschafts- und Finanzkrise insbesondere im Jahr 2009 und die Corona-Krise 2020), die (relativen) Brennstoffpreise und die CO_2-Zertifikatspreise, regulatorische Rahmenentscheidungen (wie das Kohleverstromungs-beendigungsgesetz 2020 und die Änderung des Atomgesetzes 2011), den Außenhandelssaldo für Strom (etwa der Exportanstieg ab 2012 und die Änderung in einen Importsaldo ab 2023), die Witterungsbedingungen (etwa kalte Winter 2010, 2012, 2013, 2021) sowie statistische Artefakte aufgrund der Ummeldung von Kraftwerken in andere Sektoren.

Wesentliche energieträgerspezifische Treiber sind:

Braunkohle

- bis 1999 Schließung vieler braunkohlebefeuerter Anlagen in den neuen Bundesländern
- 2012 gehen die bisher letzten drei neuen Braunkohlen-Kraftwerksblöcke in Betrieb
- danach bis zum aktuellen Berichtsrand weitere Stilllegung von Kraftwerken mit Überführung in vierjährige Sicherheitsbereitschaft (insbesondere 2018 und 2019 mit wesentlicher Wirkung auf die Stromerzeugung 2019 und 2020), um bei Engpässen vorübergehend zur Verfügung zu stehen sowie die immer häufiger angewendete Fahrweise der Kraftwerke im Mittellastbereich.

Steinkohle

- Über die Zeitreihe betrachtet weisen die Steinkohlekraftwerke stärkere Schwankungen beim Brennstoffeinsatz auf, da sie im Gegensatz zur Braunkohle meist im Mittellastbereich gefahren werden und damit deutlicher auf Nachfrageschwankungen reagieren und zum anderen abhängig von Importpreisen sind.
- Mitte der Neunzigerjahre sowie 2012: Ummeldung von Unternehmen von der Industrie zur öffentlichen Versorgung
- 2016, 2017, 2020: preisbedingte Verschiebung des Brennstoffmixes von Steinkohle zu Erdgas
- 2023, 2024: Stilllegung mehrere Steinkohlekraftwerke

Kokereigas, Gicht- u. Konvertergas, Brenngas

- 2015 Ummeldung der Gichtgaskraftwerke in die Stahlindustrie

Naturgase (Erdgas, Grubengas):

- seit 1990 deutlicher Anstieg des Einsatzes von Erdgas zur Stromerzeugung
- ab 2005 Inbetriebnahme einer ganzen Reihe von großen GuD- und mittleren Gasturbinenkraftwerken
- Gaskraftwerke werden zunehmend zur Stabilisierung der Netze bei fluktierender Erzeugung durch Erneuerbare Energien genutz
- Gestiegener Erdgasverbrauch in 2024 durch die günstigere Großhandelspreise für Erdgas im Vergleich zum Vorjahr

Mineralöle

- Mineralöle spielen für die deutsche Stromversorgung nur eine untergeordnete Rolle. Sie werden überwiegend zur Hilfs- und Stützfeuerung in Kohle- und Müllheizkraftwerken und zur Spitzenlasterzeugung eingesetzt

Brennstoffübergreifend

- seit 2005 steigender Einsatz von erneuerbaren Energien (vorwiegend Wind und PV), dadurch Verdrängung von fossilen Energieträgern und Veränderung der Betriebsweise der verbliebenen Kraftwerke
- der Kernkraftausstieg, der zukzessive bis Ende 2023 erfolgte, führte zunächst zu Emissionssteigerungen, die durch erhöhtes EE-Stromangebot abgemildert wurden
- nach dem Kernkraftausstieg sank die Stromerzeugung, seit 2023 wird mehr Strom importiert, als exportiert
- Die Energiekrise infolge des Krieges in der Ukraine wirkte sich auf den Brennstoffeinsatz in der Strom- und Wärmeerzeugung aus: Der Einsatz von Erdgas nahm ab, während der Verbrauch von Heizöl und Kohle anstieg. Einige Kohlekraftwerke wurden vorübergehend aus der Sicherheitsbereitsschaft wieder eingesetzt, zudem wurde der Ausstieg aus der Kernenergie bis Ende 2023 verschoben.

Der Trend für das Treibhausgas N_2O wird im Wesentlichen vom Kohleeinsatz bestimmt. Da für N_2O keine Minderungsmaßnahmen in Energieerzeugungsanlagen bekannt sind, ist davon auszugehen, dass der seit 1990 sinkende Trend auf den verringerten Kohleeinsatz zurückzuführen ist.

Für CH_4 ist dagegen seit 1990 ein steigender Trend zu beobachten. Hier macht sich vor allem der seit 2003 deutliche Anstieg des Biogaseinsatzes bemerkbar. Biogas wird vorwiegend in Verbrennungsmotoren eingesetzt, die sehr hohe spezifische Methanemissionen aufweisen.

Eine genauere Trenddiskussion der Jahre 1990 bis 2020 ist im Kapitel Beschreibung der Kategorie (1.A.1.a) im NIR 2022 (UBA et al., 2022) 2022 beschrieben.

3.2.4.2 Methodische Aspekte (1.A.1.a)

Aktivitätsraten

Die in der Energiebilanz verbuchten Energieeinsätze werden im Modell „Bilanz der Emissionsursachen“ mit Hilfe statistischer Daten nach verschiedenen Kriterien auf mehrere Zeitreihen aufgeteilt. Ziel der Berechnungen ist es, eine an die technischen Belange der Strom- und Wärmeerzeugung angepasste Datenbasis zu schaffen. Folglich können brennstoff- und technikspezifische Emissionsfaktoren auf die Aktivitätsraten angewendet werden.

Um den Einsatz von Erdgas und leichtem Heizöl in Gasturbinen, GuD-Anlagen, Dampfturbinen und Gasmotoren zur Strom- und Wärmeerzeugung berechnen zu können, wurde 2014 im UBA ein Verfahren entwickelt, mit dessen Hilfe aus der UBA-Kraftwerksdatenbank bekannte Wirkungsgrade in die Berechnung einbezogen wurden. Damit kann über die aus der Energiestatistik verfügbare Stromerzeugung für die o.g. Anlagenarten ein Brennstoffeinsatz berechnet werden. Die Daten werden für die aktuelle Berichterstattung in regelmäßigen Abständen aktualisiert.

Ab dem Jahr 2012 weist die Energiebilanz Mini-KWK Anlagen als sogenannte Einspeiser in das öffentliche Netz aus. Folgerichtig werden die Emissionen aus der Erdgasverbrennung sowie der Verbrennung von leichtem Heizöl in diesen Anlagen, in der Quellgruppe 1.A.1.a berichtet. Die Brennstoffeinsätze aus der Wärmeerzeugung werden in der Quellgruppe 1.A.4 berichtet.

Die Aktivitätsraten für die neuen Bundesländer wurden für das Jahr 1990 bereits zur Berichterstattung 2006 im Rahmen eines Forschungsprojektes als Teilvorhaben A „Überarbeitung und Dokumentation der Brennstoffeinsätze für stationäre Feuerungsanlagen in den neuen Bundesländern für das Jahr 1990“ überarbeitet und dokumentiert (Zander & Merten, 2006).

Für die Strom- und Wärmerzeugung in Müllverbrennungsanlagen öffentlicher Kraftwerke, sowie für die Wärmeerzeugung in Müllverbrennungsanlagen öffentlicher Fernheizwerke werden bei der Bestimmung der Aktivitätsraten für Haus- und Siedlungsabfälle sowie Industriemüll sowohl Daten aus der Energiebilanz als auch aus der Abfallstatistik (Statistisches Bundesamt, 2023) verwendet.

Vor 2003 wiesen sowohl Energiestatistik als auch Energiebilanz deutlich geringere Abfallmengen aus als die Abfallstatistik. Seitdem hat sich die Datenlage in der Energiestatistik erheblich verbessert, so dass sich die Angaben zu den Energieeinsätzenweitgehend angenähert haben. Durch differenzierte Brennstoffangaben können heute feste Biomasse (insbesondere Alt- und Restholz), biogene Gase, Klärschlamm und Abwärme gesondert ausgewiesen werden. Industriemüll wird als eigene Brennstoffkategorie seit 2008 in der Energiestatistik erfasst. Um jedoch eine möglichst vollständige Abbildung der Abfallmengen sicherzustellen, ist weiterhin die Nutzung zusätzlicher Daten aus der Abfallstatistik erforderlich.

Der fossile und der biogene Anteil von Hausmüll/Siedlungsabfall wird seit dem NIR 2006 im Verhältnis 1:1 getrennt ausgewiesen. Beim Industriemüll variiert die Zusammensetzung in Abhängigkeit von der jeweiligen Anlage. Daher wird der biogene Anteil beim Einsatz zur Mitverbrennung in Braun- und Steinkohlekraftwerken sowie bei der Strom- und Wärmeversorgung in Ersatzbrennstoffkraftwerken der öffentlicher Versorger gesondert berücksichtigt.

Die Aktivitätsraten der anderen Brennstoffe werden direkt aus der Energiebilanz entnommen. Sofern statistische Anhaltspunkte oder Expertenschätzungen vorliegen, werden die Brennstoffeinsätze zusätzlich in zwei Größenklassen (Verbrennungsanlagen kleiner und größer 50 MW) eingeteilt. Die Einteilungsgrenze geht auf gesetzliche Vorschriften zur Genehmigung von Feuerungsanlagen in der Bundesrepublik Deutschland zurück.

Seit dem NIR 2011(UBA et al., 2011) werden die CO_2-Emissionen aus der Gichtgasverbrennung in öffentlichen Kraftwerken in der Kategorie 1.A.1.a berichtet. Im Jahr 2015 meldeten sich alle Gichtgaskraftwerke, die bis dahin zur öffentlichen Versorgung berichteten, in die Industrie um. Von daher findet aktuell in der Quellgruppe 1.A.1.a kein Gichtgaseinsatz mehr statt. Die Tabelle 25 im NIR 2022 (UBA et al., 2022) gibt eine Übersicht über die entsprechenden Emissionen aus der Gichtgasnutzung über die Zeitreihe seit 1990.

Ab dem NID 2025 (UBA et al., 2025) wurde die Datenbasis zur Berichterstattung der Aktivitätsraten des Randjahres verbessert. Es erfolgte die Umstellung der Disaggregation der Daten der Energiebilanz vom bisherigen Verteilmodell auf die Modellierung mit statistischen Daten, die zum Zeitpunkt der Berechnung der Aktivitsraten vorliegen oder mittels Imputationsverfahren seitens des Statistischen Bundesamtes ermittelt wurden.

Desweiteren erfolgen seit 2023 im Zweijährigen Rhythmus Revisionen der Energiebilanzen ab dem Jahr 2003 für den Fall, dass neue, verbesserte Datengrundlagen und/oder Berechnungsmethoden erkannt und eingesetzt wurden.

Emissionsfaktoren

Da CO_2-Emissionen von der Brennstoffqualität abhängen, werden die CO_2-Emissionsfaktoren sektorübergreifend berechnet und genutzt. Eine detaillierte Beschreibung sowie eine Liste mit den verwendeten Faktoren ist im Anhang 6.6 verfügbar.

Datengrundlage für Emissionsfaktoren für alle anderen Treibhausgase und Vorläufersubstanzen ist der Bericht zum Forschungsvorhaben "Ermittlung und Evaluierung von Emissionsfaktoren für Feuerungsanlagen in Deutschland für die Jahre 1995, 2000 und 2010" (Rentz et al., 2002). Die Werte für die Zwischenjahre 1996 - 1999 und 2001 - 2009 wurden durch lineare Interpolation ermittelt. Das Vorhaben sowie die lineare Interpolation für die Zwischenjahre ist ebenfalls die Grundlage für die Emissionsfaktoren der Kapitel 3.2.5, 3.2.6 und 3.2.7, soweit dort Kraftwerke, Gasturbinen oder Kesselfeuerungen zur Bereitstellung von Dampf, Heiß- und Warmwasser mit enthalten sind. Das Forschungsvorhaben diente der Ermittlung und Evaluierung repräsentativer Emissionsfaktoren für die wesentlichen Luftschadstoffe aus genehmigungsbedürftigen Feuerungsanlagen in der Bundes-republik Deutschland, gültig für die Jahre 1995, 2000 und 2010. Dies beinhaltet in erster Linie eine Analyse und Charakterisierung der Emittentenstruktur und der damit verknüpften Emissions-faktoren für das Jahr 1995 und eine adäquate Fortschreibung dieser Daten für die Jahre 2000 und 2010. Auf diese Weise wurden systematisch Emissionsfaktoren für die Stoffe SO_2, NO_X, CO, NMVOC, Staub und N_2O ermittelt. Dabei wird zwischen 12 Kohlenbrennstoffen, vier flüssigen und sieben gasförmigen Brennstoffen sowie Brennholz unterschieden. Darüber hinaus werden die verfügbaren Daten an Emissionsfaktoren weiterer Stoffe zusammengestellt; dazu gehören PAH, PCDD/F, As und Cd für

genehmigungsbedürftige Feuerungsanlagen sowie CH_4 für Gasturbinen und genehmigungsbedürftige Feuerungsanlagen, die unter die TA Luft und die 44.BImSchV fallen. Informationen zur Vorgehensweise des Forschungsvorhabens sind im Anhang 3 des NIR 2022 dargestellt.

Im Jahr 2011 wurden im Zuge eines größeren Forschungsvorhabens (Fichtner et al. (2011)), die Emissionsfaktoren (außer CO_2) aktualisiert. N_2O unterliegt in Deutschland nur in Ausnahmefällen der Überwachung; aus diesem Grunde liegen keine regelmäßigen Messdaten vor. Allerdings wurde das Emissionsverhalten bei Einsatz von Stein- und Braunkohlen, insbesondere bei Einsatz in Wirbelschichtfeuerungen und vor allem in den 90er Jahren, gezielt untersucht. Weitere Messungen wurden 2008 vom VGB durchgeführt. Das Vorhaben Fichtner et al. (2011) hat die bisher verwendeten Werte überprüft und aktualisiert. Tabelle 29 zeigt die Ergebnisse für große Anlagen der öffentlichen Kraftwerke (Feuerungswärmeleistung 50 Megawatt oder mehr), Tabelle 30 die Ergebnisse für kleinere Anlagen der Energiewirtschaft und der Industrie. Auf Grundlage dieser Werte wurden die kategoriespezifischen Emissionsfaktoren für das ZSE berechnet.

Tabelle 29: Technologische Emissionsfaktoren für Lachgas aus GFA, in [kg/TJ]

Brennstoff / Feuerungstechnologie	EF
Öffentliche Kraftwerke:	
Steinkohle / Trockenfeuerung	1,0
Steinkohle / Schmelzkammerfeuerung	1,9
Braunkohle / Trockenfeuerung	3,5
Flüssigbrennstoff / Kesselfeuerungen	1,0
Erdgas / Kesselfeuerungen	0,5
Industriekraftwerke, Industriekessel und Fernheizwerke:	
Steinkohle / Trockenfeuerung	1,0
Steinkohle / Schmelzkammerfeuerung	2,0
Steinkohle / Wirbelschichtfeuerung	20
Steinkohle / Rostfeuerung	4,0
Braunkohle / Trockenfeuerung	3,4
Braunkohle / Wirbelschichtfeuerung	8,0
Braunkohle / Rostfeuerung	3,5
Flüssigbrennstoff / Kesselfeuerungen	1,0
Erdgas / Kesselfeuerungen	0,5
Gasturbinen und Gas-und Dampfturbinenanlagen:	
Erdgas	1,7
leichtes Heizöl	2,0
Müllverbrennungsanlagen	1,2

Tabelle 30: Technologische Emissionsfaktoren für Lachgas aus Anlagen < 50 MW FWL, in [kg/TJ]

Brennstoff / Feuerungstechnologie	EF
Kesselfeuerungen bei Einsatz von:	
Steinkohle	10,0
Braunkohle	10,7
Biomasse	3,0
leichtes Heizöl	1,1
schweres Heizöl	3,0
Erdgas	0,6
Gasturbinen und Gas-und Dampfturbinenanlagen:	
Erdgas	1,7
leichtes Heizöl	2,0

Tabelle 31: Methan-Emissionsfaktoren für Feuerungsanlagen ab 50 MW FWL und für Gasturbinen, in [kg/TJ]

Anlagenart	Brennstoff	EF
Feuerungsanlagen ≥ 50 MW FWL	Steinkohle	1,0
	Braunkohle	0,63
	Heizöl, schwer	4,1
	Heizöl, leicht	3,3
	Erdgas	2,0
Gasturbinen (einschl. GuD)	Heizöl, leicht	8,0
	Erdgas	10,925
Verbrennungsmotoren	Erdgas	309,0
	Biogase	312,3
Müllverbrennung		1,8

In einem von IZT durchgeführten Forschungsvorhaben „Aufbereitung von Daten der Emissionserklärungen gemäß 11.BImSchV“ (Jörß & Gronewäller, 2010) konnten spezielle CH_4-Emissionsfaktoren für Gasmotoren ermittelt werden. Der Durchschnittswert für den Brennstoff Erdgas liegt mit 309 kg/TJ sehr deutlich über dem bis dahin verwendeten Wert von 0,3 kg/TJ, der in etwa dem Wert für Dampfturbinenkraftwerke entspricht. Der hohe Methanschlupf, der durch ein Entweichen von unverbranntem Erdgas entsteht, konnte durch Daten aus der Emissionsüberwachung bestätigt werden. Die Messwerte können abhängig von der Art des Motors und dem Wartungszustand erheblich schwanken. Für Biogas, Klärgas und Deponiegas wird ein durchschnittlicher CH_4-Emissionsfaktor von 312,3 kg/TJ verwendet. Dieser Wert wurde in dem Projekt „Emissionsanalyse und Quantifizierung von Stoffflüssen durch Biogasanlagen im Hinblick auf die ökologische Bewertung der landwirtschaftlichen Biogasgewinnung und Inventarisierung der deutschen Landwirtschaft“ des Deutschen Biomasse Forschungszentrums (Liebetrau et al., 2011) ermittelt.

Die für die Abfallverbrennung verwendeten Emissionsfaktoren stammen größtenteils aus dem von ATZ durchgeführten Forschungsvorhaben „Überprüfung der Emissionsfaktoren für die Abfallverbrennung“ (Daschner et al., 2010). Die N_2O-Emissionsfaktoren stammen aus der Dänischen Studie „ Emissions from decentralized CHP plants 2007“ (Nielsen et al., 2010). Da die Emissionsfaktoren der übrigen Schadstoffe mit denen der deutschen Müllverbrennungsanlagen gut übereinstimmen, können auch die N_2O-Faktoren auf das deutsche Inventar übertragen werden. Für die mitverbrannten Abfälle werden gewichtete Emissionsfaktoren berechnet, je nach Anteil der als Hauptbrennstoff eingesetzten einzelnen Kohlearten.

Informationen zu den prozessbedingten CO_2-Emissionen aus der Abgasreinigung (REA) von Großfeuerungsanlagen

Im Rahmen des Forschungsprojekts Kalksteinbilanz ((Lechtenböhmer, Nanning, et al., 2006b), FKZ 20541217/02) wurden für die Kategorie Strom- und Wärmeerzeugung in Öffentlichen Kraftwerken die Daten für die CO_2-Emissionen aus der Rauchgasentschwefelung ermittelt (siehe 3.2.4.2). Rauchgasentschwefelungsanlagen (REA) haben die Aufgabe, das in den Verbrennungsgasen enthaltene Schwefeldioxid durch chemisch-physikalische Prozesse in weniger schädliche Substanzen umzuwandeln. Kalkstein dient bei der Entschwefelung von Abgasen typischerweise als Reagenz. Die Entschwefelungstechnik richtet sich im Wesentlichen nach den immissionsschutzrechtlichen Anforderungen und der ökonomischen Verwertbarkeit der anfallenden Reststoffe (Gips). Im Bereich der Stromerzeugungsanlagen dominiert das Kalkstein-Waschverfahren. Gemessen an der installierten Leistung nutzen etwa 87 % der Kraftwerke in Deutschland dieses Verfahren (Rentz et al., 2002).

Die Entschwefelung mit $CaCO_3$ erfolgt nach mehreren Teilreaktionen. Zur stöchiometrischen Berechnung des Kalksteineinsatzes im Kalkstein-Waschverfahren wird die relevante chemische Brutto-Reaktionsgleichung für das Verfahren zugrunde gelegt (Strauß, 1998):

Gleichung 1:

$$CaCO_3 + SO_2 + \frac{1}{2}O_2 + 2H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O + CO_2$$

Daraus kann das molare Gewichts-Verhältnis von Kalkstein zu Gips abgeleitet werden. Daraus folgt, dass pro angefallener Tonne Gips 581,39 Kilogramm Kalkstein eingesetzt werden. Aus den Angaben zum Gipsaufkommen lässt sich der theoretisch maximale Kalksteineinsatz für REA in Stein- und Braunkohlekraftwerken ableiten. Aus dem Gipsaufkommen ist jedoch nicht ersichtlich, ob Kalkstein oder Kalk eingesetzt wurde. Um hierzu eine Aussage treffen zu können wurden Angaben des Bundesverbandes Kalk zur Absatzstatistik für ungebrannten und gebrannten Kalk für den Absatzbereich der Luftreinhaltung herangezogen. Über das Massenverhältnis zwischen $CaCO_3$ und CO_2 lassen sich dann gemäß obiger Reaktionsgleichung die prozessbedingten CO_2-Emissionen bestimmen. Die Ergebnisse der Rechnung sind in folgender Tabelle wiedergegeben. Sie berücksichtigen die Zahlen zum Gipsaufkommen in allen Jahren seit 1990. Ab dem Jahr 2009 werden Daten zum Gipsaufkommen vom VGBE verwendet. Für das aktuelle Berichtsjahr wurde eine Schätzung des Gipsaufkommens vorgenommen, die, ausgehend von den Vorjahresdaten für das Gipsaufkommen in Stein- und Braunkohlekraftwerken und von den aus diesen Kraftwerken erzeugten Strommengen eine Proportionalität zwischen der Jahresstromerzeugung und dem Gipsaufkommen unterstellt. Dieses Vorgehen wurde gewählt, da sich die Stromerzeugung in den letzten Jahren stark verändert hat und eine simple Fortschreibung nicht sachgerecht wäre. Sobald die Daten vom VGBE vorliegen, werden die vorläufigen Werte zum Gipsaufkommen ersetzt. Daher kommt es regelmäßig zu Rückrechnungen im Randjahr.

Tabelle 32: CO_2 aus der Rauchgasentschwefelung in Öffentlichen Kraftwerken, in [kt]

1990	618	**1997**	878	**2004**	1.162	**2011**	1.028	**2018**	936
1991	652	**1998**	1.005	**2005**	1.142	**2012**	1.053	**2019**	769
1992	629	**1999**	966	**2006**	1.076	**2013**	1.030	**2020**	577
1993	662	**2000**	1.135	**2007**	1.017	**2014**	974	**2021**	709
1994	616	**2001**	1.069	**2008**	985	**2015**	989	**2022**	742
1995	683	**2002**	1.094	**2009**	952	**2016**	921	**2023**	547
1996	867	**2003**	1.156	**2010**	919	**2017**	979	**2024**	435

Quelle: Berechnung auf der Grundlage des Projektes Kalksteinbilanz ((Lechtenböhmer, Nanning, et al., 2006b), FKZ 20541217/02), aktualisiert im Jahre 2008 (siehe NIR 2009 (UBA, 2009))

Diese CO_2-Emissionen wurden im Inventar den Emissionen aus dem Einsatz fester Brennstoffe zugeordnet, weil hier die Ursache für die REA und die CO_2-Emissionen liegt. Nach einer Expertenschätzung des Forschungsnehmers liegt die Unsicherheit des Kalksteineinsatzes und damit auch die Unsicherheit der damit verbundenen CO_2-Emissionen bei ±10 %.

3.2.4.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (1.A.1.a)

Unsicherheiten für die Aktivitätsraten wurden erstmals für das Berichtsjahr 2004 bestimmt und gelten weiterhin (Juhrich & Wachsmann, 2007a). Die Methode zur Bestimmung der Unsicherheiten ist im Anhang 2, Kapitel 13.6 des NIR 2007 beschrieben.

Weitere Aspekte zur Zeitreihenkonsistenz der Aktivitätsraten werden im Anhang 6.4 erläutert.

Die Angaben für die Unsicherheit des CO_2-Emissionsfaktors und deren statistische Verteilungsfunktion wurden vom Umweltbundesamt geschätzt. Die Zahlenwerte stützen sich auf die Spannweite der Kohlenstoffgehalte der einzelnen Brennstoffe.

Im Rahmen der in Kapitel 3.2.4.2 genannten Vorhaben Rentz et al. (2002) und Fichtner et al. (2011) wurde die Unsicherheit der ermittelten Emissionsfaktoren evaluiert.

3.2.4.3.1 Methodik zur Bestimmung der Unsicherheiten der Emissionsfaktoren

Die Unsicherheit von Emissionsdaten beruht auf mehreren Ursachen. Dies ist die Genauigkeit, beeinflusst durch zufällige und systematische Fehler im Rahmen einer Emissionsmessung, sowie die Vollständigkeit der Datenbasis hinsichtlich fehlender Messungen. Hinzu kommt die Variabilität der Emissionen. Hier ist zu unterscheiden zwischen der Variabilität der Emission einer Anlage innerhalb des Betrachtungszeitraumes (intra-plant variability) und dem unterschiedlichen Emissionsverhalten der verschiedenen betrachteten Quellen (inter-plant variability).

Bei der Berechnung von Emissionen mit Hilfe von Emissionsfaktoren kommen weitere Quellen möglicher Unsicherheiten hinzu. Im Rahmen der IPCC-GPG (Penman et al. (2000): Kapitel 6) werden jeweils an die Datenverfügbarkeit angepasste Methoden vorgeschlagen:

Beim Vorliegen kontinuierlicher Messungen sollten Unsicherheiten über die direkte Bestimmung statistischer Kennzahlen wie Standardabweichung und 95 %-Vertrauensbereich charakterisiert werden.

Bei der Ermittlung anlagenspezifischer Emissionsfaktoren sollten vor Ort verfügbare Messwerte herangezogen werden. Hinzu kommt das Einbeziehen von Sonderbetriebszuständen (An- und

Abfahrvorgänge) und Lastwechseln sowie eine Überprüfung der Repräsentativität verfügbarer Messdaten im Hinblick auf das Emissionsverhalten der Anlage.

Bei der Verwendung von Emissionsfaktoren aus der Literatur sollten alle dort gemachten Angaben zur Datenqualität genutzt werden. Weiterhin ist die Übertragbarkeit zu prüfen, inwieweit der Emissionsfaktor für die Situation im Untersuchungsgebiet repräsentativ ist. Ist dies nicht gegeben, sollte vielmehr eine Expertenschätzung vorgenommen werden.

Auf die Verwendung von Expertenschätzungen wird grundsätzlich verwiesen, wenn verfügbare empirische Daten für eine Quantifizierung nicht ausreichen. Eine beispielhafte Erläuterung wurde im Anhang 3 in Kapitel 14.1.2.2 im NIR 2007 (UBA, 2007) gegeben.

3.2.4.3.2 Ergebnis für N_2O

Die Einzelbewertungen der Unsicherheiten der N_2O-Emissionsfaktoren sind in dem Abschlussbericht des Forschungsvorhabens Fichtner et al. (2011) dargestellt. Im Zuge einer durch den Forschungsnehmer vorgenommenen Monte-Carlo-Simulation wurden für die prozentuale Unsicherheit im CRF-Bereich 1.A.1.a (und ebenso in den Bereichen 1.A.1.b, 1.A.1.c und 1.A.2.gviii / all other) Unsicherheiten von bis zu ±50 % angegeben (Anmerkung: bei Angabe von ±-Bereichen ist der Wert durch 2 zu teilen, vergleiche IPCC-GPG (Penman et al. (2000): Kapitel 6, S. 6.14); dabei gehen wir wie bisher von einer uniformen Verteilung der Unsicherheiten aus.

3.2.4.3.3 Ergebnis für CH_4

Feuerungsanlagen unterliegen hinsichtlich der CH_4–Emissionen in Deutschland keiner Überwachung, aus diesem Grunde liegen keine systematischen Messdaten vor. Herangezogen wurden daher die in Deutschland und der Schweiz verfügbaren Einzelinformationen. Infolge dieser eingeschränkten Datenlage wurde im Forschungsvorhaben von einer systematischen Zuordnung zu den dort behandelten Quellgruppen (vergleiche Kapitel 3.2.4.2) abgesehen. Die im Forschungs-vorhaben Fichtner et al. (2011) für einzelne Brennstoffe ermittelten und für die Berichterstattung verwendeten CH_4-Emissionsfaktoren für Feuerungs- und Gasturbinenanlagen einschließlich GuD wurden letztmalig im Kapitel 19.1.2.2 des NIR 2022 abgedruckt. Im Zuge einer durch den Forschungsnehmer vorgenommenen Expertenschätzung gemäß Tier 1 der IPCC-GPG (Penman et al. (2000): Kapitel 6) wurde für die prozentuale Unsicherheit in der Quellgruppe 1.A.1.a (und ebenso in den Quellgruppen 1.A.1.b, 1.A.1.c und 1.A.2.g viii / all other) eine obere Grenze von ±50 % geschätzt; dabei gehen wir - ebenso wie bei N_2O - von einer uniformen Verteilung der Unsicherheiten aus.

3.2.4.3.4 Zeitreihenkonsistenz der Emissionsfaktoren

Die Emissionsfaktoren für N_2O wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens Fichtner et al. (2011) für den Zeitpunkt 2004 (Bezugsjahr) ermittelt. Das Forschungsvorhaben sieht keine Anhaltspunkte für zeitliche Änderungen für den einzelnen Emissionsfaktor. Frühere Annahmen, dass zumindest die Werte für Gasturbinen zeitvariabel sein können, haben sich nicht bestätigt. Aus diesem Grunde wurden für jede Zeitreihe konstante Werte für den Zeitraum seit 1995 angenommen.

Die Zeitreihen für N_2O sind vor diesem Hintergrund insgesamt als konsistent zu bewerten.

Die Zeitreihen der CH_4-Emissionsfaktoren wurden ebenfalls geprüft und als in sich konsistent bewertet. Zur Sicherung der Zeitreihenkonsistenz wurden die für Verbrennungsmotoranlagen ermittelten CH_4-Emissionsfaktoren bis 1990 zurückgeschrieben. Es ist zwar davon auszugehen, dass der Methanschlupf Anfang der 90er Jahre noch deutlich höher lag als bei modernen Motoranlagen, es liegen für diesen Zeitraum jedoch zu wenig Messwerte vor.

Da für die meisten biogenen Brennstoffe erst ab dem Jahr 2003 statistische Daten zum Brennstoffeinsatz vorliegen, kann für diese Brennstoffe keine konsistente Zeitreihe ab 1990 vorgelegt werden. Das hat ausschließlich Auswirkungen auf den Trend der CH_4-Emissionen, der ab dem Jahr 2003 steil ansteigt.

3.2.4.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (1.A.1.a)

Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Zur Dokumentation ihrer Qualitätssicherungsmaßnahmen bei der Erstellung der Energiebilanzen legt die AGEB dem Umweltbundesamt entsprechende Qualitätsberichte vor (siehe Anhang 6.4.1). Seit dem Jahr 2012 führt die AGEB systematische Vergleiche zwischen der Schätzbilanz des Jahres x-1 (vorläufig) und der Energiebilanz des Jahres x-2 (endgültig) durch, erstmals für das Berichtsjahr 2010 (siehe Anhang 6.4.1).

Die Qualitätssicherung der amtlichen Statistik erfolgt über ein internes Qualitätssystem, dessen Qualitätsberichte in den Internetveröffentlichungen des Statistischen Bundesamtes einsehbar sind (Statistisches Bundesamt, fortlaufend).

Zusätzlich zu diesen Maßnahmen findet im Bedarfsfall eine Einbindung der AGEB in den jährlichen Überprüfungsprozess sowie ein regelmäßiger Erfahrungsaustausch mit der AGEB, dem statistischen Bundesamt und der BAFA im Rahmen einer jährlichen Sitzung oder im schriftlichen Umlaufverfahren statt, zu der das UBA einlädt. Hier werden vor dem Hintergrund der Erfahrungen aus der Inventarerstellung und der Inventarüberprüfung methodische Fragen angesprochen und es erfolgt ein genereller Austausch, der dem besseren Verständnis der Datenerhebung sowie der Verifizierung der Daten dient.

Die generellen qualitätssichernden Maßnahmen zu den Emissionsfaktoren von Feuerungsanlagen im Rahmen der Forschungsvorhaben Rentz et al. (2002) und Fichtner et al. (2011) sind in der Methodikbeschreibung im Anhang 7.1.1.1 angegeben. Ihre Ergebnisse wurden im NIR 2005 (UBA et al., 2005) berichtet.

3.2.4.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (1.A.1.a)

Tabelle 33: Rückrechnungen CRF 1.A.1.a, in [kt] bzw. [%]

	Abweichung CO_2 absolut					Abweichung CO_2 relativ
	gasförmige Brennstoffe	flüssige Brennstoffe	Feste Brennstoffe	Weitere Brennstoffe	Gesamt	Gesamt
2004	-40,74	0,00	0,00	0,01	-40,73	-0,01%
2005	-47,85	0,00	0,00	0,01	-47,84	-0,01%
2006	-54,61	0,00	0,00	0,01	-54,60	-0,02%
2007	-56,29	0,00	0,00	-285,59	-341,88	-0,10%
2008	-57,34	0,00	0,00	-0,03	-57,37	-0,02%
2009	-68,22	0,00	0,00	-24,94	-93,16	-0,03%
2010	-59,95	0,00	0,00	-26,33	-86,28	-0,03%
2011	-33,56	0,00	0,00	-29,28	-62,84	-0,02%
2012	-36,15	0,00	0,00	-23,11	-59,26	-0,02%
2013	-24,40	0,00	0,00	-13,85	-38,25	-0,01%

	Abweichung CO_2 absolut					Abweichung CO_2 relativ
2014	-15,09	0,00	0,00	-34,33	-49,43	-0,02%
2015	-10,04	0,00	0,00	-35,09	-45,13	-0,02%
2016	-32,93	0,00	0,00	-37,93	-70,86	-0,02%
2017	-33,97	0,00	0,00	-0,01	-33,98	-0,01%
2018	789,93	19,03	0,00	-22,11	786,86	0,30%
2019	842,77	7,97	0,00	-15,93	834,81	0,39%
2020	984,29	19,18	0,00	-1,57	1001,89	0,56%
2021	1263,91	26,14	0,00	-0,38	1289,67	0,63%
2022	1260,01	53,71	0,00	-4,80	1308,92	0,61%
2023	1250,35	141,42	-12,69	-101,01	1278,08	0,77%

Wie gewohnt kommt es im aktuellen Randjahr zu Rückrechnungen bei allen Energieträgern, nachdem die vorläufigen Daten durch die endgültige Energiebilanz ersetzt wurden. Seit 2023 stellt AGEB alle zwei Jahre Revisionen in der Zeitreihe beginnend ab dem Jahr 2003 bereit. Für das Berichtsjahr 2026 fanden wieder Revisionen statt und diese führten zu Rückrechnungen in früheren Jahren.

Die Werte der Abfallstatistik fließen neben der Energiebilanz in das Abfallberechnungsmodell ein. Da die Statistik nur alle zwei Jahre vorliegt, werden die Nicht-Energiebilanzteile für das Randjahr fortgeschrieben und im Folgejahr korrigiert.

3.2.4.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (1.A.1.a)

Derzeit sind keine Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel weitere Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4 Verbesserungen des Inventars, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

3.2.5 Mineralölraffinerien (1.A.1.b)

3.2.5.1 Beschreibung der Kategorie (1.A.1.b)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
L/T	1 A 1 b, Petroleum Refining	fossil fuels	CO_2	24212,49	1,88	21079,80	2,98	-12,94
-/-	1 A 1 b, Petroleum Refining	0	CH_4	17,99	0,01	17,28	0,01	-3,97
-/-	1 A 1 b, Petroleum Refining	0	N_2O	89,27	0,01	56,08	0,01	-37,18

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2	CS	NS	CS
CH_4	Tier 2	NS	CS

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
N_2O	Tier 2	NS	CS
NO_x, CO, NMVOC, SO_2	CS	NS	CS

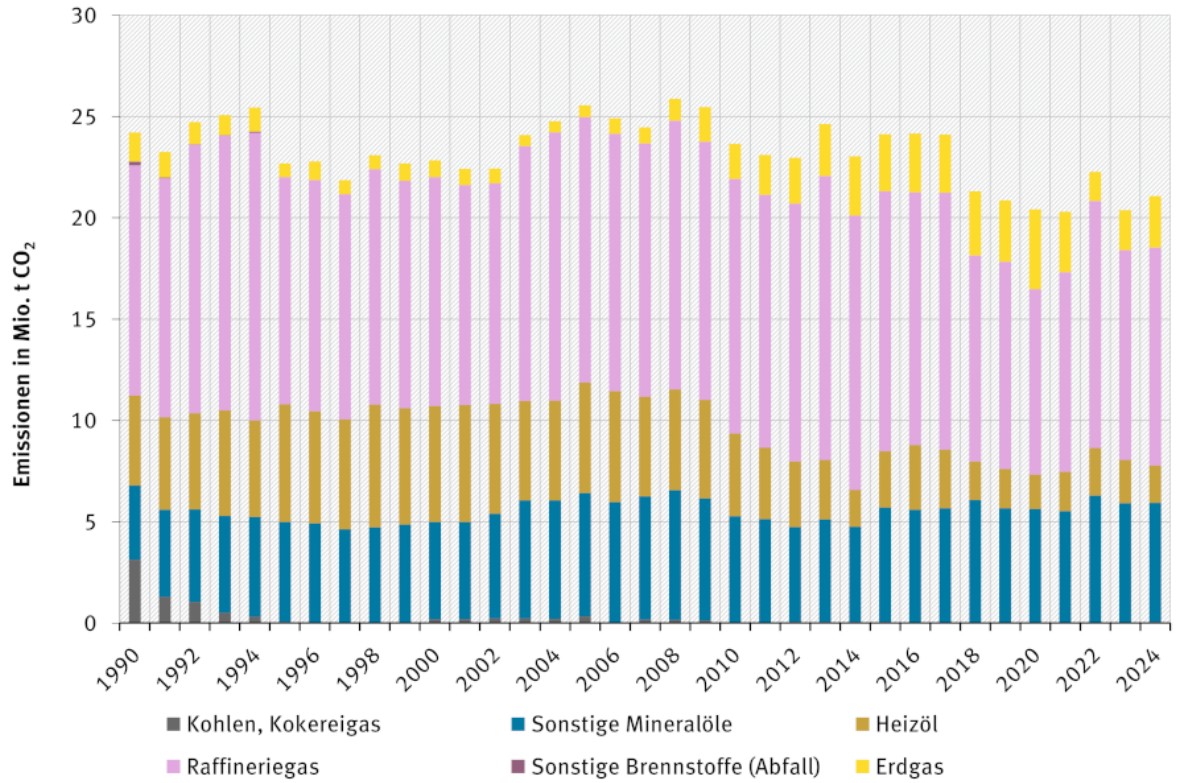
Die Kategorie der Mineralölraffinerien ist für CO_2-Emissionen eine Hauptkategorie nach der Emissionshöhe und dem Trend.

Die oben angegebenen Werte gelten für Raffineriekraftwerke (Teil der Kategorie 1.A.1.b).

Der Kategorie 1.A.1.b Raffinerien sind im ZSE die Raffinerie-Unterfeuerungen sowie die Strom- und Wärmeerzeugung der Raffineriekraftwerke zugeordnet.

Die folgende Abbildung gibt einen Überblick über den Emissionsverlauf der Kategorie 1.A.1.b:

Abbildung 22: Entwicklung der CO_2-Emissionen der Kategorie 1.A.1.b



Quelle: eigene Darstellung, UBA

Der Emissionstrend folgt im Wesentlichen der Produktionsentwicklung. Das bisherige Produktionsmaximum in Höhe von 123,6 Mio.t hergestellter Mineralölprodukte erfolgte im Jahr 2005. Bis zum Jahr 2011 sank die Bruttoraffinerieerzeugung deutlich und veränderte sich bis 2019 nur geringfügig. In den Jahren 2020 und 2021 war ein Rückgang der Produktion zu verzeichnen. Aufgrund der Gaskrise erhöhte sich 2022 der Mineralölbedarf, was zu einer Steigerung der Bruttoraffinerieerzeugung und damit auch zu einer Erhöhung der Emissionen führte. Ein weiterer wesentlicher Treiber für den Emissionstrend ist der Brennstoffwechsel für den Eigenverbrauch von schweren Mineralölprodukten zu Erdgas. Dadurch sanken die Emissionen deutlich. Effizienzmaßnahmen wirkten sich ebenfalls Emissionsmindernd aus. Demgegenüber führte die vermehrte Produktion leichterer Mineralölprodukte sowie die verstärkte Tiefenentschwefelung zu einer Erhöhung der spezifischen Brennstoffverbräuche und

damit zu einer Emissionssteigerung. Im Jahr 2023 erreichte die Bruttoraffinerieerzeugung ihr Minimum. Hauptgründe sind der geringere Bedarf an Mineralölprodukten, da aufgrund der gesunkenen Erdgaspreise in allen Sektoren wieder mehr Erdgas eingesetzt wurde. Auch in den Raffinerien wurde wieder mehr Erdgas für den Eigenbedarf verwendet. Auch das Embargos für russisches Öl führte zur einer Verringerung der Produktion. In der Summe sanken die Emissionen 2023 wieder. 2024 stiegen die Emissionen erneut mit zunehmendem Einsatz von Erdgas und der erhöhten Produktion.

3.2.5.2 Methodische Aspekte (1.A.1.b)

Aktivitätsraten

Die gesamten Daten zur Erzeugung von Mineralölprodukten in der Energiebilanz stammen aus der Amtlichen Mineralölstatistik. Die Mineralölstatistik gibt ein umfassendes Bild über die Importe, den Umwandlungseinsatz in den Raffinerien, sowie die Produktion und den Eigenverbrauch der Raffinerien. Zur Sicherung der Konsistenz folgt die Berichterstattung der Struktur der Mineralölstatistik sowie den entsprechenden Definitionen. In der Energiestatistik melden unter dem Wirtschaftszweig 19.2 „Mineralölverarbeitung“ weitere Unternehmen, die z.B. Kohlen verarbeiten, aber auch Altöl- oder Schmierstoffraffinerien. Diese Anlagen werden in der Kategorie 1.A.1.c berichtet. In der Kategorie 1.A.1.b wird daher nur die Rohölverarbeitung berichtet.

Für die Berichterstattung der Emissionen aus Rohölraffinerien werden die Anlagen in Raffinerie-kraftwerke und Raffinierie-Unterfeuerungen unterteilt. Die Aktivitätsraten zur Raffinerie-Unter-feuerung bestimmen sich als Differenzbetrag aus dem Abzug des Brennstoffeinsatzes in Raffineriekraftwerken von den Daten der Energiestatistik sowie Eigenverbrauch der Raffinerien (aus der Amtlichen Mineralölstatistik). Diese Unterscheidung ist für die Berechnung der Treib-hausgasemissionen nicht relevant, aber für die Berechnung der Vorläufersubstanzen sowie weiterer Luftschadstoffe wichtig, da die Anlagen ein unterschiedliches Emissionsverhalten aufweisen.

Der in der Amtlichen Mineralölstatistik ausgewiesene Eigenverbrauch an Petrolkoks repräsentiert den Katalysatorabbrand der Anlagen. Da nicht bekannt ist, auf welcher Grundlage die Betreiber den Petrolkokseinsatz berechnen, ist es nicht möglich, einen passenden CO_2-Emissionsfaktor zu ermitteln. Für die Jahre 2005 bis 2014 konnten aus den vom Emissionshandel vorliegenden Gesamtemissionen aus dem Katalysatorabbrand und dem Eigenverbrauch an Petrolkoks Emissionsfaktoren ermittelt werden. Damit können die Emissionen aus dem Katalysatorabbrand für die aktuellen Jahre exakt und in Übereinstimmung mit dem Emissionshandel erfasst werden. Um entsprechende Faktoren rückwirkend bis 1990 bilden zu können, wurde zunächst ein spezifischer Faktor gebildet, der sich auf die Kapazität der Konversionsanlagen bezieht. Dieses Vorgehen hat sich nach verschiedenen Prüfungen als die realitätsnächste Methode herausgestellt, da In- und Output der Reformer und FCC-Anlagen statistisch nicht erfasst werden. Als Ergebnis liegen die Emissionen aus dem Katalysatorabbrand im Jahr 1990 deutlich unter den Emissionen im aktuellen Jahr. Das erscheint plausibel, da die Weiterverarbeitung von schweren Mineralölprodukten seit 1990 deutlich zugenommen hat.

Da für die Jahre 1990 bis 1993 für die neuen Bundesländer kein Eigenverbrauch an Petrolkoks ausgewiesen wird, mussten diese Werte über den aus den Emissionshandelsdaten ermittelten Emissionsfaktor berechnet werden.

Da in den Mineralölraffinerien Emissionen fast ausschließlich aus Verbrennungsprozessen entstehen, werden diese in der Kategorie 1.A.1.b berichtet. Nur die diffusen Emissionen aus der

Herstellung von Kalzinat sowie die Fackelemissionen werden in der Kategorie 1.B.2.a.iv berichtet.

Emissionsfaktoren

Eine Beschreibung sowie eine Liste der verwendeten CO_2-Emissionsfaktoren ist Anhang 6.6 verfügbar.

Die Emissionsfaktoren für N_2O, CH_4 sowie die Vorläufersubstanzen für Raffineriekraftwerke sind den Forschungsvorhaben Rentz et al. (2002) und Fichtner et al. (2011) entnommen. Eine ausführliche Beschreibung der Vorgehensweise ist dem Kapitel 3.2.4.2 verfügbar. Für die Prozesswärme bereitstellenden Unterfeuerungen liefert das zitierte Vorhaben keine Emissionsfaktoren. Ersatzweise werden daher für Unterfeuerungen dieselben Werte für N_2O und CH_4 gewählt, die auch für Raffineriekraftwerke angesetzt werden.

3.2.5.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (1.A.1.b)

Erstmals wurden im Berichtsjahr 2004 für die Aktivitätsraten Unsicherheiten bestimmt (Juhrich & Wachsmann, 2007a). Die Methode zur Bestimmung der Unsicherheiten ist im Anhang 2, Kapitel „Unsicherheiten der Aktivitätsraten stationärer Feuerungsanlagen“ (Kapitel 13.6 des NIR 2007 (UBA, 2007)) beschrieben.

3.2.5.3.1 Ergebnis für N_2O

Die Ergebnisse des Kapitels 3.2.4.3.2 gelten entsprechend.

3.2.5.3.2 Ergebnis für CH_4

Die Ergebnisse des Kapitels 3.2.4.3.3 gelten entsprechend.

3.2.5.3.3 Zeitreihenkonsistenz der Emissionsfaktoren

Die Ergebnisse des Kapitels 3.2.4.3.4 gelten entsprechend.

3.2.5.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (1.A.1.b)

Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Weitere Informationen zur Qualitätssicherung siehe CRF 1.A.1.a (Kapitel 3.2.4.4).

Bezüglich der Emissionsfaktoren gelten die Ergebnisse des Kapitels 3.2.4.3 entsprechend.

3.2.5.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (1.A.1.b)

Tabelle 34: Rückrechnungen CRF 1.A.1.b nach Brennstoffen, in [kt] bzw. [%]

	Abweichung CO_2 absolut				Abweichung CO_2 relativ	
	gasförmige Brennstoffe	flüssige Brennstoffe	feste Brennstoffe	weitere Brennstoffe	gesamt	Gesamt
2013	169,68	0,00	0,00	-	169,69	0,69 %
2015	0,00	-2,46	0,00	-	-2,46	-0,01 %
2016	0,00	-15,01	0,00	-	-15,01	-0,06 %
2017	0,00	53,15	0,00	-	53,15	0,22 %
2018	0,00	14,05	0,00	-	14,05	0,07 %
2019	0,00	28,04	0,00	-	28,04	0,13 %

	Abweichung CO_2 absolut				Abweichung CO_2 relativ	
2020	0,00	27,94	0,00	-	27,94	0,14 %
2021	0,00	27,06	0,00	-	27,06	0,13 %
2023	186,12	-33,77	-152,24	-	0,11	0,00 %

Nach dem Vorliegen der finalen Energiebilanz für 2023 wurden die vorläufigen Werte ersetzt. Das führte zu Rückrechnungen bei allen Brennstoffen. Seit 2023 stellt AGEB alle zwei Jahre Revisionen in der Zeitreihe beginnend ab dem Jahr 2003 bereit. Für das Berichtsjahr 2026 fanden wieder Revisionen statt und diese führten zu Rückrechnungen in früheren Jahren.

3.2.5.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (1.A.1.b)

Derzeit sind keine Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4 Verbesserungen des Inventars, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

3.2.6 Herstellung von festen Brennstoffen und sonstige Energieerzeuger (1.A.1.c)

3.2.6.1 Beschreibung der Kategorie (1.A.1.c)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] (1990-2024)
L/T	1 A 1 c, Manufacture of Solid Fuels and Other Energy Industries	fossil fuels	CO_2	65289,06	5,05	8735,95	1,24	-86,62
-/-	1 A 1 c, Manufacture of Solid Fuels and Other Energy Industries	0	CH_4	103,02	0,01	113,12	0,02	9,81
-/-	1 A 1 c, Manufacture of Solid Fuels and Other Energy Industries	0	N_2O	586,23	0,05	116,43	0,02	-80,14

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2	CS	NS	CS
CH_4	Tier 2	NS	CS
N_2O	Tier 2	NS	CS
NO_X, CO, NMVOC, SO_2	CS	NS	CS

Die Kategorie der „Herstellung von festen Brennstoffen und der sonstigen Energieerzeuger“ ist für CO_2-Emissionen eine Hauptkategorie nach der Emissionshöhe und dem Trend.

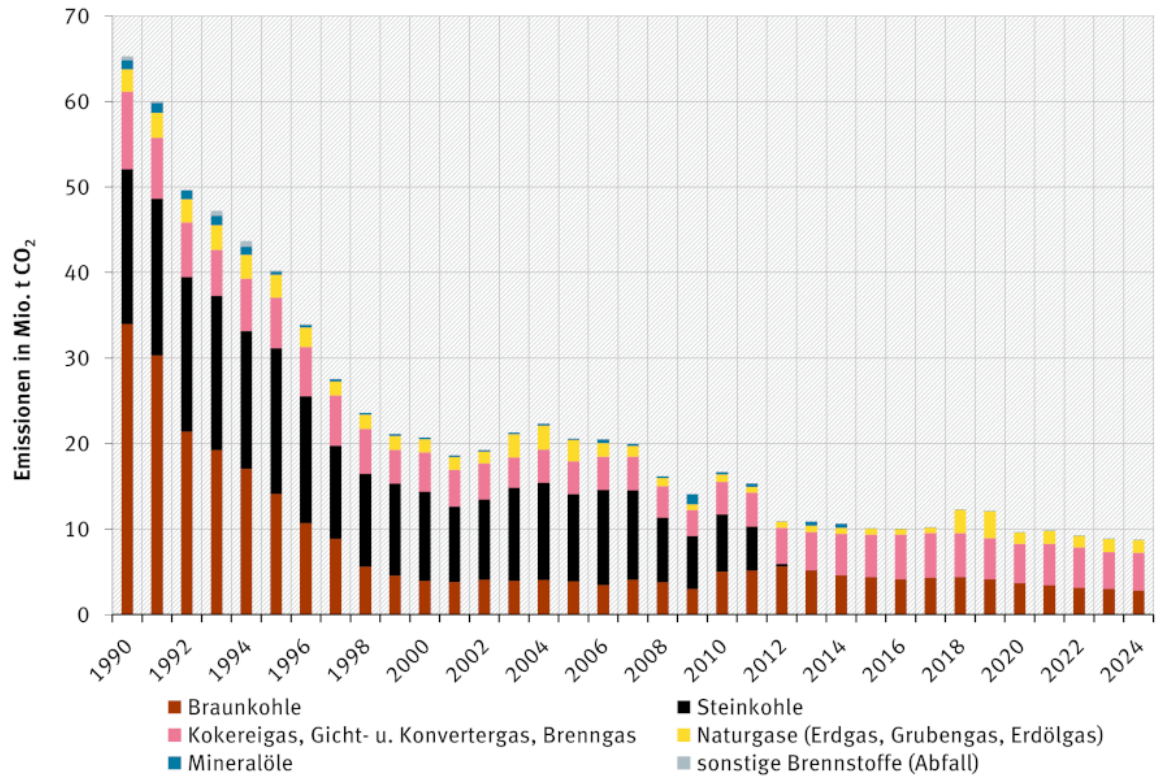
Die obigen Angaben beziehen sich auf die Kraftwerke und die sonstigen Kesselfeuerungen zur Dampf-, Heiß- und Warmwasserbereitstellung in der Kategorie 1.A.1.c.

Der Kategorie 1.A.1.c werden der Steinkohlen- und Braunkohlenbergbau sowie die Kokereien und Brikettfabriken zugerechnet, außerdem die Gewinnung von Rohöl und Erdgas. Der für den Betrieb der Anlagen erforderliche Brennstoffeinsatz für den Eigenbedarf wird in der Kategorie 1.A.1.c berichtet.

Unter die Kategorie 1.A.1.c „Herstellung von festen Brennstoffen und sonstige Energieindustrien“ werden im ZSE unterschieden: die Strom- und Wärmeerzeugung in Dampfturbinenkraftwerken, getrennt nach Steinkohlenbergbau und Braunkohlenbergbau (Grubenkraftwerke), die Strom- und Wärmeerzeugung in Gasturbinen, Gasmotoren und Dieselmotoren der Zechen- und Grubenkraft-werke zusammen, die übrige Wärmeerzeugung in Industriekesseln des Umwandlungsbereichs (ohne Raffinerien) sowie die Herstellung von Steinkohlenkoks und der Betrieb von Dieselmotoren zu Antriebszwecken in Zechen- und Grubenkraftwerken. Sie werden nach Großfeuerungsanlagen und TA Luftanlagen unterschieden.

Die folgende Abbildung zeigt eine Übersicht über die Emissionsentwicklung der Kategorie 1.A.1.c nach Brennstoffen aggregiert. Die Abbildung zeigt sehr deutlich, wie stark die Emissionen in dieser Kategorie seit 1990 zurückgegangen sind:

Abbildung 23: Entwicklung der CO_2-Emissionen der Kategorie 1.A.1.c



Quelle: eigene Darstellung, UBA

Braunkohle

Den stärksten Emissionsrückgang verzeichnet die Braunkohle, die in den neuen Bundesländern Anfang der 1990er Jahre stark rückläufig war. Die DDR-Wirtschaft basierte im Wesentlichen auf Braunkohle und musste bis Ende der 90er Jahre in umfangreichem Ausmaß auf andere Brennstoffe umgestellt werden, wobei wesentliche Braunkohlekapazitäten ersatzlos entfallen sind. Das betraf insbesondere die für diesen Sektor relevanten Grubenkraftwerke und die Braunkohleveredlung, weil die in den DDR-Haushalten verbreiteten Kohleöfen größtenteils bis Ende der 1990er Jahre durch modernere heizöl- und erdgasbefeuerte Heizungsanlagen ersetzt. Somit reduzierte sich der Brikettbedarf deutlich und die meisten Produktionsanlagen stellten ihren Betrieb ein.

Über die Jahre kam es immer wieder zu statistischen Ummeldungen von Grubenkraftwerken und damit zu Emissionsverschiebungen zwischen den Quellgruppen 1.A.1.c und 1.A.1.a.

Steinkohle

Die Emissionen aus der Steinkohlennutzung im Sektor 1.A.1.c sind seit dem Jahr 1990 deutlich gesunken. Wesentliche Ursache ist die starke Reduktion der Steinkohlenförderung bis zu ihrer Einstellung im Jahr 2018. Infolgedessen wurden auch Energieerzeugungsanlagen im Steinkohlenb-ergbau stillgelegt. Die verbliebenen Zechenkraftwerke meldeten sich 2012 in die öffentliche Versorgung um. Das führte in dem betroffenen Jahr zu einer Erhöhung der CO_2 Emissionen der Quellgruppe 1.A.1.a. Dieser statistische Effekt wurde mittels sektorübergreifender Trendbetrachtung mit dem Sektor 1.A.1.a hinsichtlich tatsächlicher Emissionsveränderungen plausibilisiert.

Der auffällige Emissionsrückgang im Jahr 2009 ist der generellen Veringerung der Wirtschaftsleistung während der Finanzkrise zuzuschreiben.

Kokereigas, Gicht- und Konvertergas (Industriegase)

In den Zahlen zeigt sich eine deutliche Emissionsminderung - insbesondere bis Ende der 90er-Jahre - vor allem aufgrund der Einstellung der Stadtgaserzeugung bis 1996 sowie aufgrund eines deutlichen Rückgangs der Koksproduktion (1990: 19 Mio. t, 2009: 6,7 Mio. t, 2018: 9,2 Mio. t Steinkohlenkoks). Während es 1990 noch acht Zechenkokereien gab, gehören die derzeit noch betriebenen 6 Kokereien alle zur Stahlindustrie. Die Steinkohlenkoksproduktion wird von der konjunkturbedingten Entwicklung der Stahlproduktion geprägt. Insgesamt führten Anlagenschließungen und Ertüchtigungen zu einer deutlichen Emissionsminderung in diesem Sektor.

Bedingt durch die ambitionierten Klimaschutzziele der Bundesregierung für einen Kohleausstieg stehen die Unternehmen zur Herstellung von festen Brennstoffen seit Jahren vor der Aufgabe betrieblicher Anpassungen, die mit Emissionsrückgängen einhergehen.

3.2.6.2 Methodische Aspekte (1.A.1.c)

Die Anwendung einer länderspezifischen Berechnungsmethode (Tier 3) für identifizierte Hauptquellgruppen erfolgte auf Basis der aktuellen Hauptkategorienanalyse.

Der Brennstoffeinsatz zur Stromerzeugung in Kraftwerken des Steinkohlen- bzw. des Braunkohlenbergbaus ist in der Energiebilanzzeile 12 „Industriewärmekraftwerke“ enthalten. Der Brennstoffeinsatz zur Wärmeerzeugung im Umwandlungsbereich ist den Energiebilanzzeilen 33-39 bzw. der Summenzeile 40 („Energieverbrauch im Umwandlungsbereich insgesamt“) zu entnehmen.

Mit Hilfe von Angaben des Statistischen Bundesamtes (Statistisches Bundesamt, 2025b) wird der Brennstoffeinsatz zur Stromerzeugung in Kraftwerken des Steinkohlenbergbaus ermittelt. Die Aktivitätsraten zur Wärmeerzeugung in Kraftwerken des Steinkohlenbergbaus entsprechen der Energiebilanzzeile 34 „Energieeinsatz in Steinkohlenzechen- und -brikettfabriken“.

Der ausgewiesene Brennstoffeinsatz zur Stromerzeugung in Grubenkraftwerken beruht auf Verbandsangaben (persönliche Mitteilung des DEBRIV – Bundesverband Braunkohle). Der Einsatz zur Wärmeerzeugung, insbesondere zur Braunkohlentrocknung zur Herstellung von Braukohlenprodukten, ist nicht in der Energiebilanz enthalten. Dieser wird aus den Produktionszahlen der Braunkohlenprodukte[23] und dem für die Trocknung notwendigen spezifischen Brennstoffeinsatz berechnet und als „Nicht- Energiebilanz“–Einsatz im ZSE verbucht und berichtet. Die Daten werden jährlich beim Bundesverband Braunkohle abgefragt und aktualisiert.

[23] Statistik der Kohlewirtschaft, siehe https://kohlenstatistik.de/daten-fakten/ (Braunkohlen im Überblick)

Die für die Herstellung von Steinkohlenkoks eingesetzten Brennstoffmengen werden direkt aus der Energiebilanzzeile 33 (Kokereien) genommen. Darin wird der Eigenverbrauch der Kokereien verbucht. Die Brennstoffnutzung in den Unterfeuerungen ist die größte Emissionsquelle der Kokereien. Bevor der Koks gelöscht wird, entstehen aber auch diffuse Emissionen, die in der Kategorie 1.B.1.b berichtet werden.

Der Brennstoffeinsatz zur Wärmeerzeugung im übrigen Umwandlungsbereich setzt sich aus den Energieverbräuchen der Energiebilanzzeilen 33 bis 39 (Energieverbrauch im Umwandlungsbereich insgesamt) zusammen. Dazu zählt der Grubenselbstverbrauch, Anlagen zur Erdöl- und Erdgas-gewinnung sowie der Altölaufbereitung, Kohlenwertstoffbetriebe, Anlagen zur Herstellung und Verarbeitung von Spalt- und Brutstoffen und der Eigenverbrauch von Kläranlagen.

Die CO_2-Emissionen aus der Gichtgasverbrennung in Kokereien werden ebenfalls in der Kategorie 1.A.1.c berichtet. Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht der CO_2-Emissionen aus der Gichtgasnutzung in Kokereien über die gesamte Zeitreihe ab 1990.

Tabelle 35: CO_2-Emissionen aus der Gichtgasverbrennung in Kokereien, in [Mio. t]

1990	5,340	**1997**	4,969	**2004**	3,356	**2011**	3,558	**2018**	4,809
1991	5,251	**1998**	4,362	**2005**	3,247	**2012**	3,962	**2019**	4,479
1992	4,590	**1999**	3,145	**2006**	3,281	**2013**	4,154	**2020**	4,275
1993	4,083	**2000**	3,652	**2007**	3,226	**2014**	4,554	**2021**	4,537
1994	5,066	**2001**	3,741	**2008**	3,023	**2015**	4,648	**2022**	4,436
1995	4,924	**2002**	3,684	**2009**	2,500	**2016**	4,872	**2023**	4,016
1996	4,707	**2003**	3,029	**2010**	3,245	**2017**	4,910	**2024**	4,144

Die Überarbeitung der Daten für 1990 und die Folgejahre 1991-1994 für die neuen Bundesländer ist letztmalig in Anhang 19.1.1 des NIR 2022 beschrieben.

Emissionsfaktoren

Eine Liste der verwendeten CO_2 Emissionsfaktoren, sowie eine methodische Beschreibung sind im Anhang 6.6 verfügbar.

Die Emissionsfaktoren für Kraftwerke und sonstige Kesselfeuerungen zur Dampf-, Heiß- und Warmwasserbereitstellung in der Kategorie 1.A.1.c sind Rentz et al. (2002) und Fichtner et al. (2011) entnommen. Eine ausführliche Beschreibung der Vorgehensweise ist dem Kapitel 3.2.4.2 verfügbar. Die Forschungsvorhaben unterscheiden innerhalb des Sektors nach den Kraftwerken des Steinkohlenbergbaus, den Kraftwerken des Braunkohlenbergbaus sowie den sonstigen Kesselfeuerungen zur Dampf-, Heiß- und Warmwasserbereitstellung.

Die Emissionsfaktoren für Kokereien wurden größtenteils aus Hensmann et al. (2012) entnommen. Die dort ermittelten Emissionsfaktoren für gefasste Quellen wurden der Kategorie 1.A.1.c zugeordnet, da diese Emissionen hauptsächlich aus der Unterfeuerung der Koksöfen resultieren. Die ermittelten Emissionsfaktoren für diffuse Quellen wurden dagegen definitionsgemäß der Kategorie 1.B.1.b zugeordnet. Neben weiteren Schadstoffen werden auch CO-Emissionen aus Kokereien in beiden Kategorien berechnet.

3.2.6.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (1.A.1.c)

Erstmals wurden im Berichtsjahr 2004 für die Aktivitätsraten Unsicherheiten bestimmt (Forschungsvorhaben FKZ 204 41 132, Juhrich and Wachsmann (2007a)). Die Methode zur

Bestimmung der Unsicherheiten ist im Anhang 2, Kapitel 13.6 des NIR 2007 (UBA, 2007) beschrieben.

Die Vorgehensweise bei der Ermittlung der Unsicherheiten für die Emissionsfaktoren ist im Kapitel 3.2.4.3.1 beschrieben.

3.2.6.3.1 Ergebnis für N_2O

In Anlagen des Braunkohlenbergbaus - sie sind Teil des Sektors 1.A.1.c - werden vergleichsweise viele Wirbelschichtfeuerungen eingesetzt. Es ist bekannt, dass diese relativ höhere N_2O-Emissionen aufweisen als andere Kohlefeuerungstechnologien. Das Emissionsverhalten bei Einsatz von Stein- und Braunkohlen wurde insbesondere beim Einsatz in Wirbelschichtfeuerungen und insbesondere in den 90er Jahren gezielt untersucht. Daher lagen ausreichend Messdaten vor, die eine systematische Erhebung von N_2O-Emissionsfaktoren im Forschungsvorhaben ermöglichten. Die Ausführungen aus Kapitel 3.2.4.3.2 gelten entsprechend.

3.2.6.3.2 Ergebnis für CH_4

Die Ergebnisse des Kapitels 3.2.4.3.3 gelten entsprechend.

3.2.6.3.3 Zeitreihenkonsistenz der Emissionsfaktoren

Die Ergebnisse des Kapitels 3.2.4.3.4 gelten entsprechend.

3.2.6.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (1.A.1.c)

Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung, die den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen entsprechen, wurden durch die Nationale Koordinierungsstelle durchgeführt.

Die Ergebnisse des Kapitels 3.2.4.2 gelten entsprechend.

3.2.6.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (1.A.1.c)

Tabelle 36: Rückrechnungen CRF 1.A.1.c, in [kt] bzw. [%]

	Abweichung CO_2 absolut					Abweichung CO_2 relativ
	gasförmige Brennstoffe	flüssige Brennstoffe	feste Brennstoffe	weitere Brennstoffe	gesamt	Gesamt
2003	19,40	0,15	0,00	0,00	19,56	0,09 %
2004	36,45	0,30	0,00	0,00	36,75	0,16 %
2005	52,41	0,89	0,00	0,00	53,30	0,26 %
2006	55,64	1,24	0,00	0,00	56,88	0,28 %
2007	88,12	2,05	0,00	0,00	90,17	0,45 %
2008	60,64	7,60	0,00	0,00	68,24	0,42 %
2009	234,90	0,02	0,00	0,00	234,92	1,70 %
2010	38,11	2,75	0,00	0,00	40,86	0,25 %
2011	286,77	2,12	0,00	0,00	288,89	1,92 %
2012	492,60	1,72	0,00	0,00	494,32	4,73 %
2013	529,77	1,43	0,00	0,00	531,20	5,12 %
2014	341,60	1,16	0,00	0,00	342,76	3,33 %
2015	413,80	0,78	0,00	0,00	414,58	4,30 %

	Abweichung CO_2 absolut					Abweichung CO_2 relativ
2016	142,94	2,99	0,00	0,00	145,93	1,48 %
2017	330,80	4,55	0,00	0,00	335,34	3,40 %
2018	75,67	3,74	0,00	0,00	79,41	0,65 %
2019	73,08	3,17	0,00	0,00	76,25	0,63 %
2020	62,56	4,80	0,00	0,00	67,37	0,71 %
2021	50,06	4,67	0,00	0,00	54,73	0,56 %
2022	68,03	4,37	0,00	0,00	72,40	0,79 %
2023	405,01	3,56	543,88	0,00	952,44	12,05 %

Nach dem Vorliegen der finalen Energiebilanz für 2023 wurden die vorläufigen Werte ersetzt. Das führte zu Rückrechnungen. Seit 2023 stellt AGEB alle zwei Jahre Revisionen in der Zeitreihe beginnend ab dem Jahr 2003 bereit. Für das Berichtsjahr 2026 fanden wieder Revisionen statt und diese führten zu Rückrechnungen in früheren Jahren.

3.2.6.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (1.A.1.c)

Derzeit sind keine Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4 Verbesserungen des Inventars, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

3.2.7 Verarbeitendes Gewerbe (1.A.2)

Die Berechnungsalgorithmen der Strukturelemente der BEU der Kategorie 1.A.2 wurden im Forschungsvorhaben „Dokumentation der Datenqualität von Aktivitätsraten“ (FKZ 204 41 132, Juhrich and Wachsmann (2007a)) überarbeitet und unterliegen einer einheitlichen Systematik überarbeitet und unterliegen einer einheitlichen Systematik. Sie basieren überwiegend auf der Grundlage von gesicherten Daten des Statistischen Bundesamtes.

Eine Sektordifferenzierung der Aktivitätsraten nach Branchen erfolgt ausschließlich für die Prozessfeuerungen. Die Berechnungsalgorithmen sind im genannten Forschungsvorhaben ausführlich dokumentiert.

Die Prozessfeuerungen werden zum großen Teil branchenbezogen berichtet. Die Disaggregation ist bei der vorhandenen Datenlage nicht vollständig UNFCCC-konform möglich. So kann die Strom- und Wärmeerzeugung der Industriekraftwerke und -wärmekraftwerke nicht vollständig den Branchen zugeordnet werden und wird daher zusammengefasst unter 1.A.2.gviii Sonstige berichtet.

Die Abgrenzung der energiebedingten Prozessfeuerungen zur Strom- und Wärmeerzeugung in Industriekraftwerken und Kesseln erfolgt mittels Statistik 067 (Stromerzeugungsanlagen des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden; (Statistisches Bundesamt, 2025b).

Bis 2001 wurde in der Statistik 067 lediglich der Brennstoffeinsatz zur Stromproduktion in Stromerzeugungsanlagen ausgewiesen. Seit 2002 wird der Brennstoffeinsatz sowohl zur Strom- als auch zur Wärmeproduktion angegeben. (Zu den Einsätzen zur Wärmeproduktion für die Jahre vor 2002 liegen keine Daten vor.).

Das Verhältnis des fossilen und biogenen Anteils von Industriemüll ergibt sich aus der Abfallstatistik (Statistisches Bundesamt, 2023), den Angaben der entsprechenden Industrieverbände zu Ersatzbrennstoffen und dem Forschungsvorhaben „Einsatz von Sekundärbrennstoffen“ (Lechtenböhmer, Nanning, et al. (2006b), FKZ 204 42 203/02). Die eingesetzten Mengen an Regelbrennstoffen aller Subkategorien sind vollständig aus der Energiebilanz entnommen und in der BEU disaggregiert. Über die Energiebilanz hinaus werden in drei relevanten Industriebranchen Ersatzbrennstoffe berücksichtigt, die im Forschungsprojekt Lechtenböhmer, Nanning, et al. (2006b) identifiziert wurden und seither über Verbandsdaten jährlich aktualisiert werden.

Detaillierte branchenspezifische Daten für den Einsatz von Ersatzbrennstoffen in Prozessfeuerungen und in Industriekraftwerken werden für die Industriebranchen Zellulose - und Papierherstellung sowie Herstellung von Kalk und Zement verwendet.

Besonderheiten der Subkategorien sind in den Unterkapiteln beschrieben. Speziell die Besonderheiten der Sammelgruppe 1.A.2.gviii „Sonstige“ sind zu beachten.

Für die im Forschungsvorhaben „Dokumentation der Datenqualität von Aktivitätsraten“ (Juhrich & Wachsmann, 2007a) genannten Strukturelemente wurden die Unsicherheiten entsprechend der im Rahmen des Forschungsberichts Lechtenböhmer, Nanning, et al. (2006b) dokumentierten Methode ermittelt. Dies ist im Endbericht zum Forschungsvorhaben Juhrich and Wachsmann (2007a) und im Anhang 13.6 des NIR (UBA, 2007) dokumentiert.

Kohlendioxidemissionen dominieren die CRF-Kategorie 1.A.2. Andere Treibhausgase tragen nur in sehr geringem Maß zu den Gesamtemissionen dieser Kategorie bei.

Im Zeitraum 1990 bis 1994 ist ein starker Rückgang der Treibhausgasemissionen zu verzeichnen. Dies ist bedingt durch die Stilllegung ineffizienter Anlagen des verarbeitenden Gewerbes in den neuen Bundesländern nach der deutschen Wiedervereinigung 1990.

In den Folgejahren auftretende Schwankungen der Emissionen spiegeln den konjunkturellen Verlauf der Produktion im verarbeitenden Gewerbe in Deutschland wider.

Ab dem THG-Inventar 2025 wurde die Datenbasis zur Berichterstattung der Aktivitätsraten des Randjahres verbessert. Es erfolgte die Umstellung der Disaggregation der Daten der Energiebilanz vom bisherigen Verteilmodell auf die Modellierung mit statistischen Daten, die zum Zeitpunkt der Berechnung der Aktivitsraten vorliegen oder mittels Imputationsverfahren seitens des Statistischen Bundesamtes ermittelt wurden.

3.2.7.1 Verarbeitendes Gewerbe - Eisenschaffende Industrie (1.A.2.a)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
L/T	1 A 2 a, Iron and Steel	fossil fuels	CO_2	35269,33	2,73	33166,23	4,69	-5,96
-/-	1 A 2 a, Iron and Steel	0	CH_4	69,95	0,01	63,73	0,01	-8,89
-/-	1 A 2 a, Iron and Steel	0	N_2O	137,93	0,02	88,33	0,02	-35,96

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2	CS	NS	CS
CH_4	CS	NS	CS
N_2O	CS	NS	CS
NO_X, CO, NMVOC, SO_2	CS	NS	CS

Die Kategorie „Verarbeitendes Gewerbe - Eisenschaffende Industrie“ ist für CO_2-Emissionen eine Hauptkategorie nach der Emissionshöhe und dem Trend.

Die Eisenschaffende Industrie (Subkategorie 1.A.2.a) ist neben der Zementindustrie die zweite bedeutende CO_2-Emissionsquelle unter den Prozessfeuerungen.

3.2.7.1.1 Beschreibung der Kategorie (1.A.2.a)

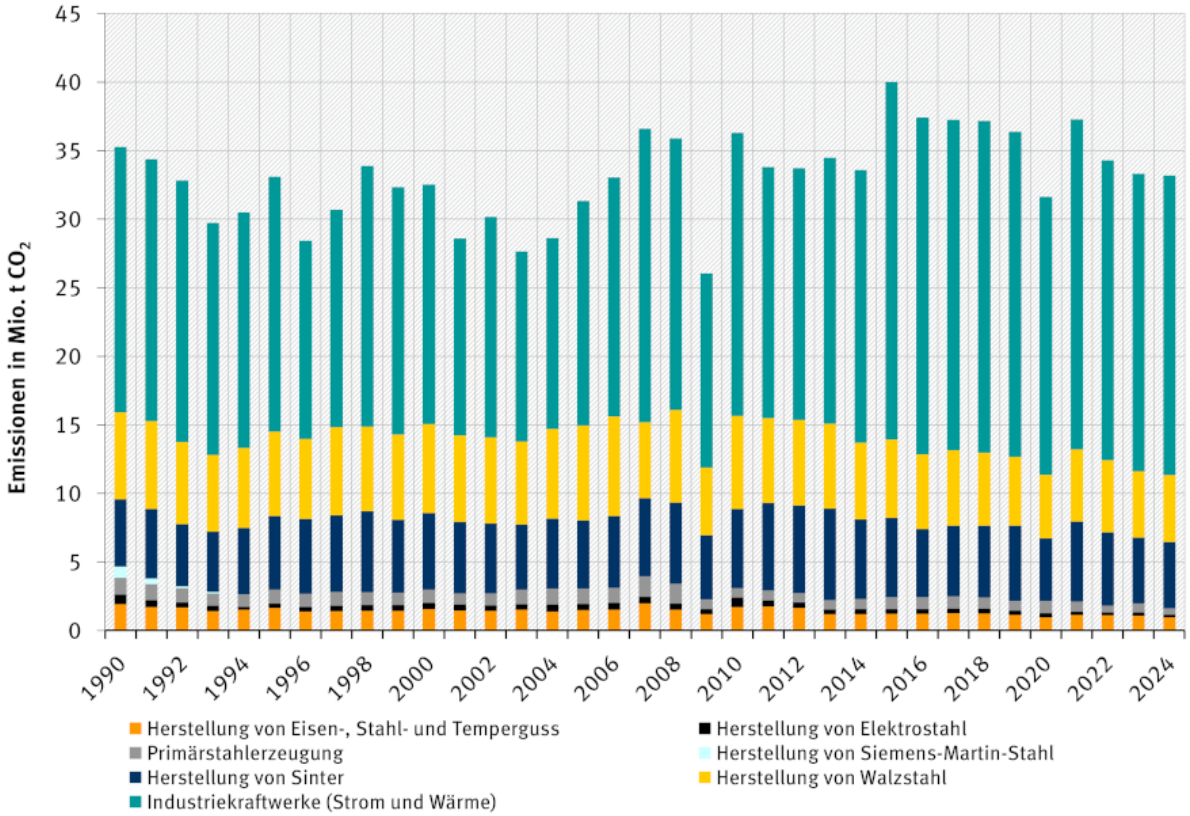
Diese Subkategorie umfasst die Prozessfeuerungen der verschiedenen Produktionsbereiche der Eisenschaffenden Industrie. Dazu gehören die Produktionsbereiche Roheisen (Hochofen), Eisenschwamm (Direktreduktion), Sinter, Walzstahl, Eisen- Stahl-Temperguss, Siemens-Martin-Stahl (bis 1993) und Elektrostahl, sowie Kraftwerke und Kessel der gesamten Stahlindustrie.

Eine Produktion von Eisenschwamm (direkt reduziertem Eisen; *engl.* DRI) erfolgt in Deutschland nur in geringem Umfang und nur in einer Anlage. Die bei der Produktion von Eisenschwamm entstehenden CO_2-Emissionen resultieren aus dem Einsatz von Erdgas bzw. dem daraus erzeugten Gemisch der Reduktionsgase CO und H_2. Die eingesetzte Menge an Erdgas ist über die gesamte Zeitreihe in den unter 1.A.2.a berichteten Einsätzen von Erdgas enthalten, eine gesonderte Ausweisung der CO_2-Emissionen ist aus Geheimhaltungsgründen jedoch nicht möglich.

Bei der Herstellung von Roheisen wird ein Großteil der im Hochofen eingesetzten Energieträger für die darin ablaufenden Reduktionsprozesse benötigt, während in den anderen Produktionsbereichen der Eisenschaffenden Industrie Brennstoffe zum großen Teil zur Wärmeerzeugung eingesetzt werden.

Die folgende Graphik zeigt eine Übersicht über die CO_2-Emissionen aus den einzelnen Subkategorien in 1.A.2.a. Insgesamt folgen die CO_2-Emissionen der Entwicklung der Primärstahlerzeugung.

Abbildung 24: Entwicklung der CO_2-Emissionen in Kategorie 1.A.2.a nach Produkten



Quelle: eigene Darstellung, UBA

Die Übersicht zeigt über die Jahre z.T. große Schwankungen, die überwiegend der Produktionsentwicklung und damit der Konjunkturentwicklung in der Stahlindustrie folgen. In den Jahren 1990 bis 1994 ist die Absenkung der Emissionen geprägt durch die Umstrukturierung im Eisen und Stahlbereich in den neuen Bundesländern nach 1990. Die Entwicklung in den Jahren 2009 und 2010 spiegelt die damalige Wirtschafts- und Finanzkrise und die darauf folgende Wiederbelebung der Konjunktur wieder.

Der auffällige Emissionsanstieg im Jahr 2015 ist auf die Ummeldung einiger Gichtgaskraftwerke aus der öffentlichen Versorgung (CRF 1.A.1.a) in die Industrie (1.A.2.a) zurückzuführen. Dadurch kommt es zu einer Verschiebung der Emissionen. In Summe betrachtet steigen die CO_2-Emissionen in diesem Jahr infolge des Produktionsanstieges nur leicht. Das ist in der Abbildung 44 im Kapitel 4.4.1 gut zu erkennen.

Nach den Industriekraftwerken (zur Eigenstromerzeugung aus Gicht- und Konvertergas) kommen die anteilig höchsten Emissionen aus der Walzstahl- und Sintererzeugung. Für den Hochofen werden nur die zur Energieerzeugung benötigten Erd- und Kokereigaseinsätze in der Kategorie 1.A.2.a berichtet. Die prozessbedingten Emissionen werden in der Kategorie 2.C.1 verbucht.

Die deutliche Abnahme der CO_2-Emissionen im Jahr 2020 resultiert aus dem Produktionsrückgang, der durch die Corona-Krise ausgelöst wurde.

3.2.7.1.2 Methodische Aspekte (1.A.2.a)

Für die Bereitstellung der Aktivitätsdaten der konventionellen Brennstoffe der Kategorie wird ab dem Berichtsjahr 2011 der sogenannte BGS-Bogen (Brennstoff-, Gas- und Stromwirtschaft der Hochofen-, Stahl- und Walzwerke sowie Schmiede-, Press- und Hammerwerke einschließlich

der örtlich verbundenen sonstigen Betriebe (ohne eigene Kokerei)) als Datenquelle genutzt. Dieser ermöglicht eine verbesserte Disaggregation der Energiedaten in der Bilanz der Emissionsursachen (BEU). Seit dem Berichtsjahr 2012, werden die Daten auf der Grundlage einer Vereinbarung mit der Wirtschaftsvereinigung Stahl in gleicher Struktur bereitgestellt.

Diese Angaben ermöglichen neben der Darstellung der Aktivitätsdaten in Sinteranlagen, Hochofenbetrieben, Oxygenstahlwerken (Konverter) und Walzwerken die zusätzliche Disaggregation für die Elektrostahlwerke.

Weiterhin erfolgt eine datenbasierte Differenzierung der festen Brennstoffe nach „Steinkohle und Steinkohlebriketts"; „Koks" und „Koksgrus unter 10 mm". Die Brennstoffeinsätze für Koks und Koksgrus werden in der Datenbank als „Koks" summiert ausgewiesen, da die Energiestatistik den aggregierten Brennstoff „Koks" ausweist. Die im BGS-Bogen ausgewiesenen „flüssigen Brennstoffe" werden dem „Heizöl schwer" zugeordnet.

Da der BGS-Bogen Brennstoffeinsätze in natürlichen Einheiten ausweist, werden diese mit den von der Arbeitsgemeinschaft der Energiebilanzen (AGEB) ausgewiesenen Heizwerten für feste und flüssige Einzelbrennstoffe in Energieeinheiten umgerechnet. Ab dem NID 2026 werden die Heizwerte entsprechend der von der Arbeitsgemeinschaft für Energiebilanzen übermittelten Heizwerte in der Struktur der Energiebilanz verwendet. Hier die Heizwerte der Energiebilanzzeile 8 für den Primärenergieverbrauch. Für die Gase wurde im BGS-Bogen eine Normierung auf 35,16912 MJ/m³ definiert, die in der Methodik der Berechnung der Aktivitätsraten für Hochofen-, Kokerei-, Erd- und Konvertergas übernommen wurde.

Die Emissionsberechnung der Sekundärbrennstoffe ist an die Ergebnisse des Forschungsprojektes „Einsatz von Sekundärbrennstoffen" (Lechtenböhmer, Nanning, et al. (2006b), FKZ 204 42 203/02) angelehnt.

Im Bereich Eisen- und Stahlindustrie werden für die gesamte Zeitreihe ab 1990 prozessbedingte und energiebedingte Emissionen unterschieden. Die Methode zur Berechnung der prozessbedingten Emissionen ist im Kapitel 4.4.1 der Kategorie 2.C.1 beschrieben.

3.2.7.1.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (1.A.2.a)

Unsicherheiten wurden im Jahr 2004 für alle Brennstoffe außer Ersatzbrennstoffe und für Ersatzreduktionsmittel hinsichtlich der kompletten Zeitreihe bestimmt. Die Methode ist im Forschungsbericht Lechtenböhmer, Nanning, et al. (2006b) erläutert. Die Unsicherheiten wurden für die Aktivitätsraten im Forschungsvorhaben „Dokumentation der Datenqualität von Aktivitätsraten (FKZ 204 41 132, (Juhrich & Wachsmann, 2007b))" aktualisiert und im Endbericht dokumentiert

3.2.7.1.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (1.A.2.a)

Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung, die den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen entsprechen, wurden durch die Nationale Koordinierungsstelle durchgeführt.

Weitere Informationen zur Qualitätssicherung siehe CRF 1.A.1.a (Kapitel 3.2.4.4).

Die Qualitätssicherung der BGS-Daten durch den Verband entsprechend QSE-Handbuch wurden in der Verbandsvereinbarung festgelegt. Der Qualitätsbericht des Verbandes wird mit den Daten übermittelt.

3.2.7.1.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (1.A.2.a)

Tabelle 37: Rückrechnungen in CRF 1.A.2.a, in [kt] bzw. [%]

	Abweichung CO_2 absolut					Abweichung CO_2 relativ
	gasförmige Brennstoffe	flüssige Brennstoffe	feste Brennstoffe	weitere Brennstoffe	gesamt	Gesamt
2023	-7,72	0,78	-511,28	-	-518,22	-1,53%

Für das Jahr 2023 wurden die vorläufigen Daten durch die nun vorliegende endgültige Energiebilanz ersetzt. Dadurch kommt es zu Rückrechnungen.

3.2.7.1.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (1.A.2.a)

Derzeit sind keine Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4 Verbesserungen des Inventars, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

3.2.7.2 Verarbeitendes Gewerbe – Nichteisen-Metalle (1.A.2.b)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
L/-	1 A 2 b, Non-ferrous Metals	fossil fuels	CO_2	1629,22	0,13	1524,28	0,22	-6,44
-/-	1 A 2 b, Non-ferrous Metals	0	CH_4	1,55	0,01	1,86	0,01	19,71
-/-	1 A 2 b, Non-ferrous Metals	0	N_2O	15,25	0,01	7,39	0,01	-51,54

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2	CS	NS	CS
CH_4	CS	NS	CS
N_2O	CS	NS	CS
NO_X, CO, NMVOC, SO_2	CS	NS	CS

Die Kategorie Nichteisen-Metalle ist Hauptkategorie für CO_2 nach der Emissionshöhe.

3.2.7.2.1 Beschreibung der Kategorie (1.A.2.b)

Diese Kategorie umfasst die Prozessfeuerungen der Produktionsbereiche der Nichteisenmetalle in aggregierter Form. Eine detailliertere Darstellung ist aufgrund der Datenlage nicht möglich.

3.2.7.2.2 Methodische Aspekte (1.A.2.b)

Die entsprechenden Brennstoffeinsätze sind in der BEU enthalten. Quelle für die Brennstoffeinsätze ist die Statistik des produzierenden Gewerbes (Statistik 060) – „Energieverwendung des produzierenden Gewerbes“ (Statistisches Bundesamt, 2025a) Melde-Nr. 27.43 alt (WZ 2003, (Statistisches Bundesamt, 2003)) → 24.43 neu (WZ 2008, (Statistisches Bundesamt, 2008)): „Erzeugung und erste Bearbeitung von Blei, Zink und Zinn“ und 27.44 alt (WZ 2003, (Statistisches Bundesamt, 2003)), (Statistisches Bundesamt, 2008)): „Erzeugung und erste Bearbeitung von Kupfer“)und für Abgrenzungen zur Strom- und Wärmeerzeugung die Statistik 067 (Statistisches Bundesamt, 2025b).

Im Endbericht zum Forschungsvorhaben „Dokumentation der Datenqualität von Aktivitätsraten“ (FKZ 204 41 132), (Juhrich & Wachsmann, 2007b)) werden die Berechnungsalgorithmen ausführlich beschrieben.

Die Aktivitätsraten für die neuen Bundesländer für 1990 wurden im Projekt „Basisjahr und Aktualisierung“ mit neuem Datenmaterial überarbeitet und dokumentiert (Zander & Merten, 2006), s. Anhangkapitel 19.1.1 des NIR (UBA et al., 2022).

3.2.7.2.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (1.A.2.b)

Im Jahr 2004 wurden für alle Aktivitätsraten Unsicherheiten bestimmt. Die Methode ist im Anhangkapitel 13.6 des NIR 2007(UBA, 2007) erläutert.

3.2.7.2.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (1.A.2.b)

Aufgrund begrenzter Ressourcen und minimaler Relevanz wurde für diese Berichterstattung keine QK/QS der EF durchgeführt.

Weitere Informationen zur Qualitätssicherung siehe CRF 1.A.1.a (Kapitel 3.2.4.4).

3.2.7.2.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (1.A.2.b)

Tabelle 38: Rückrechnungen in CRF 1.A.2.b, in [kt] bzw. [%]

	Abweichung CO_2 absolut					Abweichung CO_2 relativ
	gasförmige Brennstoffe	flüssige Brennstoffe	feste Brennstoffe	weitere Brennstoffe	gesamt	Gesamt
2023	-3,24	-15,78	4,88	-	-14,14	-0,94%

Nach dem Vorliegen der endgültigen Energiebilanz wurden die vorläufigen Werte für das Jahr 2023 durch aktuelle Werte ersetzt. Dadurch kommt es zu Rückrechnungen.

3.2.7.2.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (1.A.2.b)

Derzeit sind keine Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4 Verbesserungen des Inventars, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

3.2.7.3 Verarbeitendes Gewerbe – Chemische Industrie (1.A.2.c)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
-/-	1.A.2.c	all fuels	IE	IE	IE	IE	IE	IE

In der chemischen Industrie kommen hauptsächlich Industriekraftwerke sowie Kessel zum Einsatz. Diese Anlagen werden kategorieübergreifend in der Subkategorie 1.A.2.g Sonstige berichtet.

Die Einsätze an Energieträgern in der Kalziumkarbidproduktion sind prozessbedingt und werden unter CRF 2.B.5 berichtet (siehe Kapitel 4.3.5).

Dies bestätigte auch das Forschungsprojekt „Basisjahr und Aktualisierung“ für das Jahr 1990 in den neuen Bundesländern (Zander & Merten, 2006): der Koks wurde stofflich und nicht energetisch genutzt. Die Kalziumkarbidproduktion ist demnach keine Quelle für energiebedingte CO_2-Emissionen.

Aufgrund begrenzter Ressourcen und minimaler Relevanz wurde für diese Berichterstattung keine QK/QS der EF durchgeführt.

Die Emissionen der gesamten Subkategorie 1.A.2.c werden somit an anderer Stelle berücksichtigt (IE - included elsewhere). Daher wird die Subkategorie 1.A.2.c nicht gesondert in der Hauptkategorien-analyse aufgeführt.

Der Hauptteil der Emissionen aus der chemischen Industrie kommt aus Verbrennungsprozessen. Da die Brennstoffeinsätze für die chemische Industrie erst ab dem Jahr 2003 vorliegen, ist es nicht möglich, Zeitreihen ab 1990 zu erstellen. Deshalb werden die Emissionen aus der energetischen Nutzung von Brennstoffen in der chemischen Industrie zusammengefasst mit anderen Industriebereichen in der Kategorie 1.A.2.gviii „Sonstige“ berichtet. Dennoch konnten die vorhandenen Daten mit den verfügbaren Daten aus dem Emissionshandel abgeglichen werden. Dabei sollten zum einen Doppelzählungen mit dem IPPU-Sektor vermieden werden. Zum anderen sollte eine Untererfassung der Emissionen aus der Verbrennung der sonstigen hergestellten Gase ausgeschlossen werden.

In der Energiestatistik werden erst ab dem Jahr 2012 relevante Gasmengen berichtet. Deshalb wurde zunächst ausgewertet, in welchen Bereichen der chemischen Industrie sonstige hergestellte Gase entstehen und energetisch genutzt werden. Über die Hälfte des gesamten Gasaufkommens wird bei der Herstellung von sonstigen organischen Grundstoffen und Chemikalien eingesetzt. Danach folgen die Herstellung von sonstigen anorganischen Grundstoffen und die Herstellung von Farbstoffen und Pigmenten. Einen kleineren Einsatz dieser Gase gibt es auch bei der Herstellung von Kunststoffen in Primärformen. Für die Rückrechnung der Gasverbräuche vor 2012 wurden für jeden Sektor die Hauptprodukte ermittelt. Diese Daten sind aus den jährlichen VCI Berichten „Chemiewirtschaft in Zahlen“ bis 1990 verfügbar. Lediglich für die neuen Bundesländer gibt es für das Jahr 1990 keine Produktionsdaten. Da in der Energiebilanz für die neuen Bundesländer größere Mengen an sogenannten Brenngasen verbucht werden, ist davon auszugehen, dass diese Gase zumindest von der AGEB in der Energiebilanz berücksichtigt werden. Mit Hilfe der Produktionsdaten und den in der Energiestatistik für das Jahr 2013 ausgewiesenen Gasmengen konnten für jeden Teilsektor spezifische Faktoren gebildet werden, mit denen die Brennstoffeinsätze rückwirkend berechnet werden konnten.

3.2.7.4 Verarbeitendes Gewerbe – Zellstoff und Papierindustrie (1.A.2.d)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
-/-	1 A 2 d, Pulp, Paper and Print	fossil fuels	CO_2	3,65	0,01	8,85	0,01	142,57
-/-	1 A 2 d, Pulp, Paper and Print	0	CH_4	0,73	0,01	2,67	0,01	264,38
-/-	1 A 2 d, Pulp, Paper and Print	0	N_2O	2,50	0,01	9,09	0,01	264,38

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2	CS	NS	CS
CH_4	CS	NS	CS
N_2O	CS	NS	CS
NO_X, CO, NMVOC, SO_2		IE	

Die Kategorie „Zellstoff und Papier“ ist keine Hauptkategorie.

3.2.7.4.1 Beschreibung der Kategorie (1.A.2.d)

Der Energieverbrauch für die Herstellung von Zellstoff und Papier, kann nur für Ersatzbrennstoffe abgebildet werden. Diese machen zugleich einen großen Anteil an den gesamten verwendeten Brennstoffen aus.

Emissionen aus dem Einsatz von Regelbrennstoffen in Prozessfeuerungen sowie Emissionen der Eigenstromerzeuger sind in dieser Quellgruppe nicht gesondert ausgewiesen, sondern werden unter 1.A.2.g *Sonstige* zusammengefasst berichtet.

3.2.7.4.2 Methodische Aspekte (1.A.2.d)

Die in der Papierindustrie eingesetzten Ersatzbrennstoffe werden nur teilweise in der Energiebilanz abgebildet. Diese sind Abfälle aus dem eigenen Produktionsbereich. Die Angaben zu Arten und Mengen der eingesetzten Stoffe werden vom Verband Deutscher Papierfabriken (VDP) zur Verfügung gestellt. Der überwiegende Teil der im Sektor eingesetzten Ersatzbrennstoffe besteht aus Holz- und Zellstofffasern und damit aus Biomasse. Im Rahmen des Forschungsprojekts „Einsatz von Sekundärbrennstoffen“ Lechtenböhmer, Nanning, et al. (2006b) wurden für Brennstoffe die biogenen und fossilen Anteile hergeleitet. Ebenso wurden CO_2-Emissionsfaktoren auf der Basis von Angaben zu Kohlenstoffgehalten, Wassergehalten und Heizwerten abgeleitet.

Die Daten der amtlichen Statistik zum Einsatz der Regelbrennstoffe in der Papierindustrie wurden einer Prüfung unterzogen. Nach aktueller Wirtschaftszweigsystematik (WZ 2008), (Statistisches Bundesamt, 2008) sind hier Brennstoffeinsätzeentsprechend Wirtschaftszweignummer 17 „Herstellung von Papier, Pappe und Waren“ zuzuordnen.

Die eindeutige Zuordnung der Quelle zu einer Zeitreihe entsprechend der alten Wirtschafts-zweigzuordnung (WZ 2003, (Statistisches Bundesamt, 2003)) ist nicht möglich. Dem Wirtschaftszweig 17 nach der neuen WZ 2008 stehen Anteile der Wirtschaftszweige 17, 21, 22 und 36 der abgelösten Wirtschaftszweigsytematik 2003 gegenüber.

Zur Sicherung der Geheimhaltung der Einzel-Brennstoffeinsätze ist eine disaggregierte Ausweisung zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht möglich. Gleiches gilt für die Statistik 067 (Statistisches Bundesamt, 2025b), die für die Abgrenzungen zur Strom- und Wärmeerzeugung herangezogen wird.

3.2.7.4.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (1.A.2.d)

Im Rahmen des Forschungsprojekts Lechtenböhmer, Nanning, et al. (2006b) wurden für die Ersatzbrennstoffe die Unsicherheiten der hergeleiteten CO_2-Emissionsfaktoren nach der Monte-Carlo-Methode bestimmt. Dabei wurden die Angaben zu C-Gehalt, Wassergehalt und Heizwert berücksichtigt. Diesen Angaben liegen Schätzungen mit Schwankungen und nur wenige Mess- oder Analyseergebnisse zugrunde und führen zu einer großen Unsicherheitsspanne. CO_2-Emissionsfaktoren für Sekundärbrennstoffe gelten inklusive der Unsicherheitenangabe für die gesamte Zeitreihe, weil keine Erkenntnisse zu Trends vorliegen.

3.2.7.4.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (1.A.2.d)

Aufgrund begrenzter Ressourcen und minimaler Relevanz wurde für diese Berichterstattung keine QK/QS der EF durchgeführt.

Die statistische Erfassung des Einsatzes sekundärer Brennstoffe hat in der Papierindustrie eine lange Tradition. Die Daten werden jährlich in einem Leistungsbericht veröffentlicht. Trotz kleinerer Strukturbrüche spiegeln die dort bereitgestellten Daten die fortschreitende Substitution von Regel- durch Ersatzbrennstoffe in der Papierindustrie gut wider.

3.2.7.4.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (1.A.2.d)

Es waren keine Rückrechnungen nötig.

3.2.7.4.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (1.A.2.d)

Derzeit sind keine Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4 Verbesserungen des Inventars, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

3.2.7.5 Verarbeitendes Gewerbe – Zuckerherstellung (1.A.2.e)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
-/T	1 A 2 e, Food Processing, Beverages and Tobacco	fossil fuels	CO_2	2015,91	0,16	280,87	0,04	-86,07
-/-	1 A 2 e, Food Processing, Beverages and Tobacco	0	CH_4	5,02	0,01	0,19	0,01	-96,14
-/-	1 A 2 e, Food Processing, Beverages and Tobacco	0	N_2O	21,92	0,01	2,23	0,01	-89,81

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2	CS	NS	CS
CH_4	CS	NS	CS
N_2O	CS	NS	CS
NOX, CO, NMVOC, SO_2	CS	NS	CS

Die Kategorie „Zuckerherstellung“ ist für CO_2-Emissionen eine Hauptkategorie nach dem Trend (siehe Tabelle 8). Aufgrund der seit 1990 stark gefallenen Emissionen und des dadurch erreichten sehr geringen Emissionsniveaus hat die Nationale Koordinierungsstelle aus Gründen der Ressourcen-priorisierung entschieden, die für Hauptkategorien vorgesehenen höheren Ansprüche an die Methodik für diese Kategorie nicht umzusetzen.

3.2.7.5.1 Beschreibung der Kategorie (1.A.2.e)

In dieser Kategorie sind nur Prozessfeuerungen der Zuckerindustrie erfasst. Eigenstromerzeuger sind nicht gesondert ausgewiesen, sondern werden unter 1.A.2.g „Sonstige“ berichtet.

3.2.7.5.2 Methodische Aspekte (1.A.2.e)

Im Endbericht zum Forschungsvorhaben „Dokumentation der Datenqualität von Aktivitätsraten“ (Juhrich & Wachsmann, 2007a) werden die Berechnungsalgorithmen und Sonderauswertungen zum Brennstoffeinsatz ausführlich beschrieben.

Erstmals für 2004 wurden für alle Aktivitätsraten Unsicherheiten bestimmt, die weiterhin gelten. Die Methode ist im Anhangkapitel 13.6 des NIR (UBA, 2007) erläutert.

3.2.7.5.3 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (1.A.2.e)

Aufgrund begrenzter Ressourcen und minimaler Relevanz wurde für diese Berichterstattung keine QK/QS der EF durchgeführt.

Weitere Informationen zur Qualitätssicherung siehe CRF 1.A.1.a (Kapitel 3.2.4.4).

3.2.7.5.4 Kategoriespezifische Rückrechnungen (1.A.2.e)

Tabelle 39: Rückrechnungen in CRF 1.A.2.e, in [kt] bzw. [%]

	Abweichung CO_2 absolut					Abweichung CO_2 relativ
	gasförmige Brennstoffe	flüssige Brennstoffe	feste Brennstoffe	weitere Brennstoffe	gesamt	Gesamt
2023	8,09	-9,98	-38,63	-	-40,52	-14,12%

Für das Jahr 2023 wurden die vorläufigen Daten durch die mittlerweile vorliegende endgültige Energiebilanz ersetzt. Dadurch kommt es zu Rückrechnungen.

3.2.7.5.5 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (1.A.2.e)

Derzeit sind keine Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4 Verbesserungen des Inventars, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

3.2.7.6 Verarbeitendes Gewerbe – Mineralische Industrie (1.A.2.f)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
L/-	1 A 2 f, Non-metallic Minerals	fossil fuels	CO_2	18507,38	1,44	9581,88	1,36	-48,23
-/-	1 A 2 f, Non-metallic Minerals	0	CH_4	56,31	0,01	12,55	0,01	-77,71
-/-	1 A 2 f, Non-metallic Minerals	0	N_2O	182,53	0,02	76,25	0,02	-58,23

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2	CS	NS	CS
CH_4	CS	NS	CS
N_2O	CS	NS	CS
NO_X, CO, NMVOC, SO_2	CS/IE	NS/IE	CS/IE

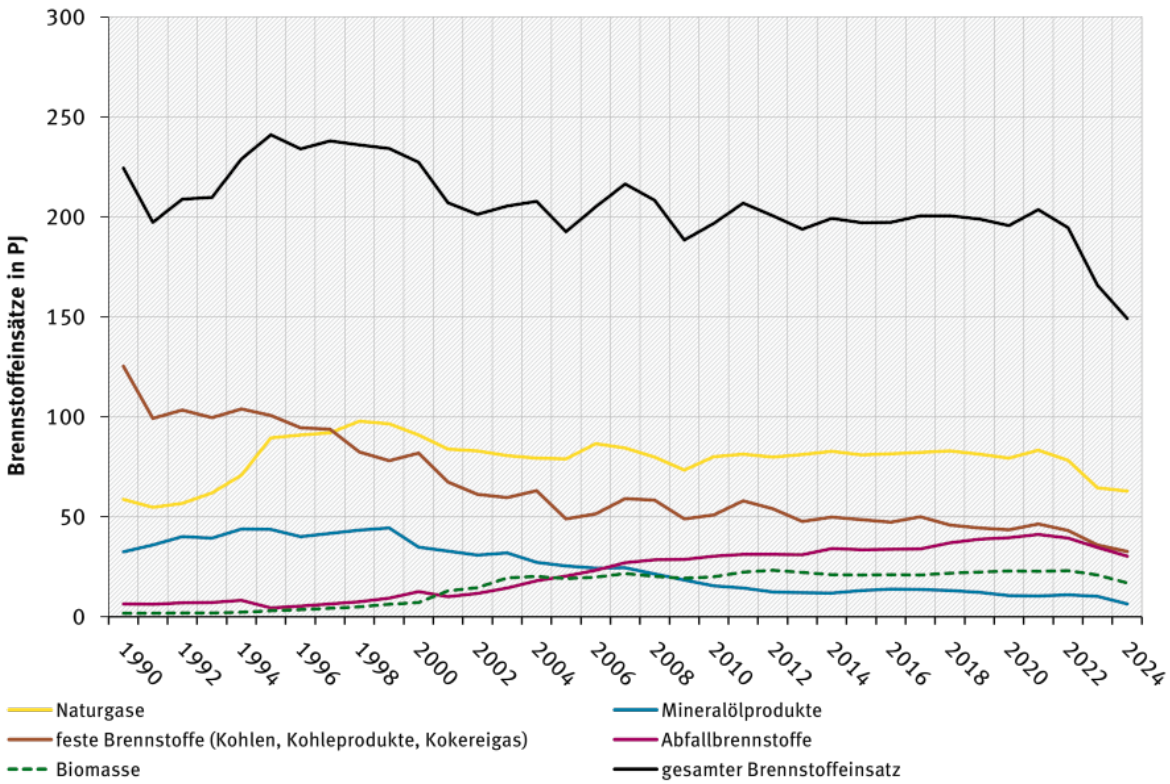
Die Kategorie „Verarbeitendes Gewerbe - Mineralische Industrie“ (alle Subkategorien) ist für CO_2-Emissionen eine Hauptkategorie nach der Emissionshöhe.

Im Inventar werden im Wesentlichen die Kategorien separat ausgewiesen, in denen Feuerungsanlagen mit einem spezifischen Emissionsverhalten, sogenannte Prozessfeuerungen, zum Einsatz kommen.

3.2.7.6.1 Beschreibung der Kategorie (1.A.2.f, Mineralische Industrie)

In dieser Kategorie werden u.a. die Prozessfeuerungen des Brennens von Zementklinker ausgewiesen. Der letzte Schritt der Zementherstellung, d.h. der Mahl- und Mischvorgang, ist nicht enthalten, sondern als stromintensiver Prozess über die Strombereitstellung (1.A.1) abgedeckt. Weiterhin werden die Prozessfeuerungen der Ziegelindustrie sowie sonstiger Baukeramik berücksichtigt. Für die Glasindustrie umfassen die Prozessfeuerungen die Herstellung von Flachglas, Hohlglas, die Herstellung von Glasfasern, die Veredlung und Verarbeitung von Flachglas sowie die Herstellung und Veredlung von sonstigem Glas und technischen Glaswaren. Außerdem werden die Prozessfeuerungen bei der Herstellung von gebranntem Kalk berücksichtigt. Gegebenenfalls stattfindende Eigenstromerzeugungen sind in 1.A.2.gviii „Sonstige“ enthalten.

Abbildung 25: Entwicklung der Brennstoffeinsätze der Kategorie 1.A.2.f Non-Metallic Minerals



Quelle: eigene Darstellung, UBA

Im Bereich der Mineralischen Industrie können mehrere Brennstoffwechsel beobachtet werden. So verdrängten Mitte der Neunzigerjahre gasförmige Brennstoffe (Naturgase) zunehmend die festen Brennstoffe. Beide Brennstoffgruppen dominieren diese Quellgruppe aktuell.

In den 2000er Jahren werden die flüssigen Brennstoffe (Mineralölprodukte) überwiegend ersetzt, zuerst durch Abfälle und Sekundärbrennstoffe, aber auch durch Biomasse.

In den letzten Jahren werden die festen Brennstoffe in immer größerem Umfang durch Sekundär-brennstoffe ersetzt. Die Entwicklung der Brennstoffeinsätze folgt der Entwicklung der Industrie in diese Branchen.

3.2.7.6.2 Methodische Aspekte (1.A.2.f, Mineralische Industrie)

Die Brennstoffeinsätze von konventionellen Brennstoffen sind in der BEU enthalten. Die Quelle für die Brennstoffeinsätze der energiebedingten Prozessfeuerung ist die Statistik des

produzierenden Gewerbes. Dabei sind folgende WZ-Nummern relevant: Melde-Nr. 26.51alt (WZ 2003, (Statistisches Bundesamt, 2003)) → 23.51neu (WZ 2008, (Statistisches Bundesamt, 2008)): Herstellung von Zement, Melde-Nr. 26.40 alt (WZ 2003) → 23.32 neu(WZ 2008): Ziegelei, Herstellung von sonstiger Baukeramik, Melde-Nr. 26.1 alt (WZ 2003) → 23.1 neu (WZ 2008): Herstellung von Glas und Glaswaren sowie Melde-Nr. 26.52 alt (WZ 2003) → 23.52 neu (WZ 2008): Herstellung von Kalk. Eine Trennung zwischen Kalk und Gips ist auf Grund der Änderung der Meldenummern nicht mehr möglich und erfolgt mit Hilfe eines Splitfaktors, der auf Basis alter Einzelstatistiken ermittelt wurde. Für Abgrenzungen zur Strom- und Wärmeerzeugung wird die Statistik 067 verwendet (Statistisches Bundesamt, 2025b).

Seit 2002 liegen die Daten der Statistik 067 nur im dreistelligen Meldenummernbereich vor. Das heißt, es können nur (aggregiertere) Daten derMeldenummer 26.5 alt (WZ 2003, (Statistisches Bundesamt, 2003)) → 23.5 neu (WZ 2008, (Statistisches Bundesamt, 2008)): Herstellung von Zement, Kalk und gebrannten Gips verwendet werden.

Im Endbericht zum Forschungsvorhaben „Dokumentation der Datenqualität von Aktivitätsraten“ (Juhrich & Wachsmann, 2007a) und im NIR (UBA et al., 2013) in den Kapiteln 3.2.9.7 bis 3.2.9.10 werden die Berechnungsalgorithmen ausführlich beschrieben.

Die Brennstoffeinsätze für die neuen Bundesländer 1990 wurden mittels des spezifischen Brennstoffverbrauchs des Jahres 1989 und der Produktion des Jahres 1990 errechnet.

In der Zementindustrie werden in nennenswertem Umfang Ersatzbrennstoffe eingesetzt, die nicht in nationalen Statistiken und der Energiebilanz berücksichtigt sind. Als Quelle für die Produktions-angaben und Brennstoffeinsätze werden Angaben der jeweiligen Industrieverbände (neben Zement- auch Kalkindustrie) genutzt. Das Verfahren für die Zusammenstellung der Aktivitätsdaten mit Raumbezug alten und neuen Bundesländer ab 1990 sowie Deutschland ab 1995 ist im Endbericht zum Forschungsvorhaben „Einsatz von Sekundärbrennstoffen“ dokumentiert (Lechtenböhmer, Nanning, et al. (2006b), FKZ 204 42 203/02). In einem ersten Schritt wurden IPCC-gemäß die Brennstoffeinsätze den Gruppen Biomasse oder sonstige Brennstoffe (Abfälle) zugeordnet. Im zweiten Schritt wurden für Mischbrennstoffe biogene Anteile hergeleitet und über Splitfaktoren in die Berechnung eingespeist. Außerdem wurden CO_2-Emissionsfaktoren auf der Basis von Angaben zu Kohlenstoff-gehalten, Wassergehalten und Heizwerten abgeleitet.

3.2.7.6.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (1.A.2.f, Mineralische Industrie)

Unsicherheiten wurden im Jahr 2004 für alle Brennstoffe und für die o.g. Ersatzbrennstoffe bestimmt. Die Methoden sind im Anhang 13.6 des NIR (UBA, 2007) und im Endbericht des Forschungs-projekts Lechtenböhmer, Nanning, et al. (2006b) erläutert.Die Unsicherheitenwurden für die Aktivitäts-raten im Forschungsvorhaben „Dokumentation der Datenqualität von Aktivitätsraten“ (Juhrich & Wachsmann, 2007a) aktualisiert und im dazugehörigenEndbericht dokumentiert.

3.2.7.6.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (1.A.2.f, Mineralische Industrie)

Eine allgemeine Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Weitere Informationen zur Qualitätssicherung siehe CRF 1.A.1.a (Kapitel 3.2.4.4).

3.2.7.6.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (1.A.2.f Mineralische Industrie)

Tabelle 40: Rückrechnungen in CRF 1.A.2.f, in [kt] bzw. [%]

	Abweichung CO_2 absolut					Abweichung CO_2 relativ
	gasförmige Brennstoffe	flüssige Brennstoffe	feste Brennstoffe	weitere Brennstoffe	gesamt	Gesamt
2023	-102,66	-61,09	-99,62	0,00	-263,37	-2,43%

Im Jahr 2023 kommt es zu Rückrechnungen bei allen konventionellen Energieträgern, da die vorläufigen Werte durch endgültige Energiebilanzwerte ersetzt wurden.

3.2.7.6.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (1.A.2.f, Mineralische Industrie)

Derzeit sind keine Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4 Verbesserungen des Inventars, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

3.2.7.7 Verarbeitendes Gewerbe - Weitere Energieerzeugung (1.A.2.g viii)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2023 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2023
L/T	1 A 2 g, Other Manufacturing Industries and Construction	fossil fuels	CO_2	125527,76	9,71	56437,66	7,98	-55,04
-/-	1 A 2 g, Other Manufacturing Industries and Construction	0	CH_4	146,88	0,02	202,46	0,03	37,85
-/-	1 A 2 g, Other Manufacturing Industries and Construction	0	N_2O	831,54	0,07	411,25	0,06	-50,54

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2	CS	NS	CS
CH_4	CS	NS	CS
N_2O	CS	NS	CS
NO_x, CO, NMVOC, SO_2	CS	NS	CS

Die Einordnung in die Hauptkategorien erfolgt für die Kategorie 1.A.2.g für stationäre & mobile Quellen gemeinsam. Demnach ist die Kategorie 1.A.2.g „Verarbeitendes Gewerbe - Weitere Energie-erzeugung“ für CO_2 eine Hauptkategorie nach der Emissionshöhe und dem Trend.

Diese Subkategorie ist wegen ihrer Eigenschaft als Auffangposition für nicht branchenscharf disaggregierbare Brennstoffeinsätze besonders bedeutsam und trägt substanziell zu den CO_2-Emissionen des gesamten Energiesektors bei.

3.2.7.7.1 Beschreibung der Kategorie (1.A.2.g viii)

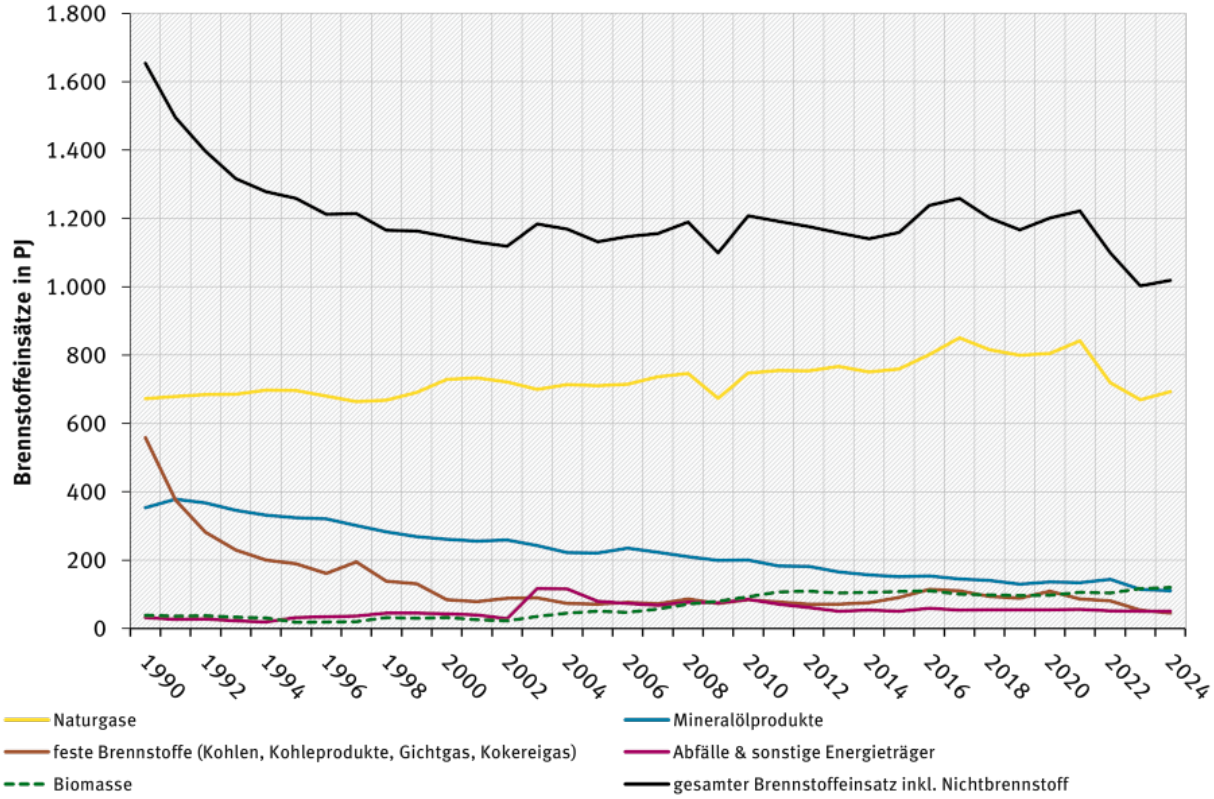
In dieser Subkategorie 1.A.2.g werden alle Emissionen berichtet, für die sich die Energieeinsätze nicht entsprechend der Gliederung für 1.A.2 disaggregieren lassen. Diese Subkategorie ist für ca. 65% der gesamten CO_2-Emissionen der Kategorie 1.A.2 verantwortlich.

In dieser Subkategorie ist die gesamte Strom- und Wärmeerzeugung in Industriekraftwerken und Kesseln aufgeführt, weil sich diese Anlagenarten aufgrund ihres ähnlichen Emissionsverhaltens in dieser Subkategorie zusammenfassen lassen. Da in der chemischen Industrie bzw. in der Kategorie 1.A.2.c im Wesentlichen KWK-Anlagen und Kessel zum Einsatz kommen, werden diese Emissionen nicht dort, sondern in der Subkategorie 1.A.2.gviii „Sonstige“ berichtet. Eine weitere Aufteilung der Industriekraftwerke und Kessel in die vorgesehenen Subkategorien wäre nicht mit einer höheren Datenqualität verbunden, da das Emissionsverhalten der Anlagen nicht vom Industriezweig abhängt. Zudem wäre gerade die Erstellung von Zeitreihen in einer zusätzlichen Subkategorie mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden, da Deutschland im Jahr 1990 noch aus zwei Ländern bestand und es dementsprechend auch zwei verschiedene statistische Systeme gab, die in einer Übergangszeit bis 1994 zusammengeführt wurden. Davon abgesehen wurden große Anstrengungen unternommen, um für das Basisjahr 1990 die geforderte Dokumentation und Datenqualität bereitzustellen. Weiterhin wurde mit der Novellierung des Energiestatistikgesetzes im Jahr 2003 die Datenerhebung vor allem für KWK-Anlagen deutlich verbessert. Eine rückwirkende Erhebung dieser Daten von 2002 – 1990 ist nicht möglich. Die Zeitreihenkonsistenz konnte auf aggregierter Ebene weitgehend sichergestellt werden. Eine weitere Disaggregierung würde aber zu Brüchen in den Zeitreihen führen. Dennoch wurde die Möglichkeit einer weiteren Disaggregierung umfangreich geprüft, bisher jedoch ohne erfolgreichen Lösungsansatz. Hinzu kommt, dass viele Energiedaten in Deutschland der Geheimhaltung unterliegen, so dass zur Wahrung der Geheimhaltung oft eine Aggregierung zwingend erforderlich ist. In einigen bisher einzeln ausgewiesenen Branchen müssen einzelne Brennstoffe aufgrund der Geheimhaltung zusammengefasst und unter der Kategorie 1.A.2.gviii „Sonstige“ berichtet werden. Das führt ebenfalls zu einer deutlichen Verringerung der Aussagekraft der Daten in den einzelnen Sektoren. Die Novellierung des Energiestatistikgesetzes im Jahr2017 führte zu keiner Verbesserung hinsichtlich der Disaggregationsmöglichkeiten der Industriekraftwerke und Kessel.

Des Weiteren ist festzuhalten, dass die Grenze zwischen den einzelnen Industriesektoren und der öffentlichen Versorgung letztlich nicht eindeutig gezogen werden kann. Der in den IPCC-Guidelines beschriebene Begriff „autoproducer“ ist in der Realität in dieser reinen Form kaum zu finden. Die Strom- und Wärmeversorgung ist in den einzelnen Unternehmen unterschiedlich geregelt. Einige Unternehmen betreiben eigene Kraftwerke, die häufig auch Strom in das öffentliche Netz einspeisen. Andere Betriebe beziehen Strom oder auch Wärme aus dem öffentlichen Netz. Im Zuge der Liberalisierung des Energiemarktes kam es zudem zu häufigen strukturellen Änderungen, zum Beispiel das Herauslösen der Energieerzeugungsanlagen aus dem restlichen rechtlichen Firmenverbund (Unbundling) und das daraus resultierende unterschiedliche Meldeverhalten zu den Energiestatistiken..Da die nationale Statistik die Grundlage für die Inventarerstellung bildet, wird die in der Statistik vorgenommene Zuordnung der Anlagen übernommen. Desweiteren erfolgten in der Vergangenheit auch Ummeldungen der den Sektoren zugeordneten Kraftwerken aus ihren Industriebranchen zu Kraftwerken der öffentlichen Versorung, Dies wird in unterschiedlichen Energiestatistiken abgebildet und würde zu Verzerrungen führen. Diese Zuordnung ist weder konstant über die Zeitreihe noch durchgehend konsistent mit den Angaben im Emissionshandel und kann daher in den bestehenden Datensätzen nicht harmonisiert werden.

Eine internationale Vergleichbarkeit jener Subkategorien, in denen hauptsächlich Industriekraftwerke zum Einsatz kommen, ist nicht möglich, da sich die Versorgungsstrukturen deutlich unterscheiden.

Abbildung 26: Entwicklung der Brennstoffeinsätze der Kategorie 1.A.2.g viii



Quelle: eigene Darstellung, UBA

Die Kategorie weist deutliche Verschiebungen im Brennstoffeinsatz aus.

Besonders auffällig ist der Rückgang des Einsatzes von festen Brennstoffen bis 2013, vor allem ein deutlich geringerer Einsatz von Braunkohle. Der Rückgang ist insbesondere in den Neunzigerjahren zu erkennen. Seit den 2000er-Jahren prägt der Einsatz der Naturgase den Trend des Gesamtenergieeinsatz. Vom Ende der Neunzigerjahre bis Anfang der 2010er-Jahre erhöhte sich der Einsatz von Biomasse im Trend. Im Bereich der Biomasse sind die Mengen erst seit der Einführung des Energiestatistikgesetzes im Jahr 2003 vollständig erfasst, in den Vorjahren wurde der Biomasseeinsatz zur Energieerzeugung statistisch nicht bzw. nur teilweise erfasst. Der Einsatz von Abfallbrennstoffen ist im Vergleich zu den Neunzigerjahren gestiegen und bewegt sich seit etwa 2010 auf einem etwa gleichbleibenden Niveau. Die Entwicklung im Randjahr ist maßgeblich der Entwicklung der Temperatur geschuldet.

3.2.7.7.2 Methodische Aspekte (1.A.2.g viii)

Die Brennstoffeinsätze zur Stromerzeugung in Industriekraftwerken sind in der Energiebilanzzeile 12 enthalten. Nach Abzug der Brennstoffeinsätze der Raffineriekraftwerke, der Grubenkraftwerke, der Kraftwerke des Steinkohlenbergbaus und bis 1999 der Kraftwerke der Deutschen Bahn bleiben als Differenzbetrag die Aktivitätsdaten in den übrigen Industriekraftwerken, die sich zurzeit nicht weiter untergliedern lassen.

Für die Zuordnung der Brennstoffeinsätze zur Wärmeerzeugung in Industriekraftwerken und Kesseln werden zusätzliche Daten vom Statistischen Bundesamt benötigt. Aus den Statistiken

lassen sich die Brennstoffeinsätze zur KWK-Wärmeerzeugung ermitteln. Die Aktivitätsdaten für die Kessel werden als Differenzbetrag errechnet.

Sowohl für die Stromerzeugung als auch für die Wärmeerzeugung erfolgt eine Aufteilung in Dampfturbinen, Gasturbinen, GuD-Anlagen und Gasmotoren, da sich vor allem die Methan-emissionen dieser Verbrennungstechniken unterscheiden. Diese Aufteilung wurde in der Submission 2015 grundlegend überarbeitet und ist unter 1.A.1.a beschrieben.

Eine ausführliche Beschreibung der Berechnungsalgorithmen liegt im Endbericht zum Forschungs-vorhaben „Dokumentation der Datenqualität von Aktivitätsraten“ Eine ausführliche Beschreibung der Berechnungsalgorithmen liegt im Endbericht zum Forschungs-vorhaben „Dokumentation der Datenqualität von Aktivitätsraten“ (Juhrich & Wachsmann, 2007a) vor.

Emissionsfaktoren

Eine Liste der verwendeten CO_2-Emissionsfaktoren sowie eine methodische Beschreibung ist im Anhang 6.6 verfügbar.

Alle anderen Emissionsfaktoren für Treibhausgase und Vorläufersubstanzen für Kraftwerke und sonstige Kesselfeuerungen zur Dampf-, Heiß- und Warmwasserbereitstellung in der Kategorie 1.A.2.gviii / all other sind Rentz et al. (2002) und Fichtner et al. (2011) entnommen. Eine ausführliche Beschreibung der Vorgehensweise ist dem Kapitel 3.2.4.2 verfügbar. Die Forschungs-vorhaben unterscheiden innerhalb des Sektors nach Industriekraftwerken sowie den sonstigen Kesselfeuerungen zur Dampf-, Heiß- und Warmwasserbereitstellung.

3.2.7.7.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (1.A.2.g viii)

Aktivitätsraten

Die Unsicherheiten wurden erstmals für das Jahr 2004 bestimmt. Die Methode ist im Anhang-Kapitel 13.6 des NIR 2007 zu finden. Die Unsicherheiten wurden im Forschungsvorhaben „Dokumentation der Datenqualität von Aktivitätsraten“ aktualisiert und im Endbericht dokumentiert (Juhrich & Wachsmann, 2007a).

Emissionsfaktoren

Die Vorgehensweise bei der Ermittlung der Unsicherheiten ist imKapitel 3.2.4.3.1 beschrieben.

Ergebnis für N_2O: Die Ergebnisse des Kapitels 3.2.4.3.2 gelten entsprechend.

Ergebnis für CH_4: Die Ergebnisse des Kapitels 3.2.4.3.3 gelten entsprechend.

Die Ergebnisse der Ermittlung der Zeitreihenkonsistenz des Kapitels 3.2.4.3.4 gelten entsprechend.

3.2.7.7.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (1.A.2.g viii)

Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt, während sie für ED durch die Nationale Koordinierungsstelle durchgeführt wurden.

Weitere Informationen zur Qualitätssicherung siehe 1.A.1.a (Kapitel 3.2.4.4).

Aktivitätsraten

Die Qualität der Daten wurde bei der Bearbeitung des Forschungsvorhabens „Dokumentation der Datenqualität von Aktivitätsraten“ (Juhrich & Wachsmann, 2007a) Andere, langfristig verfügbare Datenquellen konnten nicht identifiziert werden.

Emissionsfaktoren

Die Ergebnisse der generellen Vorgehensweise bei der kategoriespezifischen Qualitätssicherung / -kontrolle und Verifizierung des Kapitels 3.2.4.2 gelten entsprechend.

3.2.7.7.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (1.A.2.g viii)

Tabelle 41: Rückrechnungen in 1.A.2.g viii nach Brennstoffen, in [kt] bzw. [%]

	Abweichung CO_2 absolut					Abweichung CO_2 relativ
	gasförmige Brennstoffe	flüssige Brennstoffe	feste Brennstoffe	weitere Brennstoffe	gesamt	Gesamt
2003	-19,40	-1,03	0,00	0,00	-20,44	-0,03%
2004	-36,45	-0,99	0,00	0,00	-37,44	-0,06%
2005	-52,41	-1,56	0,00	0,00	-53,97	-0,08%
2006	-55,64	-2,46	0,00	0,00	-58,10	-0,09%
2007	-88,12	-2,05	0,00	0,00	-90,17	-0,13%
2008	-60,64	-8,46	0,00	0,00	-69,09	-0,10%
2009	-53,00	-1,33	0,00	-0,09	-54,42	-0,09%
2010	-38,11	-16,83	0,00	-0,04	-54,99	-0,08%
2011	-96,99	-11,20	0,00	0,07	-108,12	-0,16%
2012	-93,22	-2,02	0,00	-0,52	-95,76	-0,15%
2013	-37,50	-1,46	0,01	-0,03	-38,98	-0,06%
2014	-36,93	-1,16	0,00	0,03	-38,06	-0,06%
2015	-66,30	-0,79	0,00	-0,04	-67,13	-0,10%
2016	-68,59	-2,99	0,00	-0,03	-71,61	-0,10%
2017	-69,54	-4,55	0,00	0,02	-74,07	-0,10%
2018	-75,67	-3,73	0,00	0,05	-79,35	-0,12%
2019	-73,08	-3,16	0,00	-0,13	-76,37	-0,12%
2020	-62,56	1,50	0,00	-0,06	-61,12	-0,09%
2021	-50,06	-8,22	0,00	-0,03	-58,31	-0,09%
2022	-68,03	-23,38	0,00	0,07	-91,34	-0,15%
2023	-755,63	-702,02	-922,08	-327,85	-2707,59	-4,80%

Nach dem Vorliegen der endgültigen Energiebilanz wurden die vorläufigen Werte für das Jahr 2023 durch aktuelle Werte ersetzt. Das führte zu Rückrechnungen. Seit 2023 stellt AGEB alle zwei Jahre Revisionen in der Zeitreihe beginnend ab dem Jahr 2003 bereit. Für das Berichtsjahr 2026 fanden wieder Revisionen statt und diese führten zu geringen Rückrechnungen in früheren Jahren.

3.2.7.7.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (1.A.2.g viii)

Derzeit sind weder in Bezug auf die Aktivitätsdaten, noch in Bezug auf die Emissionsfaktoren Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4 Verbesserungen des Inventars, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

3.2.7.8 Bauwirtschaftlicher Verkehr (1.A.2.g vii)

3.2.7.8.1 Beschreibung der Kategorie (1.A.2.g vii)

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2	Tier 1[a], CS	NS/M	CS, D[a]
CH_4	CS (Tier 2)	NS/M	CS (M)
N2O	CS (Tier 2)	NS/M	CS (M)
NO_X, CO, NMVOC, SO_2	CS (Tier 2)	NS/M	CS (M)

[a] Biodiesel: gemäß (IPCC (2006a): Band 2, Tab. 2.4)

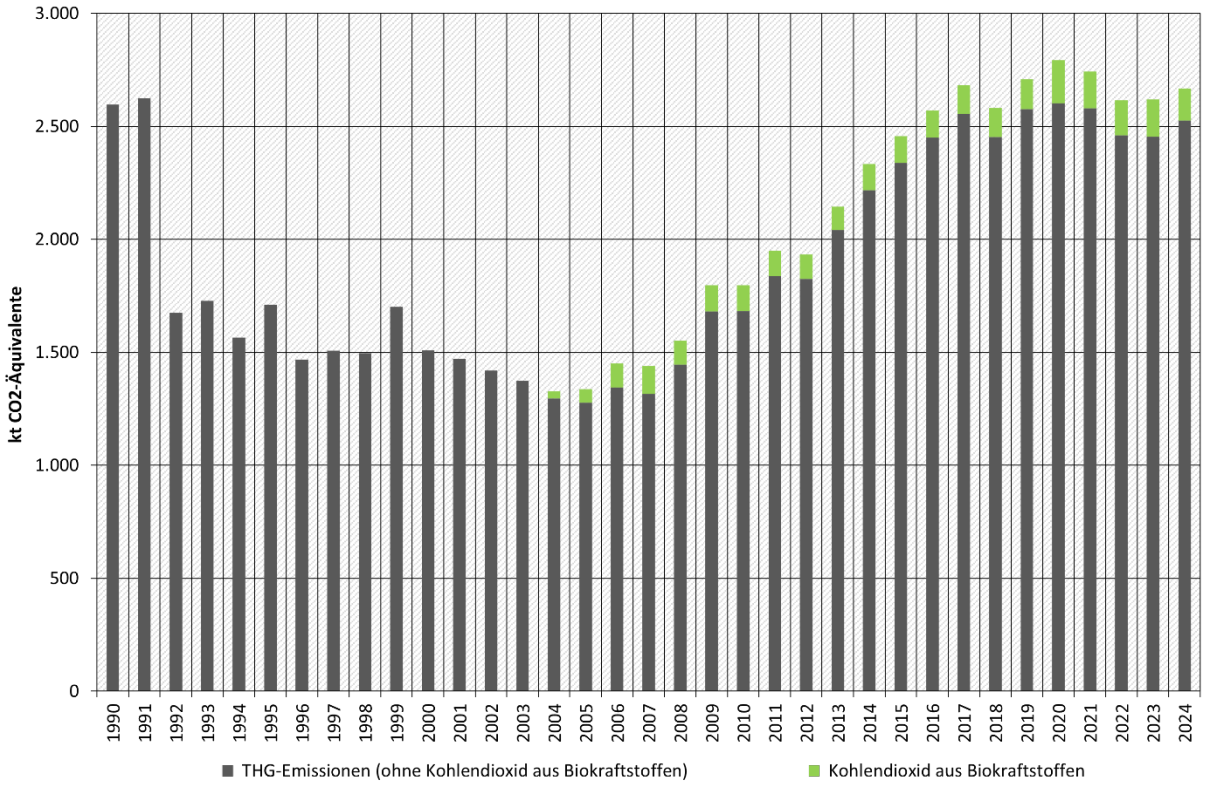
Die Einordnung in die Hauptkategorien erfolgt für die Kategorien 1.A.2.g für stationäre & mobile Quellen gemeinsam (Übersicht siehe Kapitel 3.2.7.7.). Insofern ist die Kategorie 1.A.2.g vii – „Übrige: Offroad-Fahrzeuge und sonstige Maschinen“, in der die Emissionen des bauwirtschaftlichen Verkehrs berücksichtigt sind, für CO_2 eine Hauptkategorie nach der Emissionshöhe und dem Trend.

3.2.7.8.2 Methodische Aspekte (1.A.2.g vii)

Die Emissionen werden gemäß IPCC 2006 Guidelines (IPCC (2006a): Seite 3.33; Gleichung 3.3.2) als Tier 2-Produkt aus verbrauchten Kraftstoffen und technikspezifischen Emissionsfaktoren berechnet.

Die CO_2-Emissionen aus den fossilen Anteilen der eingesetzten Biokraftstoffe werden separat ausgewiesen und den nationalen Gesamtemissionen zugeordnet (s. Erläuterungen im Anhang 7.1.4)

Abbildung 27: THG-Emissionen der Fahrzeuge und mobilen Maschinen der Bauwirtschaft seit 1990



Quelle: eigene Darstellung, UBA

Die Aktivitätsraten für fossile Diesel- und Ottokraftstoffe werden, nach Abzug der Energieeinsätze des militärischen Verkehrs, aus den Angaben der Energiebilanzzeilen 79 (bis 1994) bzw. 67 „Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und übrige Verbraucher“ berechnet.

Zur weiteren Aufteilung der Kraftstoffmengen auf mobile Quellen in Bauwirtschaft, Handel & Gewerbe (1.A.4.a ii) sowie Land- und Forstwirtschaft (1.A.4.c ii) werden dabei in TREMOD-MM (Transport Emission Model-Mobile Machinery) modellierte, jährlich schwankende Splitfaktoren herangezogen (Heidt et al., 2025).

Die Emissionsfaktoren stützen sich auf Ergebnisse verschiedener Forschungsprojekte und Expertenbetrachtungen des UBA.

Hinsichtlich Kohlendioxid wird hier grundsätzlich auf Anhang 6.6 verwiesen. Es kommen sowohl landesspezifische als auch Default-Werte (Biodiesel) zum Einsatz. Weiterführende Informationen speziell zur Schmierstoffmitverbrennung finden sich in Kapitel 4.5.1.

Für Methan und Lachgas kommen landesspezifische Werte aus (Heidt et al., 2025) zum Einsatz. Ihre Entwicklung spiegelt die seit Mitte der Neunziger Jahre schrittweise eingeführten Grenzwerte für die Abgasemissionen von bauwirtschaftlichen Maschinen wider.

Bezüglich der Freisetzung dieser beiden Treibhausgase aus der Schmierstoff-Mitverbrennung wird davon ausgegangen, dass diese bereits in den entsprechenden Emissionsfaktoren der verwendeten Kraftstoffe berücksichtigt und daher als IE *(included elsewhere)* zu berichten ist.

Tabelle 42: für das Berichtsjahr 2024 verwendete Emissionsfaktoren, in kg/TJ

	CH_4	N_2O	Ursprung
Diesel & Biodiesel	0,32 (4,15)	2,97 (28,6)	gemäß (Heidt et al., 2025)
Ottokraftstoff & Bioethanol	17,7 (50)	1,41 (2,00)	gemäß (Heidt et al., 2025)

in Klammern: Default-Werte gemäß IPCC (2006a): Band 2 – Energy , Kapitel 3 – Mobile , Tab. 3.3.1: Industry

3.2.7.8.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (1.A.2.g vii)

Die von der mathematischen Unsicherheit des in TREMOD MM entwickelten Verteilschlüssels (siehe oben: Methodische Aspekte) dominierten Unsicherheitenangaben der spezifischen Energieeinsätze basieren auf Expertenschätzungen. Gleiches gilt für die verwendeten Kohlendioxid-Emissionsfaktoren. Während bzgl. der Emissionsfaktoren für Methan dagegen Ergebnisse aus Knörr et al. (2009) zugrunde gelegt werden, muss bzgl. Lachgas bis auf weiteres auf Richtwerte gemäß IPCC zurückgegriffen werden.

Für die wie oben beschrieben für Diesel und Ottokraftstoffe berechneten spezifischen Energieeinsätze werden dabei Unsicherheiten von ±10% angenommen.

Die für die verwendeten Emissionsfaktoren angenommenen Unsicherheiten können der nachfolgenden Tabelle entnommen werden.

Tabelle 43: prozentuale Unsicherheiten der Emissionsfaktoren*

	CO_2	CH_4	N_2O
Ottokraftstoffe	±0,4%	±34%	-40% / 140%
Diesel	±3%	±34%	-40% / +140%

* untere und obere Grenze des 95%-Perzentils

3.2.7.8.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (1.A.2.g vii)

Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Zur Qualitätssicherung der Energiebilanzen liegen dem Umweltbundesamt entsprechende Qualitätsberichte der AG Energiebilanzen vor.

Tabelle 44: Übersicht relevanter Datenvergleiche

	Vergleich mit...	Erläuterung
CO_2	alternativen Emissionsinventaren für Deutschland	keine vergleichbaren Datensätze
CO_2	Default gemäß IPCC (2006a): Band 2, Kapitel 3, Tabelle 3.3.1: Industry	siehe Tabelle 45
CH_4, N_2O	Default gemäß IPCC (2006a): Band 2, Kapitel 3, Tab. 3.3.1: Industry	siehe Tabelle 42
CO_2, CH_4, N_2O	IEF anderer Staaten	siehe Tabelle 46

Tabelle 45: Vergleich der verwendeten EF (CO_2) mit Default-Werten, in kg/TJ

	Inventarwerte [a]	Default [b]	Untergrenze	Obergrenze
Dieselkraftstoff	74.027	74.100	72.600	74.800
Ottokraftstoffe	72.782	69.300	67.500	73.000
Biodiesel	70.800		59.800	84.300
Bioethanol	71.607	70.800	59.800	84.300

[a] für das Berichtsjahr 2024; [b] gemäß IPCC (2006a): Band 2, [c] Kap. 3, Tab. 3.3.1; [d] Kap. 2, Tab. 2.4

Nachfolgende Tabelle erlaubt einen Vergleich mit spezifischen impliziten Emissionsfaktoren anderer Staaten, der sich aufgrund des heterogenen Quellgruppenzuschnitts jedoch schwierig gestaltet.

Tabelle 46: länderübergreifender Vergleich der IEF für fossile Flüssigbrennstoffe, in kg/TJ

	CO_2	CH_4	N_2O
Deutschland	74.029	2,83	2,92
Belgien	74.001	6,98	5,15
Dänemark	73.631	1,99	3,46
Frankreich			
Italien			
Niederlande	72.276	1,33	0,70
Spanien	73.318	0,60	3,17
EU-27			
Großbritannien	74.137	13,0	2,92

Deutschland: IEF für das Berichtsjahr 2024; alle anderen: IEF für 2021 gemäß CRF-Submission 2023

3.2.7.8.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (1.A.2.g vii)

Wie oben beschrieben, sind die Aktivitätsraten des bauwirtschaftlichen Verkehrs Teil der in EBZ 67 angegebenen Primärdaten. Für das Jahr 2023 wurden hier die in Submission 2025 noch vorläufigen Daten durch Angaben der finalen Energiebilanz ersetzt. Zudem kam es zu einer Korrektur der Biokraftstoff-Beimengungsraten (ab 2004).

Tabelle 47: revidierte Primäraktivitätsdaten 2004-2023, in Terajoule

	2004	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Dieselkraftstoff												
Submission 2026	86.802	85.271	89.724	103.913	105.767	106.896	103.499	106.106	105.611	106.135	102.375	101.113
Submission 2025	86.802	85.271	89.724	103.914	105.768	106.894	103.495	106.054	104.452	106.457	102.720	101.133
Änderung absolut	0,00	0,00	0,18	-0,50	-1,38	1,96	3,66	51,1	1.160	-322	-345	-20,7
Änderung relativ	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,05%	1,11%	-0,30%	-0,34%	-0,02%
Ottokraftstoff												
Submission 2026	13.193	14.151	9.873	8.640	8.357	8.211	8.290	8.606	8.553	8.752	8.626	8.584
Submission 2025	13.193	14.151	14.923	12.227	11.588	10.895	10.806	11.040	10.489	10.833	10.872	10.769
Änderung absolut	0,00	0,00	-5.050	-3.586	-3.230	-2.684	-2.516	-2.434	-1.937	-2.080	-2.246	-2.184
Änderung relativ	0,00%	0,00%	-33,8%	-29,3%	-27,9%	-24,6%	-23,3%	-22,0%	-18,5%	-19,2%	-20,7%	-20,3%

	2004	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Biodiesel												
Submission 2026	2.983	5.446	6.945	5.699	5.656	5.707	5.975	6.028	8.742	7.368	7.084	7.522
Submission 2025	3.164	5.681	7.018	5.772	5.733	5.827	5.840	6.016	8.543	7.465	7.126	7.496
Änderung absolut	-181	-235	-72,7	-73,1	-77,1	-120	136	12,3	198	-97,4	-42,3	26,9
Änderung relativ	-5,73%	-4,14%	-1,04%	-1,27%	-1,35%	-2,05%	2,33%	0,20%	2,32%	-1,31%	-0,59%	0,36%
Bioethanol												
Submission 2026	14	96,1	356	363	352	339	362	360	379	404	399	408
Submission 2025	15	98	357	495	473	445	468	455	470	510	504	509
Änderung absolut	-0,50	-1,94	-1,81	-132	-121	-106	-106	-95	-91,6	-107	-105	-101
Änderung relativ	-3,43%	-1,98%	-0,51%	-26,7%	-25,6%	-23,8%	-22,7%	-20,8%	-19,5%	-20,9%	-20,9%	-19,8%

Quelle: Energiebilanz 2022 (AGEB, 2025d) und eigene Berechnungen basierend auf Heidt et al. (2025)

Gleichzeitig erfolgte für alle Jahre eine Korrektur der in TREMOD-MM erzeugten Splitfaktoren zur Aufteilung der Diesel-Primäraktivitätsdaten auf die in EBZ 67 subsummierten Kleinverbraucher. Die prozentualen Anteile des bauwirtschaftlichen Verkehrs änderten sich dabei wie folgt:

Tabelle 48: revidierte prozentuale Anteile 2004-2023 an EBZ 67

	2004	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Dieselkraftstoffe												
Submission 2026	0,15	0,16	0,22	0,27	0,27	0,28	0,28	0,28	0,29	0,28	0,28	0,28
Submission 2025	0,15	0,16	0,22	0,26	0,26	0,26	0,24	0,25	0,25	0,24	0,22	0,20
Änderung absolut	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,04	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08
Änderung relativ	-0,21%	-0,36%	-0,16%	4,79%	5,10%	7,00%	14,7%	13,3%	14,9%	19,4%	28,2%	28,2%

Eigene Berechnungen basierend auf Heidt et al. (2025)

Aus der Gesamtheit der beschriebenen Anpassungen resultierten folgende Veränderungen der letztlich dem bauwirtschaftlichen Verkehr zugewiesenen Aktivitätsdaten:

Tabelle 49: resultierende Revision der Aktivitätsdaten 2004-2023, in Terajoule

	2004	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
	Dieselkraftstoff											
Submission 2026	12.939	12.784	19.158	27.623	28.923	30.072	28.694	30.110	30.387	30.104	28.649	28.384
Submission 2025	12.966	12.831	19.188	26.360	27.518	28.105	25.008	26.566	26.159	25.287	22.417	20.495
Änderung absolut	-26,9	-47,5	-30,0	1.264	1.406	1.968	3.686	3.544	4.228	4.817	6.231	7.889
Änderung relativ	-0,21%	-0,37%	-0,16%	4,79%	5,11%	7,00%	14,7%	13,3%	16,2%	19,0%	27,8%	38,5%
	Ottokraftstoffe											
Submission 2026	4.405	4.271	3.276	3.572	3.764	4.032	4.017	4.249	4.274	4.290	4.158	4.333
Submission 2025	4.405	4.284	6.532	6.071	6.112	5.992	5.769	5.881	5.537	5.645	5.607	5.756
Änderung absolut	0,08	-12,9	-3.256	-2.499	-2.349	-1.960	-1.752	-1.632	-1.264	-1.355	-1.449	-1.423
Änderung relativ	0,00%	-0,30%	-49,9%	-41,2%	-38,4%	-32,7%	-30,4%	-27,8%	-22,8%	-24,0%	-25,8%	-24,7%
	Biodiesel											
Submission 2026	445	815	1.483	1.515	1.547	1.605	1.657	1.711	2.515	2.090	1.982	2.112
Submission 2025	473	853	1.501	1.464	1.491	1.532	1.411	1.507	2.140	1.773	1.555	1.519
Änderung absolut	-28,0	-38,2	-17,9	50,8	55,1	73,3	246	204	376	317	427	593

	2004	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Änderung relativ	-5,92%	-4,48%	-1,19%	3,47%	3,70%	4,79%	17,4%	13,5%	17,6%	17,9%	27,5%	39,0%
	Bioethanol											
Submission 2026	4,69	29,0	110	150	159	167	175	178	189	198	192	206
Submission 2025	4,86	29,7	110	246	250	242	250	242	248	266	260	272
Änderung absolut	-0,17	-0,67	-0,57	-96,1	-91,0	-75,1	-74,5	-64,5	-59,1	-68,0	-67,7	-66,1
Änderung relativ	-3,43%	-2,26%	-0,51%	-39,1%	-36,5%	-31,0%	-29,8%	-26,6%	-23,8%	-25,6%	-26,0%	-24,3%

Quelle: eigene Berechnungen basierend auf Heidt et al. (2025)

Hinzu kommt eine Aktualisierung des Kohlendioxid-Emissionsfaktors 2023 für Ottokraftstoffe:

Tabelle 50: revidierter Kohlendioxid-Emissionsfaktor 2023 für fossilen Ottokraftstoff

	EF
Submission 2026	72.782
Submission 2025	72.787
Änderung absolut	-4,16
Änderung relativ	-0,01%

Aus der Gesamtheit der beschriebenen Korrekturen und Anpassungen resultiert eine alle Jahre ab 2004 umfassende Rekalkulation der berichteten Emissionen:

Tabelle 51: revidierte Emissionsmengen 2004-2023, in kt bzw. kt CO_2-Äquivalenten

	2004	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
	Kohlendioxid[a]											
Submission 2026	1.281	1.261	1.663	2.312	2.422	2.527	2.424	2.546	2.571	2.550	2.432	2.426
Submission 2025	1.283	1.266	1.902	2.400	2.489	2.524	2.278	2.402	2.349	2.291	2.075	1.943
Änderung absolut	-2,10	-4,60	-239	-88,7	-67,2	2,82	146	144	222	259	357	482
Änderung relativ	-0,16%	-0,36%	-12,6%	-3,70%	-2,70%	0,11%	6,40%	5,99%	9,46%	11,3%	17,2%	24,8%
	Methan											
Submission 2026	0,118	0,114	0,095	0,101	0,104	0,108	0,104	0,107	0,105	0,101	0,094	0,093
Submission 2025	0,119	0,114	0,160	0,151	0,151	0,147	0,138	0,138	0,128	0,126	0,119	0,117
Änderung absolut	0,000	0,000	-0,065	-0,050	-0,047	-0,039	-0,033	-0,031	-0,023	-0,024	-0,025	-0,024
Änderung relativ	-0,11%	-0,39%	-40,3%	-33,0%	-31,1%	-26,4%	-24,2%	-22,4%	-18,0%	-19,5%	-21,2%	-20,3%
	Lachgas											
Submission 2026	0,046	0,046	0,066	0,092	0,096	0,100	0,096	0,100	0,104	0,102	0,097	0,097
Submission 2025	0,046	0,047	0,071	0,091	0,095	0,097	0,087	0,092	0,092	0,088	0,079	0,074
Änderung absolut	0,000	0,000	-0,005	0,000	0,001	0,003	0,009	0,009	0,012	0,013	0,018	0,023
Änderung relativ	-0,35%	-0,58%	-6,68%	0,27%	0,95%	3,30%	10,5%	9,50%	12,8%	14,9%	22,2%	31,3%
	Gesamt Treibhausgase[a]											
Submission 2026	1.296	1.276	1.683	2.339	2.450	2.556	2.452	2.576	2.602	2.580	2.460	2.454
Submission 2025	1.299	1.281	1.926	2.429	2.519	2.554	2.305	2.430	2.377	2.318	2.099	1.966
Änderung absolut	-2,14	-4,69	-242	-90,1	-68,3	2,58	147	145	225	262	361	488
Änderung relativ	-0,17%	-0,37%	-12,6%	-3,71%	-2,71%	0,10%	6,39%	5,98%	9,45%	11,3%	17,2%	24,8%

Eigene Berechnungen; [a] inkl. fossiles CO_2 aus der Verwendung von Biokraftstoffen

3.2.7.8.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (1.A.2.g vii)

Derzeit sind keine neuen Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4 Verbesserungen des Inventars, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

3.2.8 Transport (1.A.3)

3.2.8.1 Transport - Ziviler Luftverkehr (1.A.3.a)

3.2.8.1.1 Beschreibung der Kategorie (1.A.3.a)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
-/-	1 A 3 a, Civil Aviation	fossil fuels	CO_2	2310,48	0,18	1087,32	0,16	-52,94
-/-	1 A 3 a, Civil Aviation	0	CH_4	3,48	0,01	1,52	0,01	-56,28
-/-	1 A 3 a, Civil Aviation	0	N_2O	20,68	0,01	9,70	0,01	-53,11

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2	CS (Tier 3a)	NS/IS/M	D[a], CS[b]
CH_4	CS (Tier 3a)	NS/IS/M	CS[c] (M)
N_2O	CS (Tier 3a)	NS/IS/M	CS[c] (M)
NO_X, CO, NMBVOC	CS (Tier 3a)	NS/IS/M	CS[c] (M)
SO_2	Tier 1	NS/IS/M	D

[a] Flugbenzin: gemäß IPCC (2006a), Kapitel 3.6 – „Civil Aviation“, Tabelle 3.6.4

[b] abgeleitet aus Default von 3.150 kg/ t Kerosin gemäß Houghton et al. (1997) und spezifischem Heizwert gemäß AGEB (2025d)

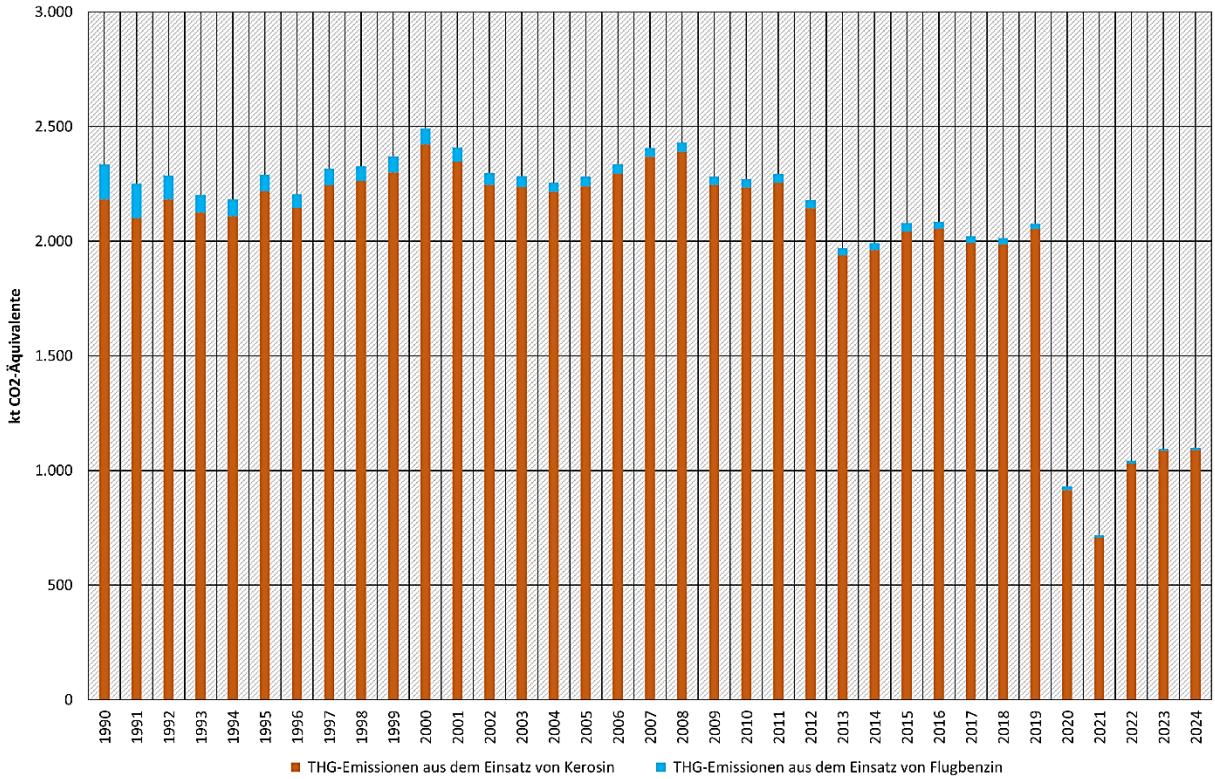
[c] abgeleitet aus Tier3-defaults gemäß EMEP/EEA (2023)

Die Kategorie „Ziviler Luftverkehr“ ist keine Hauptkategorie.

Der Flugverkehr unterscheidet sich in der Wirkung seiner Emissionen in hohem Maße von den land- und wassergebundenen Verkehrsträgern: die Klimawirksamkeit der Emissionen ändert sich unter von bodennahen Verhältnissen verschiedenen und zudem wechselnden atmosphärischen Bedingungen. Wesentliche Einflussfaktoren sind dabei der atmosphärische Druck, die Umgebungstemperatur sowie die Luftfeuchte, also Faktoren, die mit der Flughöhe erheblich variieren.

In der Debatte um die Klimawirksamkeit und die durch Luftschadstoffemissionen hervorgerufenen Umweltauswirkungen des Flugverkehrs werden neben Kohlendioxid (CO_2) hauptsächlich Wasserdampf, Stickstoffoxide (NO_X) und Partikel sowie, nachrangig, Kohlenwasserstoffe, Kohlenmonoxid (CO) und Schwefeldioxid (SO_2) wahrgenommen. Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf die im Rahmen der Emissionsberichterstattung betrachteten Komponenten Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4), Distickstoffoxid (N_2O, Lachgas), NO_X, (d.h. NO und NO_2), flüchtige organische Verbindungen ohne Methan (NMVOC), CO und SO_2.

Abbildung 28: Treibhausgas-Emissionen des nationalen zivilen Flugverkehrs seit 1990



Quelle: eigene Darstellung, UBA

3.2.8.1.2 Methodische Aspekte (1.A.3.a)

Die Berechnung der Luftverkehrsemissionen erfolgt nach Tier3a, also unter Berücksichtigung der von einzelnen Flugzeugtypen jährlich geflogenen Strecken, getrennt nach nationalen und internationalen Flügen und unter Berücksichtigung der Flugbetriebszustände LTO (Landing/Take-off-Zyklus, d.h. Flugbewegungen bis 3.000 Fuß bzw. ca. 915 m Höhe) und Cruise (Reiseflug oberhalb 3.000 Fuß).

Grundsätzlich basiert die Ermittlung der Emissionen auf den Verbrauchsdaten der Energiebilanz für Kerosin und Flugbenzin (AGEB, 2025c). Für Jahre, für die noch keine oder nur eine vorläufige Energiebilanz vorliegt, werden die Absatzzahlen des Bundesamtes für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA, 2025a) verwendet. Entscheidend für die Berichterstattung ist die Aufteilung in innerdeutschen und internationalen Flugverkehr, die innerhalb des Modells TREMOD AV (TREMOD Aviation) (Knörr et al., 2015) erfolgt. Die dazu notwendigen Bewegungsdaten werden vom Statistischen Bundesamt erfasst.

Für die Berichterstattung werden die Emissionen durch die Multiplikation des Treibstoffverbrauchs der jeweiligen Flugphase mit spezifischen Emissionsfaktoren ermittelt. CO_2- und SO_2-Emissionen beruhen unabhängig von der verwendeten Methode allein auf der Menge bzw. den Eigenschaften des eingesetzten Treibstoffs. Emissionen von CH_4, N_2O usw. sind dagegen abhängig von Triebwerken, Flughöhen, Flugphasen u.a. und werden mit einem höheren Tier-Ansatz genauer beschrieben.

Von diesem Ansatz abweichend werden die durch den Einsatz von Flugbenzin verursachten Emissionen, wie in (IPCC (2006a): Band 2, Kap. 3: Mobile Combustion) vorgeschlagen, mit angepassten Emissionsfaktoren und Heizwerten separat berechnet.

Die Aktivitätsraten (Energieeinsätze) entsprechen dem in Deutschland abgesetzten Flugtreibstoff nach (AGEB (2025c); aktuell bis 2024) bzw. den vom Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhr-kontrolle veröffentlichten Amtlichen Mineralöldaten für die Bundesrepublik Deutschland (BAFA, 2025a).

Die innerhalb von TREMOD AV erfolgenden Berechnungen bzgl. Kerosin berücksichtigen die Anzahl der Flüge nach Flugzeugtypen und Großkreisentfernungen für den nationalen und internationalen Flugverkehr. Einbezogen werden die vom Statistischen Bundesamt erfassten gewerblichen Flüge auf ausgewählten Flugplätzen. Flüge von „anderen Flugplätzen“ sowie nicht-gewerbliche Flüge werden vom Statistischen Bundesamt nur nach Gewichts- oder Flugzeug-Klassen, jedoch nicht nach Destination unterschieden. Dabei handelt es sich zu einem weit überwiegenden Teil um Flüge mit kleinen, mit Flugbenzin betriebenen Maschinen.

Tabelle 52: jährliche Anteile der Inlandsflüge an den Treibstoff-Inlandsablieferungen, in %

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023	2024
Kerosin	15,3	12,9	11,0	8,8	8,4	7,6	6,2	3,7	3,6	3,7	3,8
Flugbenzin	86,0	85,9	86,1	86,2	86,3	86,2	97,5	92,8	92,8	79,2	80,5

TREMOD AV (Knörr, Allekotte, et al., 2025)

Die Aufteilung der Treibstoffverbräuche auf die beiden Flugphasen Landung/Start (LTO-Zyklus) und Reiseflug (Cruise) erfolgt, basierend auf Daten des Statistischen Bundesamtes, ebenfalls anhand von TREMOD-AV-Berechnungen. Diese ermöglichen die Ausspielung der Treibstoffverbräuche in der Flugphase LTO für den nationalen und internationalen Flugverkehr. Der Verbrauch im Reiseflug ergibt sich entsprechend als Differenz des Gesamtabsatzes nach der Energiebilanz abzüglich des jeweiligen LTO-Verbrauchs.

Die Menge „mitverbrannter Schmierstoffe“ wird gemäß (Wallfarth, 2014) aus den jährlichen Treibstoffmengen abgeleitet (siehe Kapitel 4.5.1).

Hinsichtlich der verwendeten Emissionsfaktoren für Kohlendioxid wird grundsätzlich auf Anhang 6.6 verwiesen.

Der Emissionsfaktor für „Kohlendioxid“ aus dem Einsatz von „Kerosin“ wurde aus dem Gehalt an Kohlenstoff im Kerosin abgeleitet und beträgt 3.150 g/kg. Dieser Wert ist durch zahlreiche Publikationen abgesichert und wird für den gesamten Flugverkehr verwendet.

Distickstoffoxid (Lachgas) ist ein Produkt der Oxidation von Stickstoff in der Brennkammer, das in Spuren entstehen kann. Die diesbezügliche Datenlage ist grundsätzlich schlecht. Da eine Aufgliederung der Emissionsfaktoren in die beiden Flugphasen erforderlich ist, werden die Emissionsfaktoren sowohl für Lachgas als auch Methan der IPCC-Emissionsfaktoren-Datenbank (EFDB) entnommen (siehe Tabelle 495). Für Methan wird dabei davon ausgegangen, dass Emissionen nur während des LTO-Zyklus auftreten (siehe IPCC (2006a): Band 2, Kap. 3.6, Tab. 3.6.5). Dagegen werden N_2O-Emissionen auch für den Reiseflug berechnet.

Die weiteren Emissionen werden, basierend auf den jeweiligen Emissionsfaktoren, nach Flugphasen getrennt berechnet. Dabei werden unterschiedliche Quellen verwendet.

Die für NO_X, CO und NMVOC verwendeten impliziten Emissionsfaktoren stellen Quotienten aus in TREMOD AV berechneten und aufaggregierten Flugzeugtyp-spezifischen Emissionen und dem jährlichen Kerosinverbrauch dar. Die dazu in TREMOD AV berechneten Detail-Emissionen beruhen dabei wiederum auf Flugzeugtyp-spezifischen Emissionsfaktoren aus der EMEP/EEA-Datenbank.

Angaben zu den darüber hinaus betrachteten Luftschadstoffen finden sich im Anhang 7.1.2.1.

Die Umrechnung der in [g/kg] vorliegenden Emissionsfaktoren in Angaben mit der Einheit [g/TJ] erfolgt über einen Heizwert in Höhe von 43.000 kJ/kg (AGEB, 2025c).

Für die Berechnung der CO_2-Emissionen aus dem Einsatz von Flugbenzin wird der Standard-Wert gemäß IPCC (2006a): Band 2, Kap. 3: Mobile Combustion übernommen. In diesen Richtlinien (Seite 3-64) werden die Methan- und Lachgas-Emissionsfaktoren explizit mit den für die Verwendung von Kerosin angegebenen Werten gleichgesetzt. Diese Annahme wird hier übernommen.

Die für NO_X und CO verwendeten impliziten Emissionsfaktoren werden, wie oben für Kerosin beschrieben, aus in TREMOD AV berechneten und anschließend aufaggregierten Flugzeugtyp-spezifischen Emissionen und dem jährlichen Flugbenzinverbrauch abgeleitet.

CO_2-Emissionen aus der unbeabsichtigten Mitverbrennung von Schmierstoffen werden unter CRF 2.D.1 berichtet. Bezüglich der Freisetzung von Methan und Lachgas wird davon ausgegangen, dass diese bereits in den entsprechenden Emissionsfaktoren der verwendeten Kraftstoffe berücksichtigt und daher als IE *(included elsewhere)* zu berichten ist.

Tabelle 53: für das Berichtsjahr 2024 verwendete Emissionsfaktoren, in kg/TJ

	CH_4	N_2O	Ursprung
Kerosin: LTO	12,3 (0,50)	2,80 (2,00)	gemäß TREMOD AV, abgeleitet aus EFDB-defaults in kg/LTO
Kerosin: Reiseflug	0,00 (0,50)	2,34 (2,00)	gemäß TREMOD AV, abgeleitet aus EFDB-defaults in kg/t Kerosin
Flugbenzin: LTO	162 (-)	2,30 (-)	gemäß TREMOD AV
Flugbenzin: Reiseflug	0 (-)	2,30 (-)	gemäß TREMOD AV
Schmierstoffe	IE	IE	in EF der Treibstoffe abgebildet

Knörr, Allekotte, et al. (2025); in (): Defaults gemäß IPCC (2006a): Band 2, Kap. 3.6, Tab. 3.6.5

3.2.8.1.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (1.A.3.a)

Zur Ermittlung der Unsicherheiten werden die einzelnen Komponenten identifiziert, die in die Berechnung der Emissionen einfließen, und deren Unsicherheiten (U_1 bis U_n) quantifiziert. Durch die additive Verknüpfung der quadrierten Teilunsicherheiten ergibt sich jeweils die Gesamtunsicherheit U_{ges} laut *IPCC (2006a)*: Band 1, Kapitel 3, Seite 3.28, Formel 3.1.

Die Unsicherheiten wurden einerseits für Primäraktivitätsdaten (PAD), deren Verteilparameter (Splitfaktoren, SF) , die sich ergebenenden spezifischen Aktivitätsdaten, andererseits für die verwendeten Emissionsfaktoren ermittelt. Die Unsichheiten der den nationalen Energiebilanzen entnommenen Primäraktivitätsdaten sowie der Kohlendioxid-Emissionsfaktoren stellen dabei Expertenschätzungen dar. Alle weiteren Unsicherheiten wurden dagegen im Rahmen einer Studie abgeleitet Allekotte et al. (2022). Sämtliche Unsicherheitenangaben gelten dabei jeweils für die gesamte Zeitreihe.

Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die spezifischen Unsicherheiten.

Tabelle 54: verwendete spezifische Unsicherheiten

Parameter		Verteilung	untere Schranke	obere Schranke
Primary Activity Data (PAD)	Kerosin	normal	-5,00%	5,00%
	Flugbenzin	normal	-5,00%	5,00%
Domestic use: percental shares of PAD	Kerosin national	lognormal	-7,06%	7,44%
	Flugbenzin national	normal	-16,2%	16,2%
	Kerosin national: L/TO	lognormal	-7,42%	7,85%
	Flugbenzin national: L/TO	lognormal	-85,1%	250%
Activity Data	Kerosin - L/TO	normal	-4,10%	4,10%
	Kerosin - Reiseflug	normal	-9,91%	9,91%
	Flugbenzin - L/TO	lognormal	-81,8%	221%
	Flugbenzin - Reiseflug	normal	-39,9%	39,9%
Emission Factors	CO_2 Kerosin	normal	-5,00%	5,00%
	CO_2 Flugbenzin	normal	-5,00%	5,00%
	CH_4 Kerosin: L/TO	lognormal	-59,6%	81,4%
	CH_4 Kerosin: Reiseflug		NA	
	N_2O Kerosin: L/TO	normal	-38,0%	38,0%
	N_2O Kerosin: Reiseflug	normal	-24,0%	24,0%
	CH_4 Flugbenzin: L/TO	lognormal	-71,4%	156%
	CH_4 Flugbenzin: Reiseflug		NA	
	N_2O Flugbenzin: L/TO	normal	-44,8%	44,8%
	N_2O Flugbenzin: Reiseflug	normal	-43,5%	43,5%

Quelle: Expertenschätzung bzw. Allekotte et al. (2022)

3.2.8.1.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (1.A.3.a)

Eine allgemeine Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Für eine mit der Zeit steigende Zahl von Flugzeugtypen, für die keine spezifischen Daten verfügbar sind, mussten Emissionsfaktoren mit Hilfe von Regressionen auf Basis des Startgewichts gewonnen werden. Die Verwendung aktuellerer und vollständigerer Flugzeugtyp-spezifischer Daten würde die Qualität der Berechnungen weiter erhöhen. Auch eine Erweiterung der TREMOD-Berechnung, um die Unterscheidung nach verwendeten Antrieben, würde eine weitere Verbesserung bedeuten.

Bis auf die Emissionsfaktoren für Schwefeldioxid wurden internationale Standardwerte verwendet, die der IPCC-Emissionsfaktoren-Datenbank bzw. der EMEP/EEA-Datenbank sowie EMEP/EEA (2023) entnommen wurden. Eine Diskussion der einzelnen von Eurocontrol bereitgestellten landesspezifischen Verbrauchs- und Emissionsdaten werden derzeit nur zur Verifikation der eigenen Erhebungen herangezogen.

Tabelle 55: Übersicht relevanter Datenvergleiche

	Vergleich mit...	Erläuterung
CO_2, CH_4, N_2O	alternativen Emissionsinventaren für Deutschland	keine vergleichbaren Daten
CO_2	spezif. Tier 1 default-EF gemäß (IPCC, 2006a): Band 2, Kap. 3.6, Tab. 3.6.4	siehe Tabelle 53
CH_4, N_2O	spezif. Tier 1 default-EF gemäß (IPCC, 2006a): Band 2, Kap. 3.6, Tab. 3.6.5	siehe Tabelle 50
CO_2, CH_4, N_2O	spezifischen IEF anderer Staaten	siehe Tabelle 57

Tabelle 56: Vergleich der im Inventar verwendeten EF (CO_2) mit Default-Werten [a], in kg/TJ

	Inventarwert	Default	Untergrenze	Obergrenze
Kerosin	73.256	71.500	69.700	74.400
Flugbenzin	71.199	70.000	67.500	73.000

[a] gemäß IPCC (2006a): Band 2, Kapitel 2, Tabelle 2.4

Die folgende Tabelle erlaubt einen Vergleich mit spezifischen impliziten Emissionsfaktoren anderer Staaten.

Tabelle 57: länderübergreifender Vergleich der berichteten IEF, in kg/TJ

	Kerosin			Flugbenzin		
	CO_2	CH_4	N_2O	CO_2	CH_4	N_2O
Deutschland	73.256	3,43	2,47	71.199	28,8	2,30
Belgien	72.153	4,54	6,61	72.237	35,1	272
Dänemark	71.866	0,40	3,20	72.606	7,75	2,00
Frankreich	73.492	0,56	2,00	70.500	13,5	2,00
Italien	71.500	1,11	2,00	70.000	4,87	1,98
Niederlande	71.500	0,50	2,00	72.000	0,50	2,00
EU-27	72.735	1,23	2,09	70.586	8,40	5,26
Großbritannien	71.704	1,08	2,28	70.314	58,1	2,25

Deutschland: aktuelle IEF für das Berichtsjahr 2022; alle anderen: IEF für 2021 gemäß CRF-Submission 2023

3.2.8.1.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (1.A.3.a)

Gegenüber Submission 2025 resultieren Rückrechnungen aus der Revision der Energiebilanzen 2003 bis 2023 sowie der Aktualisierung des Modells TREMOD Aviation (Allekotte et al., 2023).

Tabelle 58: revidierte Inlandsabsätze 1990-2023, in Terajoule TJ

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
Flugturbinentreibstoff / Kerosin										
Submission 2026	193.329	233.437	297.258	343.828	361.751	361.651	199.931	257.520	384.975	401.833
Submission 2025	193.329	233.437	297.258	343.828	361.751	361.651	199.931	257.520	384.975	402.121
Änderung absolut	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-289
Änderung relativ	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,07%

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
Flugbenzin										
Submission 2026	2.438	1.142	1.120	697	567	569	214	159	175	133
Submission 2025	2.438	1.142	1.120	698	568	570	214	159	175	130
Änderung absolut	0,00	0,00	0,00	-0,43	-0,35	-0,35	-0,13	-0,10	-0,11	3,05
Änderung relativ	0,00%	0,00%	0,00%	-0,06%	-0,06%	-0,06%	-0,06%	-0,06%	-0,06%	2,34%

Tabelle 59: revidierte Anteile der Inlandsflüge an Treibstoff-Inlandsablieferungen 2023, in %

	Kerosin	Flugbenzin
Submission 2026	3,652	79,2
Submission 2025	3,650	79,2
Änderung absolut	0,003	0,00
Änderung relativ	0,07%	0,00%

Quelle: TREMOD AV (Knörr, Allekotte, et al., 2025)

Tabelle 60: resultierende Revision der Inlandsverbräuche 1990-2023, in Terajoule TJ

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
Flugturbinentreibstoff / Kerosin										
Submission 2026	29.501	29.989	32.746	30.260	30.210	27.605	12.354	9.541	13.914	14.676
Submission 2025	29.501	29.989	32.746	30.260	30.210	27.605	12.354	9.541	13.914	14.676
Änderung absolut	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Änderung relativ	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Flugbenzin										
Submission 2026	2.098	981	964	601	489	491	208	147	163	105
Submission 2025	2.098	981	964	601	490	491	209	147	163	103
Änderung absolut	0,00	0,00	0,00	-0,37	-0,30	-0,31	-0,13	-0,09	-0,10	2,41
Änderung relativ	0,00%	0,00%	0,00%	-0,06%	-0,06%	-0,06%	-0,06%	-0,06%	-0,06%	2,34%
GESAMT-TREIBSTOFFEINSATZ										
Submission 2026	31.599	30.970	33.710	30.861	30.699	28.096	12.563	9.688	14.076	14.781
Submission 2025	31.599	30.970	33.710	30.861	30.699	28.096	12.563	9.688	14.076	14.779
Änderung absolut	0,00	0,00	0,00	-0,37	-0,30	-0,31	-0,13	-0,09	-0,10	2,41
Änderung relativ	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,02%

Quelle: eigene Berechnungen

Entsprechend kommt es auch für alle Jahre ab 2023 zu einer Neuberechnung der Emissionen, wobei diese selbst für 2023 kaum ins Gewicht fällt:

Tabelle 61: revidierte THG-Emissionen 1990-2023, in kt bzw. kt CO_2-Äquivalenten

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
Kohlendioxid - CO_2										
Submission 2026	2.310	2.267	2.467	2.260	2.248	2.057	920	709	1.031	1.083
Submission 2025	2.310	2.267	2.467	2.260	2.248	2.057	920	709	1.031	1.082
Änderung absolut	0,00	0,00	0,00	-0,03	-0,02	-0,02	-0,01	-0,01	-0,01	0,17
Änderung relativ	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,02%
Methan - CH_4										
Submission 2026	0,124	0,100	0,109	0,096	0,091	0,096	0,073	0,078	0,087	0,055
Submission 2025	0,124	0,100	0,109	0,096	0,091	0,096	0,073	0,078	0,087	0,055
Änderung absolut	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Änderung relativ	0,00%	0,00%	0,00%	-0,01%	-0,01%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,15%
Lachgas - N_2O										
Submission 2026	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07	0,03	0,02	0,03	0,04
Submission 2025	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07	0,03	0,02	0,03	0,04
Änderung absolut	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Änderung relativ	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,02%
Gesamt-Treibhausgase										
Submission 2026	2.335	2.290	2.492	2.282	2.270	2.078	930	718	1.043	1.094
Submission 2025	2.335	2.290	2.492	2.282	2.270	2.078	930	718	1.043	1.094
Änderung absolut	0,00	0,00	0,00	-0,03	-0,02	-0,02	-0,01	-0,01	-0,01	0,18
Änderung relativ	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,02%

Quelle: eigene Berechnungen

3.2.8.1.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (1.A.3.a)

Nach der erfolgten grundlegeden Revision des Modells TREMOD AV sind vorerst keine größeren Arbeiten geplant. Das Hauptaugenmerk liegt nunmehr auf der regelmäßigen Aktualisierung des Modells anhand des von der Europäischen Organisation zur Sicherung der Luftfahrt Eurocontrol betriebenen *Advanced Emission Model* (AEM)[24].

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4 Verbesserungen des Inventars, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

[24] https://www.eurocontrol.int/model/advanced-emission-model

3.2.8.2 Transport - Straßenverkehr (1.A.3.b)

3.2.8.2.1 Beschreibung der Kategorie (1.A.3.b)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
L/T	1 A 3 b, Road transport	fossil fuels	CO_2	151889,81	11,75	139371,62	19,70	-8,24
-/-	1 A 3 b, Road transport	0	CH_4	1812,75	0,15	229,38	0,04	-87,35
-/-	1 A 3 b, Road transport	0	N_2O	1123,44	0,09	1306,82	0,19	16,32

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2	Tier 1 [a], CS (Tier 2)	NS / M	D [a], CS
CH_4	Tier 1 [b], CS (Tier 3)	NS / M	D [b], CS (M)
N_2O	Tier 1 [b], CS (Tier 3)	NS / M	D [b], CS (M)
NO_X, CO, NMVOC, SO_2	CS (Tier 3)	NS / M	CS (M)

[a] Biodiesel, Petroleum, in Zweitaktern mitverbrannte Schmierstoffe; [b] Flüssiggas

Die Kategorie „Straßenverkehr“ ist eine Hauptkategorie nach Höhe und Trend der CO_2-Emissionen.

In der genannten Kategorie werden die Emissionen aus dem motorisierten Straßenverkehr in Deutschland berichtet. Berücksichtigt ist der Verkehr auf öffentlichen Straßen im Inland ohne den land- und forstwirtschaftlichen sowie den militärischen Verkehr. Die Berechnungen erfolgen für die Fahrzeugkategorien Personenkraftwagen (PKW), motorisierte Zweiräder (MZR), leichte Nutzfahrzeuge (LNF), schwere Nutzfahrzeuge (SNF) und Busse. Diese werden für die Berechnung in so genannte „Fahrzeugschichten“ mit gleichem Emissionsverhalten untergliedert. Hierzu werden die Fahrzeugkategorien zusätzlich nach der Art des verwendeten Kraftstoffs, der Fahrzeuggröße (Nutzfahrzeuge und Busse nach ihrer Gewichtsklasse; motorisierte Zweiräder nach ihrem Hubraum) und der eingesetzten Schadstoffminderungstechnik gemäß den EU-Richtlinien zur Abgasgesetz-gebung („EURO-Normen“) sowie des regionalen Fahraufkommens (außerorts, innerorts und Autobahn) differenziert.

3.2.8.2.2 Methodische Aspekte (1.A.3.b)

- siehe auch Anhang 7.1.2.2 -

Durch Einführung des Katalysators und motortechnische Verbesserungen infolge der kontinuierlichen Verschärfung der zulässigen Abgaswerte sowie durch verbesserte Kraftstoff-qualitäten sind die Emissionen aus dem Straßenverkehr an CH_4, NO_X, CO, NMVOC und SO_2 seit 1990 drastisch zurückgegangen.

Die starke Abnahme des Methan-Emissionsfaktors für Benzin und damit auch der Methan-Emissionen zwischen 1990 und 1993 ist insbesondere auf die massive Reduzierung der Kraftfahrzeuge mit Zweitaktmotoren in den neuen Bundesländern zurückzuführen. Weitere Minderungen sind Folge der genannten Abgas-Grenzwertverschärfungen.

Für Busse und schwere Nutzfahrzeuge (über 3,5 t zulässiges Gesamtgewicht) wurde der zulässige Abgasgrenzwert für Kohlenwasserstoffe (HC) mit Einführung der EURO III-Norm im Jahr 2000 erheblich gesenkt (-40 %). Da EURO III-Fahrzeuge ab dem Jahr 2000 sehr schnell in den Markt kamen, verminderten sich der Emissionsfaktor und die Emissionen für Kohlenwasserstoffe aus Dieselkraftstoff nach 2000 deutlich. Dies gilt analog für Methan, das als fester Anteil an den Gesamt-HC-Emissionen berechnet wird.

N_2O-Emissionen entstehen hauptsächlich infolge unvollständiger Reduktion von NO zu N_2 im 3-Wege-Katalysator und sind gesetzlich nicht limitiert. Durch die wachsende Zahl von PKW mit Katalysator stiegen die N_2O-Emissionen gegenüber 1990 zunächst an. Neuere Katalysatoren sind jedoch so optimiert, dass nur noch geringe Mengen an Distickstoffoxid entstehen. Infolgedessen nahmen die N_2O-Emissionen im Zeitraum 2000-2006 ab. Seit dem ist wieder ein Anstieg der Emissionen zu verzeichnen. Dieser ist auf den zunehmenden Einsatz der SCR-Technik (Selektive katalytische Reduktion; engl.: selective catalytic reduction) zurückzuführen, bei dem unter bestimmten Bedingungen N_2O als unerwünschtes Nebenprodukt auftritt.

Die CO_2-Emissionen sind direkt vom Kraftstoffverbrauch abhängig. Der Anstieg der Emissionen zwischen 1990 und 1999 ist dadurch begründet, dass die fahrzeugspezifischen Verbrauchsminderungen durch den Zuwachs der Fahrleistungen überkompensiert wurden. Im Zeitraum 2000-2009 sind die Emissionen des Straßenverkehrs aus fossilen Kraftstoffen erstmals gesunken. Diese Entwicklung dürfte im Wesentlichen auf die Verringerung der spezifischen Kraftstoffverbräuche, die deutliche Verschiebung zugunsten von Dieselfahrzeugen bei den Neuzulassungen, den kontinuierlichen Anstieg der Kraftstoffpreise, die Verwendung von Biokraftstoffen, aber auch auf die Verlagerung von Tankvorgängen ins Ausland zurückzuführen sein. Der seit 2019 stark ansteigende Bestand an Elektrofahrzeugen wirkt sich ebenfalls mindernd auf die Emissionen von CO_2 aus.

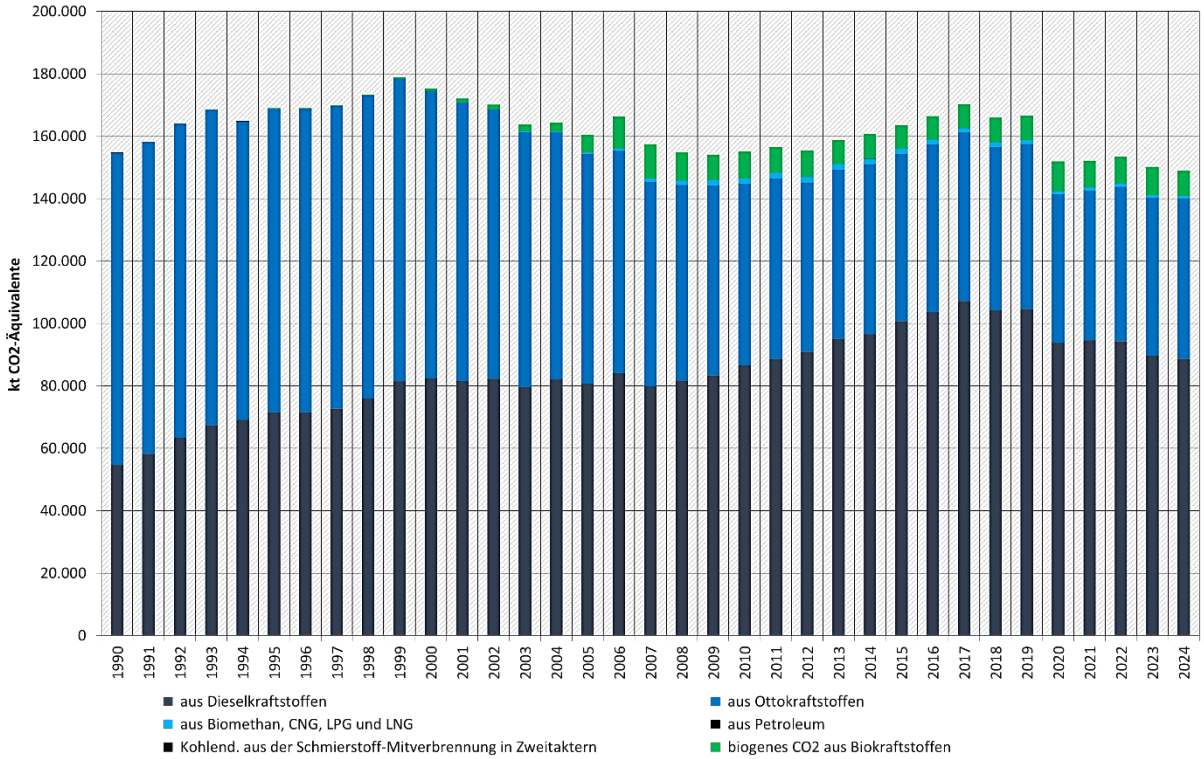
Die CO_2-Emissionen aus den fossilen Anteilen der eingesetzten Biokraftstoffe werden den nationalen Gesamtemissionen zugeordnet (s. Erläuterungen im Anhang 7.1.4).

Eine seit Jahren zunehmende durchschnittliche Motorleistung bei Pkw-Neuzulassungen sowie zunehmende Fahrleistungen führten jedoch dazu, dass die THG-Emissionen bis 2019 wieder auf ein Emissionsniveau gestiegen sind, das um rund 6 Mio. t über dem von 1990 liegt.

Der Großteil des für die Jahre 2020 und 2021 zu beobachtenden deutlichen Emissionsrückganges kann den Auswirkungen der Corona-Pandemie und dem in der Folge geänderten Mobilitätsverhalten zugeschrieben werden. Einen vergleichsweise geringen Beitrag leisteten hier aber auch die gesteigerten Anteile von Elektrofahrzeugen an den Neuzulassungen sowie eine gegenüber 2019 erhöhte Biokraftstoffquote.

Nachdem auch das Jahr 2021 im Zeichen der Pandemie stand, kam es 2022 zu einer gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Erholung, die sich in einem Wiederanstieg der Fahrleistungen niederschlug, ein Anstieg, der durch Effizienzgewinne und die Zunahme der Elektromobilität nur begrenzt kompensiert wurde, sodass die THG-Emisisonen gegenüber 2021 um 1,2 Mio. t anstiegen, damit aber weiterhin deutlich (14 Mio. t) unter dem Wert von 2019 lagen, was nach wie vor im Wesentlichen auf einen Rückgang der Fahrleistungen verglichen mit der Zeit vor der Corona-Pandemie zurückzuführen ist. Wie schon für das Jahr 2023 beobachtet, gingen die Emissionen auch in 2024 erneut zurück. Die Abnahme fällt mit rund 0,34 Mio. t jedoch erheblich geringer aus als im Vorjahr. Diese Entwicklung ist im Wesentlichen auf den weiterhin verringerten Einsatz von Dieselkraftstoffen zurückzuführen, wohingegen der Einsatz von Ottokraftstoffen leicht zugenommen hat.

Abbildung 29: Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen des Straßenverkehrs seit 1990



Quelle: eigene Darstellung, UBA

Die Berechnung der CO_2-Emissionen aus dem motorisierten Straßenverkehr in Deutschland erfolgt durch einen tier2-„*bottom up*“-Ansatz gemäß (IPCC (2006a): Band 2, Kap. 3.2, Seite 3.12): Die in Deutschland verkauften Kraftstoffe (Benzin, Bio-Ethanol, Diesel, Biodiesel, Flüssig- und Erdgas, Petroleum (bis 2002), Biogas) werden dazu innerhalb des Modells TREMOD („Transport Emission Model“) auf die einzelnen Fahrzeugschichten verteilt (vgl. Anhang 7.1.2.2) (Knörr, Heidt, et al., 2025)[25]. Die in das Modell einfließenden Verbrauchsdaten je Kraftstoffart werden den Energiebilanzen entnommen. Die eigentliche Emissionsberechnung erfolgt nach Import der spezifischen Kraftstoffverbräuche und Emissionsfaktoren im ZSE.

Die Berechnung der Nicht-CO_2-Emissionen basiert auf einem in TREMOD implementierten Tier 3-Verfahren, bei dem Fahrleistungen der einzelnen Fahrzeugschichten mit spezifischen Emissionsfaktoren multipliziert werden. Für PKW und leichte Nutzfahrzeuge wird zusätzlich ein „Kaltstart-Zuschlag“ addiert. Der je Kraftstoffart ermittelte Gesamtverbrauch wird mit dem Verbrauch gemäß Energiebilanz abgeglichen und die in TREMOD berechneten Emissionen werden mit aus diesem Abgleich abgeleiteten Korrekturfaktoren korrigiert. Für benzingetriebene Fahrzeuge werden in Abhängigkeit von der Minderungstechnik VOC-Verdampfungsemissionen berechnet. Aus Emissionen und Kraftstoffverbräuchen der einzelnen TREMOD-Fahrzeugschichten werden kraftstoffbezogene nur nach Kraftstoff– und Straßenart (Autobahn, Landstraße, Innerortsstraße) differenzierte implizite Emissionsfaktoren (IEF) in [kg/TJ] abgeleitet und an das ZSE übergeben.

[25] Um Minderungsmaßnahmen ableiten und bewerten zu können, werden mit TREMOD auch der Energieverbrauch und die CO_2-Emissionen der einzelnen Fahrzeugkategorien berechnet. Die Werte werden anschließend mit dem Gesamtverbrauch und der Gesamtemission an CO_2 abgeglichen.

Die eigentliche Emissionsberechnung erfolgt nach Import der spezifischen Kraftstoffverbräuche und impliziten Emissionsfaktoren im ZSE.

Tabelle 62: Emissionen des Straßenverkehrs, in Kilotonnen

	CO_2		CH_4	N_2O	NO_x	CO	NMVOC [c]	SO_2
	Fossil [a]	Biogen [b]						
1990	151.890	0,00	64,7	4,24	1.313	7.598	1.536	72,2
1995	166.452	106	31,9	5,9	1.140	4.332	703	69,3
2000	172.541	869	19,8	5,30	973	2.550	355	19,7
2005	153.734	5.589	13,2	2,9	783	1.635	208	0,81
2010	145.430	8.537	9,4	3,33	654	1.215	127	0,78
2015	154.675	7.487	8,6	4,5	598	1.090	100	0,82
2016	157.432	7.511	8,88	4,80	568	1.061	97,5	0,83
2017	160.958	7.657	9,11	5,16	536	1.029	94,8	0,85
2018	156.409	7.970	8,95	5,19	480	968	89,7	0,83
2019	157.196	7.889	8,96	5,32	433	931	87,8	0,83
2020	140.846	9.528	8,31	5,04	342	771	81,8	0,76
2021	142.075	8.524	8,16	5,10	318	750	79,7	0,76
2022	143.303	8.635	8,45	5,11	297	770	81,8	0,77
2023	139.702	9.008	8,18	4,95	271	776	80,6	0,75
2024	139.372	8.175	8,19	4,93	250	774	80,7	0,74

Quelle: eigene Berechnungen, basierend auf Knörr, Heidt, et al. (2025)

[a] inklusive CO_2 aus den fossilen Anteilen der eingesetzten Biokraftstoffe sowie in Zweitaktern mitverbrannten Schmierstoffen

[b] CO_2-Emissionen aus den biogenen Anteilen der eingesetzten Bio-Kraftstoffen (hier nur nachrichtlich aufgeführt)

[c] inklusive Emissionen aus der Kraftstoffverdunstung

Für die Berechnung mit TREMOD werden zahlreiche Basisdaten aus allgemein zugänglichen Statistiken und speziellen Untersuchungen verwendet, aufeinander abgestimmt und ergänzt. Hauptquellen sowie wichtige Annahmen sollen hier nur kurz vorgestellt werden. Eine detaillierte Beschreibung der Datengrundlagen einschließlich Angaben der verwendeten Quellen sowie der in TREMOD verwendeten Berechnungsmethoden liegt in Knörr, Heidt, et al. (2025) vor.

Für Westdeutschland ab 1990 bis 1993 sowie für Deutschland ab 1994 werden die Kfz-Bestandsdaten aus den offiziellen Bestands- und Neuzulassungsstatistiken des Kraftfahrt-Bundesamtes (KBA) abgeleitet. Basis der Bestandsanalyse für Ostdeutschland im Jahr 1990 waren eine detaillierte Analyse der Abgas-Prüfstelle Adlershof im Jahr 1992 sowie die Zeitreihen in den statistischen Jahrbüchern der DDR. Zwischen 1991 und 1993 musste der Bestand mit Hilfe zahlreicher Annahmen geschätzt werden.

Die Bestandsdaten der Bezugsjahre ab 2001 stehen für TREMOD als Ergebnis einer Datenbankabfrage beim KBA zur Verfügung. Diese liefert die Fahrzeugbestände pro Bezugsjahr in der für die Emissionsberechnung notwendigen Gliederung nach den Merkmalen: Antriebsart (z.B. Otto, Diesel, sonstige), Größenklasse, Fahrzeugalter und Emissionsstandard. Als repräsentativ

für die Flottenzusammensetzung eines Bezugsjahres wird der Bestand zur Jahresmitte angenommen.

Die Fortschreibung der Fahrleistungen wird auf Basis von Verkehr in Kilometern, dem Verkehrsbarometer der BASt und Daten von Destatis und des Kraftfahrtbundesamtes Jamet and Knörr (2022) vorgenommen. Für schwere Nutzfahrzeuge erfolgt darüber hinaus ein Abgleich mit den Daten der Maut-Statistik.

Hinsichtlich der verwendeten Emissionsfaktoren für Kohlendioxid wird hier grundsätzlich auf Anhang 6.6 verwiesen.

Während für alle anderen Kraftstoffe über alle Jahre einheitliche Werte zum Einsatz kommen, stehen für Ottokraftstoffe und Erdgas anhand der in Deutschland produzierten Qualitäten gewichtete jahresspezifische Werte zur Verfügung. Weiterführende Informationen speziell zu Kohlendioxid aus der Schmierstoffmitverbrennung finden sich zudem in Kapitel 4.5.1.

Alle weiteren Emissionsfaktoren sind im „Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs“ (HBEFA) hinterlegt, das zunächst im Rahmen einer Kooperation von Deutschland, Schweiz und Österreich zur Ableitung von Emissionsfaktoren für den Straßenverkehr entstand, und entstammen überwiegend den Messprogrammen des TÜV Rheinland und des RWTÜV sowie grundlegenden Untersuchungen für die Bezugsjahre 1989/1990. In diesen Untersuchungen wurde für PKW und schwere Nutzfahrzeuge eine neue Methodik angewandt, bei der von Fahrverhalten und Verkehrs-situation abhängige Faktoren abgeleitet wurden. Die Emissionsfaktoren für PKW bis zum Baujahr 1994 wurden mit Hilfe von Daten aus einer Feldüberwachung fortgeschrieben. Mittlerweile beteiligen sich auch Frankreich, Schweden und Norwegen an der Entwicklung von HBEFA. Die für die aktuellen Emissionsberechnungen verwendete HBEFA-Version 4.2 (Notter et al., 2019) geht auf Untersuchungsergebnisse aus dem EU-Arbeitskreis COST 346, Messprogrammen der beteiligten Länder und dem Forschungsprogramm ARTEMIS zurück.

Bezüglich der unbeabsichtigten Schmierstoff-Mitverbrennung wird davon ausgegangen, dass die Nicht-CO_2-Emissionen bereits in den entsprechenden Emissionsfaktoren der verwendeten Kraftstoffe abgebildet und hier als IE *(included elsewhere)* zu berichten sind. Kohlendioxid aus der unbeabsichtigten Schmierstoff-Mitverbrennung wird dagegen als Emissionen aus der Produktanwendung unter 2.D.1 berichtet. Im Gegensatz dazu wird Kohlendioxid aus der gewollten Mitverbrennung von Schmierstoffen als Teil des in Straßen-Zweitaktern eingesetzten Kraftstoffgemisches ebenfalls dem Straßenverkehr zugerechnet und in den CRT-Tabellen unter 1.A.3.b v berichtet.

Verlagerung von Tankvorgängen ins Ausland

Aufgrund eines teilweise starken Preisgefälles zu mehreren Nachbarstaaten werden hierzulande seit längerem aber auch Kraftstoffe eingesetzt, die jenseits der Grenzen gekauft und als Grauimporte nach Deutschland eingeführt werden.

Zum Umfang dieses in erster Linie für den Güterverkehr und den Pkw-Verkehr für die grenznahen Regionen Deutschlands bedeutenden und als „Tanktourismus“ bezeichneten Phänomens können keine genauen Angaben gemacht werden. Ein belastbares Gesamtbild existiert trotz mehrerer Detailuntersuchungen nicht (Lenk et al., 2004; Tietge et al., 2020). Belegt wird die Verlagerung von Tankvorgängen ins Ausland (und der damit verbundene negative Einfluss auf die Emissionsinventare der Nachbarstaaten) unter anderem auch durch eine vom österreichischen Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft veröffentlichten Studie (Molitor et al., 2004). Einerseits profitieren die

Nachbarstaaten von Mehreinnahmen aus der Energiebesteuerung dieser Treibstoffe, andererseits schlagen die Kraftstoffabsätze in deren Treibhausgasinventaren zu Buche.

3.2.8.2.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (1.A.3.b)

Im Rahmen eines Gutachens wurden die Unsicherheiten der in TREMOD einfließenden Aktivitätsdaten sowie der darin erzeugten Emissionsfaktoren für Methan und Distickstoffoxid ermittelt (Allekotte et al., 2023). Die Unsicherheiten der Kohlendioxid-Emissionsfaktoren basieren dagegen auf Expertenschätzungen und Brennstoffanalysen.

Tabelle 63: relative Unsicherheiten der Kohlendioxid-Emissionsfaktoren*

Kraftstoff	relative Unsicherheit
Dieselkraftstoffe	±3,00 %
Ottokraftstoffe	±0,40 %
Erdgas (in Form von CNG &LNG)	±1,00 %
Flüssiggas (LPG)	±2,00 %
Biodiesel	±5,00 %
Bioethanol	±1,00 %
Biomethan	±5,00 %

* untere und obere Grenze des 95%-Perzentils; basierend auf Expertenschätzungen und Brennstoffanalysen

Tabelle 64: relative Unsicherheiten der Aktivitätsdaten (AD) und IEF für Methan und Lachgas*, in %

	AD		IEF CH_4		IEF N_2O	
	U_{Min}	U_{Max}	U_{Min}	U_{Max}	U_{Min}	U_{Max}
1.A.3.b i – Personenkraftwagen						
Dieselkraftstoffe	-18,5	27,0	-47,4	95,1	-36,5	74,7
Ottokraftstoffe	-17,3	27,5	-36,2	53,0	-33,5	81,6
Erdgas	-30,2	52,2	-24,3	40,8	-31,8	50,7
Flüssiggas	-34,0	53,7	-36,7	77,7	-84,8	354,0
Biodiesel	-18,6	26,9	-47,5	95,6	-36,9	75,8
Bioethanol	-17,5	27,3	-36,1	52,4	-33,3	80,2
1.A.3.b ii - Leichte Nutzfahrzeuge						
Dieselkraftstoff	-14,0	18,2	-46,2	101	-35,8	67,5
Ottokraftstoff	-20,6	28,6	-30,1	37,8	-21,9	30,4
Erdgas	-21,7	36,4	-35,5	59,9	-23,3	31,5
Biodiesel	-14,3	18,8	-46,1	103,0	-35,8	68,2
Bioethanol	-20,8	28,8	-30,4	37,5	-21,9	30,7
1.A.3.b iii - Schwere Nutzfahrzeuge (inkl. Busse)						
Dieselkraftstoff	-25,8	34,1	-36,1	51,7	-28,8	51,4
Erdgas	-27,0	40,8	-18,8	34,7	NA	NA
LNG	-35,9	48,0	-14,2	11,4	NA	NA
Biodiesel	-25,8	33,9	-36,5	52,0	-28,9	52,8

	AD		IEF CH_4		IEF N_2O	
	U_{Min}	U_{Max}	U_{Min}	U_{Max}	U_{Min}	U_{Max}
1.A.3.b iv - motorisierte Zweiräder (Mopeds & Motorräder)						
Ottokraftstoff	-27,4	45,1	-22,5	29,4	-25,7	46,4
Bioethanol	-27,1	44,9	-22,5	29,9	-25,6	45,5

* untere und obere Grenze des 95%-Perzentils; modelliert

3.2.8.2.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (1.A.3.b)

Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Zur Qualitätssicherung der Energiebilanzen liegen dem Umweltbundesamt entsprechende Qualitätsberichte der AGEB vor. Außerdem wurde eine Dokumentation zur Überarbeitung der Energiebilanzen ab dem Jahr 2003 im Internet veröffentlicht[26].

Tabelle 65: Übersicht relevanter Datenvergleiche

	Vergleich mit...	Erläuterung
CO_2, CH_4, N_2O	alternativen Emissionsinventaren für Deutschland	keine vergleichbaren Datensätze
CO_2	spezif. Tier1-defaults gemäß (IPCC, 2006a): Band 2, Kapitel 3, Tabelle 3.2.1	keine Defaults für Biokraftstoffe und Petroleum
CO_2	Tier1-defaults gemäß (IPCC, 2006a): Band 2, Kap. 3, Tab. 2.4	siehe Tabelle 66
CH_4, N_2O	spezif. Tier1-defaults gemäß (IPCC, 2006a): Band 2, Kapitel 3, Tabelle 3.2.2	Ergebnisse kaum aussagekräftig
CH_4, N_2O	Tier1-defaults gemäß (IPCC, 2006a): Band 2, Tabelle 2.4	Ergebnisse kaum aussagekräftig
CO_2, CH_4, N_2O	spezifischen IEF anderer Staaten	siehe Tabelle 67

Tabelle 66: Vergleich der verwendeten EF (CO_2) mit Default-Werten, in kg/TJ

	Inventarwert [a]	Default [b]	Untergrenze	Obergrenze
fossile Dieselkraftstoffe	74.027	74.100	72.600	74.800
fossile Ottokraftstoffe	72.782	69.300	67.500	73.000
Erdgas (CNG & LNG)	56.352	56.100	54.300	58.300
Flüssiggas	66.333	63.100	61.600	65.600
Petroleum	74.000	-	-	-
mitverbrannte Schmierstoffe	73.300		71.900	75.200
Biodiesel	70.800		59.800	84.300
Bioethanol	71.607	70.800	59.800	84.300
Biomethan	56.352	54.600	46.200	66.000

[a] verwendet für das Berichtsjahr 2024; [b] gemäß IPCC (2006a): Kapitel 2, Tabelle 2.4

[26] AG Energiebilanzen: Erläuterungen zur Revision der Energiebilanzen 2003 – 2009 URL: http://www.ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=7&clang=0#revision_der_energiebilanzen_2003_bis_2009_05 (Aufruf vom 18.09.2013)

Tabelle 67: internationaler Vergleich verwendeten CO_2-Emissionsfaktoren, in kg/TJ

	Benzin	Diesel	LPG	CNG & LNG	Biomasse	Biodiesel	Bioethanol	Biomethan
Deutschland	72.782	74.027	66.333	56.352		70.800	71.607	56.352
Belgien	72.270	74.240	64.930	57.150	71.950			
Dänemark	72.990	74.090	63.100	56.800	74.449			
Frankreich	74.890	74.840	65.250	56.350	70.120			
Italien	72.620	73.510	65.599	58.500	74.091			
Niederlande	72.200	72.450	66.700	56.400	72.097			
Spanien	74.820	73.680	65.670	56.140	76.786			
EU-27	73.040	73.939	65.390	57.830	72.184			
Großbritannien	70.250	73.520	IE	IE	IE			

Deutschland: verwendet für das Berichtsjahr 2024; andere Länder: gemäß UNFCCC GHG Locator 2023

Für einen detaillierten Vergleich der impliziten Emissionsfaktoren für Methan und Distickstoffoxid mit den Angaben anderer Staaten sowie den sich für die EU(27) ergebenden Werten wird auf Anhang 7.1.2.3.3 dieses Berichtes verwiesen.

3.2.8.2.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (1.A.3.b)

Gegenüber der Submission 2025 erfolgten Rückrechnungen sowohl aufgrund revidierter Aktivitätsdaten als auch Emissionsfaktoren.

Dabei kam es einerseits zu einer geplanten Revision der Energiebilanzen 2003 bis 2022, andererseits wurden die zuletzt noch vorläufigen Angaben der Energiebilanz 2023 durch finale Werte ersetzt.

Tabelle 68: revidierte Energieeinsätze 2003-2023, in Terajoule

	2003	2004	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
Fossiler Diesel									
Submission 2026	1.069.729	1.102.318	1.081.211	1.155.828	1.342.885	1.244.496	1.255.404	1.252.038	1.189.167
Submission 2025	1.035.240	1.035.496	1.032.053	1.142.946	1.324.400	1.261.942	1.241.273	1.248.164	1.195.950
Änderung absolut	34.490	66.822	49.157	12.883	18.485	-17.446	14.131	3.874	-6.783
Änderung relativ	3,33%	6,45%	4,76%	1,13%	1,40%	-1,38%	1,14%	0,31%	-0,57%
Biodiesel									
Submission 2026	29.948	38.886	72.055	89.471	73.652	103.010	87.149	86.632	88.469
Submission 2025	29.948	38.831	71.956	89.399	73.570	103.219	87.043	86.588	88.638
Änderung absolut	0,00	55,1	100	71,5	82,4	-209	106	44,3	-169
Änderung relativ	0,00%	0,14%	0,14%	0,08%	0,11%	-0,20%	0,12%	0,05%	-0,19%
Fossile Ottokraftstoffe									
Submission 2026	1.107.428	1.073.174	1.002.361	790.544	731.258	649.012	653.665	674.363	690.409
Submission 2025	1.111.873	1.035.690	982.008	781.262	759.221	638.820	637.768	670.246	691.899
Änderung absolut	-4.446	37.484	20.353	9.282	-27.963	10.192	15.897	4.117	-1.490
Änderung relativ	-0,40%	3,62%	2,07%	1,19%	-3,68%	1,60%	2,49%	0,61%	-0,22%

	2003	2004	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
Bioethanol									
Submission 2026		1.143	6.809	30.548	30.770	28.734	30.160	31.169	32.793
Submission 2025		1.142	6.807	30.350	30.646	28.640	30.050	31.064	32.683
Änderung absolut		0,65	2,47	199	124	93,6	110	106	110
Änderung relativ		0,06%	0,04%	0,66%	0,40%	0,33%	0,37%	0,34%	0,34%
Erdgas (CNG & LNG)									
Submission 2026	2.488	2.774	3.127	5.491	5.837	4.727	8.047	7.858	6.943
Submission 2025	2.488	2.774	3.127	8.498	4.595	2.881	7.144	7.749	6.886
Änderung absolut	0	0	0	-3.007	1.242	1.846	903	108	57,4
Änderung relativ	0,00%	0,00%	0,00%	-35,4%	27,0%	64,1%	12,6%	1,40%	0,83%
Flüssiggas (LPG)									
Submission 2026	697	1.892	2.369	22.987	18.709	10.205	9.520	9.054	7.921
Submission 2025	697	1.892	2.369	22.982	18.709	10.213	10.138	11.761	7.927
Änderung absolut	0,00	0,00	0,00	4,51	0,00	-7,53	-618	-2.706	-5,86
Änderung relativ	0,00%	0,00%	0,00%	0,02%	0,00%	-0,07%	-6,10%	-23,0%	-0,07%
Biomethan									
Submission 2026				270	1.242	3.181	3.474	4.796	7.035
Submission 2025				270	1.242	3.181	3.474	3.821	5.218
Änderung absolut				0,00	0,00	0,00	0,00	975	1.817
Änderung relativ				0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	25,5%	34,8%
Schmierstoffe (im Zweitakter-Gemisch)									
Submission 2026	72,8	72,4	79,3	82,5	80,4	82,6	73,0	78,1	68,9
Submission 2025	72,8	72,4	77,7	81,6	83,3	81,6	72,2	78,6	69,5
Änderung absolut	0,00	0,00	1,60	0,95	-2,94	1,04	0,80	-0,52	-0,58
Änderung relativ	0,00%	0,00%	2,06%	1,17%	-3,52%	1,28%	1,11%	-0,66%	-0,83%
GESAMT-ENERGIEEINSATZ 1.A.3.b									
Submission 2026	2.210.363	2.220.259	2.168.012	2.095.222	2.204.434	2.043.447	2.047.493	2.065.989	2.022.807
Submission 2025	2.180.319	2.115.897	2.098.398	2.075.788	2.212.467	2.048.976	2.016.964	2.059.472	2.029.271
Änderung absolut	30.044	104.361	69.614	19.434	-8.033	-5.530	30.529	6.517	-6.464
Änderung relativ	1,38%	4,93%	3,32%	0,94%	-0,36%	-0,27%	1,51%	0,32%	-0,32%

Quelle: Knörr, Heidt, et al. (2025) basierend auf AGEB (2025c)
Schmierst.: als Teil von Zweitaktergemisch 1:50, verbrannt in Zweitakt-Ottomotoren

Hinzu kommt eine Korrektur der Kohlendioxid-Emissionsfaktors für Benzin und Flüssiggas für 2023:

Tabelle 69: revidierte Emissionsfaktoren für 2023, in [kg/TJ]

	Ottokraftstoff	Flüssiggas
Submission 2026	72.782	66.333
Submission 2025	72.787	66.334
Änderung absolut	-4,16	-0,01
Änderung relativ	-0,01%	0,00%

Veränderungen an den spezifischen Tier-3-Emissionsfaktoren für Methan und Lachgas erfolgten analog zu Anpassungen in TREMOD. Eine sinnvolle Darstellung dieser revidierten Datensätze ist hier nicht möglich.

Die nachfolgende Tabelle liefert abschließend einen Vergleich der aktuellen und mit Submission 2025 berichteten Emissionsmengen.

Tabelle 70: revidierte Treibhausgas-Emissionen 2003-2023, in kt CO_2-Äquivalenten

	2003	2004	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
Submission 2026	161.637	161.555	154.862	146.576	156.115	142.415	143.655	144.895	141.244
Submission 2025	159.405	153.826	149.711	145.103	156.694	142.885	141.425	144.479	141.863
Änderung absolut	2.232	7.730	5.151	1.473	-578	-471	2.230	416	-619
Änderung relativ	1,40%	5,03%	3,44%	1,02%	-0,37%	-0,33%	1,58%	0,29%	-0,44%

Quelle: eigene Berechnungen

3.2.8.2.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (1.A.3.b)

Abgesehen von der alljährlichen Revision des Modells TREMOD sind keine kategoriespezifischen Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4 Verbesserungen des Inventars, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

3.2.8.3 Transport - Schienenverkehr (1.A.3.c)

3.2.8.3.1 Beschreibung der Kategorie (1.A.3.c)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
L/T	1 A 3 c, Rail Transport	fossil fuels	CO_2	3133,05	0,25	742,99	0,11	-76,29
-/-	1 A 3 c, Rail Transport	0	CH_4	19,73	0,01	0,26	0,01	-98,66
-/-	1 A 3 c, Rail Transport	0	N_2O	6,83	0,01	1,64	0,01	-76,00

Gas	angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2	Tier 1 [a], CS (Tier 2)	NS	D [a], CS
CH_4	CS (Tier 2)	NS	D [b, c, d]
N_2O	CS (Tier 2)	NS	D [d], CS
NO_x, CO, NMVOC, SO_2	CS (Tier 2)	NS	CS

[a] Biodiesel: gemäß ((IPCC (2006a): Tab. 2.4);

[b] Diesel: gemäß (EMEP/EEA (2023): 1.A.3.c – *Railways*; Tab. 3-2 bis 3-4);

[c] Steinkohle & Steinkohlekoks: gemäß (IPCC (2006a): Tab. 3.4.1);

[d] Braunkohlen: gemäß (IPCC (2006a): Tab. 2.5)

Die Kategorie „Schienenverkehr“ ist für CO_2-Emissionen eine Hauptkategorie nach der Emissionshöhe und dem Trend.

Der Schienenverkehr in Deutschland wird langfristig mit dem Ziel modernisiert, als Energieform v.a. elektrischen Strom zu nutzen. Dessen Anteil an der zur Traktion eingesetzten Endenergie

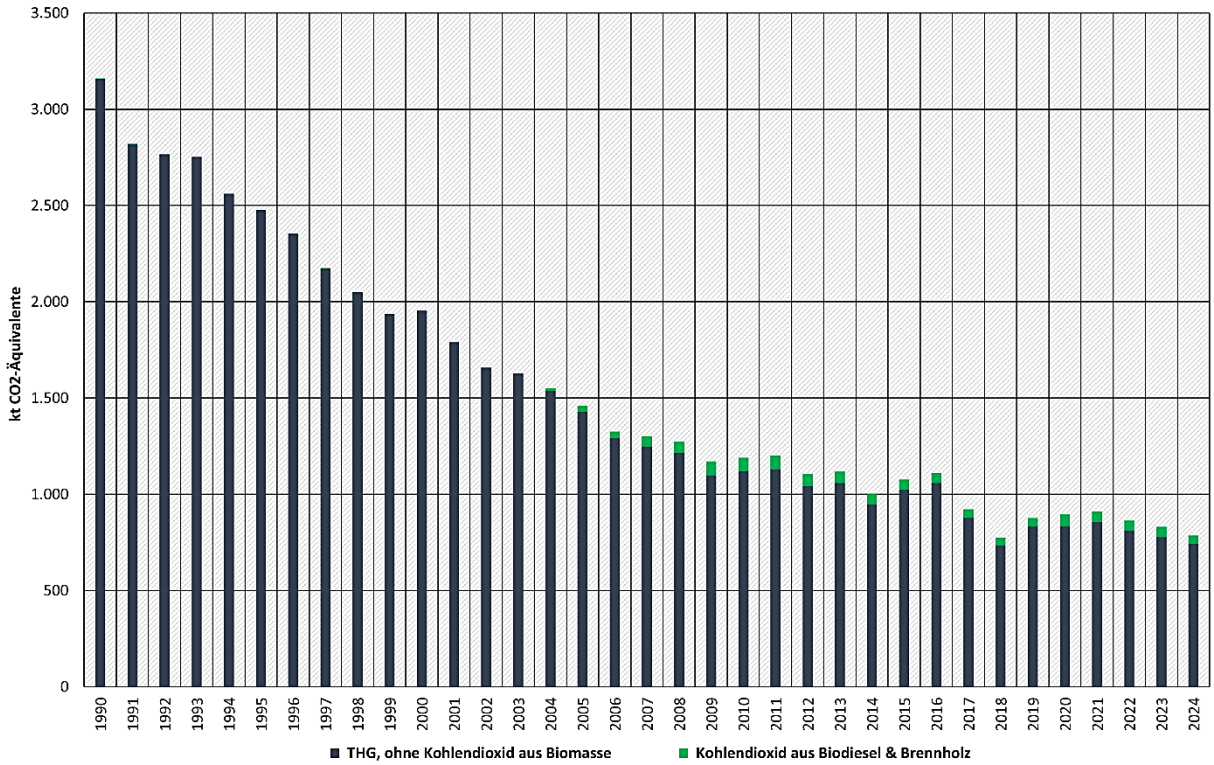
liegt aktuell bei etwa 81 % (AGEB, 2025c). Die betriebenen Bahnstrom-Kraftwerke sind dem stationären Anteil der Stromerzeugung in öffentlichen Kraftwerken (1.A.1.a) zugeordnet und werden hier nicht weiter betrachtet.

Für die Energieversorgung spielt neben elektrischem Strom nur noch Dieselkraftstoff eine bedeutende Rolle. In Form von Beimengungen kommt seit 2004 zudem Biodiesel zum Einsatz.

In historischen Fahrzeugen werden darüber hinaus geringe Mengen fester Brennstoffe verwendet.

Der Einsatz weiterer Energieträger speziell in privaten Kleinbahnen, z.B. Pflanzenöle oder Gas, wird bisher nicht erfasst und ist als vernachlässigbar anzusehen.

Abbildung 30: Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen des Schienenverkehrs, seit 1990



Quelle: eigene Darstellung, UBA

* ohne Treibhausgase aus der Erzeugung von Bahnstrom und CO2 aus der unbeabsichtigten Mitverbrennung von Schmierstoffen

3.2.8.3.2 Methodische Aspekte (1.A.3.c)

Die Emissionen werden als Produkt aus den verbrauchten Kraft- und Brennstoffen und landesspezifischen Emissionsfaktoren berechnet. Dieses Vorgehen entspricht der allgemeinen Tier 2-Methode und der prinzipiellen Berechnungsvorschrift nach Gleichung 3.4.2 der IPCC Guidelines 2006 (Band 2, Seite 3.42).

Die CO_2-Emissionen aus den fossilen Anteilen der eingesetzten Biokraftstoffe werden mit dieser Berichterstattung separat ausgewiesen und den nationalen Gesamtemissionen zugeordnet (s. Erläuterungen im Anhang 7.1.4).

Die Aktivitätsraten (Energieeinsätze) werden grundsätzlich den Energiebilanzzeilen 74 (bis 1994) bzw. 61 (ab 1995) (AGEB, 2025c) entnommen.

Auswertbare Verbrauchsdaten für Festbrennstoffe sind in den offiziellen Energiebilanzen für Braunkohle lediglich bis 2002, für Steinkohle bis 2000 verfügbar. Hier wird ergänzend auf Ergebnisse dreier in 2012, 2016 und 2021 erfolgter Erhebungen (Hasenbalg & Sohnke, 2021; Hedel & Kunze, 2012; Illichmann, 2016) sowie Inter- und Extrapolationen zurückgegriffen.

Tabelle 71: Überblick der verwendeten Statistiken und sonstigen Quellen

Brennstoff	verwendete Quelle(n)
Diesel	AGEB
Biodiesel	berechnet gemäß offizieller Beimengungsraten
Steinkohle	bis 1994: AGEB; 1995-2004: Interpolation, ab 2005: Erhebung; ab 2016: Fortschreibung
Steinkohlekoks	bis 1997: AGEB; 1998-2004: Interpolation; 2005-2010: Erhebung; ab 2011: Extrapolation
Rohbraunkohle & -briketts	1990-2002: AGEB; danach nicht mehr eingesetzt

Hinsichtlich der verwendeten Emissionsfaktoren für Kohlendioxid wird hier grundsätzlich auf Anhang 6.6 verwiesen.

Für Methan und Lachgas kommen landesspezifische Werte gemäß (Knörr, Heidt, et al. (2025): Flüssigkraftstoffe) bzw. Default-Werte gemäß (IPCC (2006a): Festbrennstoffe) zum Einsatz. Bezüglich der Freisetzung dieser beiden Treibhausgase aus der Schmierstoff-Mitverbrennung wird davon ausgegangen, dass diese bereits in den entsprechenden Emissionsfaktoren der verwendeten Kraftstoffe berücksichtigt und daher als IE *(included elsewhere)* zu berichten ist.

Tabelle 72: für das Berichtsjahr 2024 verwendete Emissionsfaktoren, in kg/TJ

	CH_4	N_2O	Ursprung
Diesel & Biodiesel	0,83 (4,15)	0,56 (28,60)	CH_4: gemäß Knörr, Heidt, et al. (2025); N_2O: Tier2 nach EMEP/EEA (2023)
Rohbraunkohle & -briketts	300 (-)	1,50 (-)	Brennstoffe in 2024 nicht eingesetzt
Steinkohle & Steinkohlekoks	2,00 (2,00)	1,50 (1,50)	Verwendung der Sektor-spezifischen IPCC-defaults für „sub-bituminous coal“
Brennholz	100	1,00	abgeleitet von stationärer Kleinfeuerung
Schmierstoffe	IE	IE	bereits in den EF der flüssigen Kraftstoffe abgebildet

in Klammern: Sektor-spezifische Vorgabe-Werte gemäß IPCC (2006a), Band 2, Kap. 3.4 - Railways

3.2.8.3.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (1.A.3.c)

Im Rahmen eines Gutachtens (Knörr et al., 2009) wurden die Unsicherheiten der in TREMOD einfließenden Aktivitätsdaten, der modellierten impliziten Emissionsfaktoren und der im Zentralen System Emissionen (ZSE) berechneten Emissionen ermittelt.

Tabelle 73: prozentuale Unsicherheiten der Aktivitätsdaten und Emissionsfaktoren *

	AD	EF CO_2	EF CH_4	EF N_2O
Dieselkraftstoffe	±10%	±3%	±34%	-42,5% / 75%
Braunkohlenbriketts	±20%	±5%	-28,1% / 40%	-42,5% / 75%
Rohbraunkohle	±20%	±3%	-28,1% / 40%	-42,5% / 75%
Steinkohle	±20%	±2%	-28,1% / 40%	-42,5% / 75%
Steinkohlenkoks	±20%	±2%	-28,1% / 40%	-42,5% / 75%
Brennholz	±10%	±5%	-42,5% / 75%	±75%
Biodiesel	±10%	±5%	-28,1% / 40%	-42,5% / 75%

* untere und obere Grenze des 95%-Perzentils

Die Aktivitätsraten-Zeitreihen für Braunkohlenbriketts, Steinkohle und Steinkohlenkoks weisen durch die Umstellung der Statistiken 1994/1995 Inkonsistenzen auf, die nicht beseitigt werden können.

3.2.8.3.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (1.A.3.c)

Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Zur Qualitätssicherung der Energiebilanzen liegen dem Umweltbundesamt entsprechende Qualitätsberichte der AGEB vor. Außerdem wurde eine Dokumentation zur Überarbeitung der Energiebilanzen ab dem Jahr 2003 im Internet veröffentlicht.

Tabelle 74: Übersicht relevanter Vergleiche

	Vergleich mit...	Erläuterung
CO_2, CH_4, N_2O	alternativen Emissionsinventaren für Deutschland	keine vergleichbaren Datensätze
CO_2	spezif. Default-EF gemäß IPCC (2006a): Band 2, Kapitel 3.4, Tab. 3.4.1	nicht für alle Brennstoffe
CO_2	Default-EF gemäß IPCC (2006a): Band 2, Kapitel 2, Tabelle 2.4	Siehe Tabelle 75
CH_4, N_2O	spezif. Default-EF gemäß IPCC (2006a): Band 2, Kapitel 3.4, Tab. 3.4.1	siehe Tabelle 72
CH_4, N_2O	Default-EF gemäß IPCC (2006a): Band 2, Kapitel 2, Tabelle 2.4	Ergebnisse kaum aussagekräftig
CO_2, CH_4, N_2O	IEF anderer Staaten	siehe Tabelle 76

Tabelle 75: Vergleich der verwendeten EF (CO_2) mit Default-Werten [a], in kg/TJ

	Inventarwert [b]	Default	Untergrenze	Obergrenze
fossiler Dieselkraftstoff	74.027	74.100	72.600	74.800
Braunkohlebriketts	100.979	97.500	87.300	109.000
Rohbraunkohle	103.612	101.000	90.900	115.000
Steinkohle	94.386	94.600	89.500	99.700
Steinkohlekoks	109.568	107.000	95.700	119.000
Biodiesel	70.800		59.800	84.300
Brennholz	102.108	112.000	95.000	132.000

[a] für das Berichtsjahr 2022; [b] gemäß IPCC (2006a): Band 2, Tab. 2.4

Die folgende Tabelle erlaubt einen Vergleich mit spezifischen impliziten Emissionsfaktoren anderer Staaten sowie den sich für die EU(27) ergebenden Werten.

Tabelle 76: länderübergreifender Vergleich der berichteten IEF, in kg/TJ

	fossile Flüssigbrennstoffe			fossile Festbrennstoffe		
	CO_2	CH_4	N_2O	CO_2	CH_4	N_2O
Deutschland	74.027	0,83	0,56	94.426	3,05	1,50
Belgien	74.100	4,94	6,86	NO	NO	NO
Dänemark	74.173	1,06	2,24	NO	NO	NO
Frankreich	74.247	10,60	2,95	IE	IE	IE

	fossile Flüssigbrennstoffe			fossile Festbrennstoffe		
	CO_2	CH_4	N_2O	CO_2	CH_4	N_2O
Italien	74.320	4,21	29,04	NO	NO	NO
Niederlande	74.394	4,26	0,56	NO	NO	NO
Spanien	74.467	4,15	0,56	NO	NO	NO
EU-27	74.541	2,95	10,80	94.991	49,77	1,10
Großbritannien	74.614	0,93	0,56	96.100	87,57	0,70

Quellen: [a] IEF für das Berichtsjahr 2025; sonst: IEF für 2021 gemäß CRF-Submission 2023

3.2.8.3.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (1.A.3.c)

Gegenüber der Submission 2025 erfolgten Rückrechnungen einzig aufgrund revidierter Aktivitätsdaten. Während für fossilen Diesel dabei nur der zuletzt noch vorläufige Wert gemäß Energiebilanz 2023 berichtigt wurde, kommt es für Biodiesel zu Anpassungen in der gesamten Zeitreihe.

Tabelle 77: revidierte Aktivitätsdaten, in Terajoule [TJ]

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
Dieselkraftstoff										
Submission 2026	38.605	31.054	25.410	18.877	14.626	13.321	10.782	11.072	10.482	10.035
Submission 2025	38.605	31.054	25.410	18.877	14.626	13.321	10.782	11.072	10.482	10.039
Änderung absolut	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-3,75
Änderung relativ	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,04%
Biodiesel										
Submission 2026				416	966	729	892	769	725	747
Submission 2025				434	976	738	882	776	727	744
Änderung absolut				-17,98	-9,97	-9,34	10,55	-7,81	-1,88	2,54
Änderung relativ				-4,14%	-1,02%	-1,27%	1,20%	-1,01%	-0,26%	0,34%
GESAMT-ENERGIEEINSATZ										
Submission 2026	41.381	32.681	26.065	19.576	15.924	14.401	11.982	12.167	11.534	11.108
Submission 2025	41.381	32.681	26.065	19.594	15.934	14.411	11.972	12.175	11.536	11.110
Änderung absolut	0,00	0,00	0,00	-17,98	-9,97	-9,34	10,55	-7,81	-1,88	-1,21
Änderung relativ	0,00%	0,00%	0,00%	-0,09%	-0,06%	-0,06%	0,09%	-0,06%	-0,02%	-0,01%

Quellen: AGEB (2025c); Knörr, Heidt, et al. (2025)

Die Korrektur des Kohlendioxid-Emissionsfaktors für Brennholz hat keine Auswirkungen auf die berichteten Emissionen.

Aus den beschriebenen Anpassungen resultieren folgende rekalkulierte Emissionen:

Tabelle 78: revidierte Emissionsmengen, in [kg] bzw. [kt CO_2-Äquivalente]

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
Kohlendioxid – CO_2[a]										
Submission 2026	3.133	2.458	1.945	1.426	1.118	1.022	830	853	810	777
Submission 2025	3.133	2.458	1.945	1.426	1.118	1.022	830	853	810	777
Änderung absolut	0,00	0,00	0,00	-0,07	-0,04	-0,04	0,04	-0,03	-0,01	-0,27
Änderung relativ	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,03%
Methan – CH_4										
Submission 2026	0,70	0,47	0,19	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Submission 2025	0,70	0,47	0,19	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Änderung absolut	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Änderung relativ	0,00%	0,00%	0,00%	-0,08%	-0,06%	-0,06%	0,08%	0,03%	-0,02%	0,01%
Lachgas – N_2O										
Submission 2026	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Submission 2025	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Änderung absolut	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Änderung relativ	0,00%	0,00%	0,00%	-0,09%	-0,06%	-0,06%	0,08%	-0,06%	-0,02%	-0,01%
Gesamt-THG[a]										
Submission 2026	3.160	2.477	1.954	1.430	1.121	1.024	833	856	812	779
Submission 2025	3.160	2.477	1.954	1.430	1.121	1.025	833	856	812	779
Änderung absolut	0,00	0,00	0,00	-0,07	-0,04	-0,04	0,04	-0,03	-0,01	-0,27
Änderung relativ	0,00%	0,00%	0,00%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	-0,03%

Quelle: eigene Berechnungen; [a] inkl. *fossiles* CO_2 aus der Verwendung von Biodiesel

3.2.8.3.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (1.A.3.c)

Derzeit sind keine neuen Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4 Verbesserungen des Inventars, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

3.2.8.4 Transport - Schiffsverkehr (1.A.3.d)

3.2.8.4.1 Beschreibung der Kategorie (1.A.3.d)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
L/-	1 A 3 d, National Shipping	fossil fuels	CO_2	3013,77	0,24	1410,58	0,20	-53,20
-/-	1 A 3 d, National Shipping	0	CH_4	2,65	0,01	10,07	0,01	280,56
-/-	1 A 3 d, National Shipping	0	N_2O	18,68	0,01	10,42	0,01	-44,22

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2	CS (Tier 2)	NS/IS/M	D[a]/CS
CH_4	CS (Tier 2)	NS/IS/M	CS (M)
N_2O	CS (Tier 2)	NS/IS/M	CS (M)
NO_x, CO, NMVOC, SO_2	CS (Tier 2)	NS/IS/M	CS (M)

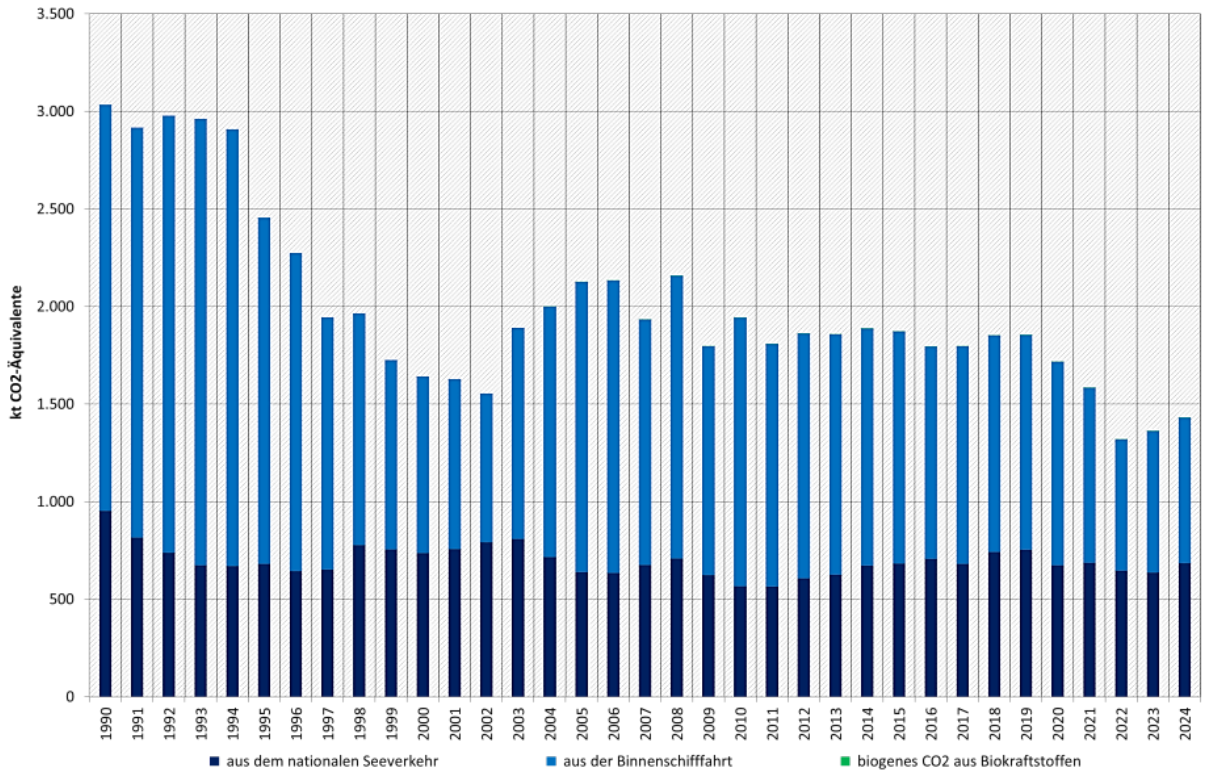
Die Kategorie „nationaler Schiffsverkehr“ ist für Kohlendioxid eine Hauptkategorie nach der Methode 1 Analyse.

Der Schiffsverkehr ist in nationalen Seeverkehr und Binnenschifffahrt sowie internationale Seeschifffahrt zu unterscheiden. Die Emissionen aus dem internationalen Schiffsverkehr werden in den Emissionsinventaren nachrichtlich ausgewiesen, gehen aber nicht in die Gesamtemissionen ein.

Der Kategorie 1.A.3.d – nationaler Schiffsverkehr sind im ZSE die Binnenschifffahrt sowie der nationale Seeverkehr, d.h. Fahrten zwischen dt. Seehäfen, zugeordnet.

Die folgende Grafik zeigt die Entwicklung der Treibhausgasemissionen des inländischen Schiffsverkehrs unterteilt in Binnenschifffahrt und nationalen Seeverkehr seit 1990.

Abbildung 31: Treibhausgas-Emissionen der nationalen Schiffsverkehrs seit 1990



Quelle: eigene Darstellung, UBA

3.2.8.4.2 Methodische Aspekte (1.A.3.d)

Für den „nationalen Seeverkehr“ werden sämtliche primäre Eingangsdaten in einem am Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) betriebenen Modell gemäß dem Tier3-Ansatz nach (EMEP/EEA (2023): Sectoral guidance chapters, 1.A.3.d Navigation (shipping)) zusammengeführt (Deichnik, 2025). Die hier zugrunde gelegten AIS-Bewegungsdaten liegen

dabei aktuell erst ab dem Jahr 2012 vor. Für die Zeitspanne 1990 bis 2011 wurden die spezifischen Verbrauchsanteile von nationalem und militärischem Seeverkehr sowie Fischerei dagegen anhand der jährlichen Entwicklung geeigneter Indikatoren (u.a. Verkehrsleistung Nord-Ostsee-Kanal, Entwicklung der Flotten in Militär und Fischerei) abgeleitet.

Für die „Binnenschifffahrt" erfolgt die Zusammenführung primärer Daten in Form eines Tier2-Ansatzes in TREMOD (Knörr, Heidt, et al., 2025). In das Modell gehen sowohl Emissionswerte aus Prüfstandmessungen als auch Daten zu spezifischen Energieverbräuchen ein. Letztere wurden mit einem auf der Binnenschifffahrtsstatistik des Statistischen Bundesamtes beruhenden Verkehrsmengengerüst verknüpft und können nach Schiffstypen und -größen sowie Beladungen und Gewässertypen differenziert werden.

Als Quelle der Aktivitätsdaten dient, wie für den gesamten Sektor 1.A, grundsätzlich (AGEB (2025c), beruhend auf BAFA).

In den amtlichen Bilanzen der AGEB und des BAFA erfolgt die Aufteilung in *inländisch* (AGEB: „Küsten- und Binnenschifffahrt" = BAFA: „an die Binnenschifffahrt") und *international* (AGEB: „Hochseebunkerungen" = BAFA: „Bunker int. Schifffahrt") anhand der unterschiedlichen Besteuerung der Schiffskraftstoffe.

Hinsichtlich des Schiffsverkehrs wird in der NEB – anhand steuerlicher Gesichtspunkte – in Hochseebunkerungen (EBZ 6) sowie Küsten- und Binnenschifffahrt (EBZ 64) unterschieden. In EBZ 6 sind die Kraftstoffmengen enthalten, die von Seeschiffen gebunkert wurden, die eine Zulassung der *International Maritime Organization* (Internationale Seeschifffahrts-Organisation, IMO) als Seeschiff (IMO-Nummer) besitzen. Das sind Fracht-, Fischerei- und Militärschiffe, die sowohl national (zwischen zwei dt. Seehäfen) als auch international (von Deutschland ins Ausland) verkehren können. In EBZ 64 sind dagegen die Kraftstoffmengen aufgeführt, die zum einen von Binnenschiffen getankt, zum anderen aber von *nicht* durch die IMO zertifizierten Seeschiffen gebunkert wurden (kleinere, nur national verkehrende Schiffe). Zur Aufteilung in nationalen und internationalen *See*verkehr ist daher eine Aufteilung der in EBZ 6 enthaltenen Kraftstoffmengen auf national und international verkehrende Seeschiffe notwendig, welche anhand der am BSH durchgeführten Modellierung erfolgt. Zusätzlich werden die jeweiligen spezifischen Mengen von Fischerei- und Militärschiffen abgezogen, die unter 1.A.4.c iii bzw. 1.A.5.b gesondert berichtet werden.

Tabelle 79: Quellennachweis für die verwendeten Aktivitätsdaten

Material	Quelle
Dieselkraftstoff	Energiebilanzzeile (EBZ) 77 (bis 1994) bzw. 64 (seit 1995): Küsten- und Binnenschifffahrt; sowie Zeile 6: Hochseebunkerungen
Schweröl	Energiebilanz, Zeile 6: Hochseebunkerungen
leichtes Heizöl	Energiebilanz, Zeile 6: Hochseebunkerungen
Ottokraftstoffe	1990-2002: lineare Extrapolation, ab 2003: EBZ 64: Küsten- und Binnenschifffahrt
Flüssiggas (LPG)	1990-2002: lineare Extrapolation, ab 2003: EBZ 64: Küsten- und Binnenschifffahrt
LNG	bisher nicht aus NEB verfügbar; stattdessen in (Deichnik, 2025) modelliert

Die Aktivitätsraten des „nationalen Seeverkehrs" sind Teil der in EBZ 6 gelisteten jährlichen Inlandsablieferungen an Diesel, leichtem und schwerem Heizöl. Um diese Anteile zu ermitteln, werden im oben genannten BSH-Modell die spezifischen Verbräuche national verkehrender

Seeschiffe anhand ihrer AIS-Signale (aktuell ab 2012 siehe oben) berechnet und zu jährlichen Gesamtmengen aggregiert.

Der Einsatz von LNG im nationalen Seeverkehr wird in den Energiebilanzen bisher nicht erfasst, in den Inventaren aber berücksichtigt.

Die jährlich von „Binnenschiffen" in Deutschland getankten Kraftstoffmengen entsprechen den in EBZ 64 angeführten Inlandsablieferungen an Diesel, Ottokraftstoffen und Flüssiggas. Die wechselnde Befahrbarkeit der Wasserstraßen hat stark schwankende jährliche Verbräuche zur Folge, welche seit Mitte der 1990er Jahre tendenziell sinken, da aufgrund von Preisvorteilen viele Schiffe im Ausland betankt werden. Der abrupte Rückgang 1994/1995 ist einer Umstellung der Energiebilanz geschuldet.

Im Rahmen des Überprüfungsprozesses des UNFCCC wurde Deutschland wiederholt (zuletzt während des In-Country Reviews 2016) ermutigt, Emissionen aus zwar hierzulande von Binnenschiffen getankten, aber erst im Ausland verbrauchten Kraftstoffen separat auszuweisen. Da die verfügbaren Statistiken und Modelle dies nicht unmittelbar zulassen, wäre hierzu eine sehr aufwändige regelmäßige Erhebung notwendig, auf deren Grundlage zudem Daten bis zurück nach 1990 entwickelt werden müssten. Unter der Annahme, dass grenzüberschreitend verkehrende Binnenschiffe nur in seltenen Fällen in Deutschland Kraftstoffe aufnehmen[27], erscheint ein solches Vorgehen jedoch als fragwürdig. Nichtsdestotrotz wird der Bitte der Prüfkommissionen nachgegangen und eine für alle Seiten vertretbare wie wissenschaftlich belastbare Lösung gesucht.

Hinsichtlich der verwendeten Emissionsfaktoren für Kohlendioxid wird hier grundsätzlich auf Anhang 6.6 verwiesen. Weiterführende Informationen speziell zu Kohlendioxid aus der Schmierstoff-Mitverbrennung finden sich zudem in Kapitel 4.5.1.

Bezüglich der Freisetzung von Methan und Lachgas aus der Schmierstoff-Mitverbrennung wird davon ausgegangen, dass diese bereits in den entsprechenden Emissionsfaktoren der verwendeten Kraftstoffe berücksichtigt und daher als IE *(included elsewhere)* zu berichten ist.

Alle weiteren Emissionsfaktoren für den Teilsektor „Nationaler Seeverkehr" wurden Deichnik (2025) entnommen.

Für die „Binnenschifffahrt" werden CH_4-Emissionsfaktoren aus Knörr, Heidt, et al. (2025) genutzt. Als Berechnungsgrundlage dienen Prüfstandmessungen sowie Daten zur benötigten Antriebsenergie differenziert nach Schiffstypen und -größen, Beladungen und Wasserstraßentypen. Hinsichtlich N_2O folgen die Emissionsfaktoren den Expertenbetrachtungen entsprechend der UBA-Studie Luftreinhaltung '88 bzw. dem Analogieschluss zu schweren Nutzfahrzeugen ohne Minderungstechnik.

Tabelle 80: für das Berichtsjahr 2024 verwendete Emissionsfaktoren, in kg/TJ

	CH_4	N_2O	Quelle
Binnenschifffahrt			
Diesel/Biodiesel	1,32 (-)	1,00 (-)	
Ottokraftstoffe	24,9	1,62	landesspezifischer Wert gemäß (Knörr, Heidt, et al., 2025)
Flüssiggas (LPG)	5,63	3,45	

[27] Aufgrund der in den Anrainerstaaten von Rhein und Donau dauerhaft preiswerteren Kraftstoffe und angesichts der Tatsache, dass ein großes Binnenschiff mit einer Tankfüllung ohne weiteres mehrere tausend Kilometer zurücklegen kann, wird davon ausgegangen, dass ein Nachtanken in Deutschland für grenzüberschreitende Fahrten nur in Ausnahmefällen stattfindet.

	CH_4	N_2O	Quelle
nationaler Seeverkehr			
Diesel / leichtes Heizöl	1,59 (-)	3,22 (2,00)	gemäß (Deichnik, 2025)
Schweröl	3,47 (7,00)	3,38 (2,00)	
LNG	646	2,39	
übergreifend			
Schmierstoffe	IE	IE	in EF der einzelnen Kraftstoffe berücksichtigt

in Klammern: Default-Werte gemäß IPCC (2006a): Band 2, Kapitel 3.5, S. 3.50, Tabelle 3.5.3
EF für Biodiesel entsprechen den für fossilen Diesel verwendeten Werten

3.2.8.4.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (1.A.3.d)

Während hinsichtlich der nationalen Binnenschifffahrt Unsicherheiten aus Knörr et al. (2009) entnommen werden konnten, muss bzgl. des nationalen Seeverkehrs derzeit noch auf Richtwerte gemäß IPCC zurückgegriffen werden.

Für die wie oben beschriebenen berechneten spezifischen Energieeinsätze sind Unsicherheiten von ±5% angenommen.

Die für die verwendeten Emissionsfaktoren angenommenen Unsicherheiten können der nachfolgenden Tabelle entnommen werden.

Tabelle 81: prozentuale Unsicherheiten der Emissionsfaktoren*

	CO_2	CH_4	N_2O
Diesel: Binnenschiff	±3%	±34%	-42,5% / 75%
Diesel / leichtes Heizöl: Seeschiff	±3%	±50%	-40% / 140%
Schweröl	-4%/1%	±40%	-40% / 140%
Ottokraftstoffe	±1%	±34%	-42,5% / 75%
LNG	±2%	-75% / 150%	±50%
LPG	±2%	±34%	-42,5% / 75%

* untere und obere Grenze des 95%-Perzentils

Durch die von 1994 zu 1995 erfolgte Umstellung der Energiebilanzen weisen die Zeitreihen der Aktivitätsdaten für Küsten- und Binnenschifffahrt zudem Inkonsistenzen auf, die aktuell nicht beseitigt werden können.

Die Emissionsfaktor-Zeitreihen weisen dagegen keine Inkonsistenzen auf.

3.2.8.4.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (1.A.3.d)

Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Zur Qualitätssicherung der Energiebilanzen liegen dem Umweltbundesamt entsprechende Qualitätsberichte der AGEB vor. Außerdem wurde eine Dokumentation zur Überarbeitung der Energiebilanzen ab dem Jahr 2003 im Internet veröffentlicht[28].

[28] AG Energiebilanzen: Erläuterungen zur Revision der Energiebilanzen 2003 – 2009 URL: https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2021/01/revision_der_energiebilanzen_2003_bis_2009_05.pdf (Aufruf vom 23.10.2023)

Tabelle 82: Übersicht relevanter Datenvergleiche

	Vergleich mit...	Erläuterung
CO_2, CH_4, N_2O	alternativen Emissionsinventaren für Deutschland	keine vergleichbaren Datensätze
CO_2	spezif. Tier1-Default gemäß (IPCC, 2006a)Band 2, Tab. 3.5.2	siehe Tabelle 83
CH_4, N_2O	sektorspezif. Tier1-Default gemäß (IPCC, 2006a): Band 2, Tab. 3.5.3	siehe Tabelle 80 Binnen: keine Defaults
CH_4, N_2O	Tier1-Default-EF gemäß (IPCC, 2006a): Band 2, Tab. 2.4	Binnen: Ergebnisse kaum aussagekräftig
CO_2, CH_4, N_2O	spezifischen IEF anderer Staaten	siehe Tabelle 84

Tabelle 83: Vergleich der für das Jahr 2024 verwendeten EF (CO_2) mit IPCC-Defaults, in kg/TJ

	Inventarwert	Default [a]	Untergrenze	Obergrenze
Dieselkraftstoff / leichtes Heizöl	74.027	74.100	72.600	74.800
Ottokraftstoff	72.787	69.300	67.500	73.000
Flüssiggas (LPG)	66.333	63.100	61.600	65.600
Schweröl	76.771	77.400	75.500	78.800
LNG	56.352	56.100	54.300	58.300
Biodiesel	70.800		59.800	84.300

[a] gemäß IPCC (2006a): Band 2, Tabelle 2.4

Die folgende Tabelle erlaubt einen Vergleich mit spezifischen impliziten Emissionsfaktoren anderer Staaten sowie der EU(27). Für leichtes Heizöl, Flüssigerdgas (LNG) und Flüssiggas (LPG) liegen keine impliziten Emissionsfaktoren zum Vergleich vor.

Tabelle 84: länderübergreifender Vergleich der berichteten IEF, in kg/TJ

	Dieselkraftstoff			Schweröl			Ottokraftstoff		
	CO_2	CH_4	N_2O	CO_2	CH_4	N_2O	CO_2	CH_4	N_2O
Deutschland	74.027	1,17	2,05	76.771	3,47	3,38	72.782	24,9	1,62
Belgien	73.342	2,00	1,96	IE	IE	IE	NO	NO	NO
Dänemark	74.050	1,95	1,81	78.000	1,36	1,95	69.300	5,00	0,60
Frankreich	74.704	7,05	1,91	78.000	7,00	2,00	72.477	58,0	1,53
Italien	74.048	6,95	1,86	77.400	7,31	1,95	73.081	70,3	1,86
Niederlande	72.454	7,00	2,00	NO	NO	NO	72.200	47,2	0,86
Spanien	74.100	7,00	2,00	78.352	7,00	2,00	NO	NO	NO
EU-27	74.471	3,80	4,01	77.896	6,64	2,05	72.463	64,4	1,40
Großbritannien	75.151	0,81	3,41	76.116	1,25	3,63	70.249	38,1	1,79

Deutschland: aktuelle IEF für das Berichtsjahr 2024; alle anderen: IEF für 2021 gemäß CRF-Submission 2023

3.2.8.4.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (1.A.3.d)

Gegenüber der Submission 2025 erfolgten Rückrechnungen sowohl aufgrund aktualisierter bzw. neu erfasster Aktivitätsdaten als auch angepasster Emissionsfaktoren.

Hier erfolgte einerseits eine geplante Revision der Energiebilanzen 2003 bis 2023, andererseits wurden die zuletzt noch vorläufigen Energiemengen für 2023 gemäß AGEB durch finale Werte ersetzt:

Tabelle 85: revidierte Energieeinsätze 2003-2023, in Terajoule

	2003	2004	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
Dieselkraftstoffe									
Submission 2026	22.362	24.170	26.114	23.920	24.710	13.761	11.785	8.786	9.473
Submission 2025	22.451	24.282	26.241	24.060	24.874	14.029	12.003	9.275	9.887
Änderung absolut	-89,4	-112	-127	-140	-163	-268	-218	-489	-414
Änderung relativ	-0,40%	-0,46%	-0,48%	-0,58%	-0,66%	-1,91%	-1,82%	-5,27%	-4,18%
Ottokraftstoffe									
Submission 2026	272	273	275	271	276	281	285	287	286
Submission 2025	272	273	275	271	275	281	286	288	289
Änderung absolut	0,00	-0,01	-0,04	-0,05	0,45	-0,15	-0,27	-0,72	-2,77
Änderung relativ	0,00%	0,00%	-0,01%	-0,02%	0,16%	-0,05%	-0,09%	-0,25%	-0,96%
Flüssiggas (LPG)									
Submission 2026	7,03	7,02	7,02	7,08	7,10	7,36	7,49	7,23	7,53
Submission 2025	7,03	7,02	7,02	7,08	7,10	7,40	7,51	7,55	7,61
Änderung absolut	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,04	-0,02	-0,33	-0,08
Änderung relativ	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	-0,54%	-0,24%	-4,30%	-1,00%
Leichtes Heizöl									
Submission 2026						8.329	8.475	7.879	7.922
Submission 2025						8.329	8.475	7.879	7.922
Änderung absolut						0,00	0,00	0,00	0,00
Änderung relativ						0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Schweröl									
Submission 2026	2.607	2.298	2.054	1.810	108	378	392	235	203
Submission 2025	2.607	2.298	2.054	1.810	108	378	392	237	237
Änderung absolut	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,72	-33,8
Änderung relativ	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,73%	-14,3%
Liquefied Natura Gas (LNG)									
Submission 2026					22,0	276	293	513	382
Submission 2025					22,0	276	293	513	382
Änderung absolut					0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Änderung relativ					0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
GESAMT-KRAFTSTOFFEINSATZ									
Submission 2026	25.248	26.747	28.450	26.009	25.123	23.031	21.237	17.708	18.274
Submission 2025	25.337	26.859	28.577	26.149	25.286	23.299	21.456	18.199	18.724
Änderung absolut	-89,4	-112	-127	-140	-163	-268	-218	-492	-450
Änderung relativ	-0,35%	-0,42%	-0,44%	-0,54%	-0,64%	-1,15%	-1,02%	-2,70%	-2,40%

Quelle: eigene Berechnungen basierend auf Deichnik (2025) und Knörr, Heidt, et al. (2025)

Darüber erfolgte eine Konsolidierung der Emissionsfaktoren für Kohlendioxid vor allem aus Schweröl (ab 2022) und LNG (ab 2014):

Tabelle 86: revidierte Emissionsfaktoren, in kg/TJ

	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2020
Schweröl											
Submission 2026	78.819	76.445	77.188	77.188	77.188	77.188	77.188	77.188	77.753	76.554	78.819
Submission 2025	78.819	76.445	77.188	77.188	77.188	77.188	77.188	77.188	77.188	77.188	78.819
Änderung absolut	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	565	-634	0,00
Änderung relativ	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,73%	-0,82%	0,00%
LNG											
Submission 2026	55.936	55.889	55.840	55.827	55.718	55.749	55.826	55.786	56.221	56.325	55.936
Submission 2025	55.944	55.944	55.944	55.944	55.944	55.718	55.944	55.944	55.944	55.944	55.944
Änderung absolut	-7,63	-54,8	-103	-117	-226	31,0	-117	-158	277	381	-7,63
Änderung relativ	-0,01%	-0,10%	-0,18%	-0,21%	-0,40%	0,06%	-0,21%	-0,28%	0,50%	0,68%	-0,01%
LPG											
Submission 2026	65.461	66.346	66.333	66.333	66.333	66.333	66.333	66.333	66.333	66.333	65.461
Submission 2025	65.461	66.346	66.334	66.334	66.334	66.334	66.334	66.334	66.334	66.334	65.461
Änderung absolut	-0,002	-0,001	-0,002	-0,002	-0,002	-0,002	-0,002	-0,002	-0,002	-0,002	-0,002
Änderung relativ	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Aus den beschriebenen Korrekturen resultieren die nachfolgend dargestellten rekalkulierten Emissionsmengen.

Tabelle 87: revidierte Treibhausgas-Emissionen 2003-2023, in kt CO_2-Äquivalenten

	2003	2004	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
Kohlendioxid[a]									
Submission 2026	1.877	1.987	2.112	1.930	1.859	1.700	1.567	1.301	1.345
Submission 2025	1.884	1.995	2.122	1.940	1.871	1.720	1.583	1.337	1.379
Änderung absolut	-6,62	-8,28	-9,41	-10,4	-12,1	-19,9	-16,2	-36,1	-33,4
Änderung relativ	-0,35%	-0,42%	-0,44%	-0,53%	-0,65%	-1,15%	-1,02%	-2,70%	-2,42%
Methan									
Submission 2026	0,055	0,058	0,062	0,053	0,062	0,225	0,210	0,348	0,259
Submission 2025	0,055	0,058	0,062	0,053	0,062	0,225	0,210	0,349	0,260
Änderung absolut	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,001	-0,001
Änderung relativ	-0,30%	-0,35%	-0,37%	-0,44%	-0,37%	-0,17%	-0,15%	-0,20%	-0,28%
Lachgas									
Submission 2026	0,051	0,049	0,048	0,044	0,047	0,044	0,043	0,038	0,038
Submission 2025	0,051	0,049	0,049	0,044	0,047	0,044	0,043	0,038	0,039
Änderung absolut	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,001
Änderung relativ	-0,18%	-0,23%	-0,26%	-0,32%	-0,35%	-0,61%	-0,51%	-1,30%	-1,40%
GESAMT-TREIBHAUSGASE[a]									
Submission 2026	1.892	2.002	2.127	1.943	1.873	1.718	1.584	1.321	1.363
Submission 2025	1.899	2.010	2.137	1.954	1.885	1.738	1.601	1.358	1.396
Änderung absolut	-7,02	-8,77	-9,98	-10,9	-12,6	-20,3	-16,6	-36,5	-33,8
Änderung relativ	-0,37%	-0,44%	-0,47%	-0,56%	-0,67%	-1,17%	-1,04%	-2,69%	-2,42%

Quelle: eigene Berechnungen; [a] inkl. fossiles CO_2 aus der Verwendung von Biokraftstoffen

3.2.8.4.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (1.A.3.d)

Hinsichtlich des nationalen Seeverkehrs erfolgen im Rahmen der alljährlichen Modellaktualisierung im Bedarfsfall auch modellpflegerische Arbeiten, die derzeit noch nicht genauer benannt werden können.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4 Verbesserungen des Inventars, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

3.2.8.5 Transport - Übriger Verkehr (1.A.3.e)

3.2.8.5.1 Beschreibung der Kategorie (1.A.3.e)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
-/-	1 A 3 e, Other Transport	fossil fuels	CO_2	1083,27	0,09	675,05	0,10	-37,68
-/-	1 A 3 e, Other Transport	0	CH_4	5,95	0,01	3,66	0,01	-38,43
-/-	1 A 3 e, Other Transport	0	N_2O	12,88	0,01	5,11	0,01	-60,34

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2	CS	ETS	CS
CH_4	Tier 2	ETS	CS
N_2O	Tier 2	ETS	CS

Die Kategorie „1.A.3.e - Transport - Übriger Verkehr“ ist keine Hauptkategorie.

Aktuell werden hier lediglich Emissionen aus Gasturbinen in Erdgasverdichterstationen des Transportnetzes berichtet. Die Emissionen aus Gasturbinen der Förderstationen werden unter 1.A.1.c berichtet, die diffusen Emissionen aus den Verdichtern unter 1.B.2.b.iii & iv.

In der chemischen Industrie eingesetzte Gasverdichter werden, gemäß der statistischen Struktur, unter 1.A.2.g - Sonstige erfasst.

3.2.8.5.2 Methodische Aspekte (1.A.3.e)

Die Aktivitätsdaten werden ab dem Jahr 2005 auf Basis der für den Emissionshandel gemeldeten und von der Emissionshandelsstelle aggregierten Erdgasmengen berechnet. Der für die Berechnung der Brennstoffeinsätze für die Jahre 1990 bis 2005 gewählte Ansatz wird im NIR 2022 an gleicher Stelle beschrieben.

Während die Erdgasverdichter der Förderstationen über die Energiestatistik abgefragt und damit bereits in der Kategorie 1.A.1.c enthalten sind, werden hier nur diejenigen Erdgasverdichter betrachtet, die dem Transportnetz zuzuordnen sind und so eine Doppelzählung vermieden

Die verwendeten Emissionsfaktoren stützen sich schadstoffspezifisch auf Ergebnisse verschiedener Forschungsprojekte und Expertenbetrachtungen des UBA, im Einzelnen:

- Für CO_2 wird auf die Dokumentation im Anhang 6.6 verwiesen.
- Die Faktoren für CH_4 und die N_2O sind dem Bericht Fichtner et al. (2011) entnommen.

Die Vorgehensweise der Studien ist in Kapitel 3.2.4.2 näher beschrieben.

3.2.8.5.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (1.A.3.e)

Erstmals wurden im Berichtsjahr 2004 für die Aktivitätsraten Unsicherheiten bestimmt (Juhrich & Wachsmann, 2007a). Die dabei verfolgte Herangehensweise ist im Anhang 2, Kapitel „Unsicherheiten der Aktivitätsraten stationärer Feuerungsanlagen“ des NIR 2007 beschrieben.

Die Vorgehensweise zur Ermittlung der Unsicherheiten der Emissionsfaktoren ist in Kapitel 3.2.4.2 beschrieben. Ergebnisse für N_2O sind dem Kapitel 3.2.4.3.2 zu entnehmen, für CH_4 dem Kapitel 3.2.4.3.3.

3.2.8.5.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (1.A.3.e)

Eine allgemeine Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt, während sie für ED durch die Nationale Koordinierungsstelle durchgeführt wurden.

Zur Verifikationszwecken ist ein Datenabgleich für Aktivitätsdaten nicht möglich, da die Emissionshandelsstelle die einzige Datenquelle ist.

Die Ergebnisse des Kapitels 3.2.4.2 gelten entsprechend.

3.2.8.5.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (1.A.3.e)

Es wurden keine Rückrechnungen vorgenommen.

3.2.8.5.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (1.A.3.e)

Derzeit sind keine Verbesserungen geplant. Es ist angedacht, die Methanemissionswerte aus den Betreiberdaten gemäß der EU Methanverordnung 2024/1787 zu verwenden.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4 Verbesserungen des Inventars, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

3.2.9 Sonstige: Haushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen, Land-, Forstwirstschaft und Fischerei (1.A.4 stationär)

3.2.9.1 Beschreibung der Kategorie (1.A.4 stationär)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
L/T	1 A 4 a, Commercial/Institutional	fossil fuels	CO_2	64025,93	4,96	21323,69	3,02	-66,70
-/-	1 A 4 a, Commercial/Institutional	0	CH_4	1636,92	0,13	100,24	0,02	-93,88
-/-	1 A 4 a, Commercial/Institutional	0	N_2O	130,28	0,02	70,04	0,01	-46,24
L/T	1 A 4 b, Residential	fossil fuels	CO_2	128635,75	9,95	76863,21	10,87	-40,25
-/-/2	1 A 4 b, Residential	0	CH_4	2782,86	0,22	813,85	0,12	-70,76
-/-/2	1 A 4 b, Residential	0	N_2O	683,71	0,06	226,93	0,04	-66,81
L/T	1 A 4 c, Agriculture/Forestry/Fishing	fossil fuels	CO_2	11359,76	0,88	7263,37	1,03	-36,06
-/-	1 A 4 c, Agriculture/Forestry/Fishing	0	CH_4	272,15	0,03	203,52	0,03	-25,22
-/-	1 A 4 c, Agriculture/Forestry/Fishing	0	N_2O	66,84	0,01	71,36	0,02	6,77

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2	Tier 1*, CS	NS/M	CS, D*
CH_4	CS (Tier 2)	NS/M	CS (M)
N_2O	CS (Tier 2)	NS/M	CS (M)
NO_x, CO, NMVOC, SO_2	CS (Tier 2)	NS/M	CS (M)

* Biodiesel und mitverbrannte Schmierstoffe

Die Einordnung in die Hauptkategorien erfolgt für die Kategorie 1.A.4 „Sonstige“ für stationäre und mobile Quellen gemeinsam (Übersicht siehe Kapitel 3.2.9.1). Demnach ist die Kategorie 1.A.4 „Sonstige“ in den Subkategorien 1.A.4.a,b & c. für CO_2-Emissionen eine Hauptkategorie nach der Emissionshöhe und dem Trend. Für CH_4-Emissionen sind die Kategorien 1.A.4.b Hauptkategorie nach dem Trend und nach Methode2. Die Subkategorie 1.A.4.b ist für N_2O zusätzlich nach der Methode-2-Analyse als Hauptkategorien identifiziert worden.

Die Kategorie 1.A.4 stationär umfasst Feuerungsanlagen in den Bereichen der Haushalte, des Gewerbes, des Handels und der Dienstleistungen (Kleinverbraucher) und der Landwirtschaft (*Commercial and Institutional, Residential* und *Agriculture*).

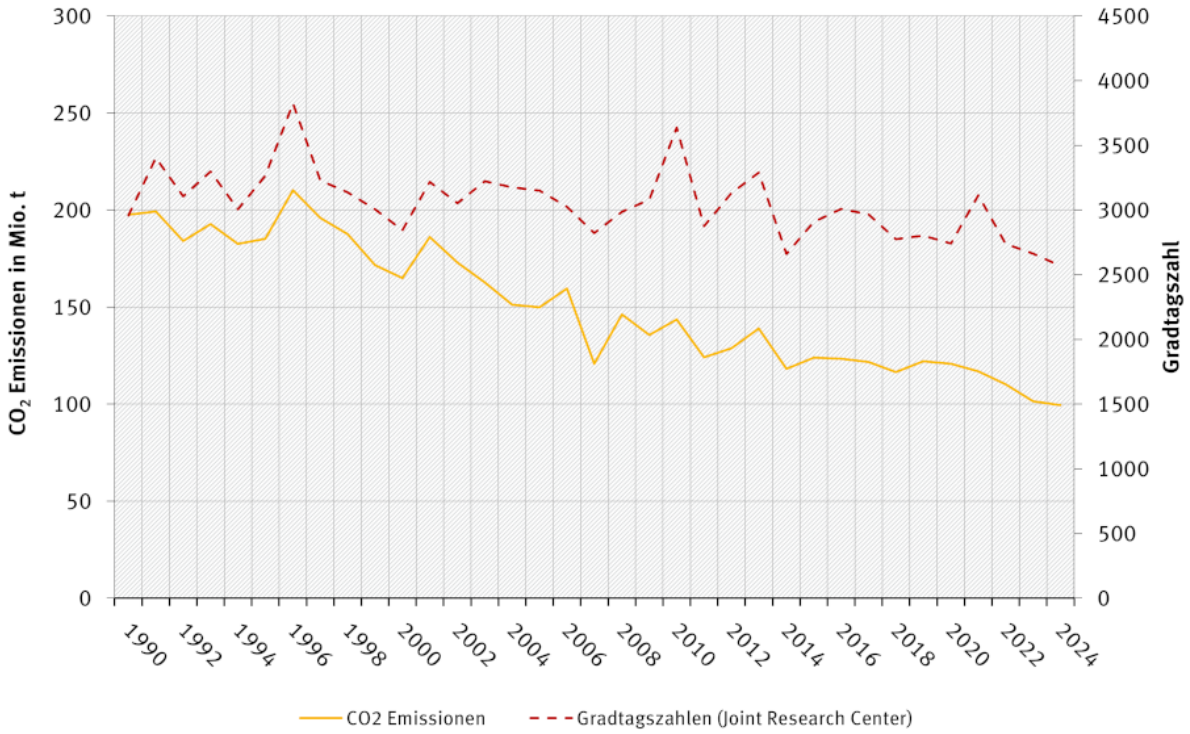
In der Subkategorie 1.A.4.a.i „Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (stationär)“ werden Anlagen zur Wärmeerzeugung in Kleinfeuerungsanlagen der Kleinverbraucher berichtet.

Unter der Subkategorie 1.A.4.b.i werden die Emissionen aus den stationären Feuerungsanlagen der Haushalte verbucht. Die Subkategorie 1.A.4.ci umfasst den stationären Teil der Bereiche Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Fischerei. Berichtet werden hier die Emissionen aus der Wärmeerzeugung in kleinen und mittleren Feuerungsanlagen.

Der Bestand an Feuerungsanlagen im Bereich der Haushalte und in Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (Kleinverbraucher) stellt hinsichtlich Bauart und Größe der Anlagen eine sehr inhomogene Gruppe dar. Die Bandbreite der installierten Feuerungen reicht, um nur einige Beispiele zu nennen, von Einzelraumfeuerstätten für feste Brennstoffe mit ca. 6 bis 8 kW Nennwärmeleistung (z.B. Kaminöfen, Herde) über Öl- und Gasfeuerungen zur Raumwärme- und Warmwassererzeugung (z.B. Zentralheizungskessel) sowie hand- und automatisch beschickte Holzfeuerungen im gewerblichen Bereich bis hin zu Feuerungsanlagen mit einer Nennwärmeleistung von bis zu 1 MW. Insgesamt waren im Jahr 2022 fast 33 Mio. Feuerungsanlagen im Bereich der Haushalte und in Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (Kleinverbraucher) in Deutschland installiert ((ZIV, 2024)[29]). Daran hatten Gasfeuerungsanlagen mit ca. 15,1 Mio. Anlagen den größten Anteil, gefolgt von den Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe (12,9 Mio. Anlagen)(davon 11,7 Mio. Einzelraumfeuerungsanlagenfür feste Brennstoffe) und Ölfeuerungsanlagen (ca. 4,8 Mio.).

[29] Zentralinnungsverband des Schornsteinfegerhandwerks (ZIV) https://www.schornsteinfeger.de/erhebungen.aspx

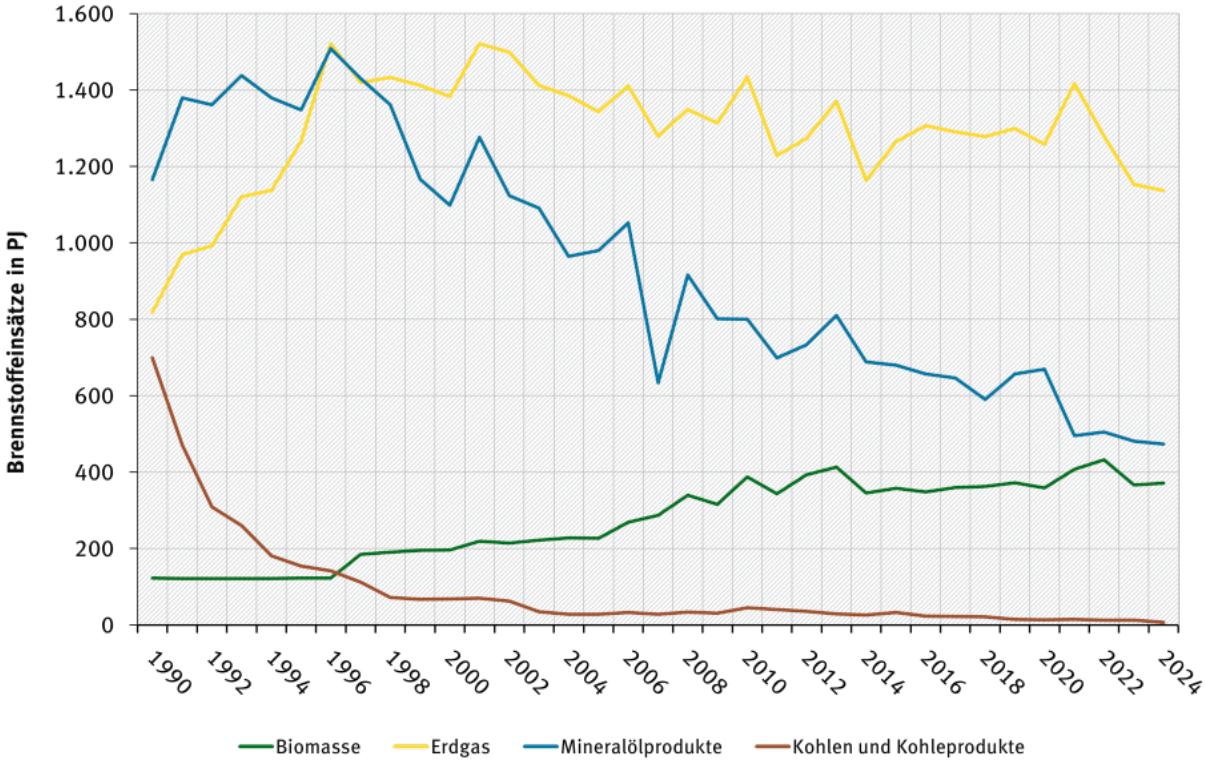
Abbildung 32: Änderung der Gesamtemission von 1.A.4 (stationär) in Abhängigkeit von der Temperatur



Quelle: eigene Darstellung, UBA

Die Entwicklung der CO_2-Emissionen und der Anzahl der Gradtagszahlen sind in Abbildung 32 dargestellt. Der Haupttreiber für die CO_2-Emissionen in 1.A.4 ist der Energieverbrauch für Raumwärme. Daher sind Schwankungen beim Verbrauch vergleichsweise stark witterungsabhängig. Besonders beim leichten Heizöl und beim Erdgas führte dies über die Jahre hinweg zu starken Schwankungen im Energieeinsatz. Der Trend zu weniger CO_2-Emissionen kommt vor allem durch die Durchführung von energetischen Gebäudesanierungen und den Wechsel zu energieeffizienteren Heiztechnologien mit CO_2-ärmeren Brennstoffen, aber auch durch höhere Standards bei Neubauten. CO_2-Emissionen, die durch den Stromverbrauch von elektrischer Wärmepumpen entstehen, werden hier nicht berichtet, sondern unter 1.A.1.a.

Abbildung 33: Verlauf des Energieverbrauchs von 1.A.4 (stationär) nach vier Brennstoffkategorien



Quelle: eigene Darstellung, UBA

Der Wechsel von Heizöl und Kohle zu Erdgas und Biomasse sorgt über den Berichtszeitraum seit 1990 für eine erhebliche CO_2-Emissionsminderung. Daneben wirkten sich auch Verbesserungen bei der Energieeffizienz verbrauchssenkend aus. Dieser langfristige Trend wurde überlagert von kurzfristigen Schwankungen des Energieverbrauchs, beispielweise induziert durch Preisänderungen von Energieträgern, deren Mengen - wie leichtes Heizöl- absatz- und nicht verbrauchsorientiert ermittelt werden.

3.2.9.2 Methodische Aspekte (1.A.4 stationär)

Aktivitätsraten

Die Aktivitätsraten der Kategorie 1.A.4 bauen auf den durch die AGEB erstellten Energiebilanzen für die Bundesrepublik Deutschland auf. Für die Jahre vor 1995 werden dabei für alte und neue Bundesländer getrennte Energiebilanzen verwendet. Für die Jahre ab 1995 sind die Zeilen 66 (Haushalte) und 67 (Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und übrige Verbraucher) maßgebend.

Da die Angaben der Energiebilanzzeile 67 – Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und übrige Verbraucher – auch die Verbräuche des Militärs beinhalten, müssen diese von den jeweiligen Positionen der Zeile 67 abgezogen werden (siehe Kapitel 3.2.11.2 zu den stationären wie mobilen Quellen des militärischen Bereichs).

Zu den Energieeinsätzen in „Feuerungsanlagen der Landwirtschaft (1.A.4.ci)“, die ebenfalls in Zeile 67 der Energiebilanz enthalten sind, werden seit dem NIR 2021 (UBA et al., 2021) für die fossilen Brennstoffe Daten der AGEB verwendet, die als Zeitreihe beginnend mit dem Jahr 2010 vorliegen. Diese Daten werden mittels eines Schätzverfahrens auf Basis der Energieausgaben der Landwirtschaft laut „Statistischem Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten“ (BMEL, 2024b) ermittelt. Die Energieträger-struktur wird in der Studie „Umsetzung eines Verfahrens zur regelmäßigen und aktuellen Ermittlung des Energieverbrauchs in nicht von der

amtlichen Statistik erfassten Bereichen“ (AGEB, 2016) beschrieben. Als Teilmenge der Energiebilanz finden sich diese Daten in den AGEB-Auswertungs-tabellen zur Energiebilanz[30] wieder.

Der Holzeinsatz in den Sektoren „Private Haushalte“ und „Gewerbe, Handel und Dienstleistungen“ (GHD) stützt sich – wie auch der Verbrauch der anderen Bioenergieträger – auf die Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat), die für die Daten zu erneuerbaren Energien zu verschiedenen nationalen, EU-weiten und internationalen Berichtspflichten der Bundesregierung verantwortlich zeichnet.[31]

Die Ergebnisse hinsichtlich Brennholz für die privaten Haushalte basieren dabei auf den im Rahmen des „Rohstoffmonitoring Holz“[32] durchgeführten Verbrauchserhebungen. Dabei werden neben dem über den offiziellen Handel käuflich erworbenem Brennholz auch die von Selbstwerbern eingeschlagenen Mengen in Wald, Garten oder Landschaftspflege miterfasst. Zusätzlich findet ein Regressionsmodell Anwendung, in das die Gradtagszahlen und die Preisindizes der konventionellen Energieträger in Verbindung mit der Beheizungsstruktur der Wohngebäude einfließen. Die Umrechnung der Volumeneinheiten in Energieeinheiten erfolgt über die abgestimmte Umrechnungskonvention der AGEE-Stat.

Der Holzeinsatz der reinen Wärmeerzeugungsanlagen des GHD-Sektors wird mittels Restrechnung abgeleitet. Dabei wird der im Zuge der Erhebungen des „Rohstoffmonitoring Holz“ und mittels Regressionsmodellen ermittelte Gesamtholzverbrauch (außerhalb der privaten Haushalte) mit den in der amtlichen Energiestatistik sowie den modelltechnisch erfassten Holzmengen verschnitten. Der auch über dieses Modell abgeleitete Holzeinsatz, der mit der Wärmebereitstellung der KWK-Anlagen in Verbindung steht, ist ebenfalls Bestandteil des Gesamtholzverbrauchs des GHD-Sektors.

Emissionsfaktoren

Eine Beschreibung sowie eine Liste der verwendeten CO_2 Emissionsfaktoren ist im Anhang 6.6 verfügbar.

Datengrundlage der für die stationären Feuerungsanlagen verwendeten Emissionsfaktoren für N_2O und CH_4 ist der Forschungsbericht „Ermittlung und Aktualisierung von Emissionsfaktoren für das nationale Emissionsinventar bezüglich kleiner und mittlerer Feuerungsanlagen der Haushalte und Kleinverbraucher“ (Tebert et al., 2016). Im Rahmen dieses Vorhabens wurden gerätebezogene und kategoriespezifische Emissionsfaktoren für Feuerungsanlagen im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher für alle wichtigen Abgaskomponenten mit hohem Detaillierungsgrad für die Bezugsjahre 2010 und 2015 berechnet.

Die Ermittlung der Emissionsfaktoren beruht auf einem kategoriespezifischen Bottom-up-Ansatz, bei dem zusätzlich zu den (Sub-)Kategorien und Brennstoffen detailliert nach Anlagentechnologien unterschieden wird. Hierbei werden durch Aggregierung von mehreren anlagenspezifischen Emissionsfaktoren mittlere Emissionsfaktoren für den gesamten Anlagenbestand der betrachteten Kategorien generiert. Durch die anlagen-/ gruppenspezifischen Emissionsfaktoren werden alle wesentlichen feuerungstechnischen Besonderheiten der für die einzelnen Gruppen typischen Anlagen erfasst. Das Verfahren

[30] https://ag-energiebilanzen.de/daten-und-fakten/auswertungstabellen/

[31] vgl. auch https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/Arbeitsgruppe/arbeitsgruppe_ee.html

[32] https://www.kiwuh.de/projekte-und-foerderung/projekte/holzbereitstellung/rohstoffmonitoring-holz/

entspricht der Tier 2/3-Methode der 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (IPCC, 2006a).

Die Strukturierung der Emissionsfaktoren richtete sich nach den Brennstoffen, die in Deutschland einen relevanten Anteil am Endenergieverbrauch haben:

- Heizöl EL,
- Erdgas,
- Braunkohlen (Briketts aus dem Rheinischen und Lausitzer Revier, Importbriketts),
- Steinkohlen (Koks, Briketts, Anthrazit) und
- Holz (naturbelassenes Holz, Holzpellets, Resthölzer).

Außerdem wurden die Emissionsfaktoren nach der Anlagenart, dem Anlagenalter dem Leistungsbereich und der typischen Betriebsweise der Feuerungsanlagen differenziert erhoben. Das Emissionsverhalten der Feuerungsanlagen wurde auf Basis einer umfangreichen Literaturauswertung dokumentiert. Durch die Anwendung von Übertragungsfaktoren wurde berücksichtigt, dass die Emissionen auf dem Prüfstand in der Regel unter denen von installierten Anlagen im realen Betrieb liegen.

Die Beschreibung der Anlagenstruktur der installierten Feuerungsanlagen erfolgte unter Fortschreibung der Daten von Struschka et al. (2008) mit Hilfe von Absatzstatistiken der einschlägigen Industrieverbände. Mit Hilfe dieser Daten wurde der Energieeinsatz in einzelnen Anlagentypen geschätzt, so dass nach Energieeinsätzen gewichtete sektorale Emissionsfaktoren ermittelt werden konnten. Tabelle 88 zeigt die sektoralen Emissionsfaktoren.

Tabelle 88: Sektorale Emissionsfaktoren für Feuerungsanlagen der Haushalte und Kleinverbraucher für das Bezugsjahr 2010, in [kg/TJ]

1.A.4.bi – Haushalte	CH_4	N_2O
Steinkohlen	134	11,5
Steinkohlebriketts	368	9,7
Steinkohlenkoks	10	0,9
Braunkohlenbriketts	237	5,2
Heizöl EL	0,05	0,55
Erdgas	3	0,25
1.A.4.ai & ci- Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (Kleinverbraucher) & Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Fischerei		
Steinkohlen	100	8,5
Steinkohlebriketts	-	-
Steinkohlenkoks	20	0,8
Braunkohlenbriketts	-	-
Heizöl EL	0,03	0,56
Erdgas	0,16	0,33

Die Emissionsfaktoren des Jahres 2010 wurden fortgeschrieben unter der Berücksichtigung des Anlagenaustausch wobei alte Feuerungsanlagen durch neue Feuerungsanlagen ersetzt werden.

3.2.9.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (1.A.4 stationär)

Anhang 2, Kapitel 13.6 im NIR (UBA, 2007) beschreibt die Methode, mit der die Unsicherheiten für die Aktivitätsraten ermittelt wurden.

Die Berechnung von abgesicherten Emissionsfaktoren im Anlagenbereich kann nur durch ein aufwendiges Verfahren erfolgen. Neben Emissionswerten müssen zusätzliche Informationen z.B. zur Berücksichtigung der Betriebsweise (Lastfälle), der Anlagenstruktur und des gerätebezogenen Endenergieverbrauchs ermittelt werden. Bei der Datenermittlung im Rahmen des oben genannten FE-Vorhabens wurde dieser Ansatz weitgehend verfolgt, gleichwohl muss allein aufgrund des großen Anlagenbestandes sowie der Vielzahl verschiedener Feuerungsbauarten und der zum Einsatz kommenden Brennstoffe von einer relativ großen „Grundunsicherheit“ der Daten ausgegangen werden.

Bei einigen Anlagenarten lagen beim Einsatz bestimmter Brennstoffe zudem nur unzureichende oder überhaupt keine Daten zum Emissionsverhalten vor. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass bei den Feuerungsanlagen der Haushalte und in Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (Kleinverbraucher) keine gesetzliche Messpflicht für Treibhausgasemissionen besteht. Für die Ermittlung der Emissionsfaktoren konnte daher im Regelfall (ausgenommen CO_2, das weitgehend unabhängig von der Feuerungsbauart ist) nur auf wenige Ergebnisse von Einzelmessungen an ausgewählten Anlagen zurückgegriffen werden. Die Datenlücken wurden durch Übertragung von Emissionsfaktoren vergleichbarer Feuerungsanlagen geschlossen.

Die Ermittlung der für die Emissionsfaktoren für CH_4 und N_2O aus der stationären Feuerung angegebenen Unsicherheiten erfolgte durch eine Expertenschätzung gemäß IPCC-GPG (Penman et al. (2000): Kapitel 6). Sie basiert auf den für das o.g. Forschungsvorhaben erhobenen Emissionsdaten und wurde im Rahmen des o.g. Forschungsprojekts von Experten des Instituts für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen der Universität Stuttgart durchgeführt. Die Schätzung der Unsicherheiten erfolgte separat für alle Feuerungstechniken und Brennstoffe. In die Schätzung gingen für N_2O und CH_4 folgende Fehlerquellen ein:

- der Messfehler bei der Bestimmung der Schadstoff-Konzentration;
- die Unsicherheit bei der Schätzung von Übertragungsfaktoren (systematische Unterschiede zwischen Prüfstands- und Feldmessungen);
- die Unsicherheit aufgrund einer zu geringen Anzahl an Emissionsdaten;
- die Unsicherheit aufgrund von unterschiedlichen eingesetzten Messverfahren;
- die Unsicherheiten bei den angesetzten Anlagendaten (Bestands-, Alters- und Leistungsstruktur und eingesetzte Brennstoffmengen)

Bei Gasfeuerungsanlagen tritt ein weiterer Fehler bei der Ermittlung der Start-/ Stopp-Emissionen auf. Hier wird CH_4 aus dem Erdgas während der An- und Abfahrvorgänge teilweise unverbrannt emittiert. Diese dem eigentlichen Verbrennungsprozess vor- und nachgelagerten Emissionen, vgl. hierzu Kapitel 3.3.2.2 (Erdgas), tragen erheblich dazu bei, dass die CH_4-Emissionsfaktoren bei Gasfeuerungsanlagen mit hohen Unsicherheiten behaftet sind.

Für die Verteilung der Unsicherheiten wird bei den N_2O-Emissionsfaktoren eine Log-Normalverteilung angenommen. Es ist davon auszugehen, dass die Abweichungen hin zu größeren Werten deutlich ausgeprägter sind als hin zu kleineren Werten. Die Emissionsfaktoren

für CH_4 und N_2O wurden im Rahmen des o.g. Forschungsvorhabens für das Jahr 2005 erhoben und seither als konstant angenommen.

3.2.9.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (1.A.4 stationär)

Emissionsfaktoren: Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Emissionsdaten: Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung, die den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen entsprechen, wurden durch die Nationale Koordinierungsstelle durchgeführt.

Aktivitätsraten: Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Weitere Informationen zur Qualitätssicherung siehe Anhang 6.4.1. Da alle verfügbaren Daten zur Erstellung der Aktivitätsdaten verwendet werden, gibt es keine weiteren Datenquellen, mit denen ein Vergleich durchgeführt werden kann.

Zur Qualitätssicherung der Angaben zu Emissionsfaktoren der stationären Feuerungen wurden im Rahmen des oben genannten F&E-Vorhabens alle verwendeten Eingangsdaten aus der Literatur und aus eigenen Erhebungen des Forschungsnehmers auf ihre Validität hin überprüft. Zur Beschreibung des Emissionsverhaltens der Feuerungsanlagen wurden Emissionswerte grundsätzlich nur dann in die weitere Berechnung übernommen, wenn in der Literaturstelle vollständige und zweifelsfreie Angaben zum eingesetzten Brennstoff, zur Bauart der Feuerung und deren Betriebsweise während der Messungen vorhanden waren. Alle für die Inventarerstellung wesentlichen Materialien hat der Auftragnehmer dokumentiert.

Im Rahmen einer von Fachleuten des Umweltbundesamtes durchgeführten Qualitätsprüfung wurden zudem die nach Tier 2 ermittelten länderspezifischen Emissionsfaktoren für CH_4 und N_2O mit den IPCC Tier 2 Default-Faktoren der *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (IPCC, 2006a) verglichen. Dabei ergab sich bei den meisten Brennstoffen eine gute Übereinstimmung der Werte (Abweichungen innerhalb einer Größenordnung), wobei tendenziell die Default-Werte für CH_4 höher liegen als die länderspezifischen Werte.

Im Rahmen der Qualitätssicherung wurde für die Sektoren Haushalte sowie Gewerbe, Handel, Dienstleistungen für das Jahr 2015 neben der Ermittlung der Emissionen nach Tier 2/3 eine Berechnung mit den Tier-1-Default-Werten durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 89 dokumentiert. Die Emissionen der Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei zählen ebenfalls zum Sektor Kleinverbraucher.

Tabelle 89: Emissionsberechnung mit landesspezifischen Tier-2/3 Emissionsfaktoren und mit den Tier 1 Default-Emissionsfaktoren nach IPCC et al. (2006)

Emissionsfaktoren	CH_4 [t]				N_2O [t]			
	Haushalte		Kleinverbraucher		Haushalte		Kleinverbraucher	
	Tier 1 Default	Landesspez. EF	Tier 1 Default	Landesspez. EF	Tier 1 Default	Landesspez. EF	Tier 1 Default	Landesspez. EF
Heizöl EL	4.694	76	1.723	6	277	256	101	97
Brenngase	4.223	2.534	1.763	55	84	212	35	115
Kohlebrennstoffe	7.388	5.776	44	85	37	177	2	7
Holz	66.780	21.074	9.011	1.465	890	352	120	25
Summe	83.085	29.459	12.541	1.611	1.289	997	258	244

Die Ergebnisse der Emissionsberechnung stimmen für N_2O bei beiden Methoden recht gut überein. Größere Abweichungen treten bei der Ermittlung der CH_4-Emissionen auf. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die Methanemissionen von Feuerungsanlagen sehr stark von der Verbrennungstechnik abhängen. Unterschiede in der Anlagenstruktur in einzelnen Ländern machen sich deshalb sehr viel stärker in den ermittelten Gesamtemissionen bemerkbar als bei Lachgas. Ferner sind Emissionen von Erdgas unter 1.B.2.b.vi mitberücksichtigt. Daher erscheinen die IEF von Deutschland hier als sehr gering. Vor allem der Default-Emissionsfaktor für Heizöl liegt sehr hoch. Der in (IPCC, 2006a) angegebene technikspezifische Emissionsfaktor für Heizkessel stimmt mit dem länderspezifischen Faktor für Deutschland deutlich besser überein.

Datenquellen, die einen Vergleich mit den hier für die mobilen Emissionsquellen der Haushalte, des landwirtschaftlichen Verkehrs und des Fischfangs berichteten Daten erlauben würden, sind nicht bekannt. Darüber hinaus wurde ein Vergleich der landesspezifischen IEF mit denen anderer Staaten durchgeführt, der aufgrund der heterogenen Zusammensetzung der Unterkategorien gerade für Methan und Lachgas allerdings nur begrenzt aussagefähig ist.

3.2.9.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (1.A.4 stationär)

Für das Jahr 2023 wurden die vorläufigen Daten durch die mittlerweile vorliegende endgültige Energiebilanz ersetzt. Dadurch wurden Rückrechnungen für fast alle Energieträger notwendig. (s. Tabelle 90). Seit 2023 stellt AGEB alle zwei Jahre Revisionen in der Zeitreihe beginnend ab dem Jahr 2003 bereit. Für das Berichtsjahr 2026 fanden wieder Revisionen statt und diese führten zu Rückrechnungen in früheren Jahren.

Tabelle 90: Rückrechnungen in CRF 1.A.4 stationär nach Brennstoffen, in [kt] bzw. [%]

	Abweichung CO_2 absolut					Abweichung CO_2 relativ
	gasförmige Brennstoffe	flüssige Brennstoffe	feste Brennstoffe	weitere Brennstoffe	gesamt	gesamt
2003	0,00	2857,22	0,00	-	2857,22	1,79%
2004	0,00	-748,88	0,00	-	-748,88	-0,49%
2005	0,00	-6034,34	0,00	-	-6034,34	-3,87%
2006	0,00	-3046,43	0,00	-	-3046,43	-1,87%

	Abweichung CO_2 absolut					Abweichung CO_2 relativ
	gasförmige Brennstoffe	flüssige Brennstoffe	feste Brennstoffe	weitere Brennstoffe	gesamt	gesamt
2007	0,00	224,51	0,00	-	224,51	0,19%
2008	0,00	90,72	0,00	-	90,72	0,06%
2009	0,00	-106,76	0,00	-	-106,76	-0,08%
2010	0,00	2097,54	0,00	-	2097,54	1,48%
2011	0,00	219,26	0,00	-	219,26	0,18%
2012	0,00	-761,68	0,00	-	-761,68	-0,59%
2013	0,00	1112,08	0,00	-	1112,08	0,81%
2014	0,00	-1638,52	0,00	-	-1638,52	-1,37%
2015	0,00	-1479,30	0,00	-	-1479,30	-1,18%
2016	0,00	2624,36	0,00	-	2624,36	2,17%
2017	0,00	1813,16	0,00	-	1813,16	1,51%
2018	0,00	1513,19	0,00	-	1513,19	1,32%
2019	0,00	1131,65	0,00	-	1131,65	0,94%
2020	0,00	-999,28	0,00	-	-999,28	-0,82%
2021	-717,28	-666,61	0,00	-	-1383,89	-1,17%
2022	572,88	125,59	0,02	-	698,49	0,64%
2023	-1431,08	864,83	0,01	-	-566,24	-0,56%

3.2.9.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (1.A.4 stationär)

Derzeit sind keine Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4 Verbesserungen des Inventars, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

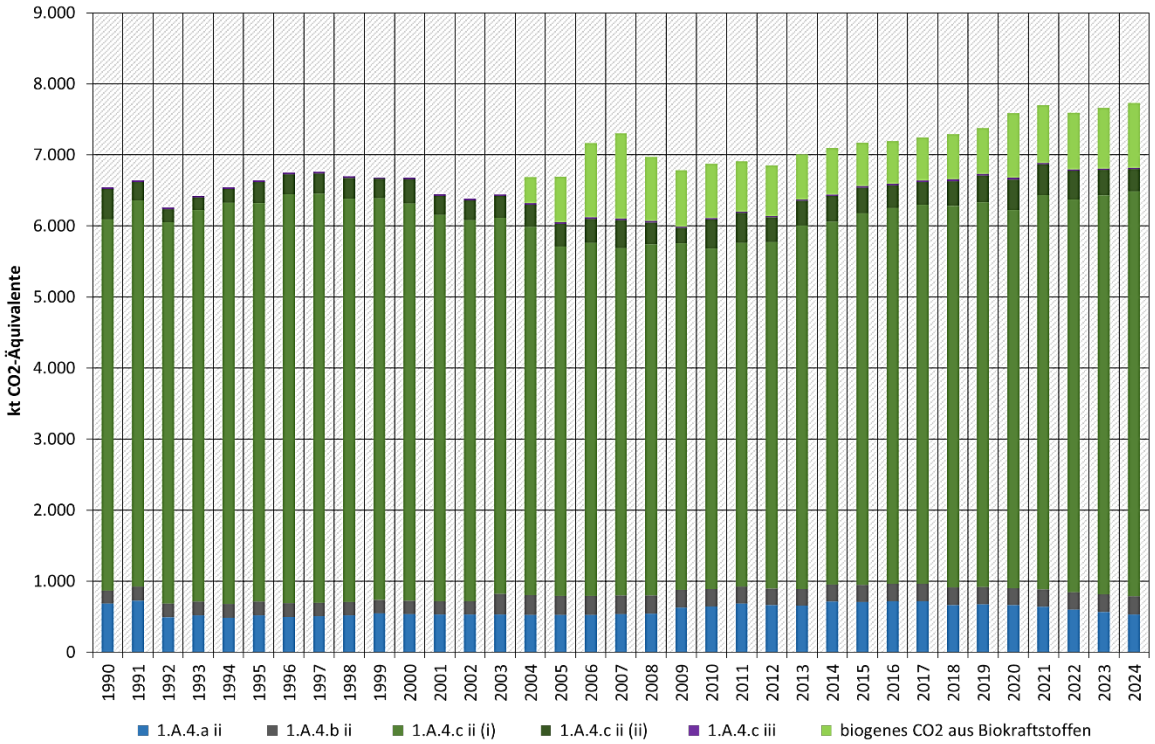
3.2.10 Sonstige: Haushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen, Land-, Forstwirtschaft und Fischerei (1.A.4 mobil)

3.2.10.1 Beschreibung der Kategorie (1.A.4 mobil)

Die Einordnung in die Hauptkategorien erfolgt für die Kategorien 1.A.4 für stationäre & mobile Quellen gemeinsam (Übersicht siehe Kapitel 3.2.9.1). Demnach ist die Kategorie 1.A.4 *Sonstige* in allen ihren Subkategorien für CO_2-Emissionen eine Hauptkategorie nach der Emissionshöhe und dem Trend. Für CH_4-Emissionen sind die Kategorien 1.A.4.a & b Hauptkategorie nach dem Trend.

Die Kategorie 1.A.4 – mobile umfasst verschiedene mobile Quellen in den Unterkategorien 1.A.4.a ii - Gewerbe, Handel und Dienstleistungen, 1.A.4.b ii - Haushalte, 1.A.4.c ii - Land- und Forstwirtschaft und sowie 1.A.4.c iii - Fischerei.

Abbildung 34: THG-Emissionen der betrachteten Teilsektoren seit 1990



Quelle: eigene Darstellung, UBA

3.2.10.2 Methodische Aspekte (1.A.4 mobil)

Die Aktivitätsraten der Quellgruppe 1.A.4 werden, wie für die stationäre Feuerung beschrieben, AGEB (2025a) entnommen.

Die dort in „EBZ 66 – Haushalte erfassten Ottokraftstoffe“ werden dabei vollständig den mobilen Quellen (1.A.4.b ii) zugeordnet.

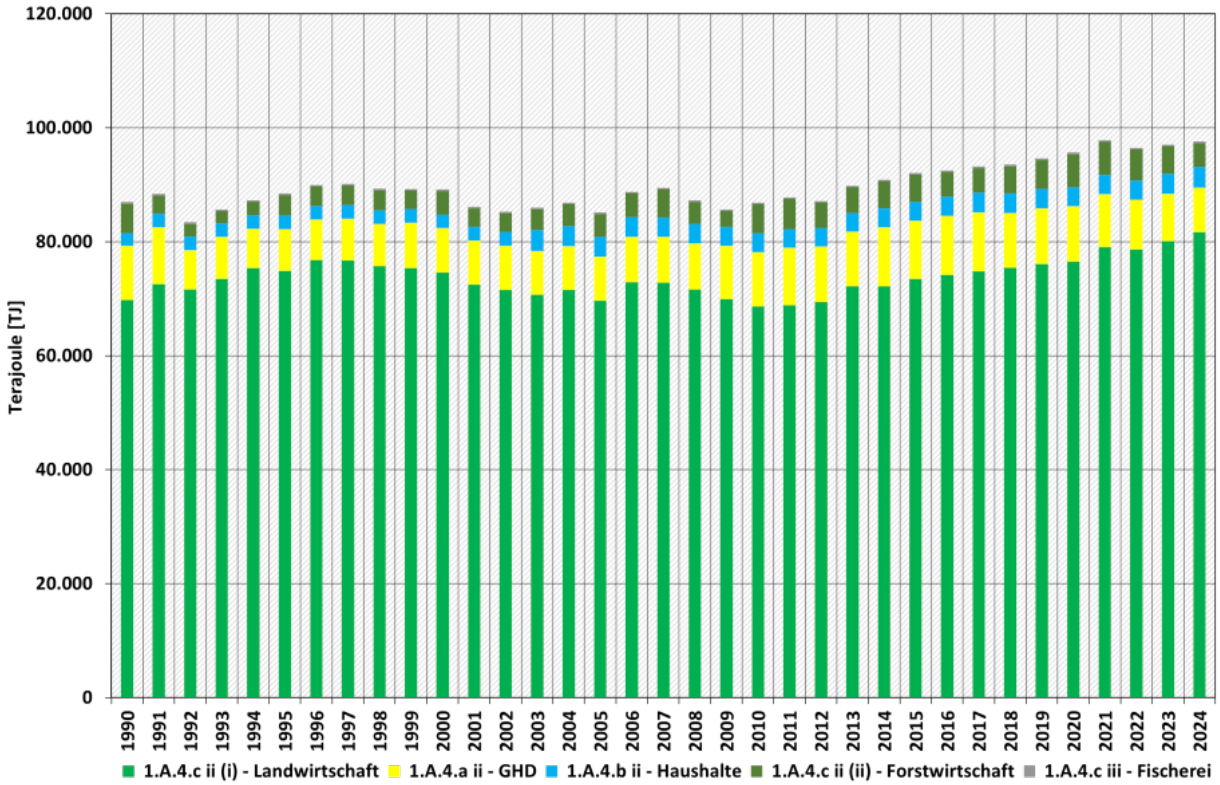
„EBZ 67 – Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und übrige Verbraucher“ beinhaltet auch die Kraftstoff-verbräuche des Militärs, die in (BAFA, 2025a) auch separat statistisch erfasst werden und somit hier abgezogen werden können (siehe Kapitel 3.2.12 zu mobilen Quellen des militärischen Bereichs). Die weitere Aufteilung auf „land- (1.A.4.c ii (i)), forst- (1.A.4.c ii (ii)) und bauwirtschaftlichen Verkehr (1.A.2.g vii)“ sowie mobile Quellen in „1.A.4.a ii (vornehmlich Gabelstapler)“ erfolgt anhand eines in Heidt et al. (2025) erzeugten jährlichen Verteilschlüssels.

Die Aktivitätsdaten der unter „1.A.4.c (iii) – Fischerei“ erfassten Küsten- und Hochseefischerei werden im unter 1.A.3.d vorgestellten BSH-Modell u.a. anhand von AIS-Daten (Automatisches Identifikationssystem der IMO) berechnet. Die Entwicklung der Energieeinsätze spiegelt dabei die Entwicklung der Zahl der über ihr AIS-Signal als solche klassifizierten Fangschiffe wider, für die Verbräuche modelliert wurden.

Die Menge unbeabsichtigt mitverbrannter Schmierstoffe wird grundsätzlich Wallfarth (2014) aus den jährlichen Kraftstoffmengen abgeleitet. Für die in Zweitakt-Ottomotoren (Haushalte, Fortwirtschaft) als Teil des Kraftstoffgemisches mitverbrannten Schmierstoffe ergibt sich diese Menge dagegen als Aufschlag von zwei Prozent zum hier getankten Benzin (siehe auch Kapitel 4.5.1).

Die CO_2-Emissionen aus den fossilen Anteilen der eingesetzten Biokraftstoffe werden den nationalen Gesamtemissionen zugeordnet (s. Erläuterungen im Anhang 7.1.4).

Abbildung 35: Kraftstoffverbrauch innerhalb der betrachteten Teilsektoren seit 1990



Quelle: eigene Darstellung, UBA

Hinsichtlich der verwendeten Emissionsfaktoren für Kohlendioxid wird hier grundsätzlich auf Anhang 6.6 verwiesen. Weiterführende Informationen speziell zu Kohlendioxid aus der Schmierstoff-Mitverbrennung finden sich zudem in Kapitel 4.5.1.

Für Methan und Lachgas kommen landesspezifische Werte gemäß Heidt et al. (2025) und Deichnik (2025) zum Einsatz. Bezüglich der Freisetzung dieser beiden Treibhausgase aus der Schmierstoff-Mitverbrennung wird davon ausgegangen, dass diese bereits in den entsprechenden Emissionsfaktoren der verwendeten Kraftstoffe berücksichtigt und daher als IE *(included elsewhere)* zu berichten ist.

Tabelle 91: für das Berichtsjahr 2024 verwendete Emissionsfaktoren, in kg/TJ

	CH_4	N_2O	Anmerkung
1.A.4.a ii – mobile Quellen in Gewerbe, Handel und Dienstleistungen			
Diesel & Biodiesel	0,62 (4,15)	2,90 (28,6)	gemäß (Heidt et al., 2025)
Flüssiggas	5,63 (-)	3,45 (-)	
1.A.4.b ii – mobile Quellen der Haushalte			
Ottokraftstoff: Maschinen/Geräte, Zweitakt	196 (180)	0,46 (0,40)	gemäß (Heidt et al., 2025)
Ottokraftstoff: Maschinen/Geräte, Viertakt	24,4 (120)	1,33 (2)	
Ottokraftstoff: Freizeitboote, Zweitakt	47,1 (-)	0,29 (-)	
Ottokraftstoff: Freizeitboote, Viertakt	24,9 (-)	1,62 (-)	
1.A.4.c ii (i) – mobile Quellen der Landwirtschaft			
Diesel & Biodiesel	1,16 (4,15)	2,94 (28,6)	gemäß (Heidt et al., 2025)

	CH_4	N_2O	Anmerkung
1.A.4.c ii (ii) – mobile Quellen der Forstwirtschaft			
Diesel & Biodiesel	0,13 (4,15)	3,12 (28,6)	gemäß (Heidt et al., 2025)
Ottokraftstoff: Zweitakt	219 (170)	0,46 (0,40)	
1.A.4.c iii – Fischerei (hier: Hochseefischfang)			
Diesel	1,17 (-)	3,32 (-)	gemäß (Deichnik, 2025)
Schweröl	NA	NA	Nutzung endet 2014
übergreifend			
Schmierstoffe	IE	IE	in EF der Kraftstoffe berücksichtigt

in Klammern: Default-Werte gemäß IPCC (2006a): Band 2, Kapitel 3.3 - *Off-road transportation*, Seite 3.36, Tabelle 3.3.1
EF für Biodiesel und Bioethanol entsprechen den für ihre fossilen Pendants angegebenen Werten

3.2.10.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (1.A.4 mobil)

Die von der mathematischen Unsicherheit des in TREMOD MM entwickelten Verteilschlüssels (siehe oben: 3.2.10.2) dominierten Unsicherheitenangaben der spezifischen Energieeinsätze basieren auf Expertenschätzungen. Gleiches gilt für die verwendeten Kohlendioxid-Emissionsfaktoren. Während bzgl. der Emissionsfaktoren für Methan dagegen Ergebnisse aus Knörr et al. (2009) zugrunde gelegt werden, muss bzgl. Lachgas bis auf weiteres auf Richtwerte gemäß IPCC zurückgegriffen werden.

Für die wie oben beschrieben berechneten Energieeinsätze für Diesel und Ottokraftstoffe werden dabei Unsicherheiten von ±20% angenommen, für die modellierten Mengen des in 1.A.4.a ii eingesetzten Flüssiggases dagegen ±5%.

Die für die verwendeten Emissionsfaktoren angenommenen Unsicherheiten können der nachfolgenden Tabelle entnommen werden.

Tabelle 92: prozentuale Unsicherheiten der Emissionsfaktoren*

	CO_2	CH_4	N_2O
Ottokraftstoffe	±0,4%	-28% / +40%	±50%
Diesel	±3%	±50%	-40% / +140%
Flüssiggas	±2%	±50%	±75%
Ottokraftstoff (Bio)	±1%	±50%	-40% / +140%
Diesel (Bio)	±3%	±50%	-40% / +140%

* untere und obere Grenze des 95%-Perzentils

3.2.10.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (1.A.4 mobil)

Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Tabelle 93: Übersicht relevanter Datenvergleiche

	Vergleich mit...	Erläuterung
CO_2, CH_4, N_2O	alternativen Emissionsinventaren für Deutschland	keine vergleichbaren Datensätze
CO_2	spezif. Tier1-Defaults gemäß (IPCC, 2006a): Band 2, Kapitel 3, Tab. 3.3.1 und 3.5.3 (1.A.4.c iii)	siehe Tabelle 94
CH_4, N_2O	spezif. Tier1-Defaults gemäß (IPCC, 2006a): Band 2, Kapitel 3, Tab. 3.3.1 und 3.5.3 (1.A.4.c iii)	siehe Tabelle 91
CO_2, CH_4, N_2O	spezifischen IEF anderer Staaten	siehe Tabelle 95

Tabelle 94: Vergleich der im Inventar verwendeten EF (CO_2) mit default-Werten*, in kg/TJ*

	Inventarwerte [a]	Default [b]	Untergrenze	Obergrenze
Dieselkraftstoff	74.027	74.100	72.600	74.800
Ottokraftstoff		69.300	67.500	73.000
Zweitakt [b]	72.797			
Viertakt	72.782			
Flüssiggas	66.333	63.100	61.600	65.600
Schweröl	n.a.	77.400	75.500	78.800
Schmierstoffe	73.300		71.900	75.200
Biodiesel	70.800		59.800	84.300
Biobenzin	70.800		59.800	84.300
Zweitakt [c]	*71.641*			
Viertakt	71.607			

[a] Inventarwerte für 2024; [b] gemäß IPCC (2006a): Band 2, Kapitel 2, Tabelle 2.4

[c] inkl. 2 % Schmierstoffe (EF = 73.300 kg/TJ) im Zweitaktergemisch 1:50

Die folgende Tabelle erlaubt einen Vergleich mit spezifischen impliziten Emissionsfaktoren (IEF) anderer Staaten sowie den sich für die EU(27) ergebenden Werten, der sich aufgrund des äußerst heterogenen Quellgruppenzuschnitts jedoch schwierig gestaltet.

Tabelle 95: länderübergreifender Vergleich der berichteten IEF, in kg/TJ

	1.A.4.a ii			1.A.4.b ii			1.A.4.c ii		
	Flüssigkraftstoffe						Dieselkraftstoff		
	CO_2	CH_4	N_2O	CO_2	CH_4	N_2O	CO_2	CH_4	N_2O
Deutschland	68.534	2,61	3,12	69.717	54,2	1,21	74.027	1,16	2,94
Belgien	NO	NO	NO	75.901	36,4	1,42	74.163	2,52	16,8
Dänemark	73.036	11,90	2,80	73.000	52,4	1,16	74.098	0,79	3,58
Frankreich							74.840	0,78	28,70
Italien				73.081	190,0	0,47	73.510	3,98	27,90
Niederlande	72.040	2,61	0,81	73.200	46,8	0,6	72.454	1,11	0,60
Spanien	75.920	406	0,40	IE	IE	IE	73.318	0,68	3,22

EU-27				IE	IE	IE	73.830	2,13	17,4
Großbritannien	63.966	0,08	0,04	70.531	9,49	0,9	74.938	0,41	3,26
	1.A.4.c ii			**1.A.4.c iii**					
	Ottokraftstoff			**Schweröll**			**Diesel / leichtes Heizöl**		
	CO_2	**CH_4**	**N_2O**	**CO_2**	**CH_4**	**N_2O**	**CO_2**	**CH_4**	**N_2O**
Deutschland	72.797	219	0,46	NO	NO	NO	74.027	1,17	3,32
Belgien	72.405	280	0,46	NO	NO	NO	74.100	10,0	0,60
Dänemark	72.989	175	1,31	78.000	1,4	1,95	73.930	1,69	1,64
Frankreich	74.892	165	0,55	NO	NO	NO	74.523	7,00	2,00
Italien	73.081	139	0,89	NO	NO	NO	73.510	4,21	1,45
Niederlande	72.200	282	0,60	NO	NO	NO	72.454	7,00	2,00
Spanien	75.920	202	0,47	NO	NO	NO	74.100	7,00	2,00
EU-27	73.282	169	0,75	77.400	7,00	2,00	73.925	5,94	1,92
Großbritannien	NO	NO	NO	76.120	1,52	3,8	75.313	1,03	3,41

Deutschland: IEF für das Berichtsjahr 2024; sonst: IEF für 2021 gemäß CRF-Submission 2023

3.2.10.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (1.A.4 mobil)

Wie oben beschrieben, sind die Aktivitätsraten der hier betrachteten Emissionsquellen Teil der in EBZ 67 angegebenen Primäraktivitätsdaten. Für das Jahr 2023 wurden hier die in Submission 2024 noch vorläufigen Daten durch finale Angaben ersetzt. Zudem erfolgte eine Korrektur der Beimengungsraten für Biokraftstoffe.

Gleiches gilt für die in EBZ 66 gelisteten Primäraktivitätsdaten der Haushalte.

Tabelle 96: revidierte Primäraktivitätsdaten 2003-2023, in Terajoule

	2003	2004	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
Dieselkraftstoff									
Submission 2026	89.685	86.802	85.271	89.724	103.913	105.611	106.135	102.375	101.113
Submission 2025	89.685	86.802	85.271	89.724	103.914	104.452	106.457	102.720	101.133
Änderung absolut	0,00	0,00	0,00	0,18	-0,50	1.160	-322	-345	-20,7
Änderung relativ	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	1,11%	-0,30%	-0,34%	-0,02%
Ottokraftstoff									
Submission 2026	14.200	13.193	14.151	9.873	8.640	8.553	8.752	8.626	8.584
Submission 2025	14.200	13.193	14.151	14.923	12.227	10.489	10.833	10.872	10.769
Änderung absolut	0,00	0,00	0,00	-5.050	-3.586	-1.937	-2.080	-2.246	-2.184
Änderung relativ	0,00%	0,00%	0,00%	-33,8%	-29,3%	-18,5%	-19,2%	-20,7%	-20,3%
Flüssiggas									
Submission 2026	15.397	13.916	22.317	11.765	17.325	17.638	16.953	14.750	12.998
Submission 2025	23.027	18.339	25.297	11.432	18.702	18.598	18.139	13.962	10.117
Änderung absolut	-7.629	-4.423	-2.980	333	-1.377	-959	-1.186	789	2.881
Änderung relativ	-33,1%	-24,1%	-11,8%	2,91%	-7,36%	-5,16%	-6,54%	5,65%	28,5%

	2003	2004	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
Biodiesel									
Submission 2026		2.983	5.446	6.945	5.699	8.742	7.368	7.084	7.522
Submission 2025		3.164	5.681	7.018	5.772	8.543	7.465	7.126	7.496
Änderung absolut		-181	-235	-72,7	-73,1	198	-97,4	-42,3	26,9
Änderung relativ		-5,73%	-4,14%	-1,04%	-1,27%	2,32%	-1,31%	-0,59%	0,36%
Bioethanol									
Submission 2026		14,0	96,1	356	363	379	404	399	408
Submission 2025		14,5	98,1	357	495	470	510	504	509
Änderung absolut		-0,50	-1,94	-1,81	-132	-91,6	-107	-105	-101
Änderung relativ		-3,43%	-1,98%	-0,51%	-26,7%	-19,5%	-20,9%	-20,9%	-19,8%

Quelle: revidierte Energiebilanz 2023 (AGEB, 2025c) und eigene Berechnungen

Gleichzeitig erfolgte eine alle Jahre betreffende Anpassung der zur Aufteilung der Primäraktivitätsdaten genutzten Verteilfaktoren gemäß TREMOD MM.

Tabelle 97: revidierte prozentuale Anteile an den Primärdaten gemäß EBZ 67

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
EBZ 67 - Dieselkraftstoffe										
1.A.2.g vii										
Submission 2026	0,297	0,189	0,170	0,156	0,216	0,267	0,288	0,284	0,281	0,282
Submission 2025	0,297	0,189	0,170	0,156	0,216	0,255	0,251	0,238	0,219	0,203
Änderung absolut	0,000	0,000	0,000	-0,001	0,000	0,012	0,037	0,046	0,062	0,078
Änderung relativ	0,01%	0,01%	0,00%	-0,36%	-0,16%	4,79%	14,9%	19,4%	28,2%	38,5%
1.A.4.a ii										
Submission 2026	0,060	0,040	0,037	0,036	0,051	0,057	0,056	0,055	0,055	0,055
Submission 2025	0,060	0,040	0,037	0,037	0,051	0,054	0,049	0,046	0,043	0,040
Änderung absolut	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,007	0,009	0,012	0,015
Änderung relativ	-0,03%	-0,02%	-0,01%	-0,37%	-0,16%	4,79%	14,9%	19,4%	28,2%	38,5%
1.A.4.c ii (i)										
Submission 2026	0,624	0,766	0,785	0,797	0,718	0,658	0,630	0,636	0,639	0,640
Submission 2025	0,624	0,766	0,785	0,796	0,718	0,674	0,678	0,695	0,718	0,740
Änderung absolut	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	-0,016	-0,048	-0,059	-0,079	-0,100
Änderung relativ	0,00%	0,00%	0,00%	0,09%	0,06%	-2,32%	-7,07%	-8,52%	-11,1%	-13,5%
1.A.4.c ii (ii)										
Submission 2026	0,019	0,006	0,009	0,011	0,016	0,018	0,025	0,026	0,025	0,023
Submission 2025	0,019	0,006	0,009	0,011	0,016	0,017	0,022	0,021	0,020	0,017
Änderung absolut	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,003	0,004	0,006	0,006
Änderung relativ	-0,03%	-0,02%	-0,01%	-0,37%	-0,16%	4,79%	14,9%	19,4%	28,2%	38,5%

Quelle: Heidt et al. (2025)

Tabelle 98: revidierte Energieeinsätze der betrachteten Teilsektoren, in Terajoule

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
1.A.4.a ii										
Submission 2026	9.480	7.317	7.748	7.713	9.471	10.423	10.582	10.258	9.995	9.906
Submission 2025	9.482	7.318	7.749	7.733	9.482	10.144	9.680	9.270	8.689	8.239
Änderung absolut	-1,77	-0,86	-0,47	-20,4	-11,2	278	902	988	1.306	1.667
Änderung relativ	-0,02%	-0,01%	-0,01%	-0,26%	-0,12%	2,74%	9,31%	10,7%	15,0%	20,2%
1.A.4.b ii										
Submission 2026	2.177	2.395	2.395	3.475	3.321	3.348	3.345	3.392	3.459	3.353
Submission 2025	2.177	2.395	2.395	3.475	3.321	3.352	3.349	3.396	3.458	3.523
Änderung absolut	0,00	0,00	0,00	-0,18	0,02	-4,15	-4,43	-4,65	1,18	-170
Änderung relativ	0,00%	0,00%	0,00%	-0,01%	0,00%	-0,12%	-0,13%	-0,14%	0,03%	-4,82%
1.A.4.c ii (i)										
Submission 2026	69.792	74.870	74.621	69.542	68.656	71.760	71.960	72.071	69.688	69.319
Submission 2025	69.792	74.870	74.621	69.662	68.660	73.512	76.515	79.073	78.635	80.158
Änderung absolut	0,000	0,000	0,000	-121	-3,79	-1.752	-4.555	-7.003	-8.947	-10.839
Änderung relativ	0,00%	0,00%	0,00%	-0,17%	-0,01%	-2,38%	-5,95%	-8,86%	-11,4%	-13,5%
1.A.4.c ii (ii)										
Submission 2026	5.226	3.619	4.155	4.019	3.352	2.009	3.011	5.492	5.222	2.620
Submission 2025	5.227	3.620	4.155	4.035	5.150	4.822	5.819	5.853	5.485	4.892
Änderung absolut	-0,782	-0,420	-0,295	-16,0	-1.798	-2.813	-2.808	-361	-263	-2.271
Änderung relativ	-0,01%	-0,01%	-0,01%	-0,40%	-34,9%	-58,3%	-48,3%	-6,17%	-4,79%	-46,4%

Quelle: eigene Berechnungen basierend auf auf AGEB (2025c) sowie Heidt et al. (2025)

Parallel hierzu erfolgte eine Aktualisierung der für die einzelnen mobilen Emittenten modellierten impliziten Emissionsfaktoren. Diese Aktualisierung wirkt sich auf die Emissionen aller Teilsektoren aus (siehe auch Kapitel 3.2.8.4.5).

Aus der Gesamtheit der beschriebenen Anpassungen resultieren folgende rekalkulierte Emissionsmengen:

Tabelle 99: revidierte Emissionsmengen, in Kilotonnen CO_2-Äquivalenten

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
1.A.4.a ii										
Submission 2026	687	519	540	526	646	726	727	709	691	683
Submission 2025	688	520	541	527	647	707	665	641	600	567
Änderung absolut	-0,87	-0,67	-0,70	-1,58	-1,40	19,1	61,4	68,8	91,0	116
Änderung relativ	-0,13%	-0,13%	-0,13%	-0,30%	-0,22%	2,71%	9,23%	10,7%	15,2%	20,4%
1.A.4.b ii										
Submission 2026	180	192	188	269	246	243	240	243	248	240
Submission 2025	178	191	187	267	245	242	240	243	247	252

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
Änderung absolut	2,20	1,45	0,99	1,58	1,21	0,60	0,45	0,43	0,57	-11,8
Änderung relativ	1,23%	0,76%	0,53%	0,59%	0,49%	0,25%	0,19%	0,18%	0,23%	-4,68%
1.A.4.c ii										
Submission 2026	5.653	5.906	5.930	5.240	5.052	5.249	5.203	5.467	5.281	5.028
Submission 2025	5.654	5.910	5.934	5.240	5.202	5.596	5.753	5.991	5.937	5.977
Änderung absolut	-1,34	-3,10	-3,33	-0,11	-150	-346	-550	-524	-657	-949
Änderung relativ	-0,02%	-0,05%	-0,06%	0,00%	-2,89%	-6,19%	-9,56%	-8,74%	-11,1%	-15,9%
1.A.4.c iii										
Submission 2026	25,43	20,02	19,86	18,84	18,89	21,29	26,87	19,87	16,53	16,90
Submission 2025	25,47	20,05	19,89	18,86	18,92	21,32	26,91	19,90	16,55	16,92
Änderung absolut	-0,04	-0,03	-0,03	-0,03	-0,03	-0,03	-0,04	-0,03	-0,02	-0,02
Änderung relativ	-0,14%	-0,14%	-0,14%	-0,14%	-0,14%	-0,14%	-0,14%	-0,14%	-0,14%	-0,14%
1.A.4 - MOBILE EMITTENTEN GESAMT										
Submission 2026	6.546	6.638	6.679	6.054	5.963	6.239	6.197	6.439	6.236	5.968
Submission 2025	6.546	6.640	6.682	6.054	6.113	6.566	6.685	6.894	6.801	6.813
Änderung absolut	-0,04	-2,34	-3,07	-0,13	-150	-327	-488	-455	-565	-845
Änderung relativ	0,00%	-0,04%	-0,05%	0,00%	-2,46%	-4,97%	-7,30%	-6,60%	-8,31%	-12,4%

Quelle: eigene Berechnungen; inkl. fossiles CO_2 aus der Verwendung von Biokraftstoffen

3.2.10.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (1.A.4 mobil)

Derzeit sind keine über die routinemäßige Prüfung und Revision der verwendeten Modelle hinausgehenden Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4 Verbesserungen des Inventars, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

3.2.11 Andere Bereiche (1.A.5.a stationär)

Die Kategorie 1.A.5 umfasst die verbrennungsbedingten Emissionen des militärischen Bereichs. Sie ist in die Kategorien 1.A.5.a „Stationary“ und 1.A.5.b „Mobile“ untergliedert.

3.2.11.1 Beschreibung der Kategorie (1.A.5.a stationär)

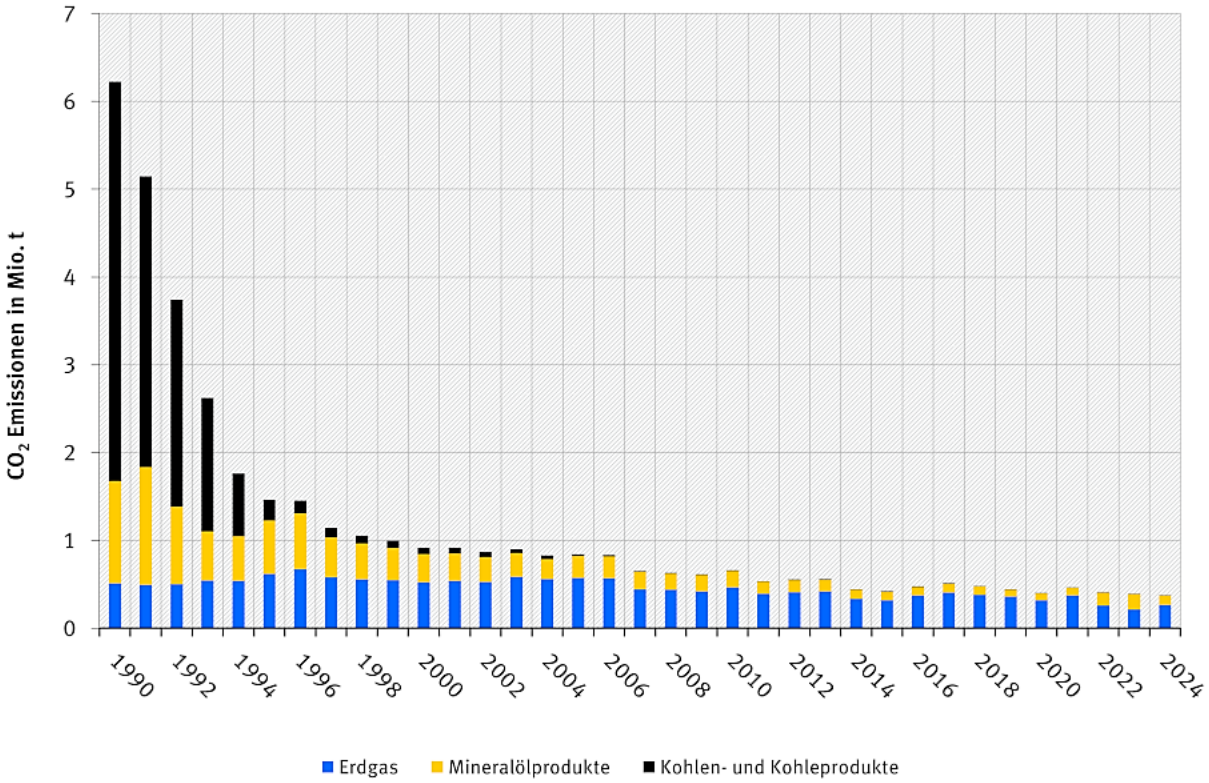
KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
L/T	1 A 5, Military	fossil fuels	CO_2	11764,62	0,91	597,06	0,09	-94,92
-/-	1 A 5, Military	0	CH_4	312,97	0,03	1,51	0,01	-99,52
-/-	1 A 5, Military	0	N_2O	54,14	0,01	1,51	0,01	-97,21

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2	CS, Tier 1	NS	CS/D
CH_4	CS, Tier 1, Tier 3	NS/M	CS/D/M
N_2O	CS, Tier 1, Tier 3	NS/M	CS/D/M

Die Einordnung in die Hauptkategorien erfolgt für die Kategorie 1.A.5 für stationäre & mobile Quellen gemeinsam. Dementsprechend ist die Kategorie 1.A.5 „Andere Bereiche“ eine Hauptkategorie für CO_2 nach der Emissionshöhe und dem Trend.

Die folgende Abbildung 36 zeigt den Emissionsverlauf seit 1990. Die besonders starke Emissionsreduktion resultiert aus der Schließung vieler militärischer Dienststellen, und einem deutlichen Trend zu weniger festen Brennstoffen.

Abbildung 36: Entwicklung der CO_2-Emissionen der Kategorie 1.A.5.a



Quelle: eigene Darstellung, UBA

3.2.11.2 Methodische Aspekte (1.A.5.a stationär)

Aktivitätsraten

Grundlage für die verwendeten Aktivitätsraten ist die Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland (AGEB). Da diese den Endenergieverbrauch der militärischen Dienststellen ab 1995 nicht mehr getrennt ausweist, sondern nur noch in Zeile 67 unter „Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und übrige Verbraucher“ mit erfasst, werden Angaben des Bundesministeriums der Verteidigung (BMVg) genutzt, das dem UBA den „Energieeinsatz zur Wärmeerzeugung in der Bundeswehr“ nach Brennstoffen meldet. Diese Zahlen werden auch jährlich im Nachhaltigkeitsbericht des Bundesministeriums der Verteidigung und der

Bundeswehr (BMVg, 2024) veröffentlicht. Diese Zahlen werden von den Angaben der Energiebilanzzeile 67 (Gewerbe, Handel, Dienstleistungen) subtrahiert und nicht in 1.A.4, sondern in 1.A.5 berichtet. Seit dem Berichtsjahr 2008 wird für die Kategorie 1.A.5.a auch der Einsatz von Holz berichtet. Die Daten dafür kommen für die Zeitreihe ab 2003 von der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat).

Emissionsfaktoren

Eine Beschreibung sowie eine Liste der verwendeten CO_2 Emissionsfaktoren ist im Anhang, Anhang 6.6 verfügbar.

Datengrundlage für die verwendeten Emissionsfaktoren für Methan und Lachgas sind die Ergebnisse eines Forschungsvorhabens der Universität Stuttgart im Auftrag des Umweltbundesamtes (Struschka et al., 2008). Im Rahmen dieses Vorhabens wurden gerätebezogene und kategoriespezifische Emissionsfaktoren von Feuerungsanlagen in den militärischen Dienststellen für alle wichtigen Abgaskomponenten mit hohem Detaillierungsgrad für das Bezugsjahr 2005 berechnet. Die Methode bei der Ermittlung der Faktoren entspricht der für die Kategorie 1.A.4 beschriebenen Methode. Die Tabelle 100 zeigt die verwendeten sektoralen Emissionsfaktoren.

Tabelle 100: Sektorale Emissionsfaktoren für militärische Dienststellen, Bezugsjahr 2005, fortgeschrieben für die aktuelle Berichterstattung, in [kg/TJ]

	CH_4	N_2O
Steinkohlen	2,0	4,8
Braunkohlenbriketts	242	0,37
Heizöl EL	0,03	0,56
Erdgas	0,042	0,29

3.2.11.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (1.A.5.a stationär)

Angaben zu den Unsicherheiten der Emissionsfaktoren können der Beschreibung der Kategorie 1.A.4 entnommen werden. Im Anhang 2 Kapitel 13.6 im NIR (UBA, 2007) ist beschrieben, wie die Unsicherheiten für die Aktivitätsraten ermittelt wurden.

3.2.11.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (1.A.5.a stationär)

Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt, während sie für ED durch die Nationale Koordinierungsstelle durchgeführt wurden

Da andere Datenquellen für Deutschland nicht bekannt sind, ist eine vergleichende Verifikation der hier berichteten Emissionen derzeit nicht möglich.

3.2.11.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (1.A.5.a stationär)

Tabelle 101: Rückrechnungen in CRF 1.A.5 stationär nach Brennstoffen, in [kt] bzw. [%]

	Abweichung CO_2 absolut					Abweichung CO_2 relativ
	gasförmige Brennstoffe	flüssige Brennstoffe	feste Brennstoffe	weitere Brennstoffe	gesamt	gesamt
2023	0,00	0,00	-0,09		-0,09	-0,02%

Für das Jahr 2023 wurden die vorläufigen Daten durch die mittlerweile vorliegende endgültige Energiebilanz ersetzt, was zu minimalen Rückrechnungen führte.

3.2.11.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (1.A.5.a stationär)

Derzeit sind keine Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4 Verbesserungen des Inventars, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

3.2.12 Andere Bereiche (1.A.5.b mobil)

3.2.12.1 Beschreibung der Kategorie (1.A.5.b mobil)

Gas	angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2	Tier 1 [a], CS	NS/M [b]	D [a], CS
CH_4	CS, Tier 1, Tier 3	NS/M [b]	CS (M)
N_2O	CS, Tier 1, Tier 3	NS/M [b]	CS (M)
NO_X, CO, NMVOC, SO_2	CS, Tier 1, Tier 3	NS/M [b]	CS (M)

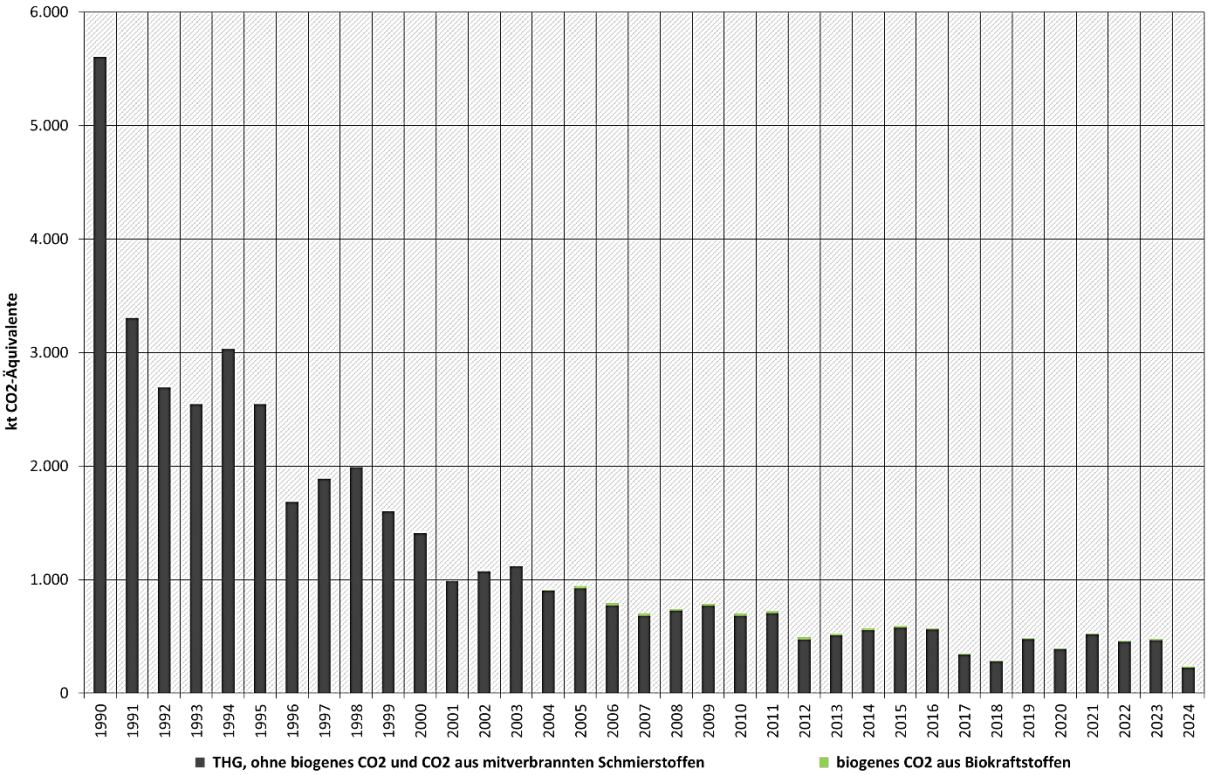
[a] für Biodiesel und Flugbenzin: Default-EF gemäß IPCC (2006a): Band 2, Kapitel 2, Tabelle 2.4

[b] militär. Schiffsverkehr: berechnet in (Deichnik, 2025)

Die Hauptkategorie-Analyse erfolgt für 1.A.5 – „Andere Bereiche“ übergreifend für stationäre und mobile Quellen (siehe Kapitel 3.2.11.1). Demnach ist die Quellgruppe 1.A.5 eine Hauptkategorie für CO_2 nach der Emissionshöhe und dem Trend.

Die folgende Abbildung zeigt die Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen seit 1990.

Abbildung 37: Entwicklung der THG-Emissionen aus mobilen Quellen des Militärs seit 1990



Quelle: eigene Darstellung, UBA

3.2.12.2 Methodische Aspekte (1.A.5.b mobil)

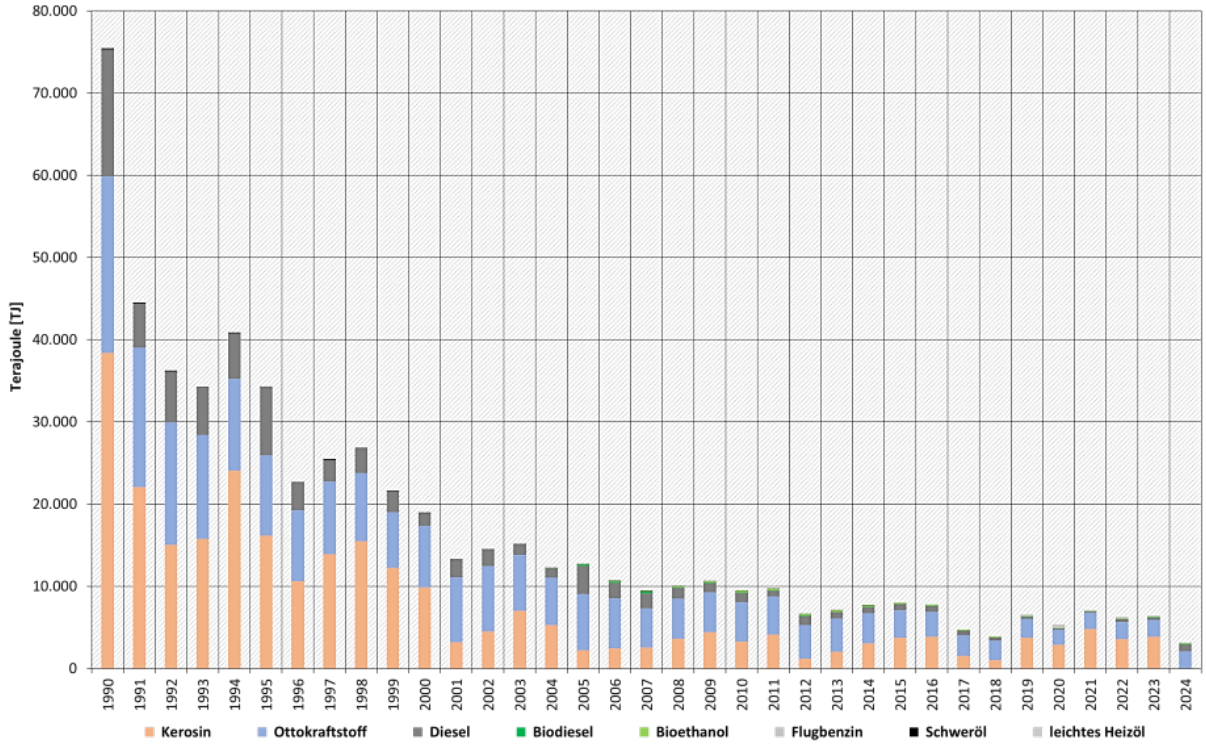
Aktivitätsraten

Grundlage für die verwendeten Aktivitätsraten ist die Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland (AGEB), der die Kraftstoffeinsätze des Militärischen Boden- und Luftverkehrs (Diesel- und Ottokraftstoffe inkl. biogene Beimischungen, Kerosin, Flugbenzin) lediglich bis 1993 direkt entnommen werden können. Ab 1994 wird auf (BAFA, 2025a) zurückgegriffen. Die dort in 1000 t angegebenen Verbräuche werden auf Basis der ausgewiesenen Heizwerte in Terajoule umgerechnet (AGEB, 2025d). Die Kraftstoffeinsätze der Marine sind dagegen nur als Teilmenge der in „EBZ 6 – Hochseebunkerungen“ geführten Mengen verfügbar und werden daher, wie in Kapitel 3.2.8.4.4 näher beschrieben, gesondert berechnet.

Darüber hinaus werden die Mengen mitverbrannter Schmierstoffe über Mitverbrennungsraten gemäß Wallfarth (2014) aus den Gesamtmengen der in den Unterkategorien 1.A.5.b i bis iii eingesetzten Kraftstoffe abgeleitet (siehe auch Kapitel 4.5.1).

Die CO_2-Emissionen aus den fossilen Anteilen der eingesetzten Biokraftstoffe werden den nationalen Gesamtemissionen zugeordnet (s. Erläuterungen im Anhang 7.1.4).

Abbildung 38: Entwicklung des Kraftstoffeinsatzes seit 1990



Quelle: eigene Darstellung, UBA

Emissionsfaktoren

Hinsichtlich der Emissionsfaktoren für Kohlendioxid wird hier grundsätzlich auf Anhang 6.6 verwiesen. Es kommen sowohl landesspezifische als auch Default-Werte (Biodiesel, Flugbenzin) zum Einsatz. Weiterführende Informationen speziell zur Schmierstoffmitverbrennung finden sich in Kapitel 4.5.1.

Für Methan und Lachgas kommen für den bodengebundenen Verkehr sowie für den Einsatz von Flugbenzin landesspezifische Werte zum Einsatz. Für Kerosin werden aufgrund der vom zivilen Flugverkehr stark abweichenden Flugzeugtypen IPCC-Defaults verwendet. Die für die Marine verwendeten Emissionsfaktoren werden Deichnik (2025) entnommen. Bezüglich der Freisetzung dieser beiden Treibhausgase aus der Schmierstoff-Mitverbrennung wird davon ausgegangen, dass diese bereits in den entsprechenden Emissionsfaktoren der verwendeten Kraftstoffe berücksichtigt und daher als IE *(included elsewhere)* zu berichten ist.

Tabelle 102: für das Berichtsjahr 2024 verwendete Emissionsfaktoren, in kg/TJ

	CH_4	N_2O	Quelle
1.A.5.b i – militärische Bodenfahrzeuge und Maschinen			
Diesel & Biodiesel	2,97 (-)	0,81 (-)	IEF aus 1.A.3.b: schweres Nutzfahrzeug
Ottokraftstoff & Bioethanol	7,04 (-)	0,72 (-)	IEF aus 1.A.3.b
1.A.5.b ii – militärischer Flugverkehr [a]			
Kerosin	0,50 (0,50)	2,00 (2,00)	Tier1-default gemäß IPCC (2006a)
Flugbenzin	20,4 (-)	2,30 (-)	Siehe 1.A.3.a

	CH_4	N_2O	Quelle
1.A.5.b iii – militärischer Seeverkehr / Marine [b]			
Diesel & leichtes Heizöl	0,85 (7,00)	4,15 (2,00)	gemäß Deichnik (2025)
Schweröl	n.a.	n.a.	Nutzung endet 2014
übergreifend			
Schmierstoffe	IE	IE	in EF der Kraftstoffe abgebildet

in Klammern: Default-Werte gemäß IPCC (2006a): Band 2, Kapitel 3: a Tab. 3.6.5; b Tab. 3.5.3

EF für Biodiesel und Bioethanol entsprechen den für ihre fossilen Pendants verwendeten Werten

3.2.12.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (1.A.5.b mobil)

Innerhalb der Untersektoren 1.A.5.b i und ii wird auf Default-Unsicherheiten gemäß IPCC zurückgegriffen. Davon abweichend wurden in (Deichnik, 2025) spezifische Unsicherheiten für Aktivitätsdaten und Emissionsfaktoren des militärischen Seeverkehrs abgeleitet.

Für die wie oben beschrieben berechneten spezifischen Energieeinsätze werden Unsicherheiten von ±5% angenommen.

Die für die verwendeten Emissionsfaktoren angenommenen Unsicherheiten können der nachfolgenden Tabelle entnommen werden.

Tabelle 103: prozentuale Unsicherheiten der Emissionsfaktoren*

	CO_2	CH_4	N_2O
Ottokraftstoffe	±0,4%	-28% / +40%	-40% / +140%
Diesel / leichtes Heizöl	±3%	±50%	-40% / +140%
Kerosin	±1%	-57% / +100%	-70% / +150%
Flugbenzin	±1%	-57% / +100%	-70% / +150%
Schweröl	±5%	±50%	-40% / +140%

* untere und obere Grenze des 95%-Perzentils

3.2.12.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (1.A.5.b mobil)

Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Tabelle 104: Übersicht relevanter Datenvergleiche

	Vergleich mit...	Erläuterung
CO_2	alternativen Emissionsinventaren für Deutschland	keine vergleichbaren Datensätze
CO_2	spezif. Tier1-Default-EF gemäß IPCC (2006a): Band 2, Kapitel 2, Tabelle 2.4	für 1.A.5.b ii & iii: siehe Tabelle 105
CO_2	Tier1-Default-EF gemäß IPCC (2006a): Band 2, Kapitel 2, Tabelle 2.4	für 1.A.5.b i: siehe Tabelle 105
CH_4, N_2O	spezifischen Tier1-Default-EF gemäß IPCC (2006a)	für 1.A.5.b ii & iii: siehe Tabelle 102
CH_4, N_2O	Tier1-Default-EF gemäß IPCC (2006a): Band 2, Kapitel 2, Tabelle 2.4	1.A.5.b i: siehe Tabelle 102
CO_2, CH_4, N_2O	spezifischen IEF anderer Staaten	keine vergleichbaren Datensätze

Tabelle 105: Vergleich der verwendeten EF(CO_2) mit Default- Werten, in kg/TJ

	Inventarwerte[a]	Default[b]	Untergrenze	Obergrenze
Diesel & leichtes Heizöl	74.027	74.100	72.600	74.800
Ottokraftstoffe	72.782	69.300	67.500	73.000
Kerosin	73.256	71.500	69.800	74.400
Flugbenzin	71.199	70.000	67.500	73.000
Biodiesel	70.800		59.800	84.300
Bioethanol	71.607	70.800	59.800	84.300

[a] für das Berichtsjahr 2024; [b] gemäß IPCC (2006a): Band 2, Kapitel 2, Tabelle 2.4

Tabelle 106: länderübergreifender Vergleich der berichteten IEF, in kg/TJ

	fossile Flüssigbrennstoffe		
	CO_2	CH_4	N_2O
Deutschland	73.402	5,86	0,91
Belgien	72.520	4,27	2,46
Dänemark	72.520	2,17	2,53
Frankreich	IE	IE	IE
Italien			
Niederlande	74.010	6,54	3,95
Spanien	C	C	C
EU-27			
Großbritannien	72.630	1,93	2,57

Deutschland: IEF für das Berichtsjahr 2024; alle anderen: IEF für 2021 gemäß CRF-Submission 2023

3.2.12.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (1.A.5.b mobil)

Gegenüber der Submission 2025 erfolgen nennenswerte Rückrechnungen zum einen aufgrund konsolodierter Heizwerte für Ottokraftstoffe infolge der Revision der Energiebilanzen 2003 bis 2022. Hinzu kommt die Finalisierung der Energiebilanz 2023. Die in (Deichnik, 2025) modellierten Verbräuche des militärischen Seeverkehrs bleiben hiervon unberührt und damit unverändert.

Tabelle 107: revidierte Energiemengen 2003-2023, in Terajoule

	2003	2004	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
Militärischer Landverkehr & mobile Maschinen									
Submission 2026	7.870	6.761	10.323	6.023	4.140	2.050	2.219	2.586	2.447
Submission 2025	7.868	6.761	10.304	6.028	4.044	1.995	2.160	2.562	2.487
Änderung absolut	2,17	-0,13	19,2	-5,84	96,1	55,1	59,2	24,1	-40,1
Änderung relativ	7.870	6.761	10.323	6.023	4.140	2.050	2.219	2.586	2.447
Militärische Luftverkehr									
Submission 2026	7.029	5.281	2.200	3.286	3.726	2.904	4.810	3.551	3.875
Submission 2025	7.029	5.281	2.200	3.286	3.726	2.904	4.810	3.551	3.369

	2003	2004	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
Änderung absolut	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	506
Änderung relativ	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	15,0%
MOBILE EMITTENTEN DES MILITÄRS GESAMT									
Submission 2026	15.158	12.291	12.762	9.518	8.021	5.345	7.148	6.268	6.457
Submission 2025	15.156	12.291	12.743	9.524	7.925	5.289	7.089	6.244	5.991
Änderung absolut	2,17	-0,13	19,2	-5,84	96,1	55,1	59,2	24,1	466
Änderung relativ	0,01%	0,00%	0,15%	-0,06%	1,21%	1,04%	0,83%	0,39%	7,77%

Quelle: eigene Berechnungen

Hinzu kommt eine Aktualisierung des Kohlendioxid-Emissionsfaktors 2023 für Ottokraftstoffe:

Tabelle 108: revidierter Kohlendioxid-Emissionsfaktor 2023 für fossilen Ottokraftstoff

	EF
Submission 2026	72.782
Submission 2025	72.787
Änderung absolut	-4,16
Änderung relativ	-0,01%

Diese Anpassungen ziehen für sämtliche betrachteten Jahre Änderungen der berichteten Treibhausgas-Emissionen nach sich.

Tabelle 109: revidierte Emissionsdaten, in kt CO_2-Äquivalenten

	2003	2004	2005	2010	2015	2015	2020	2021	2022	2023
militärischer Landverkehr & mobile Maschinen										
Submission 2026	582	496	744	425	292	144	156	181	171	582
Submission 2025	582	496	742	425	285	140	151	180	174	582
Änderung absolut	0,16	0,15	2,12	-0,29	6,43	3,93	4,28	1,71	-2,86	0,16
Änderung relativ	0,03%	0,03%	0,29%	-0,07%	2,25%	2,81%	2,83%	0,95%	-1,64%	0,03%
militärischer Luftverkehr										
Submission 2026	519	390	162	243	275	214	355	262	286	519
Submission 2025	519	390	162	243	275	214	355	262	249	519
Änderung absolut	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	37,3	0,00
Änderung relativ	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	15,0%	0,00%
MOBILE EMITTENTEN DES MILITÄRS GESAMT										
Submission 2026	1.120	905	925	683	578	388	520	453	467	1.120
Submission 2025	1.120	905	923	683	572	384	515	452	433	1.120
Änderung absolut	0,16	0,15	2,12	-0,29	6,43	3,93	4,28	1,71	34,5	0,16
Änderung relativ	0,01%	0,02%	0,23%	-0,04%	1,12%	1,02%	0,83%	0,38%	7,96%	0,01%

Quelle: eigene Berechnungen; inkl. fossiles CO_2 aus der Verwendung von Biokraftstoffen

3.2.12.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (1.A.5.b mobil)

Derzeit sind keine spezifischen Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4 Verbesserungen des Inventars, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

3.2.13 Militär

Emissionen aus internationalen Einsätzen der Bundeswehr unter NATO- oder UN-Mandat werden in den deutschen Emissionsinventaren nicht erfasst, sondern als Memo-Items als *not estimated* (NE) vermerkt. Grund hierfür sind fehlende Informationen zu im Rahmen dieser Mandate bezogenen bzw. eingesetzten Kraftstoffmengen (Aktivitätsdaten).

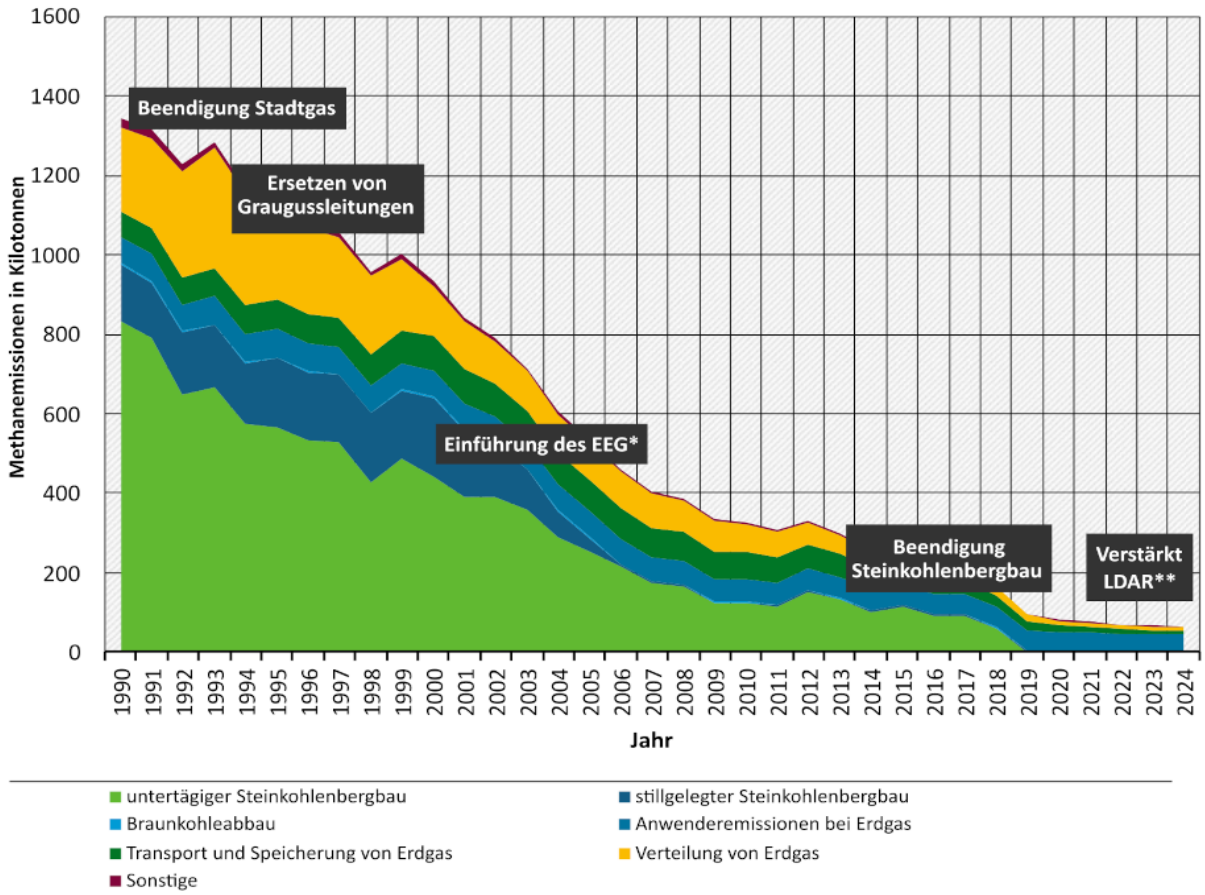
Emissionen aus der stationären Feuerung militärischer Dienststellen und dem inländischen Einsatz militärischer Fahrzeuge und Maschinen werden in den deutschen Emissionsinventaren dagegen unter der Kategorie 1.A.5 – „Other“ erfasst und beschrieben (siehe die Kapitel 3.2.11 und 3.2.12).

3.3 Diffuse Emissionen aus Brennstoffen (1.B)

Während aller Stadien, von der Extraktion fossiler Brennstoffe bis hin zu ihrem abschließenden Gebrauch, können Bestandteile als diffuse Emissionen entweichen oder freigesetzt werden. Während Methan die bedeutendsten Emissionen innerhalb der Quellkategorie Feste Brennstoffe und Erdgas darstellt, ist bei den diffusen Emissionen von Öl und Erdgas zusätzlich NMVOC von Bedeutung. Kohlendioxid spielt in der Kategorie 1.B eine Rolle bei der Veredelung fester Brennstoffe, der Sauergasaufbereitung, Prozessen in der Raffinierie sowie als Bestandteil von Erdgas bei Leckagen. Die Quellkategorie 1.B. ist keine Quelle für fluorierte Gase.

Abbildung 39 zeigt die Entwicklung der Methanemissionen in der Kategorie 1.B. In den einzelnen Unterkategorien wird dieser Trend erläutert. Insgesamt sind die Methanemissionen um 95% seit 1990 zurückgegangen.

Abbildung 39: Entwicklung der Methanemissionen in der Kategorie 1.B



nur ausgewählte Maßnahmen, die Einfluss auf die Entwicklung der Emissionsmengen hatten, sind aufgeführt (*EEG: Erneuerbare-Energien-Gesetz; **LDAR: Leckerkennung und -reparatur)
Quelle: eigene Darstellung, UBA

3.3.1 Feste Brennstoffe - Kohlenbergbau und -umwandlung (1.B.1)

KC	Category	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
-/-/2	1 B 1, Solid Fuels	CO_2	1832,80	0,15	699,81	0,10	-61,82
L/T	1 B 1, Solid Fuels	CH_4	28579,16	2,21	78,09	0,02	-99,73

Die Kategorie Kohlenbergbau und -Umwandlung ist für CH_4-Emissionen eine Hauptkategorie nach der Emissionshöhe und dem Trend, sowie zusätzlich für CO_2 nach der Methode-2-Analyse.

Im Bergbau wird zwischen Tagebau, Gewinnung des Rohstoffs in offenen Gruben, und Tiefbau, Abbau der Lagerstätte in untertägigen Abbauräumen, unterschieden. In Deutschland wird Braunkohle seit 2003 ausschließlich im Tagebau gewonnen. Die Steinkohlenförderung wurde 2018 eingestellt.

Die Kategorie ist nach folgendem Schema untergliedert:

Quellgruppe		Enthaltene Emissionen
1.B.1.a. Kohlenbergbau		
i.	Tiefbau	
	Bergbauliche Tätigkeiten	Gesamtemissionen aus Wetterströmen und Grubengasabsaugung des aktiven Steinkohlentiefbaus reduziert um die Menge verwerteten Grubengases. Seit 2019 findet kein Bergbau mehr statt, daher wird hier „NO“ berichtet.
	anschließende bergbauliche Tätigkeiten	Emissionen aus Aufbereitung, Lagerung und Transport von Steinkohle. Seit 2019 findet kein Bergbau mehr statt, daher wird hier „NO“ berichtet.
	Stillgelegte Kohlenbergwerke	Emissionen aus stillgelegten Steinkohlebergwerken
	Abfackelung von Grubengas	Kohlendioxidemissionen aus dem Abfackeln von Grubengas – dies wurde nur im Zeitraum 2009 bis 2012 in Deutschland durchgeführt; sonst wird hier „NO“ berichtet.
ii.	Tagebau	
	Bergbauliche Tätigkeiten	Emissionen aus aktivem Braunkohlentagebau. Hierbei wird das gesamte Methanpotential der deutschen Braunkohle zugrunde gelegt und als Emission während der Förderung angenommen. Eine spätere Emission von Methan bei der Weiterverarbeitung ist somit bereits abgedeckt. Es erfolgt keine Grubengaserfassung oder -nutzung.
	anschließende bergbauliche Tätigkeiten	Keine getrennte Ausweisung – die Emissionen sind bereits in „Bergbauliche Tätigkeiten“ enthalten
iii.	Kohleexploration	In Deutschland finden keine Bohrungen nach Kohlelagerstätten statt. Daher wird hier „NO“ berichtet.
1.B.1.b. Umwandlung von Brennstoffen		
	Holzkohle-produktion	Die Emissionen der Erzeugung sind in 1.A.1.a enthalten. Die Verwendung von Holzkohle ist unter 2.G.4 zusammengefasst. Daher wird hier „IE“ berichtet.
	Pflanzenkohle-produktion	Pflanzenkohle wird in Deutschland nur in sehr geringen Mengen hergestellt und nicht als Brennstoff verwendet. Daher wird hier „NA“ berichtet.
	Holzpellet-produktion	Es liegen keine Informationen zu diffusen Treibhausgasemissionen aus Pellets vor, so dass hier „NA“ berichtet wird.
	Koksproduktion und Kohleveredelungs-produkte	Bei der Steinkohleveredelung werden spezifische Emissionen hier dokumentiert. Methanemissionen bei der Herstellung von Veredelungsprodukten aus Braunkohle sind bereits in 1.B.1.a.ii „Bergbauliche Tätigkeiten“ enthalten.
	Kohle zu flüssigen Brennstoffen	Kohlehydrierung findet in Deutschland seit 1987 nicht mehr statt. Daher wird hier „NO“ berichtet.
	Synthesegas-produktion	Emissionen bei der Herstellung werden unter 1.A erfasst. Daher wird hier „IE“ berichtet
	Stadtgasproduktion	Seit 1998 gibt es in Deutschland keine Anwendung von Stadtgas mehr. Diffuse Emissionen aus der Aufbereitung, Verteilung und Anwendung werden bis 1997 unter 1.B.2.b, danach als „NO“ berichtet.
1.B.1.c. Sonstiges		In dieser Kategorie werden derzeit keine Emissionen berichtet.

3.3.1.1 Tiefbau – Steinkohlen

Gas	angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CH_4	Tier 3	AS, M	CS
CO_2	Tier 3	AS, M	CS

3.3.1.1.1 Beschreibung der Quellgruppe (1.B.1.a.ii)

Bergbauliche Tätigkeiten

In Deutschland findet seit Ende 2018 kein Steinkohlenbergbau mehr statt.

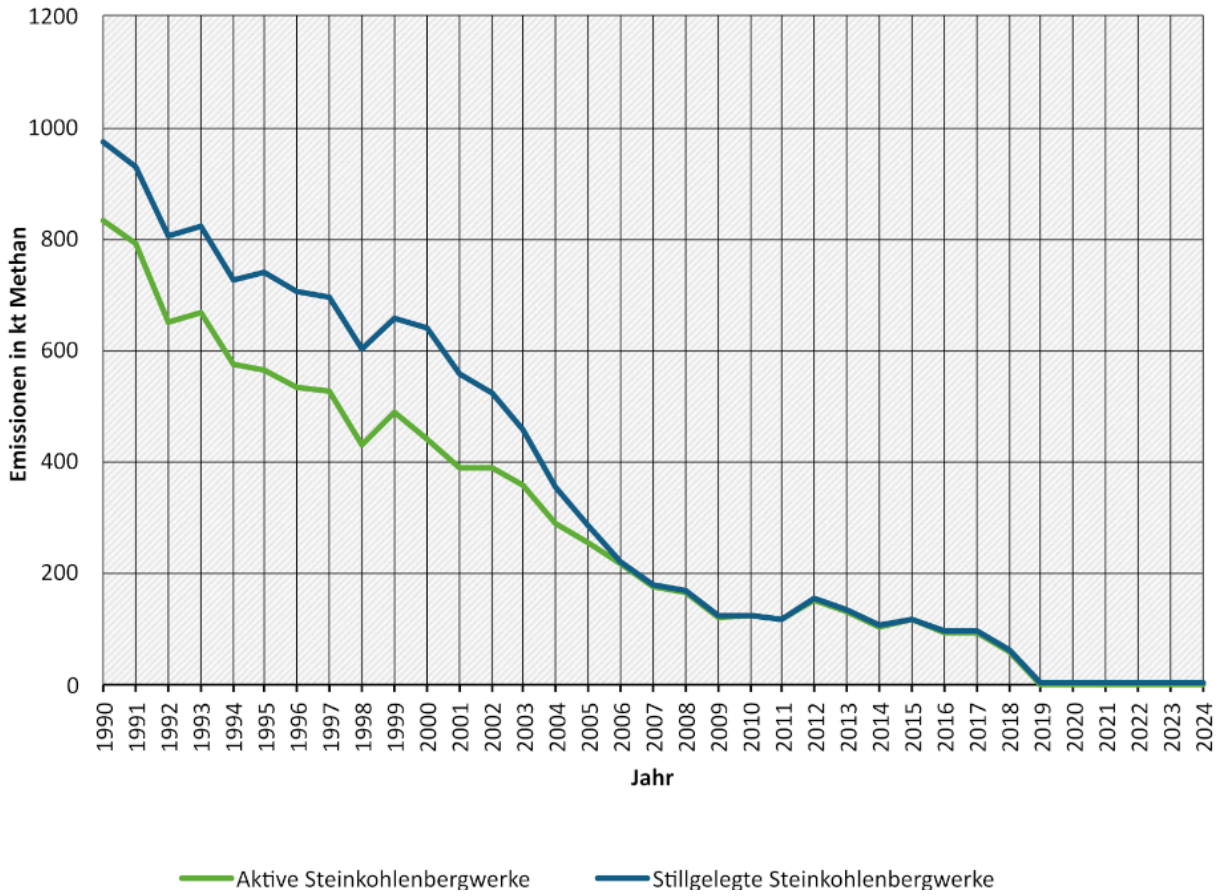
Abfackelung von Grubengas

Im Rahmen eines JI-Projektes wurde von 2009 bis 2012 eine Heißfackel betrieben (siehe NIR 2014, Kapitel 3.3.1.3.1.). Ansonsten wird kein Abfackeln in Deutschland durchgeführt.

Stillgelegter Steinkohlenbergbau

Nach der Stilllegung eines Steinkohlebergwerkes kann aus dem Nebengestein und der noch anstehenden Kohle Methan in die Grubenbaue entweichen. Da keine Bewetterung mehr durchgeführt wird, sammelt sich das Methan und kann durch Gaswegigkeiten im Deckgebirge oder durch Schachtanlagen zu Tage dringen.

Abbildung 40: Entwicklung der Grubengasemissionen im aktiven und stillgelegten Bergbau



Quelle: eigene Darstellung, UBA

Obwohl Grubengas ein fossiler Brennstoff mit erschöpflichem Vorkommen ist, wurde es aufgrund des durch seine Verwendung erzielten Klimaschutzeffekts in das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) im Jahr 2000 aufgenommen. Damit wurde den Netzbetreibern eine Abnahmeverpflichtung und eine Einspeisungsvergütung für den aus Grubengas erzeugten Strom gesetzlich vorgeschrieben. Die Abbildung 40 zeigt die Wirkung des EEG.

3.3.1.1.2 Methodische Aspekte (1.B.1.a.i)

Die Ermittlung der Emissionen erfolgt nach dem Modell der DMT (Meiners, 2018) und ist vergleichbar mit dem Tier 3-Ansatz gemäß den IPCC Guidelines. Die Berechnung der Emissionen aus der Steinkohlenförderung bis 2018 erfolgte nach dem Tier 3-Ansatz gemäß den IPCC Guidelines durch den Gesamtverband Steinkohle e.V. Sie erfüllen die Anforderungen einer bergwerks-spezifischen Emissionsermittlung. Aus sicherheitstechnischen Gründen wurden in

sämtlichen Schachtanlagen kontinuierlich die Gaszusammensetzung sowie der Wetterstrom gemessen. Diese Daten werden zur Bestimmung der Menge der Methanemissionen genutzt. Eine Experten-überprüfung wurde durch die zuständige staatliche Aufsichtsbehörde (Bergamt) vorgenommen. Außerdem wurden die Daten mittels Forschungsvorhaben verifiziert (Meiners, 2014).

3.3.1.1.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (1.B.1.a.i)

Es wird über den gesamten Zeitraum das Modell der DMT (Meiners, 2018) verwendet. Im Kapitel 6.2 des Forschungsvorhabens (Meiners, 2014) wird ein relativer Gesamtfehler von +/- 60% angegeben.

3.3.1.1.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (1.B.1.a.i)

Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

In Deutschland findet kein Steinkohlenbergbau mehr statt.

3.3.1.2 Tagebau - Braunkohlen

Gas	angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CH_4	Tier 2	AS	CS

3.3.1.2.1 Beschreibung der Kategorie (Tagebau - Braunkohlen)

In Deutschland findet der Abbau von Braunkohle in drei Revieren statt (DEBRIV, 2024)..

Aktivitätsraten

Tabelle 110: Förderung von Braunkohle, in Mio. t.

1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2023	2024
356,5	192,7	167,7	177,9	169,4	178,1	107,4	102,0	91,9

(Kohlenwirtschaft, 2025)

3.3.1.2.2 Methodik (1.B.1.a.ii)

Die Emissionen aus dem Braunkohlentagebau werden nach dem Tier 2-Ansatz berechnet. Seit dem 4.August 2024 ist die EU Methanverordnung (EU, 2024a) in Kraft, demnach die Emissionen revierspezifisch von den Unternehmen ermittelt werden. Erstmals in der Berichterstattung 2026 werden diese Daten verwendet.

Die Probenahme der Braunkohle erfolgte unmittelbar an der frischen freigelegten Kohleböschung. Die Probe wurde vor Ort gasdicht verschlossen, in einem Labor zerkleinert und das freigesetzte Probengas mittels Flammenionisationsdetektor quantitativ bestimmt.

Emissionsfaktoren

Bis zum Jahr 2023 wurde für die deutsche Braunkohle ein durchschnittlicher Emissionsfaktor von 0,015 m^3 CH_4/t (entspricht 0,011 kg CH_4/t) angenommen. Dieser EF basiert auf einer Untersuchung der RWE Rheinbraun AG von 1989 (DEBRIV, 2004) und wird durch Veröffentlichungen der DGMK (DGMK, 1992) belegt. Ab dem Jahr 2024 werden die Emissionen revierspezifisch ermittelt. Diese variieren je nach Region und Tiefe zwischen 0,00002 und 0,0111 kg/t. Der mittlere implizite Emissionsfaktor für Deutschland ist 0,004 kg/t bzw. 0,006 m^3/t.

Eine Lagerung von Braunkohle erfolgt nicht; die Verwendung erfolgt „mine-mouth“ direkt von der Förderung in die Verarbeitung bzw. in Kraftwerke.

3.3.1.2.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (1.B.1.a.ii)

Unsicherheiten der Aktivitätsrate ergeben sich vor allem aus Ungenauigkeiten beim Wiegen der geförderten Kohle. Durch Befragung von Experten (NaSE-Workshop, 2004), konnte der Fehler auf < 3 % quantifiziert werden.

3.3.1.2.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (1.B.1.a.ii)

Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Im Rahmen einer Verifizierung zur aktuellen Berichterstattung wurden verschiedene Datenquellen für Aktivitätsraten im Kohlenbergbau und auch die verwendeten EF mit denen anderer Länder verglichen (siehe Tabelle 111).

Tabelle 111: IEF Vergleich mit Ländern die für die übertägige Produktion von Braunkohle einen höheren Tier-Ansatz verwenden

	Emissionsfaktor	Quelle
Deutschland	0,006 m³/t	Betreiberberichte nach EU-Methanverordnung (EU, 2024a)
Polen	0,019 m³/t	Polnischer NIR 2011, S. 83 (UNFCCC, 2011a)
Griechenland	0,014 m³/t	Griechischer NIR 2023, S. 170 (UNFCCC, 2023b)
Ungarn	0,00 m³/t	Ungarischer NIR 2023, S. 91 (Kis-Kovács et al., 2023)
Spanien	0,10 m³/t	Spanischer NIR 2010, Tabelle 3.10.3 (UNFCCC, 2010b)
Kanada	0,09 m³/t	Kanadischer NIR 2023, Annex Tabelle A.3.2-1 (Minister of Environment and Climate Change, 2023)
Australien	0,016 m³/t	Australischer NIR 2023, S. 123 (Commonwealth of Australia, 2023)
IPCC GL 2006	1,2 m³/t	(IPCC, 2006a)

Der Ländervergleich spezifischer Emissionsfaktoren für den Tagebau zeigt eine große Bandbreite. Die Werte von Spanien und Kanada liegen höher, da in den Tagebauen auch subbituminöse bzw bituminöse Kohle mitgefördert wurde (Rio, 2017) (Seite 5) (Kanadischer NIR: (Minister of Environment and Climate Change, 2023), Annex Tabelle A.3.2-1).

Die Emissionsfaktoren des IPCC wurden von der amerikanischen Hartbraunkohle abgeleitet und können laut nationalen Experten nicht auf die deutsche Weichbraunkohle übertragen werden, da diese während des Inkohlungsprozesses eine Temperatur von 50°C nicht überschritten hat. Eine nennenswerte Methanabspaltung findet jedoch erst bei Temperaturen von über 80°C statt (DGMK, 1992).

3.3.1.3 Umwandlung von festen Brennstoffen

Gas	angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CH_4	Tier 2/ Tier 3	AS	CS
CO_2	Tier 2/ Tier 3	AS	CS
NMVOC	Tier 2/ Tier 3	AS	CS

Gas	angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO	Tier 2/ Tier 3	AS	CS
SO_2	Tier 2/ Tier 3	AS	CS

3.3.1.3.1 Beschreibung Quellgruppe (1.B.1.b)

Holzkohleproduktion

Holzkohle wird in Deutschland nur an einem Standort kommerziell produziert. Diese Anlage berichtet nach 17. BImSchV. Die Emissionen sind unter 1.A.1.a enthalten. Die Verwendung von Holzkohle ist unter 2.G.4 zusammengefasst. Daher wird hier „IE“ berichtet.

Pflanzenkohleproduktion

Pflanzenkohle wird in Deutschland nur in sehr geringen Mengen hergestellt und nicht als Brennstoff verwendet. Daher wird hier „NA“ berichtet.

Holzpelletproduktion

Holzpellets werden zumeist in Säge- und Holzwerken durch Zusammenpressen von Rückständen hergestellt. Emissionen bei der zur Trocknung benötigten Wärme werden bereits unter 1.A.1.a erfasst. Es liegen keine Informationen zu diffusen Treibhausgasemissionen aus Pellets direkt vor, so dass hier „NA“ berichtet wird.

Kohlehydrierung

Kohlehydrierung zu kommerziellen Zwecken findet in Deutschland seit 1987 nicht mehr statt (Farrenkopf, 2009). Daher wird hier „NO“ berichtet.

Synthesegasproduktion

Die Synthesegasproduktion ist derzeit komplett unter 1.A verortet. Das gilt auch für die Synthesegasherstellung in der Grundstoffindustrie. Die derzeitigen Statistiken geben keine Differenzierung nach Produkten und Brennstoffen wieder, so dass hier „IE“ berichtet wird.

Koksproduktion und Kohleveredelungsprodukte

Tabelle 112: Aktivitätsraten der Veredelungsprodukte [Angaben in Tonnen]

	Braunkohlebrikett	Braunkohlenkoks	Braunkohlenstaub	Steinkohlenkoks
1990	40.045.000	3.355.937	3.791.431	18.545.000
1995	5.010.829	191.883	2.700.110	11.102.000
2000	1.819.263	179.453	2.678.926	9.115.000
2005	1.489.922	173.443	2.923.620	8.397.000
2010	2.024.103	175.932	3.632.333	8.171.000
2015	1.640.000	170.000	4.398.000	8.800.000
2020	1.285.809	145.525	3.419.679	7.942.860
2023	692.000	156.000	3.140.100	8.034.624
2024	495.000	149.000	2.928.600	8.259.996

(Kohlenwirtschaft, 2025); Angaben der AGEB

3.3.1.3.2 Methodische Aspekte (1.B.1.b)

Die Emissionen werden nach dem Tier 2-Ansatz, für die Braunkohlenveredelung nach dem Tier 3-Ansatz, berechnet.

Emissionsfaktoren

Aus Produkten der Braunkohlenveredelung sind keine Methanemissionen zu erwarten, da der in 1.B.1.a.ii angenommene EF dem Gasinhalt der in Deutschland vorkommenden Braunkohle entspricht. Die weiteren ermittelten Emissionen stammen aus Messungen des derzeit einzigen deutschen Produzenten für Braunkohlenkoks der Herdofenanlage Fortuna-Nord.

Der verwendete Emissionsfaktor für Methan zur Berechnung der CH_4-Emissionen aus der Produktion von Steinkohlenkoks (Kokereien) beträgt 0,049 kg Methan pro Tonne Steinkohlenkoks (Meiners, 2005) und wird für die komplette Zeitreihe angewendet. Der CO_2-Emissionsfaktor ermittelt sich aus der konservativen Annahme, dass auf dem Weg zwischen Öffnen der Hochofentür und dem Löschvorgang ca. 1% des Kokses als diffuse Emission verloren gehen. Als Aktivitätsrate wurde die Gesamtmenge an Steinkohlen- und Braunkohlenkoks verwendet.

Tabelle 113: Emissionsfaktoren aus der Produktion von Steinkohlenkoks

Produkt	Gas	Emissionsfaktor	Einheit
Steinkohlenkoks	CH_4	0,049	kg/t
	CO_2	31,56	kg/t
Braunkohlenkoks	CH_4	0,0	kg/t
	CO_2	2.945,5	kg/t

Die Emissionsfaktoren für die Nicht-Treibhausgase stammen aus dem Forschungsvorhaben "Emissionsfaktoren zur Eisen- und Stahlindustrie für die Emissionsberichterstattung“ (Hensmann et al., 2011).

3.3.1.3.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (1.B.1.b)

Die Unsicherheiten für die Emissionsfaktoren für die Veredelung von Kohlen wurden von Experten auf 10% bis 25% geschätzt.

Für die Aktivitätsraten wird eine konsistente Quelle über die gesamte Zeitreihe verwendet. Unsicherheiten ergeben sich vor allem aus Ungenauigkeiten beim Wiegen der Kohlenprodukte. Durch Befragung von Experten (NaSE-Workshop, 2004), konnte der Fehler auf < 3 % quantifiziert werden.

3.3.1.3.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (1.B.1.b)

Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Bei der Betrachtung von Emissionsfaktoren ist der IPCC Konversionsfaktor von 0,67 $Gg/10^6 m^3$ bei 20°C und 1 Atmosphäre gegenüber den in Deutschland als Einheit Normkubikmeter bei 1,01325 bar und 0°C (DIN 2004, DIN Nr. 1343) verwendeten Angaben zu beachten. Bei Betrachtungen der EF sind Angaben des IPCC zu Default EF bzw. Angaben aus anderen Veröffentlichungen mit der Praxis in Deutschland mit der Angabe von Normkubikmeter zu berücksichtigen. Bei der Verwendung von in Deutschland publizierten Daten zu EF wird davon

ausgegangen, dass es sich um Angaben in Normkubikmeter handelt (abgesichert durch Expertenbefragung beim NaSE-Workshop (2004)).

Die Angaben der Guidelines beziehen sich auf 20°C und 1.013 mbar. Anhand der isobaren Proportionalität des Methans kann mit dem Faktor 1,07 von Nm^3 in m^3 umgerechnet werden.

Umrechnungsfaktor Normkubikmeter ⇔ Kilogramm:

Gleichung 1:

$$0{,}717\ Nm^3/kg\ (1{,}01325\ bar, 0°C) = 0{,}67\ Gg/10^6 m^3\ (20°C, 1\ Atmosphäre) * 1{,}07\ Nm^3/m^3$$

Ein Vergleich mit anderen Ländern ist in dieser Kategorie nicht möglich, da die genauen Mengen und die Zusammensetzung der umgewandelten Kohleprodukte sich nicht aus den CRT-Tabellen entnehmen lassen. Im IPCC Refinement 2019 (IPCC, 2019) wurde jedoch der deutsche Ansatz für die Produktion von Steinkohlenkoks übernommen.

3.3.1.4 Kategoriespezifische Rückrechnungen (1.B.1 alle)

Es sind kleinere Rückrechnungen aufgrund geänderter Statistiken (Energiebilanz) erfolgt.

3.3.1.5 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch(1.B.1 alle)

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4 Verbesserungen des Inventars, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

3.3.2 Öl und Erdgas und diffuse Emissionen aus der Energieerzeugung (1.B.2)

Die Kategorie ist nach folgendem Schema untergliedert:

Quellgruppe			Enthaltene Emissionen
1.B.2. Öl, Gas und diffuse Emissionen aus der Energieerzeugung			
	a	**Öl**	
		i) Exploration	Gesamtemissionen aus Erdöl- und Erdgasexplorationsbohrungen
		ii) Förderung	Diffuse Emissionen bei der Förderung von Erdöl sowie der Aufbereitung von Erdöl (Abtrennung von Wasser und Begleitgasen)
		iii) Transport	Emissionen aus Transport von Rohöl mittels Pipelines und Binnentankschiffen
		iv) Raffinierung/ Lagerung	Emissionen aus Entschwefelung und Raffinierung von Öl, der Lagerung von Rohöl und Mineralölprodukten sowie der Reinigung von Lagertanks
		v) Verteilung von Ölprodukten	Emissionen aus Verteilung von Mineralölprodukten, Betankungs-prozessen und Tropfverlusten sowie aus Reinigung von Tanks der Transportfahrzeuge
		vi) Stillgelegte Bohrlöcher	Emissionen aus stillgelegten Bohrlöchern – bisher noch keine Daten, daher wird „NE“ berichtet
		vii) Sonstiges	Keine Emissionen in dieser Kategorie, daher wird „NO“ berichtet
	b	**Gas**	
		i) Exploration	Die Emissionen sind der Kategorie 1.B.2.a.i zugeordnet, da keine Differenzierung möglich, daher wird „IE“ berichtet
		ii) Förderung	Diffuse Emissionen bei der Förderung von Erdgas
		iii) Verarbeitung	Emissionen aus der Entschwefelung und Aufbereitung von Sauergas sowie der Aufbereitung von Stadtgas (bis 1997)

Quellgruppe			Enthaltene Emissionen
		iv) Transport	Emissionen aus Hochdruckfernleitungen, Verdichtern und Absperr-einrichtungen sowie unterirdischer Gasspeicherung (Kavernen- und Porenspeicher)
		v) Verteilung	Emissionen aus der Erdgasverteilung und Obertagespeichern
		vi) Endanwender	Diffuse Emissionen aus Hausinstallationen in Haushalten und Kleinverbrauchern
		vii) Tanks von Erdgasfahrzeugen	diffuse Entweichungen aus Tanks von Erdgasfahrzeugen
		viii) Stillgelegte Bohrlöcher	Emissionen aus stillgelegten Bohrlöchern – bisher noch keine Daten, daher wird „NE“ berichtet
		ix) Sonstiges	Keine Emissionen in dieser Kategorie, daher wird „NO“ berichtet
	c	**Ausblasen und Abfackeln**	
		i) Ausblasen	
		- Öl	Die Emissionen sind in den Kategorien 1.B.2.a.iii und 1.B.2.a.v enthalten, daher wird „IE“ berichtet
		- Gas	Die Emissionen sind in den Kategorien 1.B.2.b.iv und 1.B.2.b.v enthalten, daher wird „IE“ berichtet
		- Kombiniert	Keine Emissionen in dieser Kategorie, daher wird „IE“ berichtet
		ii) Abfackeln	
		- Öl	Fackelemissionen bei der Erdölförderung sowie der Raffinierung
		- Gas	Fackelemissionen bei der Erdgasförderung
		- Kombiniert	Keine Emissionen in dieser Kategorie, daher wird „IE“ berichtet

3.3.2.1 Öl (1.B.2.a)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
-/-	1 B 2 a, Fugitive Emissions from Oil	0	CO_2	477,63	0,04	387,01	0,06	-18,97
-/-	1 B 2 a, Fugitive Emissions from Oil	0	CH_4	275,47	0,03	23,60	0,01	-91,43
-/-	1 B 2 a, Fugitive Emissions from Oil	0	N_2O	0,28	0,01	0,23	0,01	-20,23

Die Kategorie 1.B.2.a. „Öl“ ist keine Hauptkategorie.

3.3.2.1.1 „Öl, Exploration“ (1.B.2.a.i)

Gas	angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2, CH_4	Tier 1	AS	D
NMVOC	Tier 2	AS	CS

3.3.2.1.2 Beschreibung der Kategorie „Öl, Exploration“ (1.B.2.a.i)

Die Emissionen der Kategorie setzen sich aus den Tätigkeiten der Bohrfirmen und der Beteiligten in der Branche der Exploration zusammen. In Deutschland wird nach Erdöl und Erdgas gesucht. Es wird in der Statistik nicht nach reinen Erdöl- und Erdgasbohrungen unterschieden.

Aktivitätsraten

Tabelle 114: Anzahl der Explorationsbohrungen (Öl und Erdgas insgesamt)

1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2022	2023	2024
12	17	15	23	16	18	12	7	12	18

(BVEG, 2024)

Emissionsfaktoren

Tabelle 115: Verwendete Emissionsfaktoren für die Kategorie 1.B.2.a.i

Gas	Emissionsfaktor	Methode
CO_2	0,48 kg/No	Tier 1
CH_4	64 kg/No	Tier 1
NMVOC	576 kg/No	Tier 2

Die Emissionsfaktoren stammen aus den IPCC Good Practice Guidenace 2000 (Penman et al., 2000), die in den IPCC GL 2006 ((IPCC, 2006a): Tabelle 4.2.4) genannten beziehen sich auf eine Produktionsmenge und nicht auf Explorationsbohrungen. Daher können diese nicht angewendet werden.

3.3.2.1.2.1 Methodische Aspekte der Kategorie „Öl, Exploration“ (1.B.2.a.i)

Nach Aussagen des BVEG treten so gut wie keine diffusen Emissionen bei Bohrvorgängen auf, da an Bohrlöchern regelmäßig Messungen durchgeführt (Methansensoren in der Schutzhütte um das Bohrloch, Ultraschallmessungen, Ringraummanometer) und alte nicht mehr genutzte Bohrungen verfüllt und in der Regel mit einem Betondeckel versehen werden.

Da keine Messergebnisse der einzelnen Bohrungen vorliegen, werden, um konservativ zu schätzen, die Emissionen für Bohrungen auf Grundlage des Default-Faktors nach den IPCC GPG 2000 (Penman et al., 2000) für Kohlendioxid und Methan nach dem Tier 1 Ansatz berechnet. Es wurde für die konservative Schätzung die Summe der Emissionsfaktoren für „Drilling“, „Testing“ und „Servicing“ verwendet

3.3.2.1.2.2 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz der Kategorie „Öl, Exploration“ (1.B.2.a.i)

Die Unsicherheiten der Aktivitätsraten für Erdöl- und Erdgasexploration werden mit +/- 5 % quantifiziert. Den Emissionsfaktoren werden die Default-Unsicherheiten der Good-Practice-Guidance 2000 von +/- 25 % zugeordnet.

Für die Aktivitätsraten und die Emissionsfaktoren wird eine konsistente Quelle über die gesamte Zeitreihe verwendet.

3.3.2.1.2.3 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung der Kategorie „Öl, Exploration“ (1.B.2.a.i)

Eine allgemeine Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Aufgrund fehlender landesspezifischer Daten wurde ein externes Gutachten (Bender & Langer, 2009) in Auftrag gegeben. Es kam in seiner Quellgruppenanalyse zu dem Ergebnis, dass die Default-Faktoren für Deutschland anwendbar sind. Ein Vergleich mit anderen Ländern konnte aufgrund der geringen Vergleichsmöglichkeiten und aufgrund nicht ineinander umrechenbarer Einheiten nicht durchgeführt werden.

3.3.2.1.3 „Öl, Förderung und Vorbehandlung“ (1.B.2.a.ii)

Gas	angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2, CH_4	Tier 2	AS	CS
NMVOC	Tier 2	AS	CS

3.3.2.1.3.1 Beschreibung der Kategorie „Öl, Förderung und Vorbehandlung“ (1.B.2.a.ii)

Die Emissionen der Kategorie setzen sich aus den Tätigkeiten der Branche der Förderung (Rohöl) und der Vorbehandlung von Rohstoffen (Erdöl) der Erdölindustrie zusammen. Die Förderung von Erdöl in Deutschland ist wegen ihrer alten Lagerstätten sehr energieintensiv (Thermalförderung, Pumpenbetrieb zur Wassereinpressung in die Lagerstätte).

Die Vorbehandlung des geförderten Erdöls (Rohöls) in Aufbereitungsanlagen dient der Entgasung, Entwässerung und Entsalzung von Rohöl. Die unmittelbar aus den Bohrlöchern gewonnenen Rohöle entsprechen in ihrer Zusammensetzung nicht den Erfordernissen zum sicheren und problemlosen Transport in Rohrleitungen, da sie Verunreinigungen, einen Gasanteil und vor allem Wasser enthalten. Es erfolgt keine Stoffumwandlung. Störende Beimengungen, insbesondere mit dem Erdöl gefördertes Begleitgas (Erdölgas), Salze und Wasser werden entfernt, um Rohöl geeigneter Qualität für die Beförderung in Rohrleitungen (Pipelines) zu erzeugen.

Aktivitätsraten

Tabelle 116: Fördermenge Erdöl in kt

1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2022	2023	2024
3.606	2.959	3.113	3.573	2.516	2.414	1.907	1.705	1.636	1.627

(BVEG, 2024)

Emissionsfaktoren

Tabelle 117: Verwendete Emissionsfaktoren für die Förderung und Aufbereitung

Gas	Emissionsfaktor	Methode
CO_2	94 g/m³	Tier 2
CH_4	68 g/m³	Tier 2
NMVOC	47 g/m³	Tier 2

3.3.2.1.3.2 Methodische Aspekte der Kategorie „Öl, Förderung und Vorbehandlung“ (1.B.2.a.ii)

Die Emissionen aus der Förderung und Aufbereitung werden von den Betreibern gemessen bzw. errechnet und im jährlichen BVEG Bericht veröffentlicht. Die Emissionsfaktoren werden aus den berichteten Emissionen und der Aktivitätsrate in Tabelle 114 ermittelt.

Die Berechnung der Emissionen erfolgt nach dem Tier 2 Ansatz.

3.3.2.1.3.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz der Kategorie „Öl, Förderung und Vorbehandlung“ (1.B.2.a.ii)

Die Unsicherheiten in der Kategorie werden bei der Aktivitätsrate mit 5 bis 10 % angegeben und beruhen auf Schätzungen von Experten des BVEG und der nationalen Experten.

Die Unsicherheiten der Emissionsfaktoren in der Kategorie entsprechen 25 %.

3.3.2.1.3.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung der Kategorie „Öl, Förderung und Vorbehandlung“ (1.B.2.a.ii)

Eine allgemeine Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Die verwendeten Emissionsfaktoren entsprechen der Größenordnung IPCC Guidelines 2006 (IPCC, 2006a) angegebenen Emissionsfaktoren.

Tabelle 118: IEF Vergleich mit IPCC Default Werten

Gas	Verwendeter CS-Emissionsfaktor	IPCC GL 2006 (Tabelle 4.2.4)	
	Einheit in [g/m³]	Einheit in [Gg/1000m³]	Einheit in [g/m³]
CO_2	94 g/m³	1,1*10-07 bis 2,6*10-04	0,11 – 260,00
CH_4	68 g/m³	1,5*10-06 bis 6,0*10-02	1,50 – 60.000
NMVOC	47 g/m³	1,8*10-06 bis 4,5*10-03	1,80 – 4500,0

3.3.2.1.4 „Öl, Transport“ (1.B.2.a.iii)

Gas	angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CH_4	Tier 2	AS	CS
NMVOC	Tier 2	AS	CS

3.3.2.1.4.1 Beschreibung der Kategorie „Öl, Transport“ (1.B.2.a.iii)

Die Emissionen der Kategorie setzen sich aus den Tätigkeiten der Branche der Logistikunternehmen und Betreiber von Rohrleitungen und Rohrleitungsnetzen zusammen. Nach der Vorbehandlung wird Rohöl zu den Anlagen der Verarbeitung befördert.

Der Transport von Rohöl erfolgt fast ausschließlich mittels Rohrfernleitungen. Die Rohrfernleitungen sind ortsfest und im Regelfall unterirdisch verlegt. Anders als beim übrigen Verkehr wird der Transport nicht durch Umschlagvorgänge unterbrochen.

Aktivitätsraten

Tabelle 119: Transport von im Inland produziertem Rohöl in kt

1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2022	2023	2024
3.606	2.959	3.113	3.573	2.516	2.414	1.907	1.705	1.636	1.627

(BVEG, 2024)

Tabelle 120: Transport von importiertem Rohöl in kt

1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2022	2023	2024
84.043	86.063	89.280	97.474	93.270	91.275	83.049	88.169	77.198	84.026

(BAFA, 2025a)

Tabelle 121: Transport von Rohöl mittels Binnentankschiffen in kt

1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2022	2023	2024
88,9	66,6	111,8	176,4	5,6	43,1	46,4	52,7	44,5	4,8

(Statistisches Bundesamt, 2025c)

Emissionsfaktoren

Tabelle 122: für die Kategorie 1.B.2.a.iii verwendete Emissionsfaktoren, in [kg/t]

Quellgruppe	Gas	Emissionsfaktor
Transport von importiertem Rohöl	NMVOC	0,064
	CH_4	0,0064
Transport von im Inland produziertem Rohöl	NMVOC	0,13
	CH_4	0,013
Transport von Rohöl mittels Binnentankschiffen	NMVOC	0,34
	CH_4	0,032

3.3.2.1.4.2 Methodische Aspekte der Kategorie „Öl, Transport" (1.B.2.a.iii)

Die Berechnung der Emissionen erfolgt nach dem Tier-2 Ansatz.

Der Emissionsfaktor für Methan für die Pipelines wurde aus den IPCC Guidelines 2006 (IPCC, 2006a) übernommen. Die Faktoren für die Binnentankschiffe wurden im Forschungsvorhaben „Ermittlung von Emissionsfaktoren und Aktivitätsraten im Bereich 1.B.2.a.i bis vi" (Theloke et al., 2013) bestätigt. Da Rohrfernleitungen ständig überwacht werden und es nur sehr selten zu Störfällen kommt (CONCAWE – „Performance of European cross country oil pipelines" (Cech et al., 2017)) treten Emissionen nur in geringen Maßen an Umschlagspunkten auf. Der Emissionsfaktor ist daher sehr konservativ.

Der Emissionsfaktor beinhaltet den Umschlag/das Einpumpen in der Förderstation und sämtliche Infrastruktur (Verbindungen, Regler, Messgeräte) entlang der Pipelines sowie den Umschlag an der Raffinerie und wurde unter konservativen Annahmen ermittelt. Für die importierte Menge wird nur ein Übergabepunkt (nur Ausspeisestation) angenommen, da die Einspeisestation ins Pipelinenetz nicht auf nationalem Gebiet liegt.

3.3.2.1.4.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz der Kategorie „Öl, Transport" (1.B.2.a.iii)

Die Unsicherheiten der Emissionsfaktoren werden mit ±20 % quantifiziert, die Aktivitätsraten mit ±10 %. Die Emissionsfaktoren und die Aktivitätsraten sind über die gesamte Zeitreihe konsistent.

3.3.2.1.4.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung der Kategorie „Öl, Transport" (1.B.2.a.iii)

Eine allgemeine Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Die verwendeten Emissionsfaktoren entsprechen der Größenordnung der in den IPCC Guidelines 2006 angegebenen Emissionsfaktoren.

Im ESD Review 2016 wurde angemerkt, dass Deutschland keine CO_2-Emissionen in dieser Kategorie berichtet, obwohl die IPCC Guidelines 2006 einen Tier-1-Default-Wert ausweisen. Nach einem Telefongespräch zwischen Experten des Umweltbundesamtes und des MWV (Bittkau, 2017) wurde bestätigt, dass kein CO_2 aus Transportleitungen emittiert.

Im Review 2022 (E13 Tabelle 5) wurde wiederholt auf die IPCC Guidelines verwiesen. Diese referenzieren auf die Studie (Harrison et al., 1999): „Methane Emissions from the U.S. Petroleum Industry". Dort findet man jedoch keine Hinweise auf die Genese des CO_2-Emissionsfaktors. Es wird jedoch im Kapitel 5.2.2 darauf hingewiesen, dass auch Daten aus der Erdgasindustrie zur

Abschätzung von Emissionsfaktoren genutzt wurden. Daher nehmen nationale Experten an, dass hier der inhärente CO_2-Anteil im Erdgas zu dem Emissionsfaktor in den IPCC Guidelines herangezogen wurde.

3.3.2.1.5 „Öl, Verarbeitung und Lagerung“ (1.B.2.a.iv)

Gas	angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2	Tier 2	AS	CS
CH_4	Tier 2	AS	CS
SO_2	Tier 2	AS	CS
CO	Tier 2	AS	CS
NO_X	Tier 2	AS	CS
NMVOC	Tier 2	AS	CS

3.3.2.1.5.1 Beschreibung der Kategorie „Öl, Verarbeitung und Lagerung“ (1.B.2.a.iv)

Die Emissionen der Kategorie setzen sich aus den Tätigkeiten der Branche der Raffinerien und der Verarbeitungsbetriebe der Mineralölindustrie zusammen. In Deutschland werden Rohöl und Mineralölzwischenprodukte verarbeitet. Die Betriebe erhalten überwiegend Rohöl zur Verarbeitung. Die Verarbeitung erfolgt in technisch modernen Anlagen.

Raffinerietanklager enthalten sowohl Rohöle als auch Zwischen- und Fertigprodukte und unterscheiden sich daher von raffinieferen Tanklagern sowohl hinsichtlich der gelagerten Produkte als auch der umgeschlagenen Mengen. Raffinerieferne Tanklager dienen insbesondere der Zwischenlagerung von Heizöl, Ottokraftstoffen sowie Diesel. Die Lagerkapazitäten von Kavernen zur Lagerung von Mineralölprodukten werden gesondert angegeben. Aufgrund der Struktur der Kavernen kann davon ausgegangen werden, dass es zu keinen Emissionen flüchtiger Verbindungen kommt, dies wird in der Berechnung der Emissionen berücksichtigt.

Für Tankprüfungen und zu Reparaturzwecken werden Tanks geleert und gereinigt. Bei der Tankreinigung wird zwischen Rohöltanks und Produktentanks unterschieden. Die Rohöltankreinigung ist aufgrund der Sedimentabsetzungen wesentlich aufwendiger als bei Produktentanks. Diese enthalten keine sedimentierbaren Stoffe und werden deshalb nur bei Produktwechsel gereinigt. Emissionen werden entsprechend einer Abschätzung von (Zimmermann et al., 2025) berechnet.

Aktivitätsraten

Tabelle 123: Verarbeitete Menge an Rohöl in kt

1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2022	2023	2024
107.058	96.475	107.632	114.589	95.378	93.391	83.990	89.312	79.153	85.274

(BAFA, 2025a; En2x, 2024)

Tabelle 124: Auslastungsgrad der Raffinerien in Prozent

1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2022	2023	2024
106,2	92,1	95,3	99,5	81,1	91	81,8	84,5	75,7	82,9

(En2x, 2024)

Tabelle 125: Rohöldestillationskapazität in Raffinerien, in kt

1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2022	2023	2024
100.765	104.750	112.940	115.630	117.630	103.080	105.655	105.655	104.086	102.943

(En2x, 2024)

Tabelle 126: Lagerkapazität von Tanklagern in Raffinerien und Pipelineterminals, in Mio m3

1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2023	2024
27,2	28,4	24,9	24,0	22,5	22,1	20,7	21,1	21,1

(Koj, 2024)

Tabelle 127: Lagerkapazität von raffineriefernen Tanklagern, in Mio m^3

1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2023	2024
15,4	15,9	18,1	17,0	15,95	15,3	15,3	15,0	15,0

(Koj, 2024)

Tabelle 128: Lagerkapazität von Kavernen, in Mio m^3

1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2023	2024
26,6	25,3	27,9	27,2	27,3	25,5	25,5	28,3	28,3

(Koj, 2024)

Emissionsfaktoren

Tabelle 129: Verwendete Emissionsfaktoren für die Kategorie 1.B.2.a.vi „Diffuse Emissionen in Raffinerien“

Gas	Emissionsfaktor	Methode
CH_4	0,225 g/t	Tier 2
CO	0,494 g/t	Tier 2
CO_2	537 g/t	Tier 2
SO_2	0,854 g/t	Tier 2
NMVOC	7,24 g/t	Tier 2
NO_X	6,02 g/t	Tier 2

Tabelle 130: Verwendeter Emissionsfaktor für die Kategorie 1.B.2.a. vi „Anodenherstellung in Raffinerien“

Gas	Emissionsfaktor	Methode
CO_2	159,8 kg/t	Tier 2

Mehrere Forschungsvorhaben haben gezeigt, dass die Emissionen aus der Reinigung von Transportmitteln unter- aus der Lagerung von Produkten überschätzt wurden. Die Genese der Faktoren wurde im Begleitbericht „Aktualisierung der VOC-Emissionen für die Bereitstellung von Mineralölprodukten“ (Böttcher, 2025) aufgeführt.

3.3.2.1.5.2 Methodische Aspekte der Kategorie „Öl, Verarbeitung und Lagerung“ (1.B.2.a.iv)

Die Berechnung der Emissionen erfolgt für alle Teilbereiche nach dem Tier-2 Ansatz.

Verarbeitung

Die verwendeten Emissionsfaktoren für NMVOC, CH_4, CO_2, CO, NO_x und SO_2 wurden durch ein Forschungsvorhaben (Bender & von Müller, 2019a) unter Auswertung der Emissionserklärungen von 2004 bis 2016 ermittelt.

Anodenherstellung

Die Aktivitätsrate errechnet sich aus der Menge an Petrolkoks abzüglich des Eigenverbrauchs (Katalysatorabbrand – siehe 1.A.1.b). Die Daten stammen aus der amtlichen Mineralölstatistik. Dieser sogenannte Grünkoks wird zur Veredelung durch eine Kalzinierung verarbeitet. Der Emissionsfaktor errechnet sich aus dieser Aktivitätsrate und den Emissionsdaten des ETS.

Tanklager in Raffinerien

Nach Ergebnissen des Forschungsprojekts „Aufbereitung von Daten der Emissionserklärungen gemäß 11. BImSchV - Bereich Lageranlagen“ (Bender, 2009) wird für die Abschätzung der Emissionen aus der Lagerung in Raffinerien als Aktivitätsrate die Rohöldestillationskapazität herangezogen. Als Emissionsfaktor kann für die diffusen VOC-Emissionen der in der VDI-Richtlinie 2440 (VDI, 2000, p. 82) genannte Wert von 0,16 kg/t angesetzt werden. Davon abgeleitet wurde der EF für Methan (5-10 % von 0,16 kg) und entsprechend abgezogen (Theloke et al., 2013).

Raffinerieferne Tanklager

Aus der Auswertung der Emissionserklärungen für Lageranlagen lassen sich laut Müller-BBM (Bender, 2009) wegen des offensichtlich sehr unterschiedlichen Emissionsverhaltens der einzelnen Anlagen keine für Einzelanlagen repräsentative Emissionsfaktoren ableiten. Es konnten jedoch aggregierte Emissionsfaktoren gebildet werden, indem für die jeweiligen Datenkollektive die Summen aller Emissionen auf die Summen aller Kapazitäten bezogen wurden. In raffineriefernen Tanklagern kann zwischen der Lagerung von flüssigen und gasförmigen Mineralölprodukten unterschieden werden, da die Daten in der entsprechenden Differenzierung vorliegen. Untersuchungen von (Zimmermann et al., 2025) haben die Reinigungsemissionen abgeschätzt. Dies ist exemplarisch für ein Jahr in einem Begleitbericht aufgeigt (Böttcher, 2025). Während die Brennstoffe unter 1.B.2 berichtet werden, sind die chem. Produkte unter 2.B.10 zu finden.

Clausanlagen

Die verwendeten Emissionsfaktoren für NMVOC, CO, NO_x und SO_2 wurden durch ein Forschungsvorhaben (Bender & von Müller, 2019a) unter Auswertung der Emissionserklärungen der Raffineriestandorte von 2004 bis 2016 ermittelt. Da keine Daten für frühere Jahre vorliegen, wurden die ermittelten Daten für alle Jahre ab 1990 angewendet.

3.3.2.1.5.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz der Kategorie „Öl, Verarbeitung und Lagerung“ (1.B.2.a.iv)

Für die Emissionsfaktoren für die Verarbeitung von Rohöl wurden Unsicherheiten von +/- 20 % angenommen. Die Unsicherheiten der Aktivitätsraten werden mit +/- 10 % angenommen. Für den Bereich Lagerung und Reinigung werden die Unsicherheiten der Emissionsfaktoren auf 177 % und der Aktivitätsraten auf 65 % eingeschätzt. Diese Angaben beruhen auf Schätzungen von nationalen Experten sowie aus dem Forschungsbericht von Müller BBM, (Bender, 2009), (Theloke et al., 2013) und (Böttcher, 2025).

Emissionsfaktoren und Aktivitätsraten sind über die komplette Zeitreihe konsistent.

3.3.2.1.5.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung der Kategorie „Öl, Verarbeitung und Lagerung“ (1.B.2.a.iv)

Eine allgemeine Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Ein Abgleich mit anderen Ländern ist aufgrund der Komplexität der Kategorie nicht möglich. Dies wurde auch auf dem EU Workshop 2014 (Harthan et al., 2017) deutlich.

3.3.2.1.6 „Öl, Verteilung von Ölprodukten“ (1.B.2.a.v)

Gas	angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
NMVOC	Tier 2	AS	CS

3.3.2.1.6.1 Beschreibung der Kategorie „Öl, Verteilung von Ölprodukten“ (1.B.2.a.v)

Die Kategorie umfasst den Transport und Umschlag von Ölprodukten mittels Binnentankschiffen, Rohrleitungen, Eisenbahnkesselwagen, Straßentankfahrzeugen und Kanistern sowie die Reinigung der Transportfahrzeuge.

Aktivitätsraten

Tabelle 131: Tankstellenbestand in Deutschland, Anzahl

1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2022	2023	2024
19.317	17.957	16.324	15.187	14.744	14.531	14.459	14.452	14.442	14.376

(BTF; En2x, 2024)

Tabelle 132: Verteilte Mengen an Mineralölprodukten, in kt

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2022	2023	2024
Dieselkraftstoff	21.817	26.208	28.922	28.531	32.128	36.756	35.163	34.761	33.279	32.455
Flugturbinenkraftstoff	4.584	5.455	6.939	8.049	8.465	8.550	4.725	8.952	9.479	9.016
Leichtes Heizöl	31.803	34.785	27.875	25.380	21.005	16.127	15.558	12.128	11.493	10.736
Ottokraftstoff	31.257	30.333	28.833	23.431	19.634	18.226	16.218	16.996	17.394	17.650

(BAFA, 2025a)

Emissionsfaktoren

Die nachfolgend aufgeführten Emissionsfaktoren wurden in der Studie (Theloke et al., 2013) und (Zimmermann et al., 2025) verifiziert. Das Modell bei der Emissionsberechnung von Ottokraftstoffen wird im Kapitel 3.3.2.1.6.2 erläutert.

Mineralölprodukte werden mittels Binnentankschiffen, Rohrleitungen für Produkte, Eisenbahnkesselwagen und Straßentankfahrzeugen transportiert und zwischen den jeweiligen Tanks umgeschlagen. Die Betankungsemissionen von Flugzeugen werden von Experten als nicht vorhanden eingeordnet, da bei der Betankung Trockenkupplungen zum Einsatz kommen. Die Emissionen bei der Befüllung von privaten Heizölkesseltanks sind durch hohe Sicherheitsstandards ebenfalls sehr gering.

In dieser Kategorie werden Mineralölprodukte umgeschlagen und verteilt, die in der Raffinerie einer fraktionierten Destillation unterzogen wurden, bei der gasförmige Produkte bereits abgetrennt wurden – daher werden keine signifikanten Methanemissionen erwartet. Lediglich bei der Lagerung einiger Mineralölprodukte können geringe Mengen Methan entweichen. Um

eine Unterschätzung zu vermeiden, wurden in allen Kategorien ein Methananteil von 5 % angenommen. Dies ist in dem Begleitbericht (Böttcher, 2025) erläutert.

Tabelle 133: NMVOC-Emissionsfaktoren 1.B.2.a.v „Verteilung von Ottokraftstoffen“

Emissionsverursachender Vorgang	EF in [kg/t]	Methode
Tropfverluste bei der Betankung an der Tankstelle	0,117 kg/t	Tier 2
Verteilung von Tankwagen zu Tankstelle (20. BImSchV – Gaspendelung)	1,4[33] kg/t	M (Tier 2)
Ventilierung beim Transport mit Binnentankschiffen	0,025 kg/t	Tier 2
Verteilung von Tank Tankstelle zu Tank Fahrzeug (21. BImSchV – Gasrückführung)	1,4 kg/t	M (Tier 2)

Tabelle 134: NMVOC-Emissionsfaktoren für 1.B.2.a.v „Verteilung von Dieselkraftstoffen“

Emissionsverursachender Vorgang	EF in [kg/t]	Methode
Tropfverluste bei der Betankung an Tankstelle	0,1 kg/t	Tier 2
Transport von Raffinerie zu Transportfahrzeug	0,008 kg/t	Tier 2
Verteilung von Tank Tankstelle zu Tank Fahrzeug	0,003 kg/t	Tier 2

Tabelle 135: NMVOC-Emissionsfaktoren für 1.B.2.a.v „Verteilung von leichtem Heizöl“

Emissionsverursachender Vorgang	EF in [kg/t]	Methode
Tropfverluste bei der Betankung an Umschlagsstation	0,0011 kg/t	Tier 2
Transport von Raffinerie zu Transportfahrzeug	0,0053 kg/t	Tier 2
Verteilung von Tank Tankstelle zu Tank Fahrzeug	0,0063 kg/t	Tier 2

Tabelle 136: NMVOC-Emissionsfaktoren für 1.B.2.a.v „Verteilung von Flugturbinenkraftstoffen“

Emissionsverursachender Vorgang	EF in [kg/t]	Methode
Tropfverluste bei der Betankung an Umschlagsstation	0 kg/t	Tier 2
Transport von Raffinerie zu Transportfahrzeug	0,055 kg/t	Tier 2
Verteilung von Tankstellentank zu Fahrzeugtank	0,02 kg/t	Tier 2

Tabelle 137: NMVOC-Emissionsfaktoren für 1.B.2.a.v „Reinigung“

Emissionsverursachender Vorgang	EF in [g/t][34]	Methode
Reinigung von Straßentankwagen	1,1 g/t	Tier 2
Reinigung von Eisenbahnkesselwagen	0,47 g/t	Tier 2
Reinigung von Binnentankschiffen	18,8 g/t	Tier 2

3.3.2.1.6.2 Methodische Aspekte der Kategorie „Öl, Verteilung von Ölprodukten“ (1.B.2.a.v)

Transport

Nach dem Transport von Ottokraftstoffen mittels Binnentankschiffen befinden sich in den entladenen Tanks noch erhebliche Mengen an Ottokraftstoffdämpfen. Die Tanks müssen z.B. bei Ladungswechsel oder Werftaufenthalt entgast (ventiliert) werden (Bauer et al., 2010).

[33] Faktor ist ohne Minderungsmaßnahmen – siehe hierzu Tabelle 138

[34] Bezugsgröße ist die gesamte Menge an Ottokraftstoffen, die in Deutschland mit dem Verkehrsmittel transportiert wurde

Aus Ottokraftstoffen, die in Deutschland mittels Eisenbahnkesselwagen transportiert und umgeschlagen werden, entstehen ca. jährlich 1400 t VOC Emissionen (Joas et al., 2004). Die Logistikkette umfasst das Befüllen, den Transport, das Entleeren und die Reingung. Es ist davon auszugehen, das die Emissionen beim Transport und Entleeren vernachlässigbar sind.

Von der Raffinerie wird die Hälfte der Tankstellen direkt mit Straßentankfahrzeugen beliefert, die andere Hälfte wird über Zwischenlager versorgt, allerdings wird hier jedes dritte Zwischenlager über Pipelines versorgt (von Winkler, 2004).

Pipelines verursachen als Transportmittel keine nennenswerten Emissionen (von Winkler, 2004). Diffuse Verluste an Pipelinepumen oder -flanschen sind nach Aussagen des DGMK vernachlässigbar (Theloke et al., 2013).

Tankstellen

Beim Umfüllen aus Tankfahrzeugen in Lagertanks und bei der Betankung von Kraftfahrzeugen gelangt eine bedeutsame Menge an diffusen Emissionen von VOC in die Umwelt. Zur Ermittlung der Emissionen wird ein einheitlicher Emissionsfaktor von 1,4 kg/t herangezogen. Dies entspricht der Sättigungskonzentration von Kohlenwasserstoffdämpfen und damit der maximal möglichen Emissionsmenge ohne Minderungsmaßnahmen.

Mit den 1992 und 1993 immissionsschutzrechtlichen Vorschriften (BMJ & BfJ, 2017a, 2017b) für Tankstellen zur Begrenzung dieser Emissionen wurden Minderungsmaßnahmen gefordert. Diese betreffen sowohl den Bereich des Umfüllens und der Lagerung von Ottokraftstoffen (BMJ & BfJ, 2017a) als auch den Bereich der Betankung von Fahrzeugen mit Ottokraftstoffen an Tankstellen (BMJ & BfJ, 2017b).

Der Einsatz vorgeschriebener Minderungstechniken wie die Installation von Gaspendelungs- (20. BImSchV, (BMJ & BfJ, 1998b)) und Gasrückführungssystemen (21. BImSchV, (BMJ, 1992)) und der Einsatz von automatischen Überwachungseinheiten (mit der Novellierung der 21. BImSchV am 6.5.2002) führten zu einem stetigen Rückgang der VOC-Emissionen, was durch den Anwendungsgrad abgebildet wird (Tabelle 138).

Für die Berechnung der Emissionen werden die Anwendungs- und Wirkungsgrade der beiden Verordnungen auf den Tankstellenbestand mit berücksichtigt. Mit den derzeit vorhandenen technischen Möglichkeiten wird von folgenden Annahmen ausgegangen:

Tabelle 138: Anwendungs- und Wirkungsgrad der 20. und 21. Bundesimmissionsschutzverordnung (BImSchV) an Tankstellen

Verordnung		Faktor	
20. BImSchV	Gaspendelung	Anwendungsgrad	98 %
		Wirkungsgrad	98 %
21. BImSchV	Gasrückführung	Anwendungsgrad	98 %
		Wirkungsgrad	85 %

Für die Berechnung der Emissionen wird folgende Formel herangezogen:

Gleichung 2:

Emission = Aktivitätsrate * ungeminderter Emissionsfaktor (aus Tabelle 133) * (Anwendungsgrad * (1 - Wirkungsgrad) + (1 - Anwendungsgrad))

Ferner tritt an den Tankschläuchen eine Permeation von Kohlenwasserstoffen auf. Die DIN EN 1360 setzt einen Höchstwert von 12 ml/Schlauchmeter am Tag fest. Experten des UBA haben aus Auswertungen von Messungen einen konservativen Faktor von 10ml/m am Tag angenommen. Dieser wird zur Ermittlung der NMVOC-Emissionen herangezogen. Die Berechnung erfolgt nach der Formel des Instituts für Maschinenelemente der Universität Stuttgart (Haas, 2015):

Gleichung 3:

Anzahl Tankstellen * Zapfsäulen pro Tankstelle * Schläuche pro Zapfsäule * Schlauchlänge * Emissionsfaktor

Kanisterbetankung

Beim Umfüllen aus Kanistern in Tanks von motorbetriebenen Freizeitbooten gelangt eine kleine Menge an diffusen VOC Emissionen in die Umwelt. Zur Ermittlung der Emissionen wird wie bei den Tankstellen ein einheitlicher Emissionsfaktor von 1,4 kg/t herangezogen, ermittelt aus der Sättigungskonzentration von Kohlenwasserstoffdämpfen und damit der maximal möglichen Emissionsmenge. Darüberhinaus wird angenommen, dass bei einem durchschnittlichen Kanistervolumen von 15 l und einem geschätzten Tropfverlust von 1 kg/t sowie der Annahme, dass 0,24% der Bevölkerung ein motorbetriebenes Boot in Deutschland besitzen (Mell, 2008), es zu insgesamt 1,9 Millionen Betankungsvorgängen pro kommt. Hiervon ausgenommen sind sämtliche Betankungen über Wassertankstellen – diese Emissionen sind bereits in der Rubrik „Tankstellen“ enthalten.

Reinigung von Transportfahrzeugen

Die Tankinnenreinigung wird vor Reparaturarbeiten, vor Sicherheitsprüfungen, bei einem Produktwechsel oder bei einem Mietwechsel durchgeführt. Eine ausführliche Beschreibung der einzelnen Reinigungsprozesse sowie die Aufteilung nach Brennstoffen und chemischen Produkten befindet sich im Begleitbericht (Böttcher, 2025).

3.3.2.1.6.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz der Kategorie „Öl, Verteilung von Ölprodukten“ (1.B.2.a.v)

Die Unsicherheiten in der Kategorie werden bei den Emissionsfaktoren mit 177 % - Lognormalverteilung) angegeben, die Aktivitätsraten zu 65 % quantifiziert (Theloke et al., 2013).

3.3.2.1.6.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung der Kategorie „Öl, Verteilung von Ölprodukten“ (1.B.2.a.v)

Eine allgemeine Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Ein Vergleich mit anderen Ländern lässt sich nicht durchführen, da in den CRT-Tabellen nicht ersichtlich ist, welche Faktoren für die berichteten Emissionen einen Einfluss hatten.

3.3.2.2 Gas (1.B.2.b)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
-/-	1 B 2 b, Fugitive Emissions from Natural Gas	0	CO_2	986,72	0,08	398,54	0,06	-59,61
L/T	1 B 2 b, Fugitive Emissions from Natural Gas	0	CH_4	9892,63	0,77	1732,86	0,25	-82,48

Die Kategorie 1.B.2.b „Erdgas“ ist für CH_4-Emissionen aus Erdgas eine Hauptkategorie nach der Emissionshöhe und dem Trend.

3.3.2.2.1 „Gas, Exploration” (1.B.2.b.i)

Gas	angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CH_4	IE	IE	IE
NMVOC	IE	IE	IE

3.3.2.2.1.1 Beschreibung der Kategorie „Gas, Exploration“ (1.B.2.b.i)

Die Kategorie 1.B.2.b.i wird zusammen mit der Kategorie 1.B.2.a.i (Exploration, Erdöl) behandelt. Dementsprechend sind die zusammengefassten nicht unterteilten Daten von 1.B.2.b.i in der Kategorie 1.B.2.a.i enthalten.

3.3.2.2.1.2 Methodische Aspekte der Kategorie „Gas, Exploration“ (1.B.2.b.i)

Eine Differenzierung der Explorationen nach Öl und Gas wurde untersucht (Herold et al., 2014), jedoch aufgrund fehlender Statistiken und der sehr geringen Emissionsmengen nicht weiter verfolgt. Die Emissionen sind somit komplett für Öl- und Gasexploration unter 1.B.2.a.i ausgewiesen.

3.3.2.2.1.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz der Kategorie „Gas, Exploration“ (1.B.2.b.i)

Zur Erläuterung der Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz siehe 1.B.2.a.i.

3.3.2.2.1.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung der Kategorie „Gas, Exploration“ (1.B.2.b.i)

Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

3.3.2.2.2 „Gas, Förderung“ (1.B.2.b.ii)

Gas	angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2, CH_4	Tier 2	AS	CS
NMVOC	Tier 2	AS	CS

3.3.2.2.2.1 Beschreibung der Kategorie „Gas, Förderung“ (1.B.2.b.ii)

Die Emissionen der Kategorie setzen sich aus den Tätigkeiten bei der Förderung zusammen. Im BVEG-Jahresbericht 2021 wird erläutert, dass die Reserven rückläufig sind aufgrund erschöpfender Lagerstätten und geringer Exploration (BVEG, 2022).

Aktivitätsraten

Tabelle 139: Fördermenge Erdgas in Mrd m^3

1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2022	2023	2024
15,3	19,1	20,1	18,8	12,7	8,6	5,2	4,8	4,3	4,2

(BVEG, 2024)

Emissionsfaktoren

Tabelle 140: Verwendete Emissionsfaktoren für die Förderung

Gas	Emissionsfaktor	Methode
CO_2	0,13 g/m³	Tier 2
CH_4	0,02 g/m³	Tier 2
NMVOC	0,002 g/m³	Tier 2

3.3.2.2.2 Methodische Aspekte der Kategorie „Gas, Förderung" (1.B.2.b.ii)

Die Emissionen aus der Förderung werden seit 1998 durch den BVEG ermittelt und jährlich publiziert. Vor 1998 wurden die Emissionen mittels Default-Faktoren aus den IPCC Guidelines 2006 ermittelt. Die Berechnung der Emissionen erfolgt nach dem Tier-2 Ansatz.

3.3.2.2.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz der Kategorie „Gas, Förderung" (1.B.2.b.ii)

Die Unsicherheiten in der Kategorie werden bei der Aktivitätsrate mit 5 % angegeben und beruhen auf Schätzungen von Experten des BVEG und der nationalen Experten.

Die Unsicherheiten der Emissionsfaktoren in der Kategorie entsprechen 25 %.

3.3.2.2.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung der Kategorie „Gas, Förderung" (1.B.2.b.ii)

Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Im Zuge der EU Methanverordnung (EU, 2024a) berichten Erdgasförderer Ihre Methanemissionen. Zum Zeitpunkt der Berichterstellung ist jedoch die Auswertung dieser Daten noch nicht erfolgt.

Die verwendeten Emissionsfaktoren entsprechen der Größenordnung der in den IPCC Guidelines 2006 angegebenen Emissionsfaktoren.

Tabelle 141: IEF Vergleich mit IPCC Default Werten

Gas	verwendeter CS-Emissionsfaktor	IPCC GL 2006 (Tabelle 4.2.5)	
	Einheit in [g/m³]	Einheit in [Gg/10⁶m³]	Einheit in [g/m³]
CO_2	0,13 g/m³	$1,4*10^{-05}$ bis $1,8*10^{-04}$	0,014 – 0,18
CH_4	0,02 g/m³	$3,8*10^{-04}$ bis $2,4*10^{-02}$	0,380 – 24,0
NMVOC	0,002 g/m³	$9,1*10^{-05}$ bis $1,2*10^{-03}$	0,091 – 1,20

3.3.2.2.3 Gas, Verarbeitung (1.B.2.b.iii)

Gas	angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2, CH_4	Tier 3	AS	CS
CO	Tier 2	AS	CS
SO_2, NMVOC	Tier 2, Tier 3	AS	CS

3.3.2.2.3.1 Beschreibung der Kategorie (1.B.2.b.iii)

Die Emissionen der Kategorie setzen sich aus den Tätigkeiten der Vorbehandlung und Verarbeitung zusammen.

Aus der Tiefe kommendes Erdgas wird über Tage zunächst in Trocknungs- und Aufbereitungsanlagen behandelt. Diese Vorbehandlung des Erdgases findet in der Regel in Anlagen auf der Förderstation statt. Dabei werden mitgefördertes Lagerstättenwasser, flüssige Kohlenwasserstoffe und Feststoffe abgeschieden. Der noch verbliebene Wasserdampf wird dem Gas unter Verwendung von Glykol entzogen ((WEG, 2008))[35]: S. 25). Gastrocknungsanlagen sind in sich geschlossene Systeme, bei denen alle Überdruckabsicherungen aus Sicherheitsgründen in ein Fackelsystem eingebunden sind. Für den Fall der Auslösung dieser Druckabsicherung wird das überschüssige Gas zu einer Fackelspitze geleitet und kann dort sicher verbrannt werden. Das nach der Trocknung verkaufsgerechte Erdgas kann dem Kunden direkt über Pipelines geliefert werden (EXXON, 2014). Die Menge an abgefackeltem Gas wird unter 1.B.2.c berichtet.

Das aus der geologischen Formation des Zechsteins in Deutschland geförderte schwefelwasserstoffhaltige Erdgas - so genanntes Sauergas - erfordert eine spezielle Aufbereitung. Dieses Gas wird durch gesonderte und wegen der Gefährlichkeit des Schwefelwasserstoffs zusätzlich gesicherte Rohrleitungen in die deutschen Aufbereitungsanlagen transportiert, wo ihm in chemisch-physikalischen Waschprozessen der Schwefelwasserstoff entzogen wird. In Deutschland werden bei der Erdgasförderung ca. 40 % Sauergas mitgefördert (WEG, 2008).

Das Erdgas verlässt die Aufbereitungsanlage in verbrauchsfähiger Qualität. Der Schwefelwasserstoff wird in elementaren Schwefel umgewandelt und dient hauptsächlich der chemischen Industrie als Grundstoff.

Die geförderten Erdgasmengen und die Reserven sind seit Jahrzehnten rückläufig. Ursachen sind u.a. die sich erschöpfenden Lagerstätten sowie auch eine geringe Explorationstätigkeit, siehe (BVEG, 2022).

Biogas/Biomethan

Die Erzeugung von Biogas wird unter CRF 3.B berichtet. Dieses Biogas wird zum einen direkt vor Ort verstromt (Emissionen werden unter CRF 1.A berichtet), zum anderen als Biomethan in das Gasnetz eingeleitet. Vor der Einleitung muss es auf Erdgasqualität aufbereitet werden (Emissionen werden unter CRF 3.B berichtet). Gemäß der IPCC Guidelines 2006 wird Methan nicht nach fossil und biogen unterschieden. Daher gibt es keine Differenzierung unter CRF 1.B.2 nach fossil und biogen.

Aktivitätsraten

Tabelle 142: Schwefelproduktion aus der Erdgasgewinnung in Deutschland in kt

1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2022	2023	2024
915	1.053	1.100	1.050	832	628	353	371	277	280

(BVEG, 2024)

Die Förderung von Erdgas wird im Kapitel 3.3.2.2.2.1 in Tabelle 139 aufgelistet.

Emissionsfaktoren

Tabelle 143: Verwendete Emissionsfaktoren für 1.B.2.b.iii „Aufbereitung“

Gas	Emissionsfaktor	Methode
NMVOC	0,003 g/m³	Tier 3

[35] WEG 2008a: Erdgas-Erdöl, Entstehung-Suche-Förderung, Hannover, 34 Seiten

Gas	Emissionsfaktor	Methode
CH_4	0,05 g/m³	
CO_2	341 g/m³	

3.3.2.2.3.2 Methodische Aspekte (1.B.2.b.iii)

Die Berechnung der Emissionen erfolgte nach dem Tier-3 Ansatz.

Für die Sauergasaufbereitung werden Daten des BVEG (ehemalig WEG) seit 2000 verwendet. Diese stammen aus Messungen und Berechnungen der Mitglieder. Vor 2000 wird der mittlere CO_2-Emissionsfaktor von 0,23 t/Tsd.m^3 aus Österreich angewandt, da nach Aussagen des BVEG die deutsche Entschwefelungsanlage mit der österreichischen Anlage vergleichbar ist.

Zur Berechnung der Emissionen aus der Sauergasaufbereitung wird ein Splitfaktor bezogen auf die Aktivitätsrate von 0,4 verwendet. Diese Angabe zum Splitfaktor basiert auf dem WEG-Bericht zur Sauergasbehandlung (WEG, 2008), dieser wurde 2023 auf Nachfrage beim BVEG noch einmal bestätigt (Böttcher & Lillie, 2023).

3.3.2.2.3.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (1.B.2.b.iii)

Die Unsicherheiten in der Kategorie werden bei den Emissionsdaten mit 10 bis 30 % angegeben. Diese Angaben beruhen auf Schätzungen der nationalen Experten und liegen in der angegebenen Spanne relevanter Default-Emissionsfaktoren ((IPCC, 2003); Kap. 2.7.1.6).

3.3.2.2.3.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (1.B.2.b.iii)

Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Tabelle 144: Vergleich nationaler IEF mit IPCC-Default Werten

Quelle	verwendeter CS-Emissionsfaktor	IPCC GL 2006 (Tabelle 4.2.4)[36]	
	in [g/m³]	in [Gg/10^{6}m³]	in [g/m³]
CO_2	341	$7{,}9*10^{-06}+ 3{,}6*10^{-3}+ 6{,}3*10^{-2}$	66,608
CH_4	0,05	$9{,}7*10^{-05} + 2{,}4*10^{-6}$	0,099
NMVOC	0,003	$6{,}8*10^{-05} + 1{,}9*10^{-6}$	0,068

Ein Vergleich mit den IPCC Default Faktoren [Tabelle 4.2.4 in den (IPCC, 2006a)] zeigt den nationalen Emissionsfaktoren für Methan in der Bandbreite der Defaultfaktoren. Der für Kohlendioxid übersteigt den Wert aber massiv, jedoch liegt Deutschland im Vergleich mit Österreich (Tabelle 145) in derselben Größenordnung. Die Abweichungen zu den IPCC Defaultwerten lassen sich damit erklären, dass in den deutschen Emissionsfaktor die Schwefelproduktion mit enthalten ist. Nach Angaben des BVEG kann ein Sechstel der Emissionen der Schwefelproduktion zugeschrieben werden.

Tabelle 145: Kohlendioxid- Emissionsfaktorvergleich (2022) in [g/m³]

Quelle	CS-Emissionsfaktor
Österreich	269
Deutschland	340

[36] Addition von diffusen und Fackelemissionen sowie Rohgasventilierung (Raw-CO_2-venting)

Ein Abgleich mit weiteren Ländern konnte nicht durchgeführt werden, da in den CRT-Tabellen nicht ersichtlich ist, welcher Anteil aufbereiteten Erdgases dem Sauergas zuzuordnen ist.

3.3.2.2.4 Gas, Weiterleitung (1.B.2.b.iv)

Gas	angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
NMVOC; CO_2; CH_4	Tier 3	AS	CS

3.3.2.2.4.1 Beschreibung der Kategorie (1.B.2.b.iv)

Die Emissionen der Quellgruppe setzen sich aus den Tätigkeiten der Branche der Gasversorger zusammen. In Deutschland wird Gas von Betrieben/Anlagen der Förderung und der Verarbeitung zu Unternehmen der Gasversorgung und Gasverarbeitung weitergeleitet. Ferner erfolgen Import und Weiterleitung von Erdgas mittels Fernleitungen.

Zur Weiterleitung von Gas werden ausschließlich Stahlleitungen verwendet (Zöllner, 2014).

Aktivitätsraten

Tabelle 146: Länge der Hochdruckfernleitungen, in [km]

1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2023	2024
22.696	29.866	32.214	34.086	35.503	34.270	33.809	34.035	34.035

eigene Abfrage bei den FNB

Ein Teil des Erdgases wird zur zeitlichen Unterbrechung (zur Wahrung der Versorgungssicherheit) der Weiterleitung in unterirdischen Speichern zwischengelagert.

Tabelle 147: Unterirdische Gasspeichervolumina in [Mrd. m³]

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2023	2024
Kavernenspeicher	2,8	4,8	6,1	6,8	9,2	14,3	15,1	14,3	14,0
Porenspeicher	5,2	8,5	12,5	12,4	12,1	9,8	8,6	8,6	8,6

(BVEG, 2024)

Ein wesentlicher Emissionspfad sind Verdichter, die zur Druckaufrechterhaltung an den Leitungen. ca. alle 100 km (GASUNIE, 2014) eingesetzt werden. Hinzu kommen Absperreinrichtungen (Schieber), die sich entlang der Hochdruckleitungen befinden sowie Gas-Druckregel(mess)anlagen (GDR(M)A).

Zur Inspektion und Reinigung der Leitungen kommen sogenannt Molche zum Einsatz. Der Molch bewegt sich im Leitungssystem mithilfe des Gasstroms von einer Sende- zu einer Empfangsstation (Molchschleusen), die entweder fest installiert oder mobil sein kann. Sowohl beim Ein- als auch beim Ausschleusen werden geringe Menge Methan emittiert. Außerdem können die Molchschleusen Leckagen aufweisen, welche allerdings regelmäßig kontrolliert und ggf. repariert werden. Nicht alle Leitungen sind molchbar, da Durchmesserreduzierungen, Absperrarmaturen, Bögen, o.ä. existieren können, die die Durchfahrt verhindern. Eine Abschätzung dieser Emissionen wurde durch ein Gutachten des DBI durchgeführt (Grosse, 2021).

LNG Terminals

Am 17. Dezember 2022 ging das erste Flüssiggasterminal des Typs FSRU (Floating Storage and Regasification Unit) in Betrieb. Zwei weitere sind in 2023 und 2024 in Betrieb gegangen.

Emissionsfaktoren

In Deutschland wird gefördertes Erdgas von den Förderfeldern und den dortigen Förderstationen (auf Land und vor der Küste), sowie importiertes Erdgas hauptsächlich über Rohrleitungen weitergeleitet.

Im Zuge der EU Methanverordnung (EU, 2024a) berichten FSRU- und LNG-Betreiber ihre Methanemissionen. Zum Zeitpunkt der Berichterstellung lagen noch nicht alle Betreiberdaten vor, so dass aus den gemeldeten Daten eine Hochrechnung erfolgte. Der so ermittelte Emissionsfaktor beträgt 30.124 kg CH_4 pro Station.

Nach Auskunft der Deutschen Re-Gas, gibt es keine Fackelsysteme an deutschen LNG Terminals. Sämtliche Kohlendioxidemissionen werden im ETS gemeldet und sind daher bereits unter 1.A.1.c berücksichtigt. Als Sicherheitseinrichtung wird das sogenannte boil-off Gas nicht ausgeblasen sondern abgeführt und für den Schiffsantrieb verwendet.

Die Emissionsfaktoren für die Gasuntergrundspeicher wurden von (Bender & Langer, 2012) ermittelt und mittels Reduktionsfaktor bis zum Jahr 2023 extrapoliert (Böttcher, 2022) (Kapitel 5.3). Im Zuge der EU Methanverordnung (EU, 2024a) berichten Untergrundspeicherbetreiber ihre Methanemissionen für 2024 (siehe Tabelle 148). Der Emissionsfaktor für das Jahr 2024 beträgt 0,05 kg CH_4 pro 1000m^3 Speicher.

Tabelle 148: Emissionen der Untergrundspeicherbetreiber nach EU Methanverordnung

Asset	OGMP Kategorie	Emissionen
Compressor Stations (Injection/Withdrawal)	2.1	941,1 t
Treatment & Wells & Dehydrators	2.2	178,6 t

Die Ferngasnetzbetreiber berichten ihre Methanemissionen im Zuge der EU Methanverordnung (EU, 2024a). Folgende Daten wurden übermittelt:

Tabelle 149: Emissionen der FNB nach EU Methanverordnung

Asset	OGMP Kategorie	Emissionen
Fernleitungen	1.1	1.020 t
Verdichter	1.2	2.755 t
Regelanlagen	1.3	2.771 t

Die NMVOC und CO_2-Emissionsfaktoren wurden mittels Splitfaktoren aus der Gaszusammensetzung nach (Lubenau & Schuetz, 2014) ermittelt (Böttcher, 2022) (Kapitel 6).

3.3.2.2.4.2 Methodische Aspekte (1.B.2.b.iv)

Die Anforderungen der EU-Methanverordnung (EU, 2024a) entsprechen dem Tier-3-Ansatz nach UNFCCC.

3.3.2.2.4.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (1.B.2.b.iv)

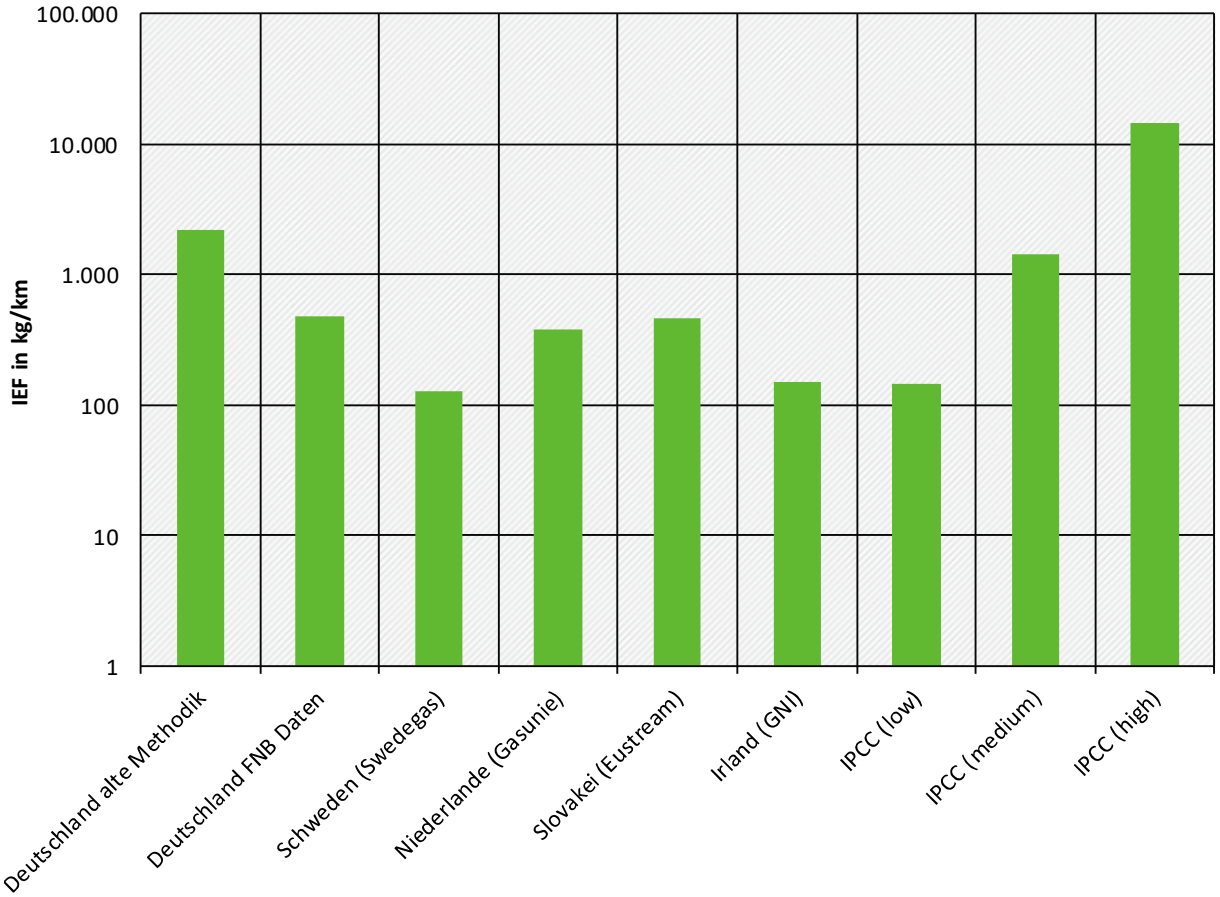
Die Unsicherheiten in der Kategorie werden bei den Emissionsdaten mit 10 bis 50 % angegeben.

3.3.2.2.4.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (1.B.2.b.iv)

Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Ein Vergleich der Kategorie mit den IPCC Default Faktoren (Tabelle 4.2.8) zeigt, dass die Emissionsfaktoren für Methan innerhalb der angegebenen Bandbreite liegen. Im Vergleich mit Nachbarstaaten, die ein ähnliches Messprogramm durchgeführt haben, zeigt sich Deutschland im guten Mittelfeld (siehe Abbildung 41).

Abbildung 41: Vergleich mit internationalen IEF für Methan aus 1.B.2.b iv Logarithmische Darstellung; Bezug auf das Jahr 2020



Daten des IPCC (Volume 2, Chapter 4 – Tabelle 4.2.8) umgerechnet von m³/a in kg/a mit Dichte von 0,717 kg/m³
Quelle: Hintergrundpapier (Böttcher, 2022), Umweltbundesamt

3.3.2.2.5 Gas, Verteilung (1.B.2.b.v)

Gas	angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
NMVOC; CO_2; CH_4	Tier 3	AS	CS

3.3.2.2.5.1 Beschreibung der Kategorie (1.B.2.b.v)

Die durch die Gasverteilung verursachten Emissionen sind trotz deutlich gestiegener Gasdurchleitungen und eines gegenüber 1990 deutlich erweiterten Verteilungsnetzes erheblich zurückgegangen. Ursache hierfür ist zum einen die Erneuerung des Gasverteilungsnetzes. So wurde insbesondere der Anteil der Graugussrohre im Niederdrucknetz reduziert und durch emissionsärmere Kunststoffrohrleitungen ersetzt. Eine weitere Ursache dieser Reduzierung ist die

Minderung der diffusen Verteilungsverluste in der Folge technischer Verbesserungen (technisch dichte Armaturen wie Flansche, Ventile, Pumpen, Kompressoren) als Resultat der Implementierung von Anforderungen zur Emissionskontrolle aus Regularien ((TA Luft, 1986) und (TA Luft, 2002)).

Aktivitätsraten

Tabelle 150: Gasverteilungsnetz, Angaben in km

Parameter	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2019	2020	2023	2024
Gesamtlänge Leitungsnetz[37]	282.612	366.987	362.388	402.391	471.886	474.570	489.100	503.543	527.000	557.000

(BNetzA & BKartA, 2025)

3.3.2.2.5.2 Methodische Aspekte (1.B.2.b.v)

Rohrleitungsnetz

Die Berechnung erfolgt mittels Tier-3-Ansatzes auf der Grundlage der verfügbaren Leitungslängen aus dem Monitoringbericht (BNetzA & BKartA, 2025) und der Aufteilung nach Versorgungs- und Netzanschlussleitungen aus der GaWaS (Grosse, 2023). In den frühen 1990er Jahren wurden auch die Emissionen der Verteilung von Stadtgas in die Berechnungen einbezogen. Das Stadtgasverteilungsnetz hatte 1990 einen Anteil von 16 % am gesamten Gasnetz, davon 15 % im Graugussnetz- und 85 % im Stahl- und Duktilgussbereich.

Die Emissionsfaktoren stammen aus der DVGW Studie von (Große et al., 2022).

Im Zuge der EU Methanverordnung (EU, 2024a) berichten alle Verteilnetzbetreiber ihre Methanemissionen. Zum Zeitpunkt der Berichterstellung lagen noch nicht alle Betreiberdaten vor. Eine Hochrechnung konnte aufgrund der Vielzahl an Unternehmen und der sehr heterogenen Berichte nicht erfolgen. Daher wurden die Daten nicht verwendet.

Speicher

Zur Einlagerung von mittleren Erdgasmengen und zum Ausgleich kurzzeitiger Verbrauchsschwankungen eignen sich künstliche oberirdische Speicher. In Deutschland stehen hierzu Kugel- und Röhrenspeicher sowie weitere Niederdruckbehälter zur Verfügung. Aufgrund der Ergebnisse eines Forschungsvorhabens (Bender & Langer, 2012) konnten landesspezifische Emissionsfaktoren ermittelt werden. Die Berechnung der Emissionen erfolgt mittels Tier-2-Ansatz.

3.3.2.2.5.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (1.B.2.b.v)

Die Unsicherheiten der Emissionen in der Kategorie werden mit 44 bis 112 % angegeben (Große et al., 2022)(Kap. 5.2.4).

Die Unsicherheiten der Aktivitätsraten werden maßgeblich von der Leitungslänge beeinflusst. Es gibt in Deutschland mehrere Statistiken, die sich zum Teil erheblich unterscheiden (Vergleich Tabelle 151).

[37] Die angegebenen Daten beinhalten auch die Hausanschlussleitungen

Tabelle 151: Vergleich der Leitungslänge verschiedener Statistiken für das Jahr 2020

	Leitungslänge	Bezugsquelle
BDEW	492.500 km	Internetseite[38]
BNetzA	522.000 km	Monitoringbericht [39]
DVGW	412.992 km	Datenabfrage [40]
UBA	503.543 km	BDEW-Daten von 2018 hochgerechnet mit durchschnittlichen Zubauraten

Um konservativ zu rechnen, werden die Daten des Monitoringberichts verwendet, jedoch eine Unsicherheit von 25% angewendet.

3.3.2.2.5.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (1.B.2.b.v)

Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

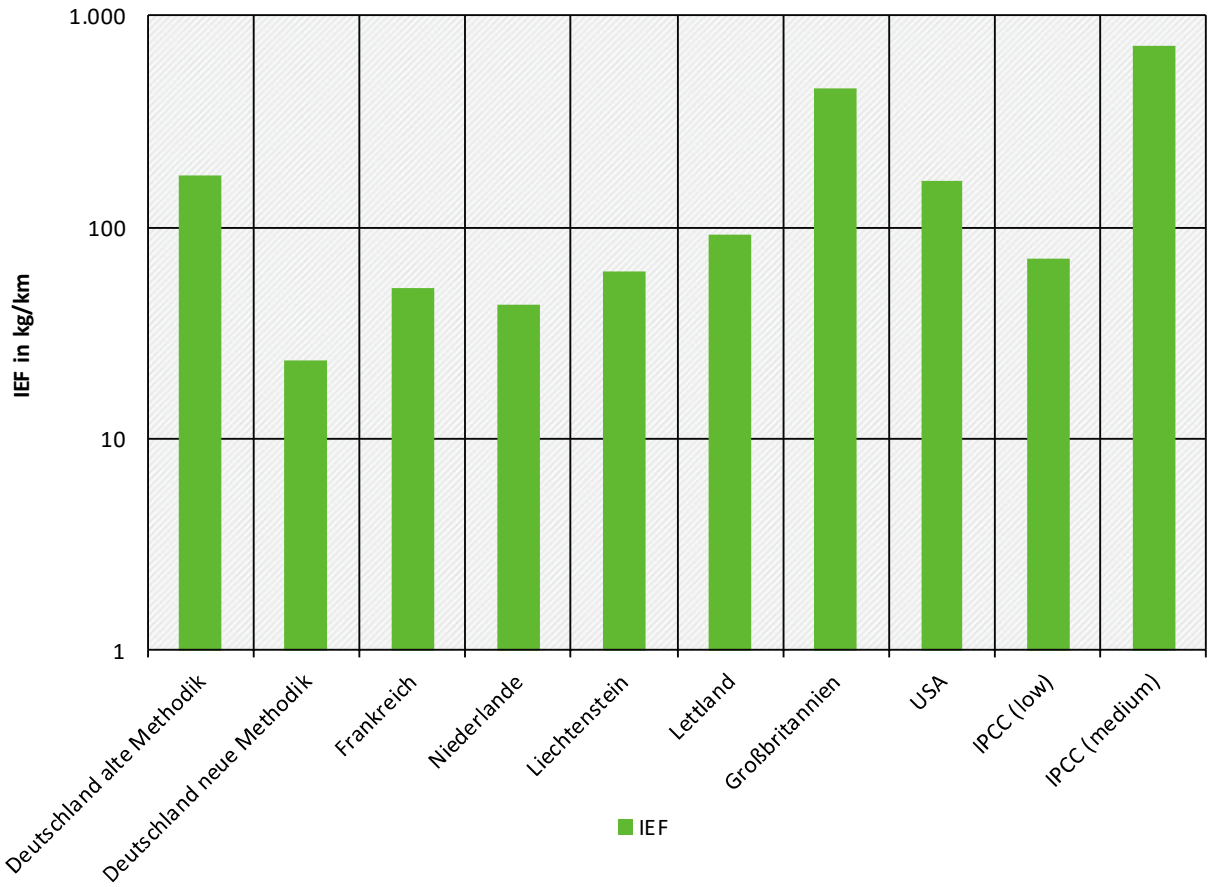
Ein Vergleich der Kategorie mit anderen Ländern wurde in Böttcher (2022) (Kapitel 4.3) durchgeführt. Es zeigt ein insgesamt recht niedriger impliziter Emissionswert (Abbildung 42). Es muss hier allerdings berücksichtigt werden, dass Deutschland die sogenannten post-meter-emissions unter 1.B.2.b.vi separat ausweist. Wenn man diese mit einbezieht, liegt der IEF im Bereich der Nachbarländer.

[38] https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/gasnetzentwicklung-deutschland/

[39] https://www.bundeskartellamt.de/SharedDocs/Publikation/DE/Berichte/Energie-Monitoring-2020.html

[40] Summe NAL und VL aus Grosse, C. (2022). *Qualitätsprüfung der Texte für die nationalen Inventarberichte 2023 und 2024 und Datenerhebung in der Quellgruppe 1.B.2.b - Zwischenbericht 2022*.

Abbildung 42: Vergleich der mit internationalen IEF für Methan an 1.B.2.b v



Logarithmische Darstellung; Bezug auf das Jahr 2020 Daten des IPCC (Volume 2, Chapter 4 – Tabelle 4.2.8) umgerechnet von m³/a in kg/a mit Dichte von 0,717 kg/m³]
Quelle: eigene Darstellung, Umweltbundesamt

3.3.2.2.6 Gas, diffuse Emissionen bei Endanwendern (1.B.2.b.vi)

Gas	angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
NMVOC; CO_2; CH_4	Tier 2	AS	CS

3.3.2.2.6.1 Beschreibung der Kategorie (1.B.2.b.vi)

Die Kategorie beschreibt die Emissionen ab dem Übergabepunkt vom Gasversorger zum -abnehmer. Diese beinhalten Emissionen aus der verlegten Installation (Gaszähler, innergebäudliche Leitungen) sowie Leckagen durch Start-Stopp-Vorgänge bei Erdgasendgeräten. Außerdem finden Emissionen von Erdgasfahrzeugen hier Berücksichtigung.

Aktivitätsraten

Tabelle 152: Anzahl Erdgasfahrzeuge in Deutschland

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2023	2024
Anzahl	0	0	7.500	28.500	90.000	97.804	100.807	100.000	100.000

Quelle: (ADAC, 2025)

Tabelle 153: Verwendete Aktivitätsraten für die Kategorie 1.B.2.b.vi „diffuse Emissionen bei Erdgas-Anwendern“

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2023	2024
Anzahl der Gaszähler in Haushalten und Kleinverbrauchern [Mio.]	10,3	12,7	12,8	13,3	12,9	13,0	13,1	13,2	13,3

eigene Erhebung

Emissionsfaktoren

Tabelle 154: Verwendete Emissionsfaktoren für die Kategorie 1.B.2.b.vi „diffuse Emissionen bei Endanwendern “

Aktivität	Emissionsfaktor
Haushalte und Kleinverbraucher	4 m³ / No
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen	0,5 m³ /No
Industrie	IE (in 1.A.1)

3.3.2.2.6.2 Methodische Aspekte (1.B.2.b.vi)

Haushalte und Kleinverbraucher

In einer Untersuchung des GWI im Auftrag des DVGW (Brandes, 2022) wurden Emissionen von Erdgasendgeräten untersucht. Dabei wurden die Emissionen aus der häuslichen, gewerblichen und industriellen Gasanwendung in Deutschland ermittelt.

Die Untersuchung zeigt unter anderem auf, dass Solarthermieanlagen einen Einfluss auf das Emissionsverhalten haben, da häufig dabei das Einschalten der sogenannten „Komfortfunktion“ mit kombinierten Gasthermen eine Rolle spielt. Da die Experten des GWI in einem Gespräch davon ausgehen, dass diese Komfortfunktion in den Haushalten mehrheitlich genutzt wird, wird das Szenario 4 aus der Studie verwendet (Tabelle 6-10 in der Studie).

Die Emissionen der Quellgruppe 1.A.4.b.i „Stationär“ beinhaltet ebenfalls Methanemissionen aus Haushalten und Kleinverbrauchern. Nach (Struschka et al., 2008) sind teilweise auch Start-Stopp-Emissionen enthalten. Allerdings sind die dort ermittelten Emissionen zwei Größenordnungen niedriger als die des GWI. Um eine Untererfassung zu vermeiden, werden die Emissionen des GWI in dieser Kategorie berichtet.

Laut DVGW Arbeitsblatt G 600 (Schuhmann, 2018) liegt bei Hausinstallationen eine uneingeschränkte Gebrauchsfähigkeit bei einem Leckagevolumen von 0-1 l/h vor. Wird bei der Dichtheitsprüfung ein höherer Leckagewert festgestellt, muss die Installation zeitnah instandgesetzt werden. Umgerechnet liegen somit die maximalen Emissionen zwischen 0 und 8,76 m^3_{Erdgas}/a bzw. 6,3 kg_{Erdgas}/a. Um konservativ zu bleiben wird dieser Wert für 1990 angesetzt. Dafür werden die 8,76 m^3_{Erdgas}/a noch mit 0,9 multipliziert um nur den Methananteil zu berücksichtigen. Der so ermittelte Wert liegt bei 7,9 m^3_{CH4}/a. Ab dem Jahr 2021 wird der Emissionsfaktor aus der GWI-Studie (Haushalte plus Installationen plus Zählertausch) von insgesamt 4 m^3/No (Gaszähler) angesetzt, dazwischen wird interpoliert.

Gewerbe, Handel, Dienstleistungen

Die Untersuchung des GWI (Brandes, 2022) zeigt, dass die Emissionen im Gewerbe-, Handel- und Dienstleistungssektor bei über vier Kilotonnen Methan pro Jahr liegt. Die in 1.A.4 verwendeten Faktoren ergeben jedoch zwei Größenordnungen weniger. Da nicht abschließend geklärt werden konnte, warum diese Diskrepanz auftritt, werden die Emissionen des GHD-

Sektors aus Start-Stopp-Verlusten in dieser Kategorie mit aufgenommen. Um eine Zeitreihe bilden zu können, werden die ermittelten Emissionen durch die Anzahl der Gaszähler geteilt. Somit entsteht ein Faktor von 0,5 m^3/No. Dieser wird über die komplette Zeitreihe angewendet, da laut Studie (Kapitel 1) man davon ausgehen kann, dass sich der Gerätebestand in den vergangenen Jahrzehnten kaum verändert hat.

Industrie

Die Auswertung von Böttcher (2022) (Kapitel 5.6) sowie Gespäche mit Fachexperten der stationären Feuerung zeigen auf, dass Methanemissionen bereits unter 1.A.1 enthalten sind. Daher werden sie in dieser Kategorie mit IE berichtet.

Erdgasfahrzeuge und Tankstellen

In Deutschland werden erdgasbetriebene Fahrzeuge an CNG-Tankstellen, welche an das öffentliche Netz angeschlossen sind, mittels Kompressoren aus Hochdruckzwischenspeichern betankt. Es gibt derzeit ca. 666 CNG-Tankstellen landesweit (erdgas-mobil, 2025). Aufgrund der hohen Sicherheitsanforderungen bei der Betankung und auch bei den Tanks selbst, sind daher die Emissionen mit ca. 30 t pro Jahr sehr gering und werden im Wesentlichen bei der Druckprüfung und bei Entleerung von Tanks verursacht. Die Berechnung der Emissionen erfolgt mittels Tier-2-Ansatz. Die Methanemissionen aus den Kompressoren (Schlupf) sind aus statistischen Gründen bereits unter 1.B.2.b.v „Verteilung“ mit berücksichtigt.

3.3.2.2.6.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (1.B.2.b.vi)

Die Unsicherheiten in der Kategorie werden bei den Emissionsdaten mit 20 % angegeben. Diese Angaben beruhen auf Schätzungen von Experten und liegen in der angegebenen Spanne relevanter Default-Emissionsfaktoren (Penman et al. (2000), Kap. 2.7.1.6).

3.3.2.2.6.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (1.B.2.b.vi)

Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Ein Vergleich der Kategorie mit anderen Ländern wurde in Böttcher (2022) (Kap. 5.6) durchgeführt. Demnach gibt es in Großbritannen ähnliche Untersuchungen, jedoch liegen die Emissionen eine Größenordnung unter den deutschen. Zu einem ähnlichen Ergebnis kommt auch Betzenbichler et al. (2016).

Darüber hinaus wird im NIR von Lettland (Skrebele et al., 2023) (Tabellen 3.56 und 3.57) abgeschätzt, dass ca. 85% der diffusen Verluste in der Erdgaskette (Kategorie 1.B.2.b.vi geteilt durch Kategorie 1.B.2.b-komplett) allein bei den Endverbrauchern entstehen. Setzt man die deutschen Werte ins Verhältnis, erhält man 64%.

Die IPCC Guidelines 2006 geben zwar keine Methodenbeschreibung für diese Kategorie vor, jedoch in Tabelle 4.2.8 eine Bandbreite der zu erwartenden Emissionsfaktoren vor. Hier zu berücksichtigen ist, dass die Guidelines sich auf die Anzahl der Endgeräte und nicht auf die der Gaszähler beziehen. Nach Daten des Schornsteinfegerverbandes gab es 2021 15,1 Mio erdgasbetriebene Endgeräte (ZIV, 2024) (Kapitel 3) – bezogen auf die 13,3 Mio Gaszähler ist das ein Faktor von 1,1 Geräten pro Gaszähler. Diesen Faktor muss man zu den 4,5 m^3/Gaszähler dazumultiplizieren und erhält so rund 5 m^3/Endgerät (siehe Tabelle 155).

Tabelle 155: Vergleich mit IPCC Default Werten

Einrichtung	CS-Emissionsfaktor	IPCC GL 2006 – Tabelle 4.2.8
Anwenderverluste (Haushalte + GHD)	5 m³/Endgerät	2 bis 20 m³/Endgerät

3.3.2.3 Abfackelung und Entlüftung (1.B.2.c)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
-/-/2	1 B 2 c, Venting and Flaring (oil, gas, combined oil and gas)	0	CO_2	543,52	0,05	319,64	0,05	-41,19
-/-	1 B 2 c, Venting and Flaring (oil, gas, combined oil and gas)	0	CH_4	1,85	0,01	0,63	0,01	-65,94
-/-	1 B 2 c, Venting and Flaring (oil, gas, combined oil and gas)	0	N_2O	1,74	0,01	0,62	0,01	-64,51

Die Kategorien in der übergeordneten Gruppe der diffusen Emissionen aus 1.B.2.c "Abfackelung und Entlüftung" umfasst die direkt ausgeblasenen und über eine Verbrennung in die Atmosphäre emittierten Treibhausgase und Luftschadstoffe. Die Emissionen aus Entlüftungsvorgängen werden in den Kategorien 1.B.2.a.iv für Öl sowie 1.B.2.b.iii und 1.B.2.b.iv für Gas berücksichtigt.

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	benutzte Emissionsfaktoren
CO_2	Tier 2	AS	CS
CH_4	Tier 2	AS	CS
N_2O	Tier 2	AS	CS
NMVOC	Tier 2	AS	CS

Die Kategorie 1.B.2.c „Abfackelung und Entlüftung“ ist für CO_2 eine Hauptkategorie nach der Methode-2-Analyse.

3.3.2.3.1.1 Beschreibung der Kategorie „Abfackelung und Entlüftung“ (1.B.2.c)

Nach den allgemeinen Vorgaben aus der (TA Luft, 2002) sind Gase und Dämpfe sowie Wasserstoff und Schwefelwasserstoff, die aus Druckentlastungsarmaturen und Entleerungseinrichtungen austreten, in ein Gassammelsystem einzuleiten. Die erfassten Gase werden soweit wie möglich in Prozessfeuerungen verbrannt. Sofern dies nicht möglich ist, werden die Gase einer Fackel zugeführt. Die Fackeln müssen mindestens die Anforderungen an Fackeln zur Verbrennung von Gasen aus Betriebsstörungen und Sicherheitsventilen erfüllen. Die Fackel ist für eine Raffinerie und für andere Anlagen in den Kategorien 1.B.2 eine unbedingt notwendige Sicherheitseinrichtung. Bei der Verarbeitung von Rohöl können aus unterschiedlichen Gründen gelegentlich zu hohe Drücke in den Prozessanlagen entstehen. Damit in solchen Fällen der Druck nicht so hoch wird, dass Behälter und Rohrleitungen platzen, muss der Überdruck durch Sicherheitsventile abgebaut werden können. Sicherheitsventile lassen das Produkt in Leitungen ab, die zur Fackel führen. Dort können die Gase, die bei Überdruck ausströmen, kontrolliert verbrannt werden. Kohlenwasserstoffe werden dabei zu mehr als 99 % zu CO_2 und H_2O umgesetzt. Durch Einrichtungen zur Fackelgasrückgewinnung wird der größte Teil der anfallenden Gase verflüssigt und wieder in den Verarbeitungsprozess rückgeführt oder in der Raffinerie für Feuerungszwecke genutzt. Am Fackelkopf ist daher selten mehr als eine kleine Zündflamme zu sehen.

Aktivitätsraten

Seit 2018 veröffentlicht der BVEG die jährlichen Fackelgasmengen getrennt nach Erdgas- und Erdölförderstationen. Zuvor konnten nur die Daten der Erdgasproduktion separat ausgewiesen werden. Die Aktivitätsrate bei der Erdgasproduktion steigt zwischen 2018 und 2019 sprunghaft an. Dies ist nicht direkt auf eine deutlich höhere Fackelgasmenge zurückzuführen, sondern auf eine nun vom Branchenverband BVEG mit berichteter Menge an Pilotgas. Das Pilotgas dient zur Sicherstellung der Betriebsfähigkeit der Fackeln und der sicheren Zündung abzufackelnder Gase. Die entstehenden Emissionen durch die Pilotgase wurden bereits vorher miterfasst, die Emissionsfaktoren werden daher ab dem Jahr 2019 angepasst.

Tabelle 156: Fackelgasmengen in Mio. m³

Fackelmengen	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2018	2020	2022	2023	2024
Erdgasproduktion	36	33	36	19	12	10	11	14	10	11	10
Erdölproduktion	NA	NA	NA	NA	NA	NA	10	8	8	8	5

(BVEG, 2024)

Emissionsfaktoren

Abfackelungsaktivitäten finden auf Förderanlagen und in Raffinerien statt. In Raffinerien werden diese differenziert nach Regelbetrieb und nach Störungs- bzw. An-/Abfahrbetrieb. An den Erdöl- und Erdgasförderstationen wird differentiert nach routinemäßig, sicherheitsrelevant und nicht-routinemäßig.

Die Daten werden betreiberspezifisch ermittelt und an das Umweltbundesamt übermittelt. Auf Grundlage dieser Daten werden implizite Emissionsfaktoren abgeleitet.

Tabelle 157: implizite Emissionsfaktoren für 1.B.2.c „Fackelemissionen bei der Erdgasförderung“

Gas	Wert	Methode
CO_2	1,8 kg/m³	Tier 3

Tabelle 158: implizite Emissionsfaktoren für 1.B.2.c „Fackelemissionen an Erdölförderanlagen“

Gas	Wert	Methode
CO_2	2,8 kg/m³	Tier 3

Laut BVEG sind die Emissionen von Lachgas verschwindend gering. Zu diesem Ergebnis kommt auch ein Gutachten (Theloke et al., 2013). Um konservativ zu bleiben, wurde zur Berechnung der IPCC Defaultwert angenommen.

Die SO_2-Emissionen werden ermittelt aus der Aktivitätsrate des abgefackelten Erdgases (Tabelle 156) und einem Emissionsfaktor von 0,140 kg/ 1000 m³, welcher einen durchschnittlichen H_2S-Gehalt von 5 Vol. % berücksichtigt.

Die Emissionsfaktoren der Raffineriefackeln wurden aus den Emissionserklärungen 2004 und 2008 abgeleitet (Theloke et al., 2013) und 2019 für CH_4, N_2O, CO, NMVOC, NO_x und SO_2 auf Basis von (Bender & von Müller, 2019b) aktualisiert.

Tabelle 159: verwendet Emissionsfaktoren für 1.B.2.c „Fackelemissionen an Raffinerien: Abfackelung-Normalbetrieb“

Gas	Wert	Methode
CH_4	0,222 g/t	Tier 2
CO_2	2,60 kg/t	Tier 2
N_2O	0,03 g/t	Tier 2
CO	0,76 g/t	Tier 2
NMVOC	4,14 g/t	Tier 2
SO_2	3,28 g/t	Tier 2
NO_X (als NO_2)	0,49 g/t	Tier 2

Tabelle 160: verwendete Emissionsfaktoren 1.B.2.c „Fackelemissionen an Raffinerien: Abfackelung-Störung“

Gas	Wert	Methode
CH_4	0,095 g/t	Tier 2
CO_2	1,47 kg/t	Tier 2
N_2O	0,3 mg/t	Tier 2
CO	0,71 g/t	Tier 2
NMVOC	0,73 g/t	Tier 2
SO_2	7,48 g/t	Tier 2
NO_X (als NO_2)	4,18 g/t	Tier 2

3.3.2.3.1.2 Methodische Aspekte der Kategorie „Abfackelung und Entlüftung“ (1.B.2.c)

Emissionen bei der Entlüftung werden in der Kategorie 1.B.2.b.iii berücksichtigt.

Die im BVEG Jahresbericht angegebenen Emissionen beinhalten auch verbrennungsbedingte Emissionen für Motoren. Nach der Studie (Fritsche et al., 2006) sowie nach eigenen Befragungen sind nur rund 0,1% der dort angegebenen Kohlendioxidemissionen als diffus und weniger als 5% als Fackelemissionen anzusehen. Daher sind die im Jahresbericht des BVEG angegebenen Emissionen nicht für die Berichterstattung direkt anzuwenden.

Für die Ermittlung der Kohlendioxidemissionen aus der Abfackelung an Erdölproduktionsstätten wurden die berichteten Fackelgasmengen mit dem Faktor von 2,8 kg/m^3 (https://www.worldbank.org/en/programs/zero-routine-flaring-by-2030/qna#17) multipliziert.

Die Emissionsfaktoren wurden aus den Emissionsberichten, der Rohöldestillationskapazität und der Gesamtauslastung der deutschen Raffinerien gebildet. Als Basis dient das Auswertungsgutachten von (Theloke et al., 2013).

Vor 2018 werden die Emissionen der Erdölförderung aus den Werten der Studie (Fritsche et al., 2006) (Tabelle 5) berechnet. Die Berechnung dieser Emissionen erfolgt nach dem Tier-2 Ansatz.

Vor 2004 werden die Emissionen der Raffineriefackeln aus den Werten der Studie (Theloke et al., 2013) (Tabelle 5) berechnet. Die Berechnung dieser Emissionen erfolgt nach dem Tier-2 Ansatz.

Im Review 2022 wurde Deutschland aufgefordert zu begründen, warum IE in den CRT-Tabellen als Aktivitätsrate ausgeweisen wird. Dies wurde getan, um keinen falschen IEF in den CRT-Tabellen zu erzeugen, da CO_2 bezogen auf die Fackelgasmenge berechnet wird (Tier-2-Ansatz), N_2O bezogen auf die Fördermenge (Tier-1-Ansatz).

3.3.2.3.1.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz der Kategorie „Abfackelung und Entlüftung“ (1.B.2.c)

Für die Emissionsfaktoren für Kohlendioxid und Methan der Abfackelungsprozesse im Normalbetrieb werden quantitative Unsicherheiten von +/-10 % (95 % Konfidenzintervall, Normalverteilung) angenommen. Die Unsicherheiten der Aktivitätsraten werden mit +/-5 % (95 % Konfidenzintervall, Normalverteilung) angenommen.

Die Unsicherheiten der Emissionsfaktoren störungsbedingter Abfackelungsprozesse (Störungs-, An- und Abfahrbetrieb) sind weitaus größer, da die Emissionsmenge jedes Jahr sehr unterschiedlich sein kann. Sie werden mit -90 %/ +300 % (95% Konfidenzintervall, Lognormal-Verteilung) abgeschätzt. Die Unsicherheiten der Aktivitätsraten werden mit +/-10 % (95 % Konfidenzintervall, Normalverteilung) angenommen (Theloke et al., 2013).

3.3.2.3.1.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung der Kategorie „Abfackelung und Entlüftung“ (1.B.2.c)

Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Die Qualitätskontrolle beim BVEG erfolgt über ein einheitlich abgestimmtes Verfahren zur Ermittlung der Emissionen Mitgliedsfirmen“, Eigenverlag, letzte Überarbeitung Dez. 2016)(BVEG, 2016).

Ein Vergleich der Kategorie mit den IPCC Guidelines zeigt einen erheblichen Unterschied der einzelnen Faktoren. Auf dem EU-Workshop in Dessau (siehe (Harthan et al., 2017)) waren sich die Experten einig, dass die Defaultwerte deutlich über den aktuell in Europa vorhandenen Emissionsfaktoren liegen.

Tabelle 161: Vergleich der nationalen IEF mit IPCC Default Werten

Gas und Einrichtung	Verwendeter CS-Emissionsfaktor[41]	IPCC GL 2006 (Tabelle 4.2.4)	
	in [g/m³]	in [Gg/1000m³]	in [g/m³]
CO_2 in Raffineriefackeln	3.503	$3{,}4*10^{-02}$	34.000
CH_4 in Raffineriefackeln	0,27	$2{,}1*10^{-05}$	21
NMVOC in Raffineriefackeln	4,86	$1{,}7*10^{-05}$	17

3.3.2.4 Geothermie (1.B.2.d)

3.3.2.4.1 Beschreibung der Kategorie (1.B.2.d)

Die Kategorie 1.B.2.d „Geothermie“ ist keine Hauptkategorie.

Geothermie ist eine regenerative Energieform. Geothermiesysteme, die die Erdwärme bis zu einer Tiefe von 400 Metern nutzen, zählen zur oberflächennahen Geothermie. Systeme der oberflächennahen Geothermie stellen Wärme (in der Regel über Wärmepumpen) und Kälte bereit und dienen zur Brauchwassererwärmung. Geothermiesysteme, die die Erdwärme in

[41] Für Raffinerien ermittelt aus Mittelwert zwischen Normal- und Störungsbetrieb

Tiefen von größer als 400 Metern nutzen, zählen zur tiefen Geothermie. Geothermische Heizwerke versorgen Energieverbraucher über Fernwärme-/Fernkältenetze mit Wärme und Kälte, indem der Wärmeinhalt des Thermalwasserstroms meist direkt genutzt wird. Geothermische Kraftwerke wandeln die Wärme des Thermalwasserstroms technisch in Strom und erzeugen i.d.R. in einem gekoppelten Prozess Strom und Wärme.

Beim Betrieb der Geothermiekraftwerke und Geothermieheizwerke in Deutschland treten keine Emissionen von klimawirksamen Gasen auf. Der Thermalwasserkreislauf ist geschlossen und wird untertägig und obertägig unter Luftabschluss betrieben, so dass während des Betriebs keine Emissionen auftreten. Selbst eine Freisetzung der im Wärmeträgerfluid gelösten Gase - vor allem H_2, CH_4, CO_2 und H_2S – würde keine berichtenswerte Konzentration erreichen (vgl. (Kaltschmitt, 2007): Kapitel A.2.3.5). Daher werden die Emissionen mit „NE“ berichtet. Der Eigenstrombedarf aller Geothermieanlagen, größtenteils Antriebsenergie für Pumpen, wurde im Berichtsjahr mit Strom aus dem Netz gedeckt und wird im Bericht unter den entsprechenden Quellgruppen inventarisiert.

3.3.2.4.2 Methodische Aspekte (1.B.2.d)

Das IPCC Reference Manual beschreibt keine Methodik für die Kategorie 1.B.2.d „Andere“ ((Houghton et al., 1997): Band 3, S. 1.132f)

Emissionsfaktoren für Treibhausgase und Luftschadstoffe, die bei Bohrungen zur Erschließung der oberflächennahen und der tiefen Geothermie entweichen könnten, wurden in Deutschland nicht ermittelt. Bei Bohrungen muss, auch wenn nicht gezielt Kohlenwasserstoffe exploriert werden, stets mit einer Freisetzung von im Untergrund gebundenen Gasen gerechnet werden – darunter klimawirksame Gase (vgl. (Kaltschmitt, 2007): Kapitel A.2.1.5). Bei Bohrungen für die oberflächennahe Geothermie sind, aufgrund üblicherweise niedriger Gaskonzentrationen, wie bei Trinkwasserbrunnen nur sehr geringe Emissionen zu erwarten. Bei geothermischen Tiefbohrungen gelten zur Vermeidung von Gasaustritten dieselben Sicherheitsbestimmungen wie bei der Kohlenwasserstoffexploration, einschließlich der Pflicht zum Einsatz sogenannter Eruptionskreuze und „Blow-out-Preventer“ zur Vermeidung von Störfällen. Eine Schätzung von (Theloke et al., 2013) geht davon aus, dass sich die diffusen Emissionen bei der tiefen Geothermiebohrung im Kilogrammbereich bewegen. Die Emissionen aus dieser Kategorie werden als NE berichtet, da ihr Beitrag zu den Gesamtemissionen unter 0.05 % des Gesamtinventars oder 500 kt CO_2-Äquivalente liegen (gemäß FCCC/SBSTA/2013/L.29/Add.1) und eine jährliche Bestandaufnahme nicht gewährleistet werden kann (gemäß FCCC/SBSTA/2013/L.29/Add.1, para 37). In Kapitel 5 wird einmalig der Emissionsbeitrag zum Gesamtinventar dargestellt. Die Zusammenstellung aller Quellen, für die der Eintrag „not estimated“ beibehalten wird, werden im Kapitel 1.7.2 dargestellt.

3.3.2.4.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (1.B.2.d)

Erläuterungen zu Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz entfallen.

3.3.2.4.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und –Verifizierung (1.B.2.d)

Erläuterungen zu kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung entfallen.

3.3.2.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (1.B.2 alle)

Aufgrund der Vorläufigkeit einiger Statistiken sind Rückrechnung der letzten zwei Jahre entstanden. Ferner traten Änderungen bei der Lagerung und Reinigung von Mineralölprodukten auf.

Tabelle 162: Rückrechnung in der Kategorie 1.B.2 – NMVOC-Emissionen in kt

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2023
Submission 2026	176,5	118,2	77,6	47,3	37,6	32,2	28,3	27,5
Submission 2025	168,0	112,5	74,2	46,4	38,4	33,0	28,9	28,0
Differenz	-8,5	-5,7	-3,3	-1,0	0,8	0,8	0,6	0,5

Tabelle 163: Rückrechnung in der Kategorie 1.B.2 - CO_2-Emissionen in kt

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2023
Submission 2026	2.008	2.127	2.214	2.213	1.898	1.672	1.190	1.006
Submission 2025	2.008	2.127	2.214	2.213	1.898	1.672	1.190	1.003
Differenz	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-3,4

Tabelle 164: Rückrechnung in der Kategorie 1.B.2 - CH_4-Emissionen in kt

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2023
Submission 2026	363,0	382,1	288,1	243,3	198,3	136,1	77,0	63,3
Submission 2025	363,2	382,3	288,3	243,4	198,4	136,2	77,2	64,1
Differenz	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,3	0,8

3.3.2.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (1.B.2 alle)

Die im Zuge der EU Methanverodnung (EU, 2024a) ermittelten Emissionsdaten sollen künftig für die UNFCCC Berichterstattung verwendet werden. In diesem Jahr konnten jedoch viele der Berichte bis zum Redaktionsschluß noch nicht ausgewertet werden.

Bei den Endanwenderemissionen (1.B.2.b.vi) gibt es einige Überlappungsbereiche mit Emissionen aus 1.A.1., 1.A.2 und 1.A.4. Es wird daher geprüft, ob es hier zu einer Doppelzählung kommt. Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4 Verbesserungen des Inventars, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

3.4 Abscheidung, Transportund Speicherung von CO_2 (CCS) (CRF 1.C)

3.4.1 Kategorie (1.C)

3.4.1.1 Beschreibung der Kategorie (1.C)

Nach Rückmeldung des Betreibers der einzigen hierzulande existierenden Pilotanlage wurden zu Versuchszwecken bisher ca. 67 kt CO_2 verpresst (GFZ, 2018). Die messtechnische Überwachung der Anlage hat seitdem keine Undichtigkeiten nachgewiesen. Um dennoch konservativ zu berichten, wurden die eingespeicherten Mengen im deutschen Inventar nicht abgezogen. Mögliche Entweichungen sind daher bereits berücksichtigt.

3.4.1.2 Methodische Aspekte (1.C)

Nach Empfehlungen im In-Country-Review 2016 wird aktuell der Notation Key *NO* verwendet.

3.4.1.3 Beschreibung der angewandten Flexibilitäten (1.C)

Erläuterungen zu Flexibilitäten entfallen.

3.4.1.4 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (1.C)

Erläuterungen zu Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz entfallen.

3.4.1.5 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (1.C)

Erläuterungen zu kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung entfallen.

3.4.1.6 Kategoriespezifische Rückrechnungen (1.C)

Erläuterungen zu Rückrechnungen entfallen.

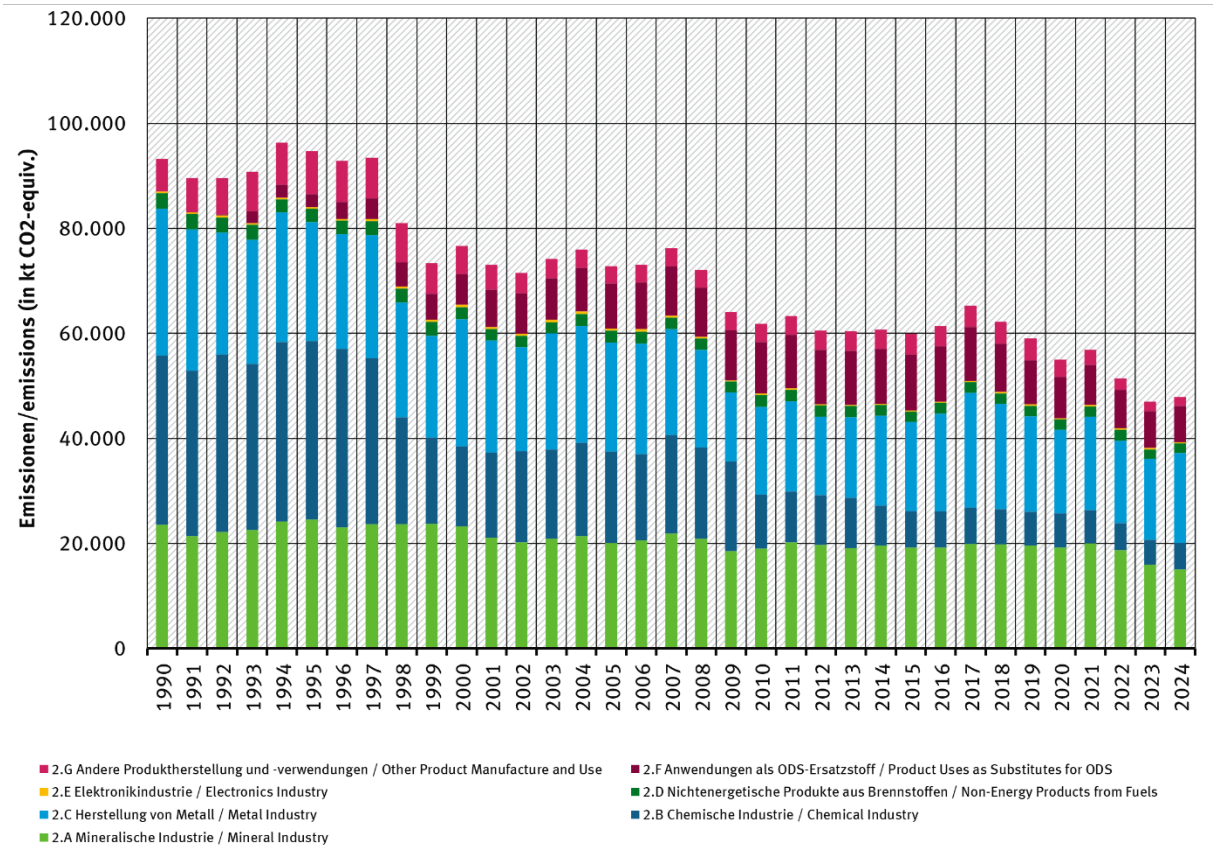
3.4.1.7 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (1.C)

Es sind keine Verbesserungen geplant.

4 Industrieprozesse (CRF-Sektor 2)

4.1 Übersicht (CRF Sektor 2)

Abbildung 43: Übersicht über die Treibhausgas-Emissionen des CRF-Sektors 2



Quelle: eigene Darstellung, UBA

4.2 Mineralische Industrie (2.A)

Die CRF-Kategorie 2.A Mineralische Industrie ist unterteilt in die Unterpunkte 2.A.1 bis 2.A.4. Dazu gehören:

- die Zementklinkerproduktion (2.A.1, Kapitel 4.2.1),
- das Kalkbrennen (2.A.2, Kapitel 4.2.2),
- die Glasherstellung (2.A.3, Kapitel 4.2.3)
- die Keramikproduktion (2.A.4.a, Kapitel 4.2.4.1)
- die sonstige Sodaverwendung (2.A.4.b, Kapitel 4.2.4.2),
- die Herstellung von nicht-metallurgischen Magnesiumprodukten (2.A.4.c, Kapitel 4.2.4.3)
- die weitere Verwendung von Kalkstein und Dolomit (2.A.4.d, Kapitel 4.2.4.4).

4.2.1 Mineralische Industrie: Zement (2.A.1)

4.2.1.1 Beschreibung der Kategorie (2.A.1)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
L/T	2 A 1, Cement Production	0	CO_2	15297,27	1,19	9830,97	1,39	-35,73

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2	Tier2	AS	CS
NO_X, SO_2	Tier 1	AS	CS

Die Kategorie „Zement“ ist für CO_2-Emissionen eine Hauptkategorie nach der Emissionshöhe und dem Trend. Die weiteren Ausführungen beziehen sich nur auf die Zementklinkerproduktion, weil die Klinkermahlung als Staubquelle hier nicht relevant ist. Die Zementproduktion ist in Tabelle 165 nur als Bezugsgröße ohne Emissionsrelevanz aufgeführt.

Beim Klinkerbrennprozess werden klimarelevante Gase emittiert. Zum weit überwiegenden Teil ist dies CO_2. Die CO_2-Emissionen aus den Rohmaterialien sind direkt an die Produktionsmengen des Zementklinkers gekoppelt. Laut Deutscher Emissionshandelsstelle (DEHSt, 2025b) betrug die Klinkerproduktion im Jahr 2024 in Deutschland 18.185 kt. Die rohstoffbedingten CO_2-Emissionen werden mit einem vom Verein Deutscher Zementwerke (VDZ) aus anlagenspezifischen Daten ermittelten, landesspezifischen Emissionsfaktor von 0,53 t CO_2/t Zementklinker unter Berücksichtigung des Anteils an ausgeschleustem Bypassstaub berechnet. Aus der Klinkerproduktion resultiert daher eine rohstoffbedingte CO_2-Emission von 9.831 kt CO_2 im Jahr 2024.

Tabelle 165: Produktion und rohstoffbedingte CO_2-Emissionen der deutschen Zementindustrie, in [kt/a]

	Klinkerproduktion + ausgeschleuster Bypassstaub[42]	Rohstoffbedingte CO_2-Emissionen	Zementproduktion
1990	28.863	15.297	37.772
1995	29.363	15.562	35.862
2000	28.779	15.253	35.414
2005	24.622	13.050	31.009
2010	23.456	12.431	29.915
2015	23.822	12.626	31.160
2020	25.203	13.357	35.485
2021	25.736	13.640	35.622
2022	23.657	12.538	32.901
2023	20.312	10.765	28.185
2024	18.549	9.831	26.830

Quelle: eigene Berechnungen, hergeleitet aus BDZ (2005) bis 1994, VDZ (2016) ab 1995 und ab 2015 aus DEhSt (2016), (DEhSt, 2021), (DEhSt, 2022), (DEhSt, 2023), (DEhSt, 2024), (DEhSt, 2025a)

[42] Die Berechnung der Bypassstaubmenge erfolgt als Expertenschätzung bezogen auf die tatsächliche Klinkerproduktion unter folgenden Annahmen: 1 % für die Jahre 1990-2008, 2 % ab 2009.

4.2.1.2 Methodische Aspekte (2.A.1)

Aktivitätsdaten

Die Erhebung der Aktivitätsdaten beruht auf der Summierung einzelbetrieblicher Angaben, bis zum Jahr 1994 auf Basis von Daten des BDZ. Nach einer Optimierung der Datenerhebung innerhalb des Verbandes wurden die Aktivitätsdaten ab 1995 vom VDZ bzw. dessen Forschungsinstitut der Zementindustrie in Düsseldorf durch Umfragen bei den deutschen Zementwerken und aus Angaben des BDZ zusammengestellt. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um die im Rahmen des CO_2-Monitorings veröffentlichten Daten, ergänzt um die Werke, die nicht Mitglieder im BDZ sind (teilweise Schätzung des VDZ). Dies entspricht dem Tier 2-Ansatz der IPCC Guidelines ((IPCC, 2006a): Band 3, Kap. 2.2.1.1).

Die Daten für die Jahre ab 2015 konnten aus verbandsinternen Gründen nicht vom VDZ zur Verfügung gestellt werden. Stattdessen beruht die Zementklinkerangabe auf aggregierten anlagenspezifischen Daten der DEHSt. Ein Vergleich für die Vorjahre 2005-2014 ergab eine konstante Abweichung zwischen Angaben der DEHSt zum Emissionshandel und der Zementklinkerproduktionsdaten des VDZ von ca. 1 %, so dass von einer hohen Übereinstimmung dieser Datensätze ausgegangen werden kann. Die Vollständigkeit ist somit bei der Verwendung einer der beiden Datensätze grundsätzlich gesichert.

Nach Angaben des VDZ lag der Anteil des Bypassstaubes bezogen auf die Klinkerproduktion in den Jahren 2009 bis 2016 zwischen 1 und 2 %. Die Angabe kann nicht jährlich in hinreichend qualitätsgesicherter Form vom VDZ zur Verfügung gestellt werden, auch zukünftig scheint das nicht erreichbar. Deshalb wird konservativ mit einem Anteil des Bypassstaubs von 2 % seit dem Jahr 2009 gerechnet, was in Übereinstimmung mit den Guidelines ist (IPCC, 2006a). Für die Jahre vor 2009 liegen keine detaillierten Informationen zum Anteil des Bypassstaubes vor. Hier wird konservativ davon ausgegangen, dass der Anteil in den Jahren 1990 bis 2008 bei konstant 1 % lag.

Emissionsfaktoren

Der für die Emissionsberechnung verwendete Emissionsfaktor von 0,53 t CO_2 / t Zementklinker beruht auf massengewichteten einzelbetrieblichen Angaben, d.h. der Emissionsfaktor wurde vom VDZ durch Aggregierung anlagenspezifischer Daten zu den Anteilen von CaO und anderen (in den Rohmaterialien enthaltenen karbonathaltigen) Metalloxiden (MgO) im Klinker bestimmt. Der Emissionsfaktor wurde im Rahmen zweier Forschungsprojekte (Ruppert et al., 2009), (Schäfer et al., 2022) und für die anderen Jahre vom VDZ bestätigt. Das Verfahren entspricht der Tier 2-Methode der IPCC Guidelines (IPCC (2006a): Band 3, Kap. 2.2.1.2).

Da in der deutschen Zementindustrie der aus dem Ofenabgas abgeschiedene Staub wieder in den Brennprozess zurückgeführt wird, kann die Karbonatfreisetzung aus den Klinkerrohstoffen direkt aus dem Metalloxidgehalt des Klinkers bestimmt werden, ohne relevante Verluste über den Abgaspfad berücksichtigen zu müssen. Zusätzlich wird für die Ermittlung der rohstoffbedingten CO_2-Emissionen der über den Bypasspfad ausgeschleuste Staub für die gesamte Zeitreihe berücksichtigt.

Der Emissionsfaktor von 0,53 t CO_2/t Zementklinker wurde für die gesamte Zeitreihe in Ansatz gebracht. Unter der konservativen Annahme, dass der Bypassstaub vollständig entsäuert vorliegt, wird für diesen Stoffstrom der gleiche Emissionsfaktor verwendet.

Die rohstoffbedingten CO_2-Emissionen in der Zementindustrie werden entsprechend der *IPCC Guidelines* ((IPCC, 2006a): Band 3, Gleichung 2.2 in Verbindung mit Gleichung 2.5) nach der folgenden Gleichung ermittelt:

Gleichung 4:

$$EM_{CO2} = EF_{Klinker} \times Klinkerproduktion + EF_{Klinker} \times \%_{Bypassstaub} \times Klinkerproduktion$$

4.2.1.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (2.A.1)

Die Zeitreihenkonsistenz wird für die Aktivitätsdaten durch die langjährige Verbandsdatenerhebung und für die Jahre ab 2015 über die nachgewiesene Ersetzbarkeit durch Informationen aus dem Emissionshandel durch die hohe Übereinstimmung in den Vorjahren sowie für den Emissionsfaktor durch den einheitlichen Ansatz für alle Jahre gewährleistet.

Die Ermittlung der angegebenen Unsicherheiten erfolgte durch eine Expertenschätzung.

Die Angaben zur Klinkerproduktion müssen von den meisten Unternehmen auch im Rahmen des CO_2-Emissionshandels berichtet werden. In den EU-Monitoring-Leitlinien für den Emissionshandel ist eine maximale Genauigkeit von 2,5 % angegeben. Die Unsicherheiten für die verwendeten Aktivitätsdaten wurden daher mit ±2,5 % abgeschätzt.

Die Unsicherheit des verwendeten Emissionsfaktors wurde auf ±1 % geschätzt. Dies wurde durch die Erhebungen im Rahmen eines Forschungsprojektes bestätigt .

4.2.1.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (2.A.1)

Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Zur Qualitätssicherung wurden alle verwendeten Daten des BDZ, des VDZ, des Emissionshandels sowie Vergleichsangaben aus der Literatur auf Plausibilität geprüft. Im Zuge der Inventarüberprüfung (ICR 2016) konnten anhand von Materialien des VDZ QSE-konforme Prozeduren veranschaulicht werden, die vom Review-Team als Beleg anerkannt wurden. Der ermittelte Emissionsfaktor für die rohstoffbedingten CO_2-Emissionen wurde mit denen anderer Länder verglichen. Die geringe Abweichung (ca. 1 %) vom IPCC-Tier-1-Default-Faktor in Höhe von 0,52 t CO_2/t Klinker ((IPCC, 2006a): Band 3, Gleichung 2.4) ergibt sich aus dem zum Teil höheren Kalkgehalt des deutschen Klinkers.

Der verwendete Emissionsfaktor weicht nur geringfügig von den durchschnittlich im Vollzug des ETS in Deutschland verwendeten Emissionsfaktoren ab, die dort einer behördlichen Kontrolle und betrieblichen Nachweispflichten unterliegen. Es liegen bisher keine Berechnungen für den Emissionsfaktor vor dem Jahre 2000 vor, der einheitliche Ansatz für alle Jahre stellt eine Expertenschätzung dar.

Der Vergleich mit den prozessbedingten Emissionen im Emissionshandel ergab eine sehr gute Übereinstimmung.

4.2.1.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.A.1)

Rückrechnungen sind nicht erforderlich.

4.2.1.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (2.A.1)

Derzeit sind keine Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4 Verbesserungen des Inventars, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

4.2.2 Mineralische Industrie: Kalk (2.A.2)

4.2.2.1 Beschreibung der Kategorie (2.A.2)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
L/T	2 A 2, Lime Production		CO_2	5986,62	0,47	3979,72	0,57	-33,52

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2	Tier 2	AS	D
NO_X, SO_2	Tier 1	AS	CS

Die Kategorie Kalk ist für CO_2-Emissionen eine Hauptkategorie nach der Emissionshöhe und dem Trend.

Die Aussagen zur Kategorie 2.A.2 beziehen sich ausschließlich auf die in deutschen Kalkwerken produzierten Branntkalk- und Dolomitkalkmengen. Über die in diesem Kapitel berücksichtigten Anlagen zum Brennen von Kalk hinaus, wurden zusätzlich Kalköfen im Bereich der Eisen- und Stahlindustrie und der Zuckerindustrie identifiziert. Diese sind nicht in diesem Kapitel, sondern in den jeweiligen Kategorien 2.C.1 (Kapitel 4.4.1) und 2.H.2 (Kapitel 4.9.2) berücksichtigt. Informationen zu anderen kalksteinverwendenden Branchen sind Gegenstand des Kapitels 4.2.4.4 (CRF 2.A.4d).

Tabelle 166: Produktion und CO_2-Emissionen der deutschen Kalkindustrie, in [Mio t]

	Kalk		Dolomitkalk	
	Produktion	CO_2-Emissionen	Produktion	CO_2-Emissionen
1990	7,324	5,463	0,603	0,523
1995	7,611	5,678	0,556	0,482
2000	6,994	5,217	0,536	0,465
2005	6,535	4,875	0,474	0,411
2010	6,124	4,569	0,342	0,296
2015	6,247	4,660	0,248	0,215
2020	5,367	4,004	0,204	0,177
2021	5,943	4,434	0,221	0,192
2022	5,682	4,239	0,229	0,198
2023	4,871	3,634	0,227	0,197
2024	5,057	3,772	0,239	0,207

Quelle: Produktion: Basisdaten aus (BV Kalk, 2025) ergänzt durch UBA

4.2.2.2 Methodische Aspekte (2.A.2)

Beim Brennen von Kalkstein oder Dolomit wird CO_2 freigesetzt, das mit dem Abgas an die Atmosphäre abgegeben wird. Die Höhe der Emissionen ergibt sich aus dem Produkt der Produktmenge (Kalk oder Dolomitkalk) und dem entsprechenden Emissionsfaktor. Die Verwendung von unten erläuterten Emissionsfaktoren und länderspezifisch bestimmten

Kalkprodukten entspricht einem Tier 2-Ansatz der *2006 IPCC Guidelines* (IPCC (2006a): Band 3, Kapitel 2.3.1.1).

Emissionsfaktoren

Für die Berechnung der CO_2-Emissionen werden folgende Faktoren verwendet:

EF_{Kalk} 0,746 t CO_2/t Kalk (stöchiometrisch 0,785 * Oxidanteil 0,95)

$EF_{Dolomitkalk}$ 0,867 t CO_2/t Dolomitkalk (stöchiometrisch 0,913 * Oxidanteil 0,95)

Die verwendeten Emissionsfaktoren basieren auf den stöchiometrischen Faktoren und gehen zusätzlich davon aus, dass der Branntkalk zu 95 % aus CaO bzw. der Dolomitkalk zu 95 % aus **CaO • MgO** besteht und somit 5 % der Gesamtmasse auf nicht CO_2-relevante Verunreinigungen entfallen. Diese Herangehensweise ist in Übereinstimmung mit den *2006 IPCC Guidelines* (IPCC (2006a): Band 3, Kapitel 2.3.1.2).

Aktivitätsdaten

Die Produktionszahlen werden über die gesamte Zeitreihe vom BV Kalk e.V., dem deutschen Industrieverband der Kalkindustrie, anlagenbezogen erhoben und für die Berichterstattung zur Verfügung gestellt. Die Produktionsmenge von Werken, die nicht über die Verbandsstatistik des BV Kalk erfasst werden, wird auf der Basis vorliegender Informationen (z.B. Betreiberangaben, veröffentlichte Daten aus dem Emissionshandel) abgeschätzt und zur Angabe des BV Kalk addiert. Somit wird sichergestellt, dass die deutsche Kalkproduktion vollständig erfasst wird. Seit dem Methodenwechsel entsprechend *2006 IPCC Guidelines* wird zusätzlich davon ausgegangen, dass in allen Jahren des Berichtszeitraums ab dem Jahr 1990 2 % des gebrannten Kalks als Staub über entsprechende Abgasreinigungseinrichtungen abgeschieden und dem Brennprozess nicht wieder zugeführt werden. Dies wird über eine fiktive Erhöhung der Aktivitätsraten um 2 % berücksichtigt. Seit dem Jahr 2015 sind die Filterstaubmengen in den vom BV Kalk übermittelten Aktivitätsraten enthalten und die Erhöhung um 2 % entfällt.

Die vom BV Kalk übermittelten Aktivitätsraten werden vom UBA aktuell jährlich um die Daten eines kleineren, nicht vom Verband erfassten Werkes ergänzt. Die Abschätzung dieses Werkes basierte i. d. R. auf den Angaben der im Anlagenkonto der DEHSt angegebenen Zuteilungsmenge. Seit 2013 sind für das Anlagenkonto dieses Werkes die tatsächlichen CO_2-Emissionen veröffentlicht und liegen unterhalb der zugeteilten Menge. Inzwischen kann bereits zum Zeitpunkt der Datenerhebung auf die tatsächlichen CO_2-Emissionen aus dem Anlagenkonto zugegriffen werden.

Die Bestimmung der Aktivitätsdaten entspricht dem Tier 2 - Ansatz der *2006 IPCC Guidelines* (IPCC (2006a): Band 3, Kapitel 2.3.1.3)

4.2.2.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (2.A.2)

In den EU-Monitoring-Leitlinien für den Emissionshandel wird eine Genauigkeit der Aktivitätsraten von 2,5 % gefordert. Da die Angaben des BV Kalk zur Kalkproduktion auf den Angaben der Betreiber im Rahmen des CO_2-Emissionshandels beruhen und durch die Abfrage auf zwei parallelen Wegen qualitätsgesichert werden und gleichzeitig der Anteil der nicht in den Verbandszahlen erfassten Werke (und nachträglich geschätzten Werke) gering ist, wurden die Unsicherheiten für die verwendeten Aktivitätsraten mit ±2,5 % abgeschätzt. Dies gilt für Branntkalk und Dolomitkalk gleichermaßen.

Die Unsicherheiten für die verwendeten Emissionsfaktoren für Branntkalk wurden mit -11 % bzw. +5 % abgeschätzt. Die Unsicherheiten für die verwendeten Emissionsfaktoren für Dolomitkalk wurden mit -30 % bzw. +2 % abgeschätzt.

4.2.2.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (2.A.2)

Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Die Erfassung der Produktionsmengen durch den BV Kalk erfolgt über zwei verbandsinterne Abfragen im technischen und kaufmännischen Bereich der einzelnen Werke, die miteinander abgeglichen werden. Werksbezogene Abweichungen zwischen den beiden Abfragen werden vor der Weitergabe der Aktivitätsraten an das UBA aufgeklärt. Die an das UBA übersandten Aktivitätsraten sind daher hinreichend qualitätsgesichert (Tier 2).

Der Vergleich mit verfügbaren Informationen aus dem ETS ergab Abweichungen, die sich aus methodischen Unterschieden erklären lassen: zum einen zwischen den Vorgaben im ETS und bei IPCC, zum anderen auf Grund der Änderungen zwischen den Handelsperioden des ETS. Im Zuge der Inventarüberprüfung (ICR 2016) konnte anhand von grafischen Gegenüberstellungen veranschaulicht werden, dass die methodisch bedingten Abweichungen keine Zweifel an der Datenqualität der Inventare begründen.

Die verwendeten IPCC-Default-Faktoren sind für die landesspezifische Methode geeignet.

Der Vergleich mit den prozessbedingten Emissionen im Emissionshandel ergab eine sehr gute Übereinstimmung.

4.2.2.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.A.2)

Rückrechnungen sind nicht erforderlich.

4.2.2.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (2.A.2)

Derzeit sind keine Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4 Verbesserungen des Inventars, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

4.2.3 Mineralische Industrie: Glas (2.A.3)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
-/-	2 A 3, Glass Production		CO_2	780,48	0,07	763,49	0,11	-2,18

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2	Tier 2	AS	CS
NO_X, NMVOC, SO_2	Tier 2	AS	CS

Die Kategorie „Mineralische Produkte: Glas“ ist keine Hauptkategorie.

4.2.3.1 Beschreibung der Kategorie (2.A.3 Glas)

Die Glasindustrie in Deutschland stellt eine große Vielfalt an Gläsern her, die durch voneinander abweichende chemische Zusammensetzungen charakterisiert sind. In Deutschland finden sich folgende Sektoren innerhalb der Glasbranche: Behälterglas, Flachglas, Kristall- und Wirtschaftsglas, Spezialglas sowie Mineralfasern (Glas- und Steinwolle). Die anteilig höchste Produktion wird in den Sektoren Behälterglas (ca. Hälfte der Gesamtglasproduktion) und

Flachglas (ca. ein Viertel der Gesamtglasproduktion) erreicht (Bundesverband Glasindustrie e.V., 2025). In der Inventarberechnung ist keine Wasserglasproduktion enthalten. Sämtliche relevanten Sodaeinsatzmengen der Wasserglasproduktion sind unter 2.A.4.b (Kapitel 4.3.7) berücksichtigt.

Das aus Primär- und Sekundärrohstoffen homogen gemischte Glasgemenge wird bei Temperaturen zwischen 1450 °C und 1650 °C geschmolzen. Die hier betrachteten prozessbedingten CO_2 Emissionen entweichen während des Schmelzvorganges im Ofen aus den Karbonaten der Rohstoffe. Bei der Neutralisation von HF, HCL und SO_2 in den Abgasen mit Hilfe von Kalkstein oder anderen Karbonaten fallen ebenfalls CO_2-Emissionen an, jedoch in geringem Umfang. Diese werden hier aus diesem Grund nicht betrachtet.

Die folgende Tabelle zeigt die Trendverläufe der Aktivitätsraten, prozessbedingten CO_2-Emissionen und die sich über alle Glasarten ergebenden impliziten Emissionsfaktoren in Fünf-Jahres-Schritten seit 1990.

Es ist zu erkennen, dass der Emissionsverlauf dem Trend der Aktivitätsraten weitgehend folgt. In den impliziten Emissionsfaktoren lässt sich ablesen, dass es aber keine starre Korrelation ist, sondern Abweichungen dazu auftreten. Ursache dafür sind die jährlichen Schwankungen bei der Produktionsmenge einzelner Glassorten und bei den Scherbeneinsätzen, was nachvollziehbar und rechnerisch einwandfrei ist. Der zwischenzeitlich steigende IEF über alle Glasarten kommt von der absoluten und relativen Zunahme emissionsstärkerer Produkte wie vor allem Mineralfasern.

Die für die Herstellung von Glas auch auftretenden Emissionen der sogenannten Vorläufersubstanzen werden hier nicht thematisiert, können aber wegen Einschränkungen der UNFCCC-Software auch nicht in dieser Kategorie berichtet werden, sondern in Kapitel 4.2.4.4.

4.2.3.2 Methodische Aspekte (2.A.3 Glas)

Für die Berechnung der CO_2-Emissionen (wesentlicher Schadstoff) kommt eine Tier-2-Methode zur Anwendung, weil die detaillierten Aktivitätsraten mit spezifischen Emissionsfaktoren gekoppelt werden (entsprechend Karbonatgehalten). Es werden die folgenden Karbonate als hauptsächliche Quelle für die CO_2-Bildung während des Schmelzvorgangs betrachtet: Kalciumkarbonat ($CaCO_3$), Soda/Natriumkarbonat (Na_2CO_3), Magnesiumkarbonat ($MgCO_3$) und Bariumkarbonat ($BaCO_3$). Hier werden die CO_2-Emissionen aus sämtlichen Karbonaten in Summe berichtet, Hinweise zu den Rohstoffeinsatzmengen von Soda sind unter 2.A.4.b (siehe 4.2.4.2) zu finden. Dabei ist zu beachten, dass die berechneten Sodaeinsatzmengen nicht veröffentlicht werden können, weil die Produktionsdaten von Soda einer statistischen Geheimhaltung unterliegen und auch nicht über Bilanzrechnungen ermittelbar sein dürfen.

Die Produktionszahlen (Aktivitätsraten) werden den regelmäßig erscheinenden Jahresberichten des Bundesverbandes Glasindustrie entnommen. Die Produktion bezieht sich auf die Masse an produziertem Glas, die der Masse an geschmolzenem Glas gleich gesetzt wird. Dabei ist zu beachten, dass ein Teil der Schmelze, der der Menge an internen Scherben entspricht, nicht in der Produktionsstatistik berücksichtigt ist (siehe auch unten Hinweise zum Scherbeneinsatz). Somit entspricht die statistische Angabe nicht der tatsächlichen Menge an geschmolzenem Glas, sondern der Schmelze aus Primärrohstoffen und Fremdscherben. Die Weiterverarbeitung und Veredlung des Glases bzw. der Glasgegenstände werden nicht betrachtet. .

Für das Jahr 2024 wurden folgende Aktivitätsraten ermittelt:

Tabelle 167: Glas: Aktivitätsraten der einzelnen Branchensektoren (Glassorten), in [t]

Branchensektor	Aktivitätsrate 2024
Behälterglas	3.788.200 t
Flachglas	1.794.100 t
Glasfasern und -wolle	287.800 t
Spezialglas	292.500 t
Steinwolle	498.200 t
Wirtschaftsglas	25.300 t

Quelle: (Bundesverband Glasindustrie e.V., 2025)

Es werden folgende branchenspezifische Scherbenanteile angenommen:

Tabelle 168: Scherbenanteil der einzelnen Glassorten, in [%]

Branchensektor	Anteil Scherben an Rohstoffeinsatz
Behälterglas	55 – 75 (jährlich variabel)
Flachglas	10 (gesamte Zeitreihe)
Wirtschaftsglas	5 (gesamte Zeitreihe)
Spezialglas	5 (gesamte Zeitreihe)
Glasfasern und -wolle	40 (gesamte Zeitreihe)
Steinwolle	40 (gesamte Zeitreihe)

Quelle: (Gitzhofer, 2021) sowie Erhebungen des BV Glas (Bundesverband Glasindustrie e.V., 2025)

Bei Behälterglas ist der Scherbenanteil nur für die alten Bundesländer ab 1990 und für Deutschland ab 1995 bekannt. Für die neuen Bundesländer liegen für die Zeit zwischen 1990 und 1994 keine Daten vor, daher wurde anhand der durchschnittlichen Anteile der verschiedenen Glassektoren an der Gesamtproduktion ein durchschnittlicher Scherbeneinsatz angenommen. Im Jahr 2007 wurde die Gesellschaft für Glasrecycling und Abfallvermeidung mbH (GGA) kartellrechtlich verboten, so dass ab dem Jahr 2007 keine gesicherten Daten zum Scherbeneinsatz mehr aus dieser Quelle vorliegen. Seit 2012 stellt der BV Glas Daten zu Scherbeneinsätzen in der Behälterglasindustrie ab 2007 zur Verfügung, die aus Verbandserhebungen stammen (BV Glas, 2025). Zudem verifiziert der BV Glas die anderen für die Berichterstattung genutzten Scherben-anteile mit den ihm vorliegenden Mitgliederangaben. In den Scherbenanteilen der Sektoren sind ausschließlich externe Scherben enthalten, da interne Scherben nicht in der Produktions-statistik erfasst werden, auf die sich wiederum die Aktivitätsraten stützen. Der Gesamtanteil an Scherben in den Wannen ist teilweise deutlich höher, je nachdem wieviel interne Scherben bei der Produktion anfallen (z.B. bei einem Farbwechsel). Für das Jahr 2024 wurde der Scherbenanteil für Behälterglas basierend auf dem Wert von 2023 fortgeschrieben, da die Datenerbebung verbandsintern noch nicht abgeschlossen war.

Da die während des Schmelzvorgangs entstehenden Abgase sowie die verbrennungsbedingten Abgase als gesammelter Abgasvolumenstrom abgeführt werden, können für die in der deutschen Glasindustrie emittierten Mengen an CO_2 keine Messergebnisse verwendet werden. Es wird daher ein Berechnungsverfahren angewandt, das auf Basis der Gewichtsanteile der oben erwähnten Karbonate sowie dem Einsatz von Scherben in der Behälter- und Flachglasindustrie

beruht. Die Angaben zur chemischen Zusammensetzung der verschiedenen in Deutschland produzierten Glassorten stammen aus der VDI-Richtlinie 2578 (VDI, 2017) sowie dem ATV-DVWK-Merkblatt 374 (ATV-DVWK, 2004).

Die Vorgehensweise bei der Ermittlung der Emissionsfaktoren für die einzelnen Glasoxide und der Emissionen ist detailliert im NIR (UBA, 2007) (Kapitel 4.1.7.2, S. 251ff) beschrieben.

Für die Branchensektoren wurden folgende Emissionsfaktoren errechnet, die bei wechselndem Scherbeneinsatz jährlich schwanken (Spannenangabe bei Behälterglas).

Tabelle 169: CO_2-Emissionsfaktoren für verschiedene Glassorten (berechnet im Vergleich mit Angaben der IPCC Guidelines 2006

Glassorte	berechneter EF [kg CO_2/ t geschmolzenes Glas] - stöchiometrisch/ inkl. Scherbeneinsatz-	Default-EF [kg CO_2/ t geschmolzenes Glas] - laut 2006 IPCC Guidelines (IPCC (2006a): Vol. 3, Tab. 2.6)-
Behälterglas	193 / 49 – 86*	210
Flachglas	208 / 187	210
Wirtschaftsglas	120 / 114	100
Spezialglas	113 / 107	30 - 200
Glasfasern	198 / 119	190 - 250
Steinwolle	299 / 179	-
unspezifiziert	174 / 139	-

* zuletzt bei 71 kg CO_2 pro t geschmolzenen Glases

Die stöchiometrischen berechneten Emissionsfaktoren liegen sehr nah an den Default-Faktoren. Die Emissionsfaktoren inklusive Scherbeneinsatz liegen deutlich unterhalb der Default-Werte, da in Deutschland der Scherbeneinsatz traditionell sehr hoch ist. Lediglich für Wirtschaftsglas gilt dies nicht, was an den hohen Qualitätsanforderungen und den damit verbundenen niedrigen Scherbeneinsätzen liegen kann.

4.2.3.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (2.A.3 Glas)

Die Produktionsdaten stammen aus der verbandsinternen Statistik des BV Glas. Dieser vertritt nahezu alle Behälter- und Flachglashersteller Deutschlands, damit sind die Daten dieser Branchensektoren sehr genau und es wurde eine Unsicherheit von 5 % angesetzt. Alle anderen Glassektoren vertritt der Verband nicht vollständig und kann daher keine Vollständigkeit garantieren. Daher wird von einer Unsicherheit von 10 % ausgegangen. Bis ca. 2002 hat der BV Glas ebenfalls die Daten mit den Daten des Statistischen Bundesamtes abgeglichen.

Die Unsicherheit bei den Scherbenangaben für Behälterglas liegt in der üblichen Spannbreite statistischer Erfassung. Für die neuen Bundesländer wurde eine Unsicherheit von 20 % angenommen, weil keine statistische Erhebung sondern nur eine Schätzung vorliegt. Die Nutzung von Daten aus verbandsinternen Erhebungen zum Scherbeneinsatz ab 2007 erhöht die Unsicherheiten. Dazu zählt der Fakt, dass nur betriebsinterne Scherben und externe Behälterglasscherben erfasst werden, aber nicht die Mengen an Flachglas, die eventuell in der Behälterglasproduktion eingesetzt werden.

Die Angaben zum Scherbeneinsatz bei allen anderen Glasarten hingegen sind deutlich ungenauer, da dort nur Schätzungen vorliegen. Es wurde daher eine Unsicherheit von 20 % angesetzt.

Für die CO_2-Emissionsfaktoren wurde eine Unsicherheit von 14 % für Behälterglas und 22 % für alle anderen Glasarten angegeben.

4.2.3.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (2.A.3 Glas)

Eine allgemeine Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Die errechneten Emissionsfaktoren wurden mit mehreren Quellen verglichen, u.a. mit den IPCC Guidelines (IPCC, 2006a) sowie dem Emissionsfaktoren-Handbuch „Emissionserklärung 2004 Baden-Württemberg“ (UMEG, 2004). Die errechneten Emissionsfaktoren können danach als zutreffend eingeschätzt werden. Darüber hinaus wurde der IEF mit dem folgender Länder verglichen, die ebenfalls die Sodanutzung nicht separat sondern in die Glasherstellung integriert berichten: Spanien (0,10), Italien (0,10) und Portugal (0,09). Diese Werte sind mit dem deutschen IEF für die Glasindustrie (um 0,1 schwankend) vergleichbar.

Die berechneten Emissionen wurden ebenfalls mit den ETS-Daten in Deutschland abgeglichen. Dabei lagen die berechneten Emissionen ungefähr 11 % über denen gemäß ETS, was mit einer unterschiedlichen Zuordnung der Materialien zu prozess- und energiebdingten Emissionen begründet werden kann.

Die Angaben zur chemischen Zusammensetzung der einzelnen Glassorten werden weiterhin als richtig angesehen. Erheblichen Einfluss hat aber die Rate des Scherbeneinsatzes, für die die Datenlage immer noch verbesserungswürdig ist (siehe Kapitel 4.2.3.3).

4.2.3.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.A.3 Glas)

Rückrechnungen haben sich im Jahr 2023 wegen Korrekturen einzelner Produktionszahlen ergeben.

4.2.3.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (2.A.3 Glas)

Derzeit sind keine Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4 Verbesserungen des Inventars, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

4.2.4 Mineralische Industrie: Weiterer Einsatz von Karbonaten (2.A.4)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
-/-	2 A 4, Other Process Uses of Carbonates		CO_2	1458,01	0,12	505,61	0,08	-65,32

Die übergeordnete Kategorie 2.A.4 – „Mineralische Produkte: Weiterer Einsatz von Karbonaten“ ist keine Hauptkategorie. Diese Kategorie wird wesentlich von der Keramikindustrie bestimmt, was sowohl die Höhe der Emissionen wie auch die Detailliertheit der Methode betrifft.

Emissionen der Vorläufersubstanzen SO_2, NO_X, CO sowie NMVOC werden in dieser Kategorie berichtet, wenn die 'CRF Software' von UNFCCC keinen Eintrag in Subkategorien gestattet, im Einzelnen ist das in 4.2.4.4.1 beschrieben.

4.2.4.1 Mineralische Industrie: Keramik (2.A.4.a)

4.2.4.1.1 Beschreibung der Kategorie (2.A.4.a Keramik)

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2	Tier 2	NS	CS
NO_X, NMVOC, SO_2	Tier 1	NS	CS

Wie die Glasindustrie ist auch die Keramikindustrie in Deutschland sehr heterogen geprägt. Sie umfasst eine Vielzahl an Produkten, die durch unterschiedliche Einsatzbereiche und entsprechende chemische Zusammensetzungen charakterisiert sind. Neben Ton (als Hauptrohstoff), Sand und anderen natürlichen Rohstoffgemengen werden auch synthetisch hergestellte Stoffe wie z.B. Aluminiumoxid und Siliziumdioxid eingesetzt. Nachfolgende Einsatzgebiete können in Deutschland innerhalb der Keramikbranche unterschieden werden: Baukeramik (Ziegel, Fliesen, Drainrohre), Sanitärkeramik (WC-Becken, Waschtische), Geschirrkeramik (Tafelservice, Haushaltsporzellan), Technische Keramik (Isolatoren, Konstruktionsbauteile), Feuerfestkeramik (Ofenmauerwerk, Feuerbeton), Keramisch gebundene Schleifkörper und Blähton (VDI-Richtlinie 2585), (VDI, 2006)). Die anteilig höchste Produktionsmenge wird in den Sektoren Ziegel (ca. 80 % der Gesamt-keramikproduktion) erreicht, gefolgt von Feuerfesterzeugnissen (ca. 10 %) und Fliesen (ca. 6 %).

Das aus Primärrohstoffen – und nur in geringen Mengen Sekundärrohstoffen - homogen gemischte Gemenge wird vorwiegend in Tunnelöfen und Herdöfen bei Ofentemperaturen zwischen 800 - 1.300 °C gebrannt. Die Verweilzeiten sind sehr stark von den Produkten abhängig und betragen in der Regel mehrere Stunden (European Commission (EC), 2007a). Bei Feuerfesterzeugnissen und technischen Keramiken werden auch weitaus höhere Brenntemperaturen genutzt. Die hier betrachteten prozessbedingten CO_2-Emissionen entweichen während des Brennvorganges im Ofen. Diese kommen sowohl aus den karbonatischen als auch aus den fossilen Bestandteilen des Rohstoffes. Teilweise stammen die prozessbedingten CO_2-Emissionen auch aus sogenannten Porosierungsmitteln (u.a. Sägemehl, Papierfangstoffe, Polystyrol), die insbesondere bei der Ziegelherstellung (Hintermauerziegel) eingesetzt werden. Bei der Bestimmung der CO_2-Emissionsfaktoren werden nur die nicht-biogenen Anteile berücksichtigt.

Die Zeitreihen „keramische Erzeugnisse“ (siehe Tabelle 170) umfassen die Aktivitätsraten sowie die prozessbedingten CO_2-Emissionen der gesamten Keramikindustrie in Deutschland seit 1990[43]. Über diese Aktivitätsraten werden auch die Nicht-CO_2-Emissionen (NO_X, NMVOC, SO_2, etc.) der gesamten keramischen Industrie berechnet.

Tabelle 170: Aktivitätsraten und prozessbedingte CO_2-Emissionen der keramischen Industrie (CRF 2.A.4.a), seit 1990, in [kt]

	Aktivitätsrate		prozessbedingtes CO_2[44]
	Gesamte Produktion	CO_2-relevante Produktion[45]	
1990	17.691	15.628	1.122
1995	25.167	23.254	1.742

[43] Blähton ist hier nicht berücksichtigt da keine Daten (Produktionsmengen/ Aktivitätsraten) verfügbar

[44] Hintermauerziegel, Vormauerziegel, Ziegel für Boden- und Straßenbeläge, Dachziegel und Zubehör, Fliesen, Steinzeug, keramische Rohre und andere Bau-Formen, Haushalts- und Hygienekeramik: Porzellan, Haushalts- und Hygienekeramik: Steinzeug, Steingut

	Aktivitätsrate		prozessbedingtes CO_2[44]
2000	20.649	18.914	1.314
2005	14.199	12.547	772
2010	11.921	10.254	607
2015	11.645	10.084	552
2020	11.611	10.371	552
2021	12.245	10.828	581
2022	12.130	10.724	572
2023	7.960	6.740	334
2024	6.788	5.642	275

Quelle: eigene Berechnungen UBA

4.2.4.1.2 Methodische Aspekte (2.A.4.a Keramik)

Die *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* enthalten Hinweise zur Berechnung der prozessbedingten CO_2–Emissionen für die Keramikindustrie (IPCC (2006a): Band 3, Kapitel 2.5.1 ‚Ceramics'). Dabei wird diesem Industriesektor grundsätzlich die Herstellung folgender Produktgruppen zugeordnet: Dach- und Mauerziegel, Steinzeugrohre, feuerfeste Erzeugnisse, Blähton, Wand- und Bodenfliesen, Haushaltskeramik, Sanitärkeramik, technische Keramik, anorganisch gebundene Schleifmittel. Bezogen auf die produzierte Menge, sind die Produktgruppen Dach- und Mauerziegel, feuerfeste Erzeugnisse sowie Wand- und Bodenfliesen als relevant anzusehen. Entsprechend der Datenlage werden fast alle Produkte für die Emissions-berechnungen berücksichtigt.

Für die Einschätzung der Methode liefern die IPCC-Guidelines 2006 nur Hinweise bezüglich des Karbonateinsatzes. Weil mit der vorliegenden Methode weitere CO_2-Quellen berücksichtigt werden, wird diese als eine länderspezifische Tier-2-Methode eingeschätzt.

Aktivitätsdaten

Für die Produktionszahlen (Aktivitätsraten) werden die Daten vom Statistischen Bundesamt herangezogen (Statistisches Bundesamt, 2025c). Zur Vervollständigung der Datenlage zu allen Produktkategorien der keramischen Industrie, auch im Hinblick auf die Ermittlung der prozessbedingten CO_2-Emissionen, wurde im Rahmen eines Sachverständigengutachtens, in Zusammenarbeit mit dem Statistischen Bundesamt, für jede Produktkategorie die jeweilige Jahresproduktion ermittelt (Gottwald et al., 2017). Der betrachtete Projektzeitraum lag zwischen 1990 – 2015 und wurde seitdem weiter entwickelt. Die Anzahl der damit zu berücksichtigenden Produktkategorien aus der amtlichen Statistik schwanken zwischen 52 und 67, mit der letzten Anpassung zum Jahr 2019 sind es 57 Produktmeldenummern. Die Datenlieferung des Statistischen Bundesamts liegt je nach Produkt in unterschiedlichen Einheiten vor (Tonne, Quadratmeter, Stück, Wert). Um eine konsistente Bearbeitung der Daten zu ermöglichen, ist eine Vereinheitlichung der Maßangaben in Tonne [t] notwendig. Eine Ermittlung der produzierten Massen, die nicht in der Einheit Tonne [t] vorliegen, ist nur über Umrechnungsfaktoren möglich. Die Umrechnungsfaktoren sind im Projektbericht einsehbar.

Ab Datenjahr 2019 erfolgt die Umrechnung der Fliesen, die in Quadratmetern gemeldet werden, nach einer angepassten Methode. Die vormals zehn statistischen Meldenummern für verschiedene Fliesenprodukte werden ab Datenjahr 2019 in drei neue Meldegruppen mit neuer Systematik veröffentlicht. Dabei wurden die davor verwendeten Umrechnungsfaktoren ungeeignet. Die für die Umrechnung in die Einheit Tonne notwendigen durchschnittlichen

Flächengewichte wurden mit dem Bundesverband Keramische Fliesen e.V. im August 2020 diskutiert und zugewiesen (BKF, 2020).

Die Umrechnungsfaktoren für Vormauer-, Hintermauer- und Dachziegel wurden abweichend zum Sachverständigengutachten nach Hinweisen des Bundesverbands der Deutschen Ziegelindustrie e. V. in Fachgesprächen mit Vertretern von Umwelt- und Industrieverbänden erarbeitet. Hierfür werden Durschnittswerte für die Rohdichten der Hintermauerziegel verwendet. Diese wurden für das Jahr 1994 und für das Jahr 2016 ermittelt. Die Rohdichten sinken im Zeitverlauf stetig, da der Anteil an porosierten Produkten und der Grad der Porosierung zunehmen. Die Werte für die Jahre zwischen 1994 und 2016 sind linear interpoliert.

Emissionsfaktoren

Die prozessbedingten CO_2-Emissionen stammen aus dem Rohstoff für die Herstellung keramischer Erzeugnisse. I.d.R. sind dies lokal vorhandene Lehme und Tone, die unterschiedliche Anteile an nicht biogenen Kohlenstoffen (wie Karbonate) und organischen Kohlenstoffen enthalten. Darüber hinaus werden in geringem Maße prozessbedingte CO_2-Emissionen auch über sogenannte Porosierungsmittel verursacht, die bei der Herstellung von Hintermauerziegeln dem Rohmaterial zugemischt werden. Als Porosierungsmittel kommen vorwiegend erneuerbare Ressourcen (z.B. Schlämme aus der Papierindustrie, auch mit fossilen Anteilen, sowie Papierfasern), in geringen Mengen aber auch nicht erneuerbare Stoffe (vor allem Polystyrol) zum Einsatz. Auch sogenannte (organische) Bindemittel, die ebenfalls in geringen Mengen für die Herstellung von Feuerfest- und Schleifmittelerzeugnisse eingesetzt werden, tragen zu prozessbedingten CO_2-Emissionen bei, allerdings in nicht relevanten Mengen.

Die für Deutschland geeigneten Emissionsfaktoren wurden in zwei Stufen erarbeitet: Zuerst durch eine Kennzeichnung der statistischen Angaben für CO_2-relevante Produktgruppen (Gottwald et al., 2017); zusätzlich wurden von der deutschen Emissionshandelsstelle (DEHSt) konkrete Emissionsfaktoren berechnet (Rothe, 2017). Hierbei wurden u.a. verifizierte Daten von Anlagen (Emissionsberichte, Produktzuordnung, Produktionsmengen, Glührückstand von Rohmaterialproben) der Jahre 2012 bis 2015 herangezogen, die der DEHSt vorlagen[46]. Produktgruppen, bei denen die Emissionsfaktoren durch die DEHSt nicht direkt ermittelt werden konnten, aber als CO_2-relevant gelten, sind durch Annahmen und Analogien mit anderen Produktgruppen (Rohstoffzusammensetzung) ergänzt worden (Expertenschätzung)[47]. Als Ergebnis dieses schrittweisen Bewertens wurden Feuerfestprodukte, Ziergegenstände, technische Keramiken und Schleifmittel von den CO_2-Berechnungen ausgeschlossen. Tabelle 171 enthält die für die unterschiedlichen Produktgruppen ermittelten CO_2- Emissionsfaktoren.

Tabelle 171: CO_2-Emissionsfaktoren für verschiedene keramische Produktgruppen

Produktgruppe	CO_2- Emissionsfaktor [t_{CO2} /$t_{Produkt}$]	Bemerkungen
Fliesen, Steinzeug	0,018	DEHSt
Hintermauerziegel	0,1047	DEHSt
Vormauerziegel	0,0189	DEHSt
Ziegel für Boden- und Straßenbeläge	0,016	DEHSt/ UBA*
Dachziegel, Zubehör	0,0112	DEHSt
keramische Rohre und andere Bau-Formen	0,0112	DEHSt/ UBA*
Haushalts- und Hygienekeramik: Porzellan	0,009	DEHSt/ UBA*
Haushalts- und Hygienekeramik: Steinzeug, Steingut	0,018	DEHSt/ UBA*

* als Expertenschätzung ermittelte Emissionsfaktoren (siehe obige Beschreibung)

Der implizite Emissionsfaktor (IEF) für die deutsche Keramikindustrie ergibt sich aus den prozessbedingten CO_2-Emissionen und der Aktivitätsrate der CO_2-relevanten Keramik-produktion für das jeweilige Jahr (siehe Tabelle 170). Für 2024 kann damit ein IEF von 0,049 $t_{CO2}/t_{Produkt}$ errechnet werden[48].

4.2.4.1.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (2.A.4.a Keramik)

Die Unsicherheiten der Aktivitätsraten werden u.a. wegen der erforderlichen Umrechnungen von Stückzahlen, Volumen- und Flächenangaben auf produzierte Massen (Tonnen [t]) sowie der Unsicherheiten bei der Erfassung der Produktionsstatistik auf + 6 % / - 7 % geschätzt.

Die Unsicherheiten der verwendeten CO_2-Emissionsfaktoren für die in Tabelle 171 genannten Produktgruppen sind teilweise sehr verschieden. Beispielsweise liegen die Unsicherheiten bei den Produktgruppen Hintermauerziegeln bei -18 % / +18 % und Fliesen bei -53 % / +53 %. Die ermittelten Unsicherheiten sind überwiegend auf die empirisch erfassten Daten der DEHSt zurückzuführen. Für die nicht direkt ermittelten Emissionsfaktoren (wie keramische Rohre, etc.) kamen anteilig noch Unsicherheiten für angewendete Analogien hinzu (z.B. Haushalts- und Hygienekeramik: -57 % / +57 %).

Zeitreihenkonsistenz bezüglich der Aktivitätsraten ist für den Großteil der in Tabelle 171

genannten Produktgruppen und für die damit verknüpften CO_2-Emissionsfaktoren gegeben. Zeitreihenbrüche vereinzelter Produktgruppen (Änderungen hinsichtlich der Verfügbarkeit statistischer Daten, Produktgruppenänderungen in der Vergangenheit) sind in Gottwald et al. (2017) erfasst und beschrieben worden. Diese Brüche sind für die CO_2-Emissionen irrelevant oder zu vernachlässigen.

Ab dem Berichtsjahr 2023 ergibt sich ein deutlicher Rückgang der Aktivitätsraten vor allem in den Produktkategorien, die durch den Bausektor nachgefragt werden (Hintermauerziegel, Dachziegel, Fliesen etc.). Dieser Rückgang folgt der anhaltenden baukonjunkturellen Entwicklung in den Berichtsjahren und ist damit plausibel.

[48] Dieser Wert entspricht nicht dem CO_2-IEF, der in den CRF-Tabellen erscheint, weil dort die gesamte Aktivitätsrate aller keramischen Produkte angegeben wird. Dabei sind Produkte subsummiert, die auf Grund ihrer Rohstoffzusammensetzung und Qualitätsansprüche keine Karbonate oder CO_2-relevante Zuschläge enthalten.

4.2.4.1.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (2.A.4.a Keramik)

Eine allgemeine Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Die berechneten CO_2-Emissionen sind nachvollziehbar und liegen in der Größenordnung der im ETS erfassten Emissionen.

Ein Vergleich mit IPCC-Default-Emissionsfaktoren ist nicht möglich, weil in den Guidelines Emissionsfaktoren nur auf die Rohstoffe bezogen sind. Die landesspezifischen Emissionsfaktoren beziehen sich jedoch auf die Produkte.

Der CO_2-IEF der deutschen Keramikindustrie liegt, wie der der meisten anderen Länder, im unteren bis mittleren Bereich. In einigen Ländern liegen die IEF-Werte jedoch um den Faktor 5 bis 10 höher, was nicht vergleichbar erscheint.

4.2.4.1.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.A.4.a Keramik)

Für den vorliegenden Bericht waren keine Rückrechnungen erforderlich.

4.2.4.1.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (2.A.4.a Keramik)

Derzeit sind über die unter Kapitel 4.2.4.1.4 benannte Prüfung hinaus keine Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4 Verbesserungen des Inventars, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

4.2.4.2 Mineralische Industrie: weitere Sodanutzung (2.A.4.b)

4.2.4.2.1 Beschreibung der Kategorie (2.A.4.b)

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2	Tier 1	NS	D

Die übergeordnete Kategorie 2.A.4 – „Mineralische Produkte: Weiterer Einsatz von Karbonaten“ ist keine Hauptkategorie.

Das Produkt Soda wird in der Industrie für die verschiedensten Anwendungen eingesetzt. Die wichtigsten Einsatzfelder sind die Glasindustrie, die Herstellung von Wasch- und Reinigungsmitteln und die chemische Industrie. Es wird davon ausgegangen, dass der im Soda enthaltene Kohlenstoff unabhängig von der Nutzungsart früher oder später als CO_2 in die Luft freigesetzt wird.

Emissionen, die sich aus der Nutzung von Soda ergeben, stehen in einem festen Verhältnis zu den berechneten Verwendungsmengen, hier außerhalb der Glasindustrie (siehe methodische Aspekte im folgenden Kapitel):

Tabelle 172: Aktivitätsraten und nutzungsbedingte CO_2-Emissonen außerhalb der Glasindustrie

	Aktivitätsrate in [t]	CO_2-Emissionen in [kt]
1990	809.885	336,1
1995	340.793	141,4
2000	411.281	170,7

	Aktivitätsrate in [t]	CO_2-Emissionen in [kt]
2005	517.159	214,6
2010	475.836	197,5
2015	717.723	297,9
2020	613.470	254,6
2024	556.400	230,9

Quelle: Berechnungen des UBA, Herleitung siehe folgendes Kapitel

4.2.4.2.2 Methodische Aspekte (2.A.4.b)

Aktivitätsdaten

Seit der Inventarüberprüfung 2010 werden die verwendeten Sodamengen ermittelt, die nicht in anderen Kategorien für Emissionsberechnungen berücksichtigt werden. Dabei handelt es sich um eine Berechnung, die auf die höchst mögliche Emission aus der Nutzung von Soda abzielt. Die Gesamtsumme des in Deutschland genutzten Sodas wird über eine Bilanzierung (Produktionsmenge plus Import abzüglich Export) ermittelt (a). Die Im- und Exportmengen werden der Außenhandelsstatistik vom Statistischen Bundesamt entnommen (Statistisches Bundesamt, o.J.). Die Emissionen aus der Verwendung von Soda in der Glasindustrie werden bereits unter der Kategorie 2.A.3 kategoriespezifisch berücksichtigt (b). Die dort eingesetzten Mengen an Soda werden bei der hier relevanten Sodanutzung abgezogen. Die Aktivitätsdaten aus obiger Tabelle (c) ergeben sich nach folgender Formel

Gleichung 5:

$$c = a - b$$

Bei der Ermittlung der Bilanz in den Jahren 2017 bis 2021 wird auf einen Mittelwert des Außenhandelssaldo der vohergehenden fünf Jahre zurück gegriffen, weil das Statistische Bundesamt eine sehr hohe Exportangabe geliefert hat. Ab dem Jahr 2022 ist der Bilanzrahmen des Statistischen Bundesamtes wieder plausibel und wird im Original verwendet.

Emissionsfaktor

Für die Anwendung von Soda beträgt der Emissionsfaktor stöchiometrisch 415 kg CO_2 pro Tonne Soda unter der Annahme, dass eine vollständige Freisetzung erfolgt (konservativer Ansatz).

4.2.4.2.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (2.A.4.b)

Aktivitätsdaten

Die Berechnungen der relevanten Mengen an genutztem Soda weisen hohe Unsicherheiten auf (maximal ±18%), weil zu den statistischen Schwankungsbreiten der Sodaproduktion und des Außenhandels mit Soda Berechnungsannahmen o.g. Herleitung hinzukommen.

Emissionsfaktor

Der Emissionsfaktor für die Verwendung von Soda weist kleine, begründete Unsicherheiten im Bereich von Produktreinheit und Vollständigkeit des chemischen Umsatzes auf (-5%/+0%).

4.2.4.2.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (2.A.4.b)

Eine allgemeine Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung, die den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen entsprechen, wurden durch die Nationale Koordinierungsstelle durchgeführt.

Momentan lassen sich die verwendeten Sodamengen, die nicht der Glasindustrie zuzuordnen sind, nicht quantitativ verifizieren. Sie stellen aber als konservative Schätzung keine Unterschätzung des Inventars dar. Qualitativ stehen die Berechnungsergebnisse den stichprobenartig bekannten Absatzzahlen der Sodahersteller nicht entgegen.

Der stöchiometrische Emissionsfaktor entspricht den Default-Angaben der IPCC-Guidelines (IPCC (2006a): Band 3, Ch. 2, table 2.1)

4.2.4.2.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.A.4.b)

Es waren geringe Rekalkulationen notwendig, weil sich Angaben aus der Verwendung in der Glasindustrie geändert haben:

Tabelle 173: Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.A.4.b), in [kt CO_2]

	Submission 2026	Submission 2025	Änderung
2022	264,2	264,1	+0,1
2023	250,3	261,5	-11,2

Quelle: Berechnungen UBA

4.2.4.2.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (2.A.4.b)

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4 Verbesserungen des Inventars, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet. Darüber hinaus sind keine Verbesserungen geplant.

4.2.4.3 Herstellung nichtmetallurgischer Magnesiumprodukte (2.A.4.c)

4.2.4.3.1 Beschreibung der Kategorie (2.A.4.c)

Die Treibhausgas-Emissionen aus dieser Kategorie betragen weniger als 0,05 % des Gesamtinventars (ohne LULUCF) und unterschreiten 500 kt CO_2-Äquivalente, zudem kann eine jährliche Erfassung nicht gewährleistet werden (UNFCCC, 2013). Somit wird auf eine entsprechende Berichterstattung verzichtet. In diesem Kapitel findet einmalig eine quantitative Abschätzung der somit nicht im Inventar berücksichtigten Emission statt. Eine Zusammenstellung aller als ‚not estimated' erfasster Quellen erfolgt darüber hinaus in Kapitel 1.7.2 dieses Berichtes.

4.2.4.3.2 Methodische Aspekte (2.A.4.c)

Geeignete Aktivitätsdaten für diesen Quellkategoriezuschnitt konnten nicht in den amtlichen Statistiken identifiziert werden. Einige Produktarten wie Feuerfeststeine sind bereits in den Aktivitätsdaten der keramischen Industrie enthalten (CRF 2.A.4.a, Kapitel 4.2.4). Die darüber hinaus identifizierte „Herstellung von anderen Karbonaten" ist eine Sammelposition, bei der Magnesiumkarbonate eine nicht ausweisbare Teilmenge ausmachen. Die sich ergebende Zeitreihe belegt nur Produktionsmengen unterhalb 300.000 t. Erst ab ca. einer Million Tonnen eines Produkts mit hohem Anteil an CaO und MgO würde die Schwelle zur Berücksichtigung erreicht werden. Keine in Frage kommende Produktart, auch nicht die bereits in anderen Kategorien erfassten, erreicht dieses Maß.

Eine genaue Berechnung der potentiellen CO_2-Emissionen ist auf Grund der statistischen Sammel-positionen kaum möglich, sie wird auf deutlich weniger als 100.000 t Kohlendioxid geschätzt.

4.2.4.3.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (2.A.4.c)

Aussagen über Unsicherheiten und Angaben zur Zeitreihenkonsistenz sind nicht möglich.

4.2.4.3.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (2.A.4.c)

Aufgrund begrenzter Ressourcen und minimaler Relevanz wurde für diese Berichterstattung keine QK/QS durchgeführt.

Eine erste Schätzung erfolgte im Rahmen eines Forschungsprojektes und wurde vom fachlichen Ansprechpartner im UBA geprüft und in der oben beschriebenen Weise bestätigt.

4.2.4.3.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.A.4.c)

Die Betrachtung von Rekalkulationen entfällt aufgrund der nicht ausgewiesenen Emissionen.

4.2.4.3.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (2.A.4.c)

Derzeit sind keine Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4 Verbesserungen des Inventars, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

4.2.4.4 Mineralische Industrie: weitere Verwendung von Kalkstein und Dolomit (2.A.4.d)

4.2.4.4.1 Beschreibung der Kategorie (2.A.4.d)

Emissionen von Kohlendioxid dieser Kategorie werden nicht gesondert berichtet, sondern werden in den Kategorien berichtet, in denen Kalkstein und Dolomit verwendet wird (Included Elsewhere - IE). In den jeweiligen Kategorien erfolgt auch die Berücksichtigung in der Hauptkategorienanalyse.

In dieser Kategorie wurden bis zur Submission 2014 in Ergänzung zu den IPCC-Guidelines 1996 die gesamte Produktion und Verwendung von Kalkstein und Dolomit bilanziell betrachtet und Abgleiche mit den Kategorien des Inventars vorgenommen. Die „Kalksteinbilanz“ (Röhling & Kludt, 2010) kann im NIR 2014 letztmalig nachvollzogen werden.

Für den Einsatz von Kalkstein in anderen emissionsrelevanten Bereichen als den unten benannten Kategorien liegen keine Erkenntnisse vor.

Emissionen der Vorläufersubstanzen SO_2, NOx, CO sowie NMVOC werden in dieser Kategorie in der 'CRF Software' von UNFCCC eingegeben, weil bis auf SO_2 aus 2.A.1 kein Eintrag in Subkategorien von 2.A möglich ist, im Einzelnen sind das:

- NOx und NMVOC aus 2.A.1, 2.A.2, 2.A.3 und 2.A.4.a,
- SO_2 aus 2.A.2, 2.A.3 und 2.A.4.a inklusive einer statistischen Angabe für SO_2 in 1990 (für das Gebiet der 'Neuen Bundesländer')
- CO aus 2.A.2 und 2.A.3,
- diese Allokation bedingt auch, dass keine Angabe von Aktivitäten in dieser Kategorie möglich ist, sondern nur in den emissionsverursachenden Kategorien.

4.2.4.4.2 Methodische Aspekte (2.A.4.d)

Im Folgenden soll eine Übersicht des nationalen Kalksteineinsatzes gegeben werden (Kategorieverweise). Die Emissionsberechnungen erfolgen in den Kategorien, in denen CO_2-Emissionen aus der Kalksteinverwendung resultieren:

- 1.A.1.a Rauchgasentschwefelung von Kraftwerken (Kalksteineinsatz)
- 2.A.1 Zementklinkerherstellung (Kalksteinanteil in den Rohstoffen)
- 2.A.2 Kalkherstellung (Kalksteineinsatz)
- 2.A.3 Glasherstellung (Kalksteinanteil in den Rohstoffen)
- 2.A.4.a Keramische Produktion (Karbonatanteil in den Rohstoffen)
- 2.B.7 Sodaherstellung (Kalksteineinsatz)
- 2.C.1 Eisen- und Stahlherstellung (Kalksteineinsatz und Kalköfen)
- 2.H.2 Zuckerherstellung (Kalköfen)
- 3.G-I Land- und forstwirtschaftliche Bodenkalkung (Kalkstein und Dolomit)

Die Daten werden in den jeweils relevanten Kategorien aktualisiert (Aufstellung siehe oben), wobei auch die methodischen Aspekte in den jeweiligen Kategoriekapiteln erläutert werden

4.2.4.4.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (2.A.4.d)

Angaben zu den Unsicherheiten der Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren der relevanten Kalksteinverwendungen werden in den jeweiligen Quellgruppenkapiteln gemacht.

4.2.4.4.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (2.A.4.d)

Die Aktivitätsdaten und die Emissionsfaktoren der relevanten Kalksteinverwendungen werden in den jeweiligen Kategorien verifiziert und aktualisiert.

4.2.4.4.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.A.4.d)

Rekalkulationen erfolgen in den jeweiligen Kategorien.

4.2.4.4.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (2.A.4.d)

Derzeit sind keine Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4 Verbesserungen des Inventars, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

4.3 Chemische Industrie (2.B)

Die Kategorie 2.B ist unterteilt in die Unterpunkte 2.B.1 bis 2.B.10. Hierzu gehören die Ammoniakproduktion (2.B.1), die Salpetersäureproduktion (2.B.2), die Adipinsäureproduktion (2.B.3), die Caprolactam-, Glyoxal- und Glyoxylsäureproduktion, (2.B.4), die Carbidproduktion (2.B.5), die Titandioxidproduktion (2.B.6), die Sodaherstellung (2.B.7), die Petrochemikalien- und Industrierußproduktion (2.B.8) und die Produktion von fluorierten Chemikalien (2.B.9).

In der Kategorie *Andere* (2.B.10) werden nur Vorläufersubstanzen aus der Produktion von Düngemitteln und Schwefelsäure berichtet. Die Produktion von 1,12-Dodecandisäure wird in

2.B.10 beschrieben, die prozessbedingten N_2O-Emissionen werden aber aus Vertraulichkeitsgründen mit unter 2.B.3 berichtet.

4.3.1 Chemische Industrie: Ammoniakproduktion (2.B.1)

4.3.1.1 Beschreibung der Kategorie (2.B.1)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
L/-	2 B 1, Ammonia Production		CO_2	6025,00	0,47	3267,00	0,47	-45,78

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2	Tier 3	PS	PS
NO_X			D

Die Kategorie „Chemische Industrie: Ammoniakproduktion“ ist für CO_2-Emissionen eine Hauptkategorie nach der Emissionshöhe.

Die Herstellung von Ammoniak erfolgt auf Basis von Wasserstoff und Stickstoff unter Bildung von CO_2 nach dem Haber-Bosch-Verfahren. Wasserstoff wird in einem hochintegrierten Verfahren in einem *Steam-Reforming*-Prozess aus Synthesegas meist auf der Basis von Erdgas gewonnen, Stickstoff wird durch Luftzerlegung bereitgestellt.

Die verschiedenen Anlagenarten zur Herstellung von Ammoniak können aufgrund des hochintegrierten Charakters des Verfahrens nicht in einzelne Aggregate unterteilt und als Verfahrensteile getrennt voneinander verglichen werden. Beim *Steam Reforming* werden folgende Verfahren unterschieden:

- ACP - *Advanced Conventional Process* (weiterentwickeltes konventionelles Verfahren) mit einem befeuerten Primär-Reformer und sekundärer Reformierung mit Luftüberschuss (stöchiometrisches H/N-Verhältnis)
- RPR - *Reduced Primary Reformer Process* (Reduzierte primäre Reformierung) unter milden Bedingungen in einem befeuerten Primär-Reformer und sekundärer Spaltung mit Luftüberschuss (unterstöchiometrisches H/N-Verhältnis)
- HPR - *Heat Exchange Primary Reformer Process* (Primäre Reformierung mit Wärmeaustausch) autothermische Spaltung mit Wärmeaustausch unter Einsatz eines mit Prozessgas beheizten Dampfreformers (Wärmeaustausch-Reformer) und eines separaten Sekundärreformers oder eines kombinierten autothermischen Reformers und Verwendung von Überschussluft oder angereicherter Luft (unterstöchiometrisches oder stöchiometrisches H/N-Verhältnis).

Weiterhin ist folgendes Verfahren im Einsatz:

- Partielle Oxidation - Vergasung von Erdgas, Fraktionen schweren Mineralöls oder Vakuumreststoffen bei der Herstellung von Synthesegas.

Seit Mitte 2014 wird in Deutschland nur noch an vier Standorten Ammoniak produziert. Dabei werden sowohl der Steam-Reforming-Prozess als auch die partielle Oxidation verwendet.

Der Produktionsrückgang um mehr als 15 % (entspricht einer Menge von knapp 300 kt) im ersten Jahr nach der Wiedervereinigung beruhte auf einer Marktbereinigung, die zu über 2/3 zu

Lasten der neuen Bundesländer ging. In den Folgejahren bis 1994 blieb das Produktionsniveau nahezu konstant. Der Grund für den Wiederzuwachs ab 1995 auf das Niveau von 1990 konnte nicht geklärt werden, er könnte aber darauf zurückzuführen sein, dass in den neuen Bundesländern nach umfangreichen Modernisierungsarbeiten die Produktionsprozesse wieder aufgenommen wurden. Nach 1995 unterliegt das Produktionsniveau nur kleineren Schwankungen. Der Produktionsrückgang 2009 um fast 8 Prozent war bedingt durch die globale Wirtschaftskrise. Bis 2013 war der IEF im Vergleich zu anderen Ländern höher, da in Deutschland neben Erdgas auch Schweröl zur partiellen Oxidation eingesetzt wurde. Schweröl erzeugt aber deutlich höhere CO_2-Emissionen als Erdgas. Seit Mitte 2013 wird für die partielle Oxidation überwiegend Erdgas eingesetzt, außerdem wird eine größere Menge an CO_2 aufgefangen und weiter verarbeitet zu Harnstoff für den Einsatz als AdBlue und für den Einsatz als Düngemittel, so dass sich der IEF nicht mehr wesentlich von dem anderer Länder unterscheidet.

4.3.1.2 Methodische Aspekte (2.B.1)

Entsprechend der Einstufung als Hauptkategorie für die CO_2-Emissionen werden die Emissionsdaten aus dieser Kategorie seit der Berichterstattung 2010 nach Tier 3 erhoben und berichtet, mit Ausnahme einer Anlage die bis 2012 nach der Tier 2 Methode erhoben worden ist, da der Default Kohlenstoffgehalt verwendet wurde. Seit 2013 sind alle Anlagen nach dem Tier 3 Verfahren erhoben. Die Grundlage dazu bildet eine Kooperationsvereinbarung mit den Betreibern zur Lieferung anlagenspezifischer Daten. Mit der Tier 2 und Tier 3 Methode erfüllen die erhobenen Daten über die gesamte Zeitreihe die Anforderungen an eine Hauptkategorie.

Die Betreiber übersenden ihre anlagenspezifischen Daen an den Industrieverband Agrar (IVA). Dort werden diese aus Vertraulichkeitsgründen anonymisiert und dann anlagenspezifisch an das Umweltbundesamt übermittelt. Das Umweltbundesamt nimmt eine Qualitätssicherung vor und aggregiert anschließend die Daten.

Die Anlagenbetreiber melden:

- die produzierte Menge Ammoniak (Aktivitätsdaten),
- die Menge des jeweils eingesetzten Rohstoffes (Erdgas, schweres Mineralöl) abzüglich des in der Energiebilanz gemeldeten energetisch genutzten Brennstoffes (TFR_i),
- dessen C-Faktor (CCF_i) und Kohlenstoffoxidationsfaktor (COF_i),
- die Menge und die Verwendungsart des weiterverarbeiteten CO_2 (R_{CO2}).

CO_2- Emissionen

Die CO_2-Emissionen werden entsprechend der Gleichung 3.3 in den 2006 IPCC-Guidelines (IPCC, 2006a) berechnet:

Gleichung 6:

$$EF_{CO2} = \sum(TFR_i * CCF_i * COF_i * \frac{44}{12} - R_{CO2})$$

Die rückgewonnene Menge an CO_2, die bei anderen Produktionsprozessen wie z.B. zur Harnstoff-Produktion eingesetzt wird und dort auch berichtet wird, ist in den berichteten Emissionen nicht enthalten.

Seit 2013 unterliegen alle Ammoniakanlagen dem Emissionshandel, damit erfüllen auch alle Anlagen für die Ermittlung des Kohlenstoffgehalts die Anforderungen an den Emissionshandel.

Ein Produzent verwendet einen Standardfaktor, der sich aufgrund der laufenden Betriebsanalytik heraus gebildet hat (C-Gehalt = 86,1 % - Gewichtsbasis). Der zweite Produzent verwendete für Erdgas bis 2013 den IPCC-Default Value, für die Restgase wurde der C-Gehalt analytisch ermittelt, der C-Gehalt des eingesetzten Gasgemischs wurde mengengewichtet aus den C-Gehalten der einzelnen Einsatzstoffe errechnet. In zwei Fällen werden die Daten, die der Erdgaslieferant zur Verfügung stellt verwendet.

Emissionsfaktor für NO_x

Für den Emissionsfaktor von NO_X wurde der Default-Emissionsfaktor des *CORINAIR Guidebooks* von 1 kg/t HNO_3 verwendet (EMEP (2009): EMEP EEA Emission Inventory Guidebook, TFEIP-endorsed draft, May 2009).

4.3.1.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (2.B.1)

Die von den Betreibern übermittelten Unsicherheiten werden vom UBA entsprechend der Gleichung 3.2 (IPCC (2006a): Vol. 1, Ch. 3) aggregiert und eingetragen.

Die Unsicherheit für die Aktivitätsrate beträgt ±0,6 %. Die Unsicherheit für die Emissionen beträgt ±1 %.

4.3.1.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (2.B.1)

Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

4.3.1.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.B.1)

Rückrechnungen sind nicht durchgeführt worden.

4.3.1.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (2.B.1)

Derzeit sind keine neuen Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4 Verbesserungen des Inventars, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

4.3.2 Chemische Industrie: Salpetersäureproduktion (2.B.2)

4.3.2.1 Beschreibung der Kategorie (2.B.2)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
-/T	2 B 2, Nitric Acid Production		N_2O	2896,77	0,23	114,29	0,02	-96,05

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
N_2O	Tier 3	PS	PS

Die Kategorie „Chemische Industrie: Salpetersäureproduktion“ ist für N_2O-Emissionen eine Hauptkategorie nach dem Trend.

Bei der Produktion von Salpetersäure entsteht in einer Nebenreaktion Distickstoffoxid. In Deutschland gibt es derzeit insgesamt neun Anlagen zur Herstellung von Salpetersäure.

Die Herstellung von HNO_3 erfolgt in zwei Verfahrensschritten:

- Oxidation von NH_3 zu NO und
- Umwandlung von NO in NO_2 und Absorption in H_2O.

Einzelheiten des Verfahrens werden nachstehend beschrieben:

Katalytische Oxidation von Ammoniak

Ein Ammoniak-Luft-Gemisch im Verhältnis von 1:9 wird in Gegenwart eines mit Rhodium und/oder Palladium legierten Platin-Katalysators bei einer Temperatur zwischen 800 und 950 °C oxidiert.

Die entsprechende Reaktion nach dem Ostwald-Verfahren ist wie folgt:

$$4\ NH_3 + 5\ O_2 \rightarrow 4\ NO + 6\ H_2O$$

Gleichzeit bilden sich Stickstoff, Distickstoffoxid und Wasser als unerwünschte Nebenreaktionen:

$$4\ NH_3 + 3\ O_2 \rightarrow 2\ N_2 + 6\ H_2O$$

$$\mathbf{4\ NH_3 + 4\ O_2 \rightarrow 2\ N_2O + 6\ H_2O}$$

Alle drei Oxidationsreaktionen sind exotherm. Die Wärme kann zurückgewonnen werden und zur Erzeugung von Dampf für den Prozess bzw. zur Abgabe an andere Betriebe und/oder zur Vorwärmung der Restgase genutzt werden. Das Reaktionswasser wird während der Abkühlung der Reaktionsgase in einem Kühlkondensator kondensiert und in die Absorptionssäule überführt.

4.3.2.2 Methodische Aspekte (2.B 2)

Die Salpetersäureproduktion wird entsprechend den 2006 IPCC- Guidelines (IPCC, 2006a) anlagenspezifisch nach Tier 3 berichtet. Die Grundlage dazu bildet eine Kooperationsvereinbarung mit den Betreibern zur Lieferung anlagenspezifischer Daten. Bis einschließlich der Berichtsrunde 2014 übersandten sechs Betreiber die Daten an den Industrieverband Agrar (IVA). Nach einer Qualitätssicherung aggregierte der IVA aus Vertraulichkeitsgründen die Daten und übermittelte die aggregierten Daten (AR und EF) an das UBA. Zwei Firmen übermittelten ihre Daten (AR, EF, N_2O-Emissionen und evtl. eingesetzte Minderungstechnik) direkt an das Umweltbundesamt, dort wurden diese nach einer Qualitätsprüfung mit den Daten vom IVA aggregiert und in der Emissionsdatenbank ZSE dokumentiert.

Die Kooperationsvereinbarung wurde für die zweite Verpflichtungsperiode und die 2006 IPCC Guidelines angepasst. Das UBA erhält seitdem in anonymisierter Form für sechs Betriebe mit sieben Anlagen die anlagenspezifischen Daten über den IVA. Zwei weitere Betreiber schicken ihre Daten direkt an das Umweltbundesamt.

Die Anlagenbetreiber melden:

- die produzierte Menge Salpetersäure (Aktivitätsdaten),
- den EF,

- die gemessenen N_2O-Emissionen am Rohgas,
- bei Einsatz von Minderungstechniken auch die gemessenen N_2O-Emissionen am geminderten Abgas.
- Die Unsicherheiten für die Aktivitätsrate, den Emissionsfaktor und die geminderten Emissionen.

Als Minderungstechnik kommt die selektive katalytische Reduktion (SCR) und Envinox Technologie zum Einsatz. Die Technologie führt zu einer Reduktion der N_2O Emissionen von über 99 %. Durch die katalytische Zersetzung werden N_2O und NH_3 Emissionen reduziert. Eine Anlage hat zusätzlich eine zweite sekundäre Abgasbehandlung (SCR) nachgerüstet.

Bis 2006 korreliert die Produktionsmenge mit den N_2O-Emissionen. Danach ist eine deutliche Entkopplung von Produktionsmenge und N_2O-Emissionen erkennbar, dies ist auf den zunehmenden Einsatz von Minderungstechniken zurückzuführen. Im Jahr 2017 wurde der Katalysator einer Anlage ausgetauscht. Die Auswirkung ist im Jahr 2018 mit einem reduzierten EF zu erkennen.

Für das Jahr 2021 konnte ein Produzent mit einer geringen Emissionsmenge die Emissionsmessungen nicht vollständig durchführen. Aus diesem Grund wurde für diese Anlage der Emissionsfaktor anhand der vorliegenden Daten zwischen 2020 und 2022 interpoliert.

Die seit 2023 geringer ausfallenden gesamten Emissionen seit können anhand des Austausches von Katalysatoren und anhand des Einsatzes von zusätzlichen De-N2O Maßnahmen erklärt werden.

NO_X-Emissionsfaktor:

Für den Emissionsfaktor von NO_X wurden die T2-Default-Emissionsfaktoren des *CORINAIR Guidebooks* verwendet (EMEP (2009): EMEP EEA Emission Inventory Guidebook, TFEIP-endorsed draft, May 2009). Dabei wurden entsprechend der zeitlichen Entwicklung und der Technik die entsprechenden Emissionsfaktoren mit und ohne Abgasbehandlung berücksichtigt. Für mehr Details bitte im Informative Inventory Report (IIR) nachlesen.

4.3.2.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (2.B.2)

Aktivitätsrate

Die von den Betreibern übermittelte Unsicherheit für die Aktivitätsrate wurde vom UBA entsprechend der Gleichung 3.2 (IPCC (2006a), Vol. 1, Ch. 3) festgelegt. Die Unsicherheit beträgt ±1 %.

Emissionsfaktor

Für den N_2O-Emissionsfaktor wird von den Betreibern eine Unsicherheit von ±5 % angegeben.

4.3.2.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (2.B.2)

Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

4.3.2.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.B.2)

Rückrechnungen waren nicht erforderlich.

4.3.2.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (2.B.2)

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4 Verbesserungen des Inventars, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

4.3.3 Chemische Industrie: Adipinsäureproduktion (2.B.3)

4.3.3.1 Beschreibung der Kategorie (2.B.3)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
L/T	2 B 3, Adipic Acid Production		N_2O	16074,90	1,25	32,92	0,01	-99,80

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
N_2O	Tier 3	PS	PS
NO_x, CO	Tier 3	PS	PS

Die Kategorie „Chemische Industrie: Adipinsäureproduktion“ ist für N_2O-Emissionen eine Hauptkategorie nach der Emissionshöhe und dem Trend.

Im technischen Maßstab wird Adipinsäure durch Oxidation eines Gemisches von Cyclohexanol und Cyclohexanon mit Salpetersäure hergestellt. Bei dieser Reaktion werden erhebliche Mengen an Lachgas (N_2O) gebildet.

Dies wurde bis Ende 1993 von den beiden alleinigen deutschen Herstellern vollständig in die Atmosphäre emittiert. Ein Hersteller hat seitdem eine Anlage zur thermischen Zersetzung von Lachgas in Stickstoff und Sauerstoff in Betrieb. Die Zersetzung erfolgt nahezu vollständig. 2009 kam eine zweite, zusätzliche (redundante) thermische N_2O-Zersetzungsanlage hinzu. Es werden N_2O-Zersetzungsraten von über 99 % erreicht.

Ende 1997 nahm der andere Hersteller eine katalytische N_2O-Zersetzung in Betrieb, die bei Dauerbetrieb eine N_2O-Zersetzungsrate von 97-98 % erreicht. Ende 2009 kam ein zweiter, redundanter Zersetzungsreaktor hinzu.

Durch die Installation der zwei redundanten Abgasbehandlungsanlagen bei den beiden Herstellern haben sich die N_2O-Emissionen seit 2010 noch einmal deutlich reduziert.

Im März 2002 nahm ein dritter Hersteller mit einer Anlage die Produktion auf. Die Anlage wird ebenfalls mit einer thermischen N_2O-Zersetzung betrieben. Dieser Hersteller hat seit 2013 die Möglichkeit bei Ausfall der Minderungsanlage eine redundante Minderungsanlage zu nutzen. Es können N_2O-Zersetzungsraten von über 99 %erreicht werden.

Die insgesamt schwankenden Abbauraten und somit auch die Restemissionen resultieren aus Funktionsbeeinträchtigungen und geplanten Unterbrechungen der Minderungsanlagen und unterschiedlichen Produktionsvolumina.

Die Produktion hatte sich nachfragebedingt im Vergleich zu 1990 in etwa verdoppelt, ging aber insbesondere in den Jahren 2022 und 2023 wieder stark zurück.

N_2O-Emissionen aus der Produktion von 1,12-Dodecandisäure (DDS) werden hier mit berichtet, aber die Dodecandisäure-Produktion wird in Kapitel 4.3.10 beschrieben.

4.3.3.2 Methodische Aspekte (2.B.3)

Die Berechnung der N_2O-Emissionen aus der Adipinsäureproduktion basiert seit 1990 auf anlagenbezogenen Daten.

In den Jahren in denen keine Lachgasminderungstechnik installiert war wurden von den beiden Herstellern nur die Produktionsmengen zur Verfügung gestellt. Für die Berechnung der Lachgasemissionen wurde für diesen Zeitraum der IPCC Default-Emissionsfaktor verwendet und zwar bis 1994 für die eine Anlage und bis 1997 für die andere Anlage. Die Berechnung der N_2O-Emissionen entspricht in diesen Jahren dem Tier 2 Ansatz. Für den anschließenden Zeitraum wurden von den beiden Herstellern die Lachgasemissionen kontinuierlich gemessen und neben den Produktionsangaben und den N_2O-Emissionen auch für die Abschätzung der Genauigkeit der berichteten Daten notwendige Hintergrundinformationen vertraulich mitgeteilt. Der dritte Hersteller misst seit 2013 kontinuierlich. In dem Zeitraum davor berechnete er die in zwei möglichen Anlagenzuständen (ungeminderter und geminderter Betrieb) emittierten Lachgasmengen mittels hergestellter Adipinsäuremenge und einem Emissionsfaktor. Dabei wurde die Nutzungsdauer des jeweiligen Anlagenzustandes und die Anlagenlast berücksichtigt. Für die beiden Betriebszustände wurde jeweils ein Emissionsfaktor aus produzierter Adipinsäuremenge und Lachgas-konzentrationsmessung bestimmt.

Die Bestimmung der N_2O-Emissionen mit kontinuierlicher Lachgasmessung entspricht der Tier 3-Methode der *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (IPCC (2006a): Vol. 3, Ch. 3.4.2.1).

4.3.3.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (2.B.3)

Für Anlagen mit thermischer Zersetzung werden nach 2006 IPCC GL (IPCC (2006a): Vol. 3, Tab. 3.4) Unsicherheiten für die N_2O-Zersetzungsrate von ±0,5 % und für die katalytische Zersetzung von ±2,5 % angegeben.

Nach Angaben der Hersteller liegen die Unsicherheiten der Emissionen unabhängig von dem Minderungsverfahren in einem Bereich von etwa ±1 bis 6 %. Die Unsicherheiten für die Produktionsmengen werden mit <0,1 bis etwa 1 % beziffert. Der EF wird daher mit einer Unsicherheit von 6 % und die Produktionsmengen von 2 % angesetzt.

Neuberechnungen der Emissionen des dritten Herstellers rückwirkend bis zum Jahr 2002 erfolgten nach Änderungen der Erhebungsmethodik nicht, weil durch die zeitgleiche Inbetriebnahme der redundanten Minderungsanlage Emissionswerte nicht vergleichbar sind.

4.3.3.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (2.B.3)

Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Die Angaben der Hersteller unterliegen einem hohen Vertrauensschutz. Aus diesem Grund können in den CRT-Tabellen lediglich die Emissionsangaben ausgewiesen werden. Die berichteten Emissionen und Aktivitätsraten werden durch den Experten im UBA überprüft und mit anderen Datenquellen verglichen.

Ein Vergleich des IEF mit dem anderer Länder ist nur beschränkt möglich, weil nur Italien und die USA durchgängig einen Emissionsfaktor für N_2O berichten. Der niedrigere der beiden IEFs ist mit dem nationalen Emissionsfaktor vergleichbar. Ein Vergleich mit Daten aus dem PRTR ist für die Kategorie nicht möglich.

Zwei der drei Hersteller haben jeweils ein JI-Projekt durchgeführt. Die Projekte sind unter den Projekt-IDs DE-1000017 und DE-1000018 in der JI- Projektdatenbank[49] einsehbar. Die Inventardaten wurden mit den Angaben der Projekte für den Zeitraum 2008 bis 2012 verglichen und konnten durch diese bestätigt werden.

Die Emissionsdaten von 2013 bis 2019 wurden mit den ETS-Daten abgeglichen. Es gibt eine gute Übereinstimmung.

Für die Berechnungsmethode vor dem Methodenwechel in den 1990er Jahren ist keine fachliche Maßnahme zur Verifizierung bekannt.

4.3.3.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.B.3)

Rückrechnungen sind nicht durchgeführt worden.

4.3.3.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (2.B.3)

Derzeit sind keine neuen Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

4.3.4 Chemische Industrie: Caprolactam, Glyoxal & Glyoxylsäure (2.B.4)

4.3.4.1 Beschreibung der Kategorie (2.B.4)

Die Kategorie „Chemische Industrie: Caprolactam, Glyoxal & Glyoxylsäure“ ist keine Hauptkategorie.

ε-Caprolactam ist das technisch bedeutendste Lactam und wird hauptsächlich zur Herstellung von PA 6 eingesetzt. In Deutschland gibt es zwei Hersteller.

Glyoxal wird zur Herstellung einer Vielzahl von Produkten zur Verbesserung der Eigenschaften eingesetzt. Es gibt einen Produzenten. Das von ihm für die Herstellung von Glyoxal angewendete Verfahren (Oxidation von Ethylenglykol in der Gasphase) ist keine Quelle für prozessbedingte Lachgasemissionen.

Nach Aussage des Glyoxalherstellers wird kein an Kunden in Deutschland geliefertes Glyoxal zu Glyoxylsäure verarbeitet. Eine Produktion von Glyoxylsäure aus anderen Ausgangsstoffen in Deutschland ist nicht bekannt.

4.3.4.2 Methodische Aspekte (2.B.4)

Caprolactam

Beide Hersteller nutzen den Syntheseweg über das Hydroxylammoniumsulfat (HAS), für dessen Herstellung Ammoniak oxidiert wird. Die Ammoniakoxidation ist im Herstellungsprozess hauptursächlich für die N_2O-Emissionen.

Auch setzen beide Hersteller eine thermische Abgasbehandlung zur Lachgaszerstörung ein, die jeweils redundant ausgelegt ist. Die Temperaturen liegen weit oberhalb der Zersetzungstemperatur von Lachgas, so dass Emissionen standardmäßig nur in sehr geringen Mengen auftreten.

Für einen der beiden Hersteller werden aus Konsistenzgründen mit dem Emissionshandel die N_2O-Emissionen der Salpetersäureproduktion (2.B.2) zugeordnet. Die Berichterstattung erfolgt

[49] siehe: https://ji.unfccc.int/JI_Parties/DB/1JUS6UM3SH2O9VJ0RWUQDB99J8DWTJ/viewDFP

nach einer Tier 3-Methode. Für diese Anlage wird darum in der CRT-Tabelle unter 2.B.4a die Notation IE gewählt.

Für die Anlage des anderen Herstellers liegen der Nationalen Koordinierungsstelle detaillierte Informationen vor, nach denen eine vollständige Eliminierung der Lachgasmengen durch die thermische Nachverbrennungseinrichtung angenommen werden kann. Da aber für den Anlagenbetreiber keine Messverpflichtungen bestehen und um eine Untererfassung der Lachgasemissionen durch andere Emissionsquellen vorzubeugen, werden die N_2O-Emissionen einmalig quantitativ nach einer Tier 2-Methode abgeschätzt. Für die Abschätzung werden eine Produktionskapazität aus Presseberichten[50] abgeleitet und aus den 2006 IPCC-RL der N_2O-Standardemissionsfaktor für die Herstellung von Caprolactam (9 kg N_2O/t Caprolactam, gemäß IPCC (2006a): Vol. 3, Kapitel 3.5, Tabelle 3.5) und Standardfaktoren für die thermische Abgasbehandlung bei der Adipinsäureproduktion (98,5 % Minderungsrate und 99,91 % Auslastung, gemäß IPCC (2006a): Vol. 3, Kapitel 3.4, Tabelle 3.4) genutzt. Der Auslastungsfaktor für das redundant ausgelegte Abgasbehandlungssystems ergibt sich aus dem Standardauslastungsfaktor von 97 % für die Hauptanlage und 97 % Auslastung der zweiten Anlage, die in den 3 % zum Tragen kommt, in denen die Hauptanlage nicht eingesetzt werden kann. Deutschland folgt mit der Verwendung von Standardfaktoren aus den IPCC-RL der Empfehlung des *Expert Review Teams des In-Country-Review 2016*. Für das Jahr 2015 ergibt die Abschätzung eine Menge von 9,5 kt CO_2-Äquivalente (AR5) für diese Anlage. Aufgrund der Höhe der Emissionen wurde die Zulässigkeit einer reduzierten Emissionsberichterstattung (gemäß (UNFCCC, 2013), FCCC/SBSTA/2013/L.29/Add.1, para 37(b)) geprüft. Dazu wurden auch die N_2O-Emissionen der anderen Anlagen mittels Standardemissionsfaktoren und Produktionskapazität berechnet. Für beide Anlagen zusammen ergeben sich 15,9 kt CO_2-Äquivalente (AR5). Da somit die berechneten N_2O-Emissionen aus der Kategorie weniger als 0,05 % des Gesamtinventars (ohne LULUCF) darstellen und 500 kt CO_2-Äquivalente nicht überschreiten und eine jährliche Erfassung nicht durchgeführt werden kann (gemäß (UNFCCC, 2013), FCCC/SBSTA/2013/L.29/Add.1, para 37), wird auf eine entsprechende Berichterstattung verzichtet (IPCC (2006a): Vol. 3, Ch. 3.5). Eine Zusammenstellung aller als *not estimated* erfasster Quellen erfolgt darüber hinaus in Kapitel 1.7.2 dieses Berichtes. Die beiden Anlagen werden unter 2.B.4.a in der CRT-Tabelle durch die Notation IE, NE abgebildet. Die Notation steht im Einklang mit den Hinweisen und Empfehlungen des In-Country-Reviews.

4.3.4.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (2.B.4)

Für die Aktivitätsrate wird eine Unsicherheit von ±30 % angenommen und für die Standardfaktoren gelten die entsprechenden Unsicherheiten der 2006 IPCC-GL (IPCC, 2006a).

4.3.4.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (2.B.4)

Aufgrund begrenzter Ressourcen und minimaler Relevanz wurde für diese Berichterstattung keine QK/QS durchgeführt.

Es können für die Verifikation der Herstellerangaben in den Presseberichten nur wenige Quellen genutzt werden. Für die Jahre 1995 bis 2008 stehen Produktionsmengen an ε-Caprolactam zur Verfügung (Statistisches Bundesamt (jährlich - FS 4, R. 3.1), Produzierendes Gewerbe, Produktion im Produzierenden Gewerbe)). Aufgrund von Anpassungen an internationale Klassifizierungen werden aber seit 2009 keine Produktionsmengen an ε-Caprolactam mehr einzeln ausgewiesen, so dass eine statistische Erhebung der Produktionsmengen an ε-Caprolactam seitdem nicht mehr möglich ist. In der Außenhandelsstatistik wird ε-Caprolactam

[50] letzter Aufruf 25.10.2017

weiterhin einzeln ausgewiesen. Es stehen Importmengen seit 1996 und Exportmengen seit 2009 zur Verfügung. Die Import- und Exportmengen sind relativ stabil.

4.3.4.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.B.4)

Rückrechnungen sind nicht erforderlich.

4.3.4.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (2.B.4)

Derzeit sind keine neuen Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

4.3.5 Chemische Industrie: Carbidproduktion (2.B.5)

4.3.5.1 Beschreibung der Kategorie (2.B.5)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
-/-	2 B 5, Carbide Production	0	CO_2	443,16	0,04	4,39	0,01	-99,01

Gas	angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2	Tier 3	PS	PS (CaC_2) NO (SiC)

Die Kategorie „Chemische Industrie: Carbidproduktion“ ist keine Hauptkategorie.

Die Calciumcarbidproduktion fand zu Zeiten der Wiedervereinigung überwiegend in den neuen Bundesländern statt. Nachdem dort die Produktion kurze Zeit später eingestellt worden ist, verblieb nur in den alten Bundesländern ein Hersteller von Calciumcarbid. Nach Auskunft des zuständigen Fachverbands im VCI wird in Deutschland seit 1993 kein Siliziumcarbid mehr hergestellt. Emissionen aus diesem Bereich treten daher nicht mehr auf.

4.3.5.2 Methodische Aspekte (2.B.5)

Aktivitätsrate

Da es nur einen Hersteller in Deutschland gibt müssen diese Daten vertraulich behandelt werden. Die Daten werden jährlich vom Hersteller dem Umweltbundesamt direkt mitgeteilt. Sie stammen ab 1997 aus der Ökobilanz bzw. aus den jährlichen Umwelterklärungen nach EMAS (der Betrieb ist zertifiziert seit 1997). Lediglich die Produktionsmengen in der ehemaligen DDR wurden vom damaligen Statistischen Zentralamt bis 1989 veröffentlicht. Diese Angabe wurde zusammen mit vorhandenen Schätzungen für 1991 und 1992 für die Interpolation der Produktion in den neuen Bundesländern im Jahr 1990 verwendet.

Emissionsfaktor

Der stöchiometrische Emissionsfaktor für CO_2 ist 688 kg pro t Calciumcarbid (44 g mol^{-1} / 64 g mol^{-1}). Dieser Emissionsfaktor wurde bis 1992 für die Produktion in den neuen Bundesländern verwendet.

Beim Hersteller wird das im Prozess entstehende Kohlenmonoxid in gedeckelten Öfen vollständig gefasst und anschließend einer energetischen Nutzung zugeführt. Das dadurch entstehende Kohlendioxid dient als Hilfsstoff bei der Produktion von Kalkstickstoff und

Folgeprodukten. Das Kohlendioxid fällt bei diesen Prozessen nach der Reaktion mineralisch in Form von Schwarzkalk an. In dieser Form wird es einer landwirtschaftlichen Verwertung zugeführt. 2012 wurde die Fahrweise der Carbidöfen vergleichmäßigt, so dass deutlich weniger Überschuss-Ofengas abgefackelt werden musste. Zusätzlich ist nach dieser Fahrweise der Ofenbetrieb ´ruhiger´, das heißt, dass es weniger Druckstöße gibt, die über die Rohgasfackeln auszugleichen sind. Der Emissionsfaktor enthält auch die CO_2-Emissionen aus dem Fackeleinsatz.

Auf diese Weise wird für die Produktion ein wesentlich geringerer Emissionsfaktor für Kohlendioxid aus der Calciumcarbidherstellung erreicht als in den Vorjahren.

Die Gesamtemissionen sowie die Produktionsmenge werden vom Hersteller auf Anfrage dem Umweltbundesamt zur Verfügung gestellt. Der Emissionsfaktor ergibt sich als Quotient von Emissionsmenge zu Aktivitätsrate.

4.3.5.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (2.B.5)

Die Unsicherheiten bezüglich der vom Betreiber zur Verfügung gestellten Daten werden als insgesamt gering eingeschätzt.

4.3.5.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (2.B.5)

Eine allgemeine Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Angaben von Herstellern unterliegen einem hohen Vertrauensschutz. Aus diesem Grund können in den CRF-Tabellen lediglich die Emissionsangaben ausgewiesen werden. Verifizierende Berechnungen konnten nicht durchgeführt werden. Es kann aber darauf hingewiesen werden, dass die Angaben teilweise auch den Genehmigungsbehörden zur Verfügung gestellt worden sind und somit für vertrauenswürdig erachtet werden.

4.3.5.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.B.5)

Es wurden keine Rekalkulationen durchgeführt.

4.3.5.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (2.B.5)

Derzeit sind keine neuen Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

4.3.6 Chemische Industrie: Titandioxid-Produktion (2.B.6)

In Deutschland gibt es mehrere Produzenten von Titandioxid. Eine Anlage davon produziert Titandioxid nach dem Chlorid-Verfahren. Die Anderen produzieren nach dem Sulfat-Verfahren und emittieren kein prozessbedingtes CO_2. Die Abschätzung der CO_2-Emissionen erfolgte als Expertenschätzung. Grundlage war die Produktionskapazität und ein Emissionsfaktor basierend auf einer Expertenschätzung. Die Abschätzung erfolgte aufgrund von vertraulichen Daten, die hier deshalb nicht dargestellt werden können.

Da die Treibhausgas-Emissionen aus der Kategorie Titandioxidproduktion weniger als 0,05 % des Gesamtinventars (ohne LULUCF) darstellen und 500 kt CO_2-Äquivalente nicht überschreiten würden (Erfassungsuntergrenzen gemäß (UNFCCC, 2013), FCCC/SBSTA/2013/L.29/Add.1) und eine jährliche Erfassung nicht gewährleistet werden kann (gemäß (UNFCCC, 2013),

FCCC/SBSTA/2013/L.29/Add.1, para 37), wird auf eine entsprechende Berichterstattung verzichtet (IPCC (2006a): Vol. 3, Ch. 3.7). Eine Zusammenstellung aller als *not estimated* erfasster Quellen erfolgt darüber hinaus in Kapitel 1.7.2 dieses Berichtes.

4.3.7 Chemische Industrie: Soda-Herstellung (2.B.7)

4.3.7.1 Beschreibung der Kategorie (2.B.7)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024% (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
-/-	2 B 7, Soda Ash Production	0	CO_2	615,50	0,05	404,45	0,06	-34,29

Gas	angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2	Tier 1/2	NS/PS	CS

Die Kategorie „Soda-Herstellung“ ist keine Hauptkategorie.

Soda wird in Deutschland nur auf chemischem Weg hergestellt. Es gibt 3 Produktionsanlagen, die den Solvay-Prozess[51] einsetzen[52]. Das im eingesetzten Kalciumkarbonat enthaltene CO_2 wird prinzipiell im Produkt Soda (Na_2CO_3) eingebunden und erst in der Anwendung gegebenenfalls freigesetzt (siehe Kategorie 2.A.4.b in Kapitel 4.2.4.2). Da die Produktion nach dem Solvay-Verfahren jedoch mit CO_2-Überschuss abläuft, ergeben sich prozessbedingte CO_2-Emissionen.

Im Kalzinierungsschritt wird zusätzlich Koks/ Anthrazit eingesetzt, so dass weitere (energiebedingte) Kohlendioxidemissionen entstehen.

4.3.7.2 Methodische Aspekte (2.B.7)

Aktivitätsdaten

Die Gesamtsumme an in Deutschland produziertem Soda wird mittels zweier Datenlieferanten erhoben.

Vom Statistischen Bundesamt liegen lange Zeitreihen vor: Die Zeitspanne 1990 bis 1994 ergibt sich aus der Kombination von Angaben ehemals Alter Bundesländer und der Überführung der Daten zu Neuen Bundesländern in die gemeinsame Erfassung für Deutschland. Von 1995 bis 2008 wurden die Kategorien „leichtes Soda“ und „schweres Soda“ getrennt ausgewiesen. Seit 2009 wird nur noch eine Position ausgewiesen (Meldenummer 2013 43 100). Es wird nur der „zum Absatz bestimmte“ Teil berücksichtigt. Auf diese Weise wird eine Doppelzählung vermieden, da schweres Soda aus leichtem Soda hergestellt wird.

Wegen eines kaum erklärlichen Trends in den Daten des Statistischen Bundesamts seit dem Jahr 2015 wurde der Kontakt zu den Herstellern gesucht und im Jahre 2021 Kooperations-vereinbarungen mit beiden Herstellern (für alle drei Produktionsstätten, siehe auch Kapitel 1.2.1.4) geschlossen. Im UBA werden diese Daten zusammengeführt und es wurde entschieden, dass die Zeitreihe ab 2013 nun aus den Herstellerangaben gespeist wird (Überlappung zum Vergleich 2013 bis 2021).

Da es nur zwei Hersteller in Deutschland gibt, muss die Produktionsmenge aus beiden Datenquellen vertraulich behandelt werden.

[51] Ammoniak-Soda-Verfahren nach Ernst Solvay

[52] Weitere, von der Produktionsmenge weniger bedeutendere Verfahren sind nicht betrachtet, weil Kohlendioxid aus anderen Quellen als Kalkstein zum Einsatz kommt.

Emissionsfaktor

Der Emissionsfaktor wird berechnet aus den Kohlendioxidemissionen entsprechend der ETS-CO_2-Bilanz und aus der Produktionsmenge. Da die Produktionsmenge vertraulich behandelt werden muss, kann auch der EF hier nicht benannt werden.

Die beim Brennen des Kalks eingesetzte Menge an Koks ist in der Energiebilanz als nicht energetischer Einsatz berücksichtigt (also ohne CO_2-Emissionen).

4.3.7.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (2.B.7)

Aktivitätsdaten

Unsicherheiten bestehen bezüglich der vom Statistischen Bundesamt angegebenen Produktionsmengen insbesondere seit der getrennten Ausweisung und ab dem Jahr 2015.

Die Unsicherheit der Produktionsmenge wurde anhand von Herstellerangaben und Experteninterviews neu bestimmt und beträgt 1,5 %.

Emissionsfaktor

Die Unsicherheit des Emissionsfaktors hinsichtlich der Produktion von Soda wird berechnet aus den Unsicherheiten der Emissionsbilanz des ETS und den Unsicherheiten der Produktionsdaten.

4.3.7.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (2.B.7)

Eine allgemeine Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Die CO_2-Bilanz zur Ermittlung der Emissionen wird mit Daten aus dem Emissionshandel ermittelt. Diese Daten wurden im Rahmen des ETS vollumfänglich geprüft und verifiziert.

Die Produktionsdaten unterliegen Qualitätskontrollen durch die Hersteller, mit denen Kooperationssvereinbarungen bestehen.

4.3.7.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.B.7)

Rückrechnungen waren nicht nötig.

4.3.7.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (2.B.7)

Verbesserungen sind nicht geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

4.3.8 Chemische Industrie: Petrochemie und Industrieruß-Produktion (2.B.8)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
-/-	2 B 8, Petrochemical and Carbon Black Production		CO_2	973,97	0,08	756,98	0,11	-22,28
-/-	2 B 8, Petrochemical and Carbon Black Production		CH_4	373,73	0,03	423,06	0,06	13,20

Gas	angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2	Tier 2 (Industrieruß) CS (Petrochemie)	NS	D (Industrieruß) CS (Petrochemie)
CH_4	Tier 1	NS	D
CO, SO_2	Tier 1 (Industrieruß)	NS	D (Industrieruß)
NMVOC	Tier 1 (Petrochemie)	NS	C & CS (Petrochemie)

Die Kategorie „Chemische Industrie: Petrochemie und Industrieruß-Produktion“ ist keine Hauptkategorie. Die Industrieruß-Produktion dominiert mit ca. 75 % Anteil die Emissionen dieser Kategorie.

4.3.8.1 Chemische Industrie: Petrochemie (2.B.8 Petrochemie)

4.3.8.1.1 Beschreibung der Kategorie (2.B.8 Petrochemie)

In der Petrochemie werden aus Erdgas und Fraktionen des Erdöls organische Grundchemikalien hergestellt, die zu einer Vielzahl an Zwischen- und Endprodukten (hauptsächlich Polymere) weiterverarbeitet werden. In den 2006 IPCC Richtlinien (IPCC, 2006a) werden unter 2.B.8 die Produktion der Grundchemikalien (a) Methanol, (b) Ethylen, (c) Ethylendichlorid und Vinylchlorid, (d) Ethylenoxid und (e) Acrylnitril aufgrund ihrer potentiellen Kohlendioxid- und Methan-Emissionen hervorgehoben.

Die Herstellung von Petrochemikalien und Derivaten ist neben Pharmazeutika, Fein- und Spezialchemikalien sowie Polymeren eine der wichtigsten Sparten der chemisch-pharmazeutischen Industrie gemessen am Produktionswert[53].

4.3.8.1.2 Methodische Aspekte (2.B.8 Petrochemie)

Aktivitätsraten

Für die Herstellung o.g. Produkte stehen keine anlagenbezogenen Produktionsmengen zur Verfügung, sondern nur national zusammengefasste Produktionsmengen. Sie werden vom Statistischen Bundesamt ab dem Jahr 1990 auf Grundlage der „Fachserie 4, Reihe 3.1, Produzierendes Gewerbe, Produktion im Produzierenden Gewerbe“ (Statistisches Bundesamt, FS 4, R 3.1) dem Umweltbundesamt auch mit vertraulichen Daten zur Verfügung gestellt.

In der amtlichen Produktionsstatistik werden Petrochemikalien und Derivate als sonstige organische Grundstoffe und Chemikalien unter der WZ-Nummer 20.14 ausgewiesen.

Das Produktionsvolumen von Acrylnitril unterliegt der Vertraulichkeit, von Methanol und Ethylendichlorid in bestimmten Jahren. Aus diesem Grund werden alle Produktionsmengen für die Produkte a) bis e) aggregiert und zusammen mit den zugehörigen CO_2-und CH_4- Emissionen unter 2.B.8.g berichtet.

Für die Bestimmung der NMVOC-Emissionen wird neben der Herstellung der zuvor genannten Produkte a) bis e) auch die Herstellung weiterer Produkte mit erfasst, die unter der Genfer Luftreinhaltekonvention berichtet werden müssen. Eine detaillierte Berichterstattung darüber erfolgt im Rahmen der Genfer Luftreinhaltekonvention im Informative Inventory Report (IIR).

[53] Chemiewirtschaft in Zahlen 2023, Verband der Chemischen Industrie e.V. (2024): https://www.vci.de/services/publikationen/broschueren-faltblaetter/chemiewirtschaft-in-zahlen.jsp

CO_2-Emissionsfaktoren

Seit dem Jahr 2013 unterliegen alle deutschen Anlagen zur Herstellung oben genannter organischer Grundchemikalien nach Anhang 1 Teil 2 Tätigkeit Nr. 27 TEHG dem Emissionshandel (ETS), weil ihre Produktionsleistung höher als 100 t/d (36.500 t/a) ist.

Ein Vergleich der für den Treibhausgas-Emissionshandel gemeldeten CO_2-Gesamtemissionen der ETS-Anlagen nach a) bis e) mit den unter Verwendung der neuen IPCC-Standardemissionsfaktoren berechneten Emissionen für das Jahr 2013 zeigt, dass die Standardemissionsfaktoren zu höheren Emissionen führen. Und das, obwohl die anlagenbezogenen Gesamtemissionen aus dem Emissionshandel sowohl Emissionen aus Verbrennungsprozessen als auch sonstige prozessbedingte Emissionen enthalten. Im deutschen Treibhausgasinventar werden verbrennungsbedingte Emissionen größtenteils schon über die Energiestatistik im Energiesektor berücksichtigt. Daher können die Standardemissionsfaktoren nicht genutzt werden; andernfalls würde es zu einer Doppelzählung kommen.

Als Emissionsquellen für CO_2 kommen neben den Verbrennungsprozessen in Kesseln und Spaltöfen noch Verbrennungsprozesse in Fackeln, durch Entkokung und sonstige prozessbedingten Emissionen in Betracht.

Eine Quantifizierung der sonstigen prozessbedingten Emissionen ist nicht gerechtfertigt: denn bei Steamcrackern als der mit Abstand größten hier betrachteten Emittentengruppe stammen die anlagenbezogenen CO_2-Emissionen fast ausschließlich aus der Verbrennung in Spaltöfen, Hilfskesseln oder Fackeln. Diese verbrennungsbedingten Emissionen werden bis auf Fackeln in der Petrochemie schon im Energiesektor unter 1.A.2.c erfasst.

Um dem Ziel der möglichst vollständigen Erfassung der Emissionen im Inventar nachzukommen, werden aber die CO_2-Emissionen aus Fackelverlusten quantifiziert. Dabei sollen zukünftig auch Entkokungsprozesse miterfasst werden. Es wird nur der Anteil an Fackelgasen betrachtet, der den oben genannten Produkten a) bis e) zugeordnet werden kann.

Da nicht für alle vorgenannten Produkte Daten aus dem ETS vor 2013 zur Verfügung stehen, erfolgt die Berechnung der CO_2-Emissionen auf Basis eines für 2013 hergeleiteten CO_2-Emissionsfaktors und den jährlichen Produktionsmengen der jeweiligen Produkte.

Wegen der häufigen Weiterleitung von Restgasen und Fackelgasen zwischen Anlagen zur Herstellung verschiedener Produkte erscheint es sinnvoll, dafür einen über alle in dieser Kategorie betrachteten Produkte aggregierten Emissionsfaktor zu verwenden. Durch diese Aggregation werden auch Unsicherheiten bei der Zuordnung der Emissionen der oben angegebenen Herstellungsverfahren auf die unter a) bis e) genannten Produkte mit berücksichtigt, insbesondere weil CO_2-Emissionen aus Fackeln der o.a. Anlagen nicht zwangsläufig nur eines der Produkte a) bis e) betreffen. An Chemiestandorten werden abzufackelnde Gase aus verschiedenen Produktionsprozessen häufiger in einer zentralen Fackel verbrannt, die genehmigungs¬rechtlich nur einer bestimmten Produktionsanlage zugeordnet ist. Dadurch erhöht sich in solchen Fällen die dem Produkt zugeordnete Emissionsmenge gegenüber der eigentlichen durch die Produktherstellung verursachten Emissionsmenge. Andersherum können auch abzufackelnde Gase aus den Prozessen unter a) bis e) an eine Fackel in einer hier nicht betrachteten Anlage weitergeleitet werden, sodass die erfasste Emissionsmenge niedriger als die eigentliche produktbezogene Emissionsmenge ist.

Die für das Jahr 2013 den einzelnen Anlagen an Chemiestandorten zugeordneten Fackelemissionen (ETS-Daten) wurden aufsummiert und durch die Gesamtproduktionsmenge aller hergestellte Produkte a) bis e) in dem Jahr 2013 geteilt, um den Emissionsfaktor für Fackelverluste (EFFackel) zu bestimmen. Die Fackelemissionen der Steamcracker an

Raffinieriestandorten wurden über die bekannten Kapazitäten bestimmt. Der resultierende EFFackel für die oben genannten Petrochemikalien beträgt 28 kg/t Produkt. Mit diesem Emissionsfaktor werden nach einer Tier 1 Methode die jährlichen Emissionen rückwirkend bis 1990 berechnet.

CH_4-Emissionsfaktoren

In den *IPCC Guidelines* werden alle oben genannten Anlagen als potentielle Emissionsquellen aufgeführt.

In deutschen Anlagen muss in den der TA Luft unterliegenden Anlagen gemäß Punkt 5.2.5 ein Grenzwert für die Massenkonzentration organischer Stoffe insgesamt (NMVOC und CH_4, ausgenommen staubförmige organische Stoffe) von 50 mg/m^3 (Gesamtkohlenstoff) eingehalten werden. Die thermische Nachverbrennung (TNV) von flüchtigen organischen Stoffen aus Anlagen zur Herstellung organischer Grundchemikalien ist Stand der Technik.

Für Ethylen, Methanol, Ethylendichlorid und Styrol wurde von einem großen deutschen Hersteller gemeldet, dass in diesen Bereichen auf Grund der seit den achtziger Jahren eingesetzten thermischen Nachverbrennung Methanemissionen vernachlässigbar sind.

Zu Methanemissionen von Anlagen der chemischen Industrie können keine Angaben aus dem Emissionshandel genutzt werden, da nach dem aktuell gültigen TEHG von Juli 2011 CH_4 nicht zu berichten ist. Da keine Angaben von weiteren Anlagenbetreibern zur Quantifizierung der CH_4-Emissionen vorliegen, werden zur Berechnung der Methanemissionen für die Gesamtheit der Anlagen aus der petrochemischen Industrie die 2006 IPCC -Standardemissionsfaktoren IPCC (2006a): Vol. 3, Ch. 3.9.2.2) in einer Tier 1 Methode verwendet.

NMVOC–Emissionsfaktoren

Die Angaben der EF für NMVOC wurden entweder dem entsprechenden BVT-Merkblatt entnommen oder stammen aus vertraulichen Angaben deutscher Hersteller. Bis 1994 wurden die Default Faktoren des *EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook* verwendet. Eine detaillierte Berichterstattung erfolgt unter der Genfer Luftreinhaltekonvention im *Informative Inventory Report*.

4.3.8.1.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (2.B.8 Petrochemie)

CO_2

Die „Rückprojektion“ des oben angegebenen produktionsbezogenen Emissionsfaktors für Fackelverluste aus den Emissionsberichten 2013 auf frühere Jahre (bis 1990 zurück) ist mit hohen Unsicherheiten behaftet. Einerseits wurden die im ETS gemeldeten Fackelemissionen im Berichtsjahr 2013 häufig auf Basis von Schätzungen ermittelt und berichtet, andererseits muss davon ausgegangen werden, dass CO_2-Emissionen aus den Fackeln, die den betreffenden Anlagen genehmigungsrechtlich zugeordnet sind, nicht in vollem Umfang der Herstellung der betrachteten Produkte a) bis e) zuzuordnen sind. So werden mitunter auch Gase und Abgase aus anderen Produktionsprozessen in den hier betrachteten Fackeln verbrannt. Im Zeitverlauf können auch standortinterne Änderungen der Abgasführungen aus verschiedenen Prozessen auftreten, die die Unsicherheit der „rückwärtsberechneten“ produktspezifischen Emissionen weiter erhöhen. Hinzu kommt noch, dass sich das Verhältnis der Produktionsmengen zu den Fackelgasen für die betrachteten Anlagen in einzelnen Jahren deutlich von denen im Jahr 2013 unterscheiden kann.

Aufgrund der eingeschränkten Datenverfügbarkeit können Doppelzählungen im Energiesektor nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Auch die Extrapolation der Fackelemissionen der

Steamcracker trägt zur Unsicherheit des Emissionsfaktors bei. Es wird darum eine Unsicherheit von ±50 % angenommen.

Die Zeitreihenkonsistenz ist sichergestellt, weil die Rückrechnung der Emissionen bis zum Jahr 1990 nach einer einheitlichen Methode durchgeführt wird und es keine Lücken bei den Aktivitätsdaten und keine Sprünge beim Emissionsfaktor gibt.

CH_4

Aufgrund der in den achtziger Jahren eingeführten thermischen Nachverbrennung dürften die punktförmigen Emissionen an organischen Stoffen aus deutschen Anlagen gering sein. Durch die Verwendung der Standardemissionsfaktoren kommt es wahrscheinlich zu einer Übererfassung an Emissionen. Da die daraus resultierenden Unsicherheiten aber nicht abgeschätzt werden können, werden die Unsicherheiten für die Tier 1 Methoden aus Tabelle 3.27 der 2006 IPCC-Richtlinien (IPCC (2006a): Vol. 3) verwendet.

Die Zeitreihenkonsistenz ist sichergestellt, weil die Rückrechnung der Emissionen bis zum Jahr 1990 nach einer einheitlichen Methode durchgeführt wird und es keine Lücken bei den Aktivitätsdaten und keine Sprünge bei den Emissionsfaktoren gibt.

Aktivitätsraten

Die Aktivitätsraten stammen aus einer amtlichen Statistik, für die Ungenauigkeiten bei der statistischen Datenerfassung von ±20 % zugrunde gelegt werden.

4.3.8.1.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (2.B.8 Petrochemie)

Eine allgemeine Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Die vom Statistischen Bundesamt gemeldete Produktionsmenge an Ethylen für 2013 wurde mit den Kapazitätsangaben der *Association of Petrochemical Producers in Europe* (APPE; Petrochemicals Europe[54]) verglichen. Der sich ergebende nationale Standard-Auslastungsfaktor von 0,858 ist vergleichbar mit dem Standardauslastungsfaktor gemäß Artikel 18 Absatz 2 des Beschlusses 2011/278/EU (European Commission (EC), 2011).

Ein Vergleich des nationalen Emissionsfaktors für CO_2 mit den default-Werten der 2006 IPCC-Richtlinien und Emissionsfaktoren anderer Länder ist nicht möglich, da die Emissionsfaktoren kein CO_2 aus Fackeln berücksichtigen.

Weitere Quellen zur Verifizierung der Daten stehen nicht zur Verfügung.

4.3.8.1.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.B.8 Petrochemie)

Rückrechnungen sind nicht erforderlich.

4.3.8.1.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (2.B.8 Petrochemie)

Derzeit sind keine neuen Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

[54] Webseite: http://www.petrochemistry.eu

4.3.8.2 Chemische Industrie: Industrieruß-Produktion (2.B.8 Industrieruß)

4.3.8.2.1 Beschreibung der Kategorie (2.B.8 Industrieruß)

Industrieruße werden durch eine unvollständige Verbrennung von gasförmigen oder flüssigen Kohlenwasserstoffen hergestellt. Über eine gezielte Steuerung und Überwachung des jeweiligen Produktionsprozesses werden definierte Spezifikationen hergestellt. In Deutschland werden für die Industrieruß-Herstellung Steinkohleteeröle (Anthracen-Öle) oder Öle aus Erdölraffinerien (Pyrolyse- und Cracköle) eingesetzt.

90 % der Industrieruße werden in Deutschland nach dem Furnacerußverfahren hergestellt. Die restlichen 10 % werden mit dem Flammruß- und Gasrußverfahren produziert.

4.3.8.2.2 Methodische Aspekte (2.B.8 Industrieruß)

CO_2 – Emissionen

Ein Vergleich der auf Grundlage von Produktionsdaten von Destatis ermittelten CO_2-Emissionen mit den bei der Deutschen Emissionshandelsstelle (DEHSt) gemeldeten CO_2-Emissionen zeigte, dass bei der DEHSt deutlich weniger CO_2-Emissionen gemeldet sind. Auch die CO_2-Emissionen einer weiteren, nicht emissionshandelspflichtigen Anlage erklärten diesen Unterschied nicht. Recherchen bei dem bisherigen Datenlieferanten legten den Schluss nahe, dass in der verwendeten Produktionsstatistik teilweise anstelle von Produktionszahlen die Verkaufszahlen berichtet werden. Die bisher verwendete Aktivitätsrate war damit um ein deutliches zu hoch. Von 2005 bis 2021 wurden deshalb die Emissionsmengen der DEHSt verwendet und mit dem Default-Emissionsfaktor aus den *IPCC-Guidelines 2006* (IPCC (2006a): Vol. 3, Table 3.23, *Furnace Black Process (default process), primary feedstock*) die Aktivitätsrate rückgerechnet. Die Emissionen einer nicht emissionshandelspflichtigen Anlage wurden direkt von der Betreiberin an das UBA gemeldet. Eine (emissionshandelspflichtige) Anlage wurde 2016 stillgelegt. In Deutschland werden demnach noch fünf Anlagen von zwei Betreibern betrieben. Seit 2022 bezieht das UBA die Emissionsdaten direkt von den beiden Betreibern.

CH_4–Emissionsfaktoren

In den internationalen Richtlinien wird nur sehr knapp auf diese Kategorie eingegangen. In den *IPCC Guidelines* wird als potentielle Emissionsquelle auch die Produktion von Industrieruß aufgeführt.

In deutschen Anlagen muss in den der TA Luft unterliegenden Anlagen gemäß Punkt 5.2.5 ein Grenzwert für die Massenkonzentration organischer Stoffe insgesamt (NMVOC und CH_4, ausgenommen staubförmige organische Stoffe) von 50 mg/m^3 (Gesamtkohlenstoff) eingehalten werden. Von den deutschen Herstellern von Industrieruß wird auf Grund dieses Sachverhalts ein Emissionsfaktor von 0,027 kg Methan pro t Industrieruß gemeldet. Da diese Technik bereits seit den siebziger Jahren im Einsatz ist, wird dieser EF zu 0,03 kg/t gerundet und auf die gesamte Zeitreihe angewandt.

NMVOC–, CO– und SO_2–Emissionsfaktoren

In Deutschland wurden für sonstige Schadstoffe neben dem oben betrachteten Methan, die in der folgenden Tabelle aufgeführten Emissionsfaktoren verwendet.

Tabelle 174: In Deutschland verwendete Emissionsfaktoren für sonstige Schadstoffe, in [kg/t]

	CO	SO_2 [55]
1990	4,8/5	19,5/ ([56])
1991	4,6/5	19/20
1992	4,4/5	18,5/20
1993	4,2	18
1994	4	17,5
1995	3,75	17
1996	3,5	16
1997	3,25	15
1998	3	14
1999	2,9	13,4
2000	2,8	12,8
2001	2,7	12,54
2002	2,65	12,28
2003	2,6	12,0
2004	2,55	11,7
2005	2,5	11,5
2006	2,5	11,2
2007	2,5	10,9
2008	2,5	10,6
2009	2,5	10,3
ab 2010	2,5	10,0

Die Angaben der EF für CO und SO_2 bei der Herstellung von Industrieruß basieren auf dem BREF Large Volume Inorganic Chemicals - LVIC – S (European Commission (EC), 2007b) und sind identisch mit den im CORINAIR-Handbuch 2008 (First Order Draft) dargestellten Default-Werten.

Aktivitätsraten

In der Produktionsstatistik des Statistischen Bundesamtes werden die folgenden Produkte berücksichtigt (s. folgende Tabelle).

Tabelle 175: Meldenummern der Produktionsstatistik

Zeile	Industrieruß
bis 1994	4113 70
ab 1995 bis 2005	2413 11 300

[55] Bei zwei angegeben EF bezieht sich der zweite Wert auf die neuen Bundesländer.

[56] Für die neuen Bundesländer wird kein EF ausgewiesen, da diese SO_2-Emissionen nur pauschal in einer Summe berücksichtigt werden konnten.

Die Angabe für die Industrierußproduktion in den NBL 1990 entstammt dem statistischen Jahrbuch für die Bundesrepublik Deutschland (Statistisches Bundesamt (1992): S. 234), für 1991 und 1992 wurden sie wegen Geheimhaltung geschätzt. Die übrigen Daten für die Industrierußproduktion ab 1990 entstammen dem Statistischen Bundesamt (Statistisches Bundesamt (FS 4, R 3.1): Produzierendes Gewerbe, Produktion im Produzierenden Gewerbe). Ab 2005 wird die Aktivitätsrate aus den CO_2-Emissionen rückgerechnet über den Default Emissionsfaktor von CO_2.

4.3.8.2.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (2.B.8 Industrieruß)

Bei den Aktivitätsraten sind im Zeitablauf Schwankungen erkennbar, diese entsprechen aber im Wesentlichen den globalen wirtschaftlichen Schwankungen.

4.3.8.2.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (2.B.8 Industrieruß)

Eine allgemeine Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

4.3.8.2.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.B.8 Industrieruß)

Rückrechnungen sind nicht erforderlich.

4.3.8.2.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (2.B.8 Industrieruß)

Derzeit sind keine neuen Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

4.3.9 Chemische Industrie: Produktion von halogenierten Kohlenwasserstoffen und SF_6 (2.B.9)

KC	Category	Activity	EM of	1995 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1995-2024
L/T	2 B 9 a, By-product Emissions		HFC-23	C	C	C	C	C
-/-	2 B 9 b, Fugitive Emissions		SF_6	164,50	0,02	8,88	0,01	-94,60
-/-	2 B 9 b, Fugitive Emissions		HFC-134a	C	C	C	C	C
-/-	2 B 9 b, Fugitive Emissions		HFC-227ea	C	C	C	C	C
-/-	2 B 9 b, Fugitive Emissions		CF_4	C	C	C	C	C

Gas	angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
HFC	Tier 3b	PS	PS
SF_6	Tier 3b	PS	PS

Die Kategorie „Produktion halogenierter Kohlenwasserstoffe“ ist für HFC-23 -Emissionen aus Nebenprodukten eine Hauptkategorie nach dem Level und dem Trend. Die Kategorie ist unterteilt in Emissionen durch Nebenprodukte (2.B.9.a By-product Emissions) und in herstellungsbedingte Emissionen (2.B.9.b Fugitive Emissions).

4.3.9.1 Nebenprodukt-Emissionen (2.B.9.a)

4.3.9.1.1 Beschreibung der Kategorie (2.B.9.a)

Bei der Herstellung von HFCKW-22 fällt prozessbedingt bis zu 3 % HFKW-23 als Nebenprodukt an. Selbst bei Weiterverarbeitung (z.B. zu Kältemitteln) oder beim Auffangen zur stofflichen Zersetzung ist es technisch bedingt unvermeidlich, dass ein Teil des HFKW-23 in die Atmosphäre entweicht.

In Deutschland gab es zwei Produktionsanlagen für HFCKW-22, die von einem Unternehmen betrieben wurden, eine in Frankfurt und eine in Bad Wimpfen. Seit Inbetriebnahme der FCKW-Spaltanlage in Frankfurt im Jahr 1995 wurde der bei der HFCKW-22 Produktion entstehende überschüssige HFKW-23 dort direkt der Hochtemperaturspaltung mit Rückgewinnung von Flusssäure zugeführt, d.h. es entstanden keine nennenswerten Emissionen. Das an der zweiten deutschen Produktionsanlage entstandene HFKW-23 wurde quantitativ an der Produktionsanlage aufgefangen und entweder als Kältemittel oder - nach weitergehender destillativer Reinigung - als Ätzgas für die Halbleiterindustrie vermarktet. Der nicht verkäufliche Überschuss wurde seit 1999 nach Frankfurt an die Spaltanlage geliefert. Durch diese Maßnahme konnten die Emissionen maßgeblich gesenkt werden. Die HFCKW-22 Produktion wurde Mitte 2010 an einem Standort beendet und an dem anderen Standort soweit herunter gefahren dass nur noch die Teflonproduktion bedient wird. Die Produktionsmenge ist seither auf niedrigem Niveau konstant. Da die Anlage direkt mit der FCKW-Spaltanlage verbunden ist, treten nur sehr geringe Emissionen auf.

4.3.9.1.2 Methodische Aspekte (2.B.9.a)

Basierend auf Herstellerinformationen aus dem Jahr 1996 werden die HFKW-23-Emissionen für die Jahre 1990 bis 1994 als konstant angenommen.Für die Berechnung der HFKW-23-Produktionsmenge wurde ein Zwangsanfall von 3 % angenommen.

Seit 1995 wurden die Emissionen anhand der HFCKW-22 Produktionsmenge, einer jährlichen Messung der HFKW-23-Konzentration im Abgas, der HFKW-23 Verkaufsmenge und der Menge an HFKW-23, welche der Spaltanlage zugeführt wurde, vom Hersteller über eine Massenbilanz berechnet. Dabei wurden für das Berichtsjahr 1995 bei der ersten Produktionsanlage seit Jahresmitte Maßnahmen (Spaltanlage) zur Vermeidung von Emissionen zu Grunde gelegt. Seit dem Berichtsjahr 2011 werden die Produktionsmengen von Experten geschätzt und daraus die Emissionen ermittelt. Grundlage für die Schätzung sind vergleichbare Produktionsanlagen in anderen europäischen Ländern. 2019 erfolgte ein Abgleich der Annahmen mit dem zuständigen Industrievertreter. Seit 2020 übermittelt die Firma die Daten für die HFCKW-22- und HFKW-23-Produktion nicht nur an die EU, sondern auch vertraulich ans UBA.

Aktivitätsdaten

Es gibt nur einen Hersteller des HFCKW-22 in Deutschland. Die Daten des Unternehmens unterliegen daher der Vertraulichkeit. Die Emissions- und Produktionsmengen wurden dem Umweltbundesamt bis 2010 gemeldet, aber nur aggregiert berichtet. Von 2011 bis 2019 wurden die Produktions-mengen für den HFCKW-22 und den HFKW-23 von Experten geschätzt. Aufgrund der durch die Schätzung höheren Unsicherheit wurde weiterhin von einem HFKW-23-Zwangsanfall von 3 % ausgegangen. Die für 2020 bis 2022 vorliegenden Daten belegen, dass der Zwangsanfall weniger als 2 % beträgt, so dass in diesem Jahr eine Rekalkulation für die Jahre 2011 bis 2021 erfolgte.

Die Aktivitätsdaten des HFKW-23 werden mit denen der HFKW, FKW und SF_6 als *unspecified mix* in 2.B.9 berichtet.

Emissionsfaktoren

Es wurde seit 2011 von einem Zwangsanfall vom HFKW-23 von 0,03 kg pro kg HFCKW-22 ausgegangen. Neuere Daten bestätigen einen Zwangsanfall von 0,02 kg HFKW-23 pro kg HFCKW-22.

Der Emissionsfaktor bezog sich bis zum Jahr 2010 auf die HFKW-22-Produktionsmenge. Ab 2011 bezieht sich der Emissionsfaktor auf die anfallende HFKW-23 Menge und beträgt bis 2019 0,05 %. Da die entsprechende Anlage in einem direkten Rohrverbundsystem ist, welches direkt mit einer HFCKW Cracking Anlage verbunden ist, resultiert dies in einer sehr geringen Emissionsmenge. Mit den genauen Produktionszahlen ab 2020 wird der Emissionsfaktor auf 0,004 % gesetzt. Dies entspricht den 2019-Refinements, ((IPCC, 2019), Vol.3, page 3.19): *Should the vent gas be collected for treatment, thermal oxidation has been shown to reduce HFC-23 emission by 99.996 percent (Irving & Branscome, 1999).*

Emissionen

Die Emissionen des HFKW-23 wurden bis 2010 vom Hersteller mitgeteilt. Seit 2011 werden Expertenschätzungen und die Vorgaben der Guidelines, wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, herangezogen.

Da die Anzahl der Hersteller in Deutschland unter drei liegt, sind die Emissionen vertraulich. Die Emissionen des HFKW-23 werden unter 2.H.3 berichtet.

4.3.9.1.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (2.B.9.a)

Die für die Berechnung der Emissionen zu Grunde gelegten Annahmen werden in größeren regelmäßigen Abständen mit der Industrie überprüft. Sie werden mit 3 % als recht genau angenommen.

4.3.9.1.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (2.B.9.a)

Eine allgemeine Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Für eine Überprüfung der für die Emissionsberichterstattung ermittelten F-Gas Mengen als Grundlage zur Verifikation stehen außer den vom Statistischen Bundesamt und dem Produzenten zur Verfügung gestellten Daten keine weiteren Datenquellen zur Verfügung. Vergleiche mit anderen Ländern zeigen keinen Verbesserungsbedarf. Die Emissionsfaktoren liegen in derselben Größenordnung wie die anderer europäischer Länder.

4.3.9.1.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.B.9.a)

Rückrechnungen waren nicht erforderlich.

4.3.9.1.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (2.B.9.a)

Derzeit sind keine Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

4.3.9.2 Herstellungsbedingte Emissionen (2.B.9.b)

4.3.9.2.1 Beschreibung der Kategorie (2.B.9.b)

In Deutschland gibt es zwei Unternehmen, die an zwei Standorten HFKW produzieren. Eins der Unternehmen produziert auch SF_6. Die Emissionsentwicklung geht mit der Entwicklung der

Produktionsmengen einher. Während SF_6 und der HFKW-134a in Deutschland produziert werden, fand für den HFKW-227ea bis zum Jahr 2008 keine vollständige Synthese in Deutschland statt. Vielmehr wurde ein Teil des im spanischen Tarragona produzierten HFKW-227ea einer abschließenden Destillation in Deutschland unterzogen, um pharmazeutische Reinheit zu erzielen (Einsatz in Dosieraerosolen). Dabei entstanden Emissionen aufgrund geringfügiger Gasverluste.

Der HFKW-227ea wird seit 1996 produziert.

Die Emissionen des HFKW-227ea steigen, parallel zu den steigenden Produktionsmengen, seit 2009 an. Eine Ausnahme bildet das Jahr 2012, in dem weniger HFKW-227ea verkauft wurde und damit auch weniger Emissionen auftraten.

Zwischen 1990 und 1994 wurde in Deutschland auch CF_4 (FKW-14) produziert. Der HFKW-134a wurde von 1994 bis 2021 produziert.

4.3.9.2.2 Methodische Aspekte (2.B.9.b)

Emissionsfaktoren

Aus den vom Hersteller bis 2009 gemeldeten Emissions- und Produktionsmengen wurden Emissionsfaktoren errechnet. Durch emissionsbegrenzende Maßnahmen (Einbau eines Plasmabrenners) konnte der Emissionsfaktor für SF_6 ab 2014 gesenkt werden. Alle Emissionsfaktoren wurden 2019 durch Gespräche mit Industrievertretern überprüft.

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens und nach Rücksprache mit der Firma wurde der Emissionsfaktor der SF_6-Produktion erhöht. Eine Rekalkulation kann aus Vertraulichkeitsgründen hier nicht erfolgen.

Aktivitätsdaten

Da jeweils nur maximal zwei Hersteller in Deutschland existieren, unterliegen die Daten der Unternehmen der Vertraulichkeit. Die Emissions- und Produktionsmengen wurden dem Umweltbundesamt bis 2010 gemeldet, aber nur aggregiert berichtet. Seit 2011 werden die Daten des Statistischen Bundesamtes verwendet. Für SF_6 gilt dies noch heute. Seit dem Berichtsjahr 2020 werden die FCKW-22 und HFKW-23 Produktionsmengen und ab 2021 die Produktionsmenge für den HFKW-227ea direkt von den Firmen ans UBA gemeldet, damit sie rechtzeitig vorliegen.

Emissionen

Da die Anzahl der Hersteller in Deutschland unter drei liegt, sind die Emissionen der HFKW vertraulich. Die Emissionen der HFKW aus der Produktion werden unter 2.H.3 berichtet.

Unter 2.B.9.b werden nur noch die Emissionen von SF_6 berichtet.

4.3.9.2.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (2.B.9.b)

Die für die Berechnung der Emissionen zu Grunde gelegten Produktionszahlen können als sehr genau angenommen werden, da es sich um interne Aufzeichnungen der Hersteller handelt bzw. um offizielle statistische Erhebungen. Die Unsicherheiten der Emissionen werden mit 3 % angenommen.

4.3.9.2.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (2.B.9.b)

Eine allgemeine Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Für eine Überprüfung der für die Emissionsberichterstattung ermittelten F-Gas Mengen als Grundlage zur Verifikation stehen außer den vom Statistischen Bundesamt zur Verfügung gestellten Daten keine weiteren Datenquellen zur Verfügung. Vergleiche mit anderen Ländern zeigen keinen Verbesserungsbedarf. Die Emissionsfaktoren liegen in derselben Größenordnung wie die anderer europäischer Länder.

4.3.9.2.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.B.9.b)

Rückrechnungen waren für die Emissionen von SF_6 für die Berichtsjahre 2014 und 2023 aufgrund neuerer Forschungsergebnisse notwendig.

4.3.9.2.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (2.B.9.b)

Derzeit sind keine Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

4.3.10 Chemische Industrie - Sonstige: Emissionen aus sonstigen Produktionsprozessen (2.B.10)

KC	Category	Activity	EM of	1995 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1995-2024
-/-	2 B 10, Other Chemical Industry		CH_4	3,87	0,01	1,11	0,01	-71,26
-/-	2 B 10, Other Chemical Industry		N_2O	C	C	C	C	C

Die Kategorie „Sonstige: Emissionen aus sonstigen Produktionsprozessen“ ist keine Hauptkategorie.

4.3.10.1 Beschreibung der Kategorie (2.B.10)

Unter dieser Kategorie werden die Vorläufersubstanzen der Treibhausgase aus der Produktion von Düngemitteln und Schwefelsäure berichtet. N_2O-Emissionen aus der Produktion von 1,12-Dodecandisäure (DDS) werden zwar hier beschrieben, aber aus Vertraulichkeitsgründen mit in 2.B.3 Adipinsäure-Produktion erfasst. 1,12-Dodecandisäure ist wie Adipinsäure eine Dicarbonsäure, bei deren Herstellung Salpetersäure eingesetzt wird. In Deutschland gibt es einen Hersteller.

Darüber hinaus werden unter „Lagerung chemischer Produkte“ sämtliche Mineralölprodukte betrachtet, die nicht als Brennstoffe genutzt werden (siehe hierzu Kapitel 3.3.2.1.5). Während die Brennstoffe unter 1.B.2 berichtet werden, sind die chem. Produkte unter 2.B.10 zu finden.

Zu dieser Kategorie gehört auch die Reinigung der Rohöl- und Mineralölproduktenlagertanks und der Transportbehältertanks. Für den Umschlag und Transport kommen Binnentankschiffe, Pipelines, Eisenbahnkesselwagen und Straßentankfahrzeuge zum Einsatz.

4.3.10.2 Methodische Aspekte (2.B.10)

N_2O – Emissionen

Die N_2O-Emissionen der Dodecandisäureproduktion wurden bis 2004 nur über Abgasrückführung und Abgaswäscher behandelt. Seit 2005 wird das Lachgas thermisch zersetzt. Ab 2013 wurde N_2O über eine zweite Anlage zusätzlich (redundant) thermisch zersetzt. Ab 2021 ging eine neue thermische Nachverbrennung in Betrieb. Die N_2O-Emissionen werden in der Abgasbehandlungsanlage massiv reduziert. Die N_2O-Emissionsdaten der Jahre 1998 bis 2024

stammen vom Hersteller. Für die Jahre 1990 bis 1997 wurden die N_2O-Emissionen aus Daten der Jahre 1998 bis 2004, als es noch keine thermische Lachgaszersetzung gab, über eine Mittelwertbildung berechnet. Vertrauliche Produktionsmengen für ausgewählte Jahre liegen aus einer Datenerhebung beim Hersteller vor.

CH_4 - Emissionen

Die Auswertung von mehreren Forschungsvorhaben hat zu neuen Erkenntnissen geführt. Die Berechungsverfahren und Emissionsfaktoren sind in einer separaten Publikation veröffentlicht (Böttcher, 2025).

4.3.10.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (2.B.10)

Durch die Datenerhebung beim Hersteller wurde die Datengrundlage zu N_2O-Emissionen aus der Produktion von 1,12- Dodecandisäure verbessert, insbesondere die Zeitreihe in Trend und Konsistenz. Die Unsicherheit der N_2O-Emissionen wird auf ±40 % geschätzt, könnte aber nach Klärung einiger Details anders ausfallen.

Für den Bereich Lagerung und Reinigung werden die Unsicherheiten der Emissionsfaktoren auf 177 % und der Aktivitätsraten auf 65 % eingeschätzt. Diese Angaben beruhen auf Schätzungen von nationalen Experten sowie aus dem Forschungsbericht von Müller BBM, (Bender, 2009), (Theloke et al., 2013) und (Zimmermann et al., 2025).

4.3.10.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (2.B.10)

Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt. Daten anderer Länder oder andere Quellen zum Vergleich der erhaltenen Daten bzw. Verifizierung der Lachgas-Emissionen aus der Dodecandisäureherstellung konnten nicht gefunden werden.

4.3.10.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.B.10)

Auf Grund der Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben gab es Rückrechnungen, die in folgender Veröffentlichung aufgezeigt werden (Böttcher, 2025).

4.3.10.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (2.B.10)

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

4.4 Metallproduktion (2.C)

Die Kategorie 2.C ist unterteilt in die Unterpunkte 2.C.1 bis 2.C.7. Dem Unterpunkt Eisen-und Stahlproduktion (2.C.1) sind in der Emissionsdatenbank ZSE die Sinterproduktion, die Roheisenproduktion, die Erzeugung von Eisenschwamm (direkt reduziertem Eisen; *engl.* DRI), die Stahlerzeugung und die Eisen-, Stahl- und Tempergussproduktion zugeordnet. Die Produktion von Ferrolegierungen (2.C.2) ist in Deutschland von untergeordneter Bedeutung und wird daher im vorliegenden Bericht nicht weiter untergliedert. Die Aluminiumproduktion (2.C.3) untergliedert sich in Hüttenaluminium und Umschmelzaluminium. Für die Anwendung von SF_6 in der Aluminium- und Magnesiumproduktion (2.C.4) gibt es keine weiteren Untergliederungen. Der Unterpunkt (2.C.5) umfasst im ZSE die Bleiproduktion. (2.C.6) beinhaltet die Zinkproduktion. Unter (2.C.7) werden die Kupferproduktion (2.C.7a), die Nickelproduktion (2.C.7b) und Sonstige (2.C.7c) zusammengefasst. Aus diesen Kategorien resultieren in Deutschland keine Treibhausgasemissionen.

4.4.1 Metallproduktion: Eisen und Stahl (2.C.1)

4.4.1.1 Beschreibung der Kategorie (2.C.1)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
L/T	2 C 1, Iron and Steel Production		CO_2	22810,29	1,77	16386,42	2,32	-28,16
-/-	2 C 1, Iron and Steel Production		CH_4	5,22	0,01	5,04	0,01	-3,51
-/-	2 C 1, Iron and Steel Production		N_2O	23,60	0,01	12,92	0,01	-45,26

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2	Tier 2	NS	CS
CH_4	Tier 2	NS	CS
N_2O	CS	NS	CS
NO_x, CO, NMVOC, SO_2	Tier 2	NS	CS

Die Kategorie „Eisen- und Stahlproduktion“ ist für CO_2-Emissionen eine Hauptkategorie nach der Emissionshöhe und dem Trend. In dieser Kategorie fallen neben Kohlendioxid- auch geringfügige Emissionen von Methan und Lachgas an. Die Methanemissionen resultieren aus der Walzstahlerzeugung. Das Lachgas stammt aus der Primärstahlproduktion, wo es beim Einsatz von Gichtgas in den Winderhitzern entsteht.

Da die CRF-Reporter-Software eine Zuordnung von Lachgas unter 2.C.1 nicht ermöglicht, wird es stattdessen unter 2.C.7 berichtet.

In Deutschland wurden im Jahr 2024 26,5 Mio. t Rohstahl auf Erzbasis in sechs integrierten Hüttenwerken erzeugt. Die Elektrostahlproduktion betrug 10,8 Mio. t.

4.4.1.2 Methodische Aspekte (2.C.1)

Dieser Sektor umfasst die prozessbedingten Emissionen aus der Primärstahlerzeugung (via Sinteranlage, Hochofen und Oxygenstahlwerk), aus Elektrostahlwerken sowie aus der Walzstahlerzeugung.

Weitere Strukturelemente in dieser Kategorie (Gießereien: Eisen-, Stahl- und Temperguss-produktion) dienen der Berechnung anderer Schadstoffemissionen (nicht von Treibhausgasen).

Die prozessbedingten CO_2-Emissionen aus der Primärstahlerzeugung in integrierten Hüttenwerken resultieren vor allem aus dem Reduktionsmitteleinsatz in den Hochöfen. Zudem werden die CO_2-Emissionen aus dem Kalksteineinsatz in Sinteranlagen und bei der Roheisenerzeugung (einschließlich der CO_2-Emissionen aus den von der Stahlindustrie selbst betriebenen Kalköfen) sowie die CO_2-Emissionen aus dem Elektrodenabbrand bei der Elektrostahlerzeugung den prozessbedingten Emissionen im Sektor 2.C.1 zugerechnet.

Eine Produktion von Eisenschwamm - direkt reduziertem Eisen (*engl.* DRI) erfolgt in Deutschland nur in geringem Umfang (weniger als 0,6 Mio. t. pro Jahr). Jährliche Angaben zur Produktionsmenge sind für die gesamte Zeitreihe vorhanden, sind aber vertraulich, weil sie sich bisher nur auf eine einzige Anlage beziehen.

Die bei der Produktion von Eisenschwamm entstehenden CO_2-Emissionen resultieren aus dem Einsatz von Erdgas bzw. dem daraus erzeugten Gemisch der Reduktionsgase H_2 und CO. Die eingesetzte Menge an Erdgas ist über die gesamte Zeitreihe in den unter 1.A.2.a berichteten

Einsätzen von Erdgas in der Stahlindustrie enthalten. Die CO_2-Emissionen aus der Produktion von Eisenschwamm sind folglich ebenso über die gesamte Zeitreihe in den unter 1.A.2.a berichteten Emissionen enthalten.

Eine gesonderte Ausweisung prozessbedingter CO_2-Emissionen aus der Produktion von Eisenschwamm unter 2.C.1 ist nicht möglich, weil gesonderte Angaben zur hierzu verwendeten Menge an Erdgas aus Gründen der Vertraulichkeit nicht vorliegen und anderenfalls hieraus auf die vertraulichen Angaben zur Produktionsmenge der betreffenden Anlage zurückgeschlossen werden könnte.

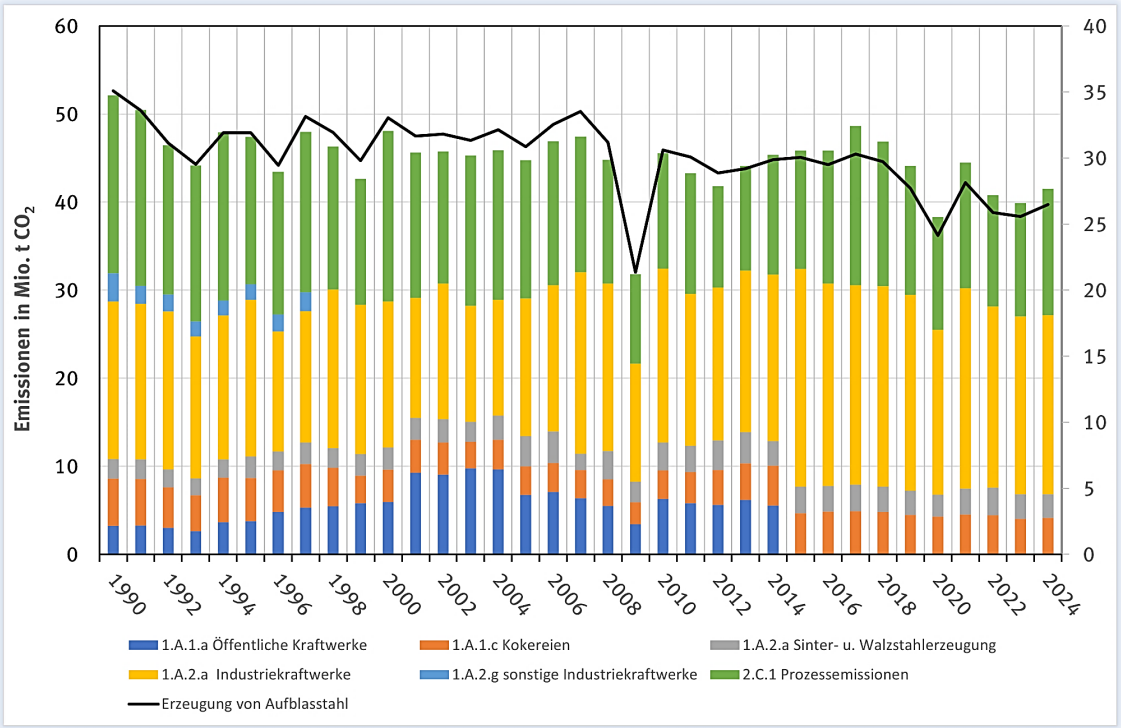
Methode zur Berechnung der aus dem Reduktionsmitteleinsatz in den Hochöfen resultierenden CO_2-Emissionen

Den *IPCC Guidelines* zufolge sind die CO_2-Emissionen in Kategorie 2.C.1 über eine Kohlenstoffbilanz zu ermitteln. Hintergrund ist, dass praktisch sämtlicher Kohlenstoff, der in die die Hochöfen eingebracht wird, bei der späteren energetischen Nutzung oder Abfackelung des im Hochofen gebildeten Gichtgases oder des im Oxygenstahlkonverter gebildeten Konvertergases als CO_2 in die Atmosphäre abgegeben wird. Der Anteil des Roheisens, der nicht zu Stahl weiterverarbeitet wird, beträgt maximal 1 %, daher ist der darin enthaltene Kohlenstoffanteil im Vergleich zu den mit dem Reduktionsmitteleinsatz verbundenen CO_2-Emissionen nicht relevant (ca. 0,1 %). Analoges gilt für den Kohlenstoffanteil im erzeugten Stahl, der nach überschlägiger Rechnung in der Größenordnung von 60.000 t/a liegt und somit dem Kohlenstoffeintrag über die eingesetzten Rohstoffe (Erze und Schrotte) entspricht[57].

Der Reduktionsmitteleinsatz im Hochofen und der Materialeinsatz im Konverter werden statistisch sehr detailliert erfasst. Diese Daten werden dem UBA von der WV Stahl jährlich übermittelt. Die Kohlenstoffgehalte der einzelnen Materialien werden aus den Emissionshandelsdaten berechnet. Weiterhin stehen CO_2 Emissionsfaktoren für die Nutzung von Hochofen- und Konvertergas aus dem Emissionshandel zur Verfügung. Die eingesetzten Gasmengen werden aus der Energiestatistik entnommen. Die Berechnung über den Kohlenstoffeintrag auf der einen Seite und dem Kohlenstoffaustrag in Form der Hochofen-/ Konvertergasnutzung führt zu einer Differenz. Diese CO_2 Emissionen werden in der Kategorie 2.C.1 berichtet. Die energetische Nutzung von Gichtgas und Konvertergas findet nur zum Teil in der Kategorie 2.C.1 statt (namentlich in den Winderhitzern am Hochofen), daneben wird es für andere Prozessfeuerungen in der Eisen- und Stahlindustrie (1.A.2.a), in Kokereien zur Koksofenunterfeuerung (1.A.1.c) sowie in öffentlichen (1.A.1.a) oder Industriekraftwerken (1.A.2.f) zur Stromerzeugung genutzt. Für alle genannten Kategorien liefert die Energiestatistik Angaben zum Gicht- und Konvertergasverbrauch. Folglich teilen sich die aus dem Reduktionsmitteleinsatz zur Primärstahlerzeugung resultierenden CO_2-Emissionen auf alle Kategorien auf, in denen das Gicht- und Konvertergas verbrannt und somit tatsächlich CO_2 emittiert wird (siehe folgende Abbildung).

[57] Der durchschnittliche Kohlenstoffanteil der über 2000 Stahlsorten, die in Deutschland erzeugt werden, wird statistisch nicht erfasst. Nach Angaben der Werke im Rahmen des Emissionshandels wird der durchschnittliche Kohlenstoffgehalt des erzeugten Rohstahls auf 0,15 % geschätzt. Nach überschlägiger Rechnung deckt sich der nicht energetische Kohlenstoffaustrag über den erzeugten Stahl mit dem Kohlenstoffeintrag über das Erz (Kohlenstoffgehalt ca. 0,1 %) sowie den eingesetzten Schrott (Kohlenstoffgehalt ca. 0,15 %),

Abbildung 44: Zeitlicher Verlauf und Kategorienzuordnung der aus dem Reduktionsmitteleinsatz zur Primärstahlerzeugung bzw. Gichtgasaufkommen resultierenden CO_2-Emissionen



Quelle: eigene Darstellung, UBA

Die Summe der dargestellten CO_2-Emissionen zeigt eine gute Korrelation mit den berichteten Aktivitätsraten für die Primärstahlerzeugung (siehe schwarze Linie). Jährliche Schwankungen in den einzelnen Kategorien beruhen vermutlich auf wechselnden Zuordnungen einzelner Anlagen in der amtlichen Statistik. Dies hat jedoch keinen Einfluss auf die Gesamtsumme der berichteten Emissionen.

Tabelle 176: CO_2 aus der Primärstahlerzeugung (einschließlich Gichtgasnutzung), in [Mt]

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019
1.A.1.a Öffentliche Kraftwerke	3,244	3,764	5,956	6,738	6,276	0,013	0,000	0,000	0,000	0,000
1.A.1.c Kokereien	5,340	4,924	3,652	3,247	3,245	4,648	4,872	4,910	4,809	4,479
1.A.2.a Sinter- u. Walzstahlerzeugung	2,228	2,445	2,520	3,461	3,198	3,015	2,912	2,990	2,872	2,752
1.A.2.a Industriekraftwerke	17,886	17,759	16,573	15,607	19,714	24,735	22,955	22,653	22,756	22,224
1.A.2.g sonstige Industriekraftwerke	3,206	1,770	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2.C.1 Prozessemissionen	20,228	16,736	19,379	15,711	13,126	13,436	15,101	18,088	16,451	14,669
	2020	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**					
1.A.1.a Öffentliche Kraftwerke	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000					
1.A.1.c Kokereien	4,275	4,537	4,436	4,016	4,144					
1.A.2.a Sinter- u. Walzstahlerzeugung	2,501	2,926	3,153	2,804	2,691					
1.A.2.a Industriekraftwerke	18,736	22,749	20,544	20,197	20,337					
1.A.2.g sonstige Industriekraftwerke	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000					
2.C.1 Prozessemissionen	12,788	14,282	12,669	12,882	14,350					

Sekundärbrennstoffe wurden in der Eisen- und Stahlindustrie nur von 1996 bis 2019 bei der Erzeugung von Roheisen im Hochofenprozess eingesetzt, zuletzt aber nur noch von einem Werk in sehr geringem Umfang. Diese Materialien waren in nationalen Statistiken und der Energiebilanz nicht enthalten. Als Datenquelle wurden daher Angaben der Wirtschaftsvereinigung Stahl genutzt. Da die Sekundärbrennstoffe ausschließlich als Ersatzreduktionsmittel an Stelle von Koks eingesetzt werden, sind die aus ihrem Einsatz resultierenden CO_2-Emissionen ebenfalls in den über den Gichtgas- und Konvertergaseinsatz ermittelten CO_2-Emissionen enthalten und müssen nicht gesondert berechnet werden.

Ermittlung der CO_2-Emissionen aus dem Kalksteineinsatz bei der Roheisenerzeugung

Die CO_2-Emissionen aus dem Kalksteineinsatz werden nach Tier 1 bestimmt (Lechtenböhmer, Nanning, et al. (2006a), FKZ 20541217/02). Die Stahlindustrie setzt Kalkstein ($CaCO_3$) in der Sinteranlage und bei der Roheisenerzeugung im Hochofen ein. In den Oxygenstahl- sowie den Elektrostahlwerken wird hingegen gebrannter Stahlwerkskalk (CaO) als Schlackenbildner eingesetzt, der in der Regel von Kalkindustrie zugekauft wird. Die bei der Erzeugung des zugekauften Branntkalks freigesetzten CO_2-Emissionen werden bereits unter 2.A.2 berichtet.

Lediglich ein Stahlwerk deckt seinen Kalkbedarf mit Hilfe eigener Kalkbrennöfen, deren Produktionsmenge und damit verbundene CO_2-Emissionen nicht in den unter 2.A.2 berichteten Daten enthalten sind. Die Produktionsmenge dieser Kalköfen wurde auf Basis verfügbarer Angaben zur Rohstahlerzeugung des Werks geschätzt und mit Angaben aus dem CO_2-Emissionshandel verglichen. Da sich dabei eine gute zahlenmäßige Überstimmung mit den von der Deutschen Emissionshandelsstelle (DEHSt) verifizierten und veröffentlichten Emissionen (siehe jährliche VET-Berichte) herausstellte, wird die Produktionsmenge der Kalköfen ab dem Jahr 2005 mit den VET-Angaben gleichgesetzt. Aus den so ermittelten AR werden in 2.C.1 – analog zu 2.A.2 – nur die über einen stöchiometrischen EF berechneten rohstoffbedingten CO_2-Emissionen berichtet (siehe Tabelle 177). Die CO_2-Emissionen aus dem Energieeinsatz in den stahlwerkseigenen Kalköfen, der in der Energiebilanz nicht gesondert ausgewiesen werden, sind in den unter 1.A.2.a berichteten Emissionen enthalten.

Die Kalksteineinsätze bei der Sinter- und Roheisenherstellung wurden bis 2004 in der Eisen- und Stahlstatistik veröffentlicht (Statistisches Bundesamt, FS 4, R 8.1), seitdem müssen sie aus den im Rahmen des BGS-Bogens berichteten Produktionsmengen von Sinter und Roheisen über spezifische Einsatzfaktoren (d. h. kg Kalkstein pro t Sinter oder Roheisen) berechnet werden. Die Aktivitätsraten des Kalksteineinsatzes werden mit dem stöchiometrischen Emissionsfaktor für Kalkstein multipliziert und ergeben dann die in Tabelle 177 angegebenen CO_2-Emissionen.

Tabelle 177: Kalksteineinsatz sowie Eigenerzeugung von Branntkalk in der Stahlindustrie und daraus resultierende CO_2-Emissionen, in [t/a]

Jahr	AR-Kalksteineinsatz		AR-Eigenerzeugung	CO_2-Emissionen		
	Hochofen	Sinteranlage	Branntkalk	Kalksteineinsatz (EF = 440 kg/t)	Kalkerzeugung (EF = 746 kg/t)	SUMME
1990	755.737	4.680.775	153.918	2.392.065	114.823	2.506.888
1995	751.000	4.600.000	139.973	2.354.440	104.420	2.458.860
2000	924.000	4.273.000	144.991	2.286.680	108.163	2.394.843
2005	787.724	4.306.067	136.510	2.241.268	101.836	2.343.105
2010	799.679	4.045.042	133.254	2.131.677	99.407	2.231.085
2015	794.999	3.987.196	147.863	2.104.166	110.306	2.214.472
2016	780.445	3.750.267	130.871	1.993.514	97.630	2.091.143
2017	797.856	4.120.243	152.537	2.163.964	113.793	2.277.756
2018	779.356	3.926.906	153.036	2.070.755	114.165	2.184.920
2019	727.895	4.003.122	142.501	2.081.647	106.306	2.187.953
2020	644.097	3.375.375	127.174	1.768.568	94.872	1.863.439
2021	733.223	3.865.442	153.749	2.023.412	114.697	2.138.109
2022	672.161	3.637.592	129.985	1.896.292	96.969	1.993.260
2023	661.780	3.604.823	131.481	1.877.305	98.085	1.975.390
2024	684.082	3.551.268	124.745	1.863.554	93.060	1.956.614

Quelle: bis 2004: Berechnung der Kalksteineinsätze im Projekt Kalksteinbilanz ((Lechtenböhmer, Nanning, et al., 2006a), FKZ 20541217/02), ab 2005: Berechnung über die im o.g. Projekt ermittelten produktspezifischen Faktoren

Ermittlung der CO_2-Emissionen aus dem Elektrodenabbrand bei der Elektrostahlherstellung

Bei der Elektrostahlherstellung entstehen direkte CO_2-Emissionen durch den Abbrand der Graphitelektroden, die ebenfalls den prozessbedingten CO_2-Emissionen der Stahlerzeugung zuzurechnen sind. Sie werden aus der Menge des produzierten Elektrostahls über einen in 2009 im Rahmen eines Forschungsvorhabens (Hensmann et al., 2012) aktualisierten Emissionsfaktor (7,4 kg/t) berechnet, der auf dem spezifischen Elektrodenverbrauch pro t Elektrostahl (2,06 kg/t), dessen Kohlenstoffgehalt (98 %) sowie dem stöchiometrischen Faktor (3,667 t CO_2/t C) basiert. Der Beitrag des Elektrodenabbrands bei der Elektrostahlherstellung ist mit ca. 0,2 % der gesamten CO_2-Emissionen der Eisen- und Stahlerzeugung unbedeutend.

Ermittlung der insgesamt unter 2.C.1 zu berichtenden CO_2-Emissionen der Eisen- und Stahlproduktion

Die insgesamt unter 2.C.1 zu berichtenden prozessbedingten Emissionen setzen sich wie folgt zusammen:

1. die aus dem Reduktionsmitteleinsatz zur Primärstahlerzeugung resultierenden CO_2-Emissionen, soweit das Gicht- und Konverter-Gas nicht in anderen Kategorien eingesetzt und folglich dort als CO_2-Emissionen berichtet wird
2. den CO_2-Emissionen aus dem Kalksteineinsatz bei der Roheisenerzeugung sowie der Eigenerzeugung an Branntkalk und
3. den CO_2-Emissionen aus dem Elektrodenabbrand bei der Elektrostahlherstellung

Die so ermittelten Emissionsmengen sind Tabelle 178 zu entnehmen.

Tabelle 178: Insgesamt unter 2.C.1 zu berichtende prozessbedingte Emissionen, in [t/a]

Jahr	CO_2 aus dem Reduktionsmitteleinsatz, soweit nicht in anderen Kategorien berichtet	CO_2 aus Kalksteineinsatz & der Eigenerzeugung an Branntkalk	CO_2 aus dem Elektrodenabbrand	2.C.1 gesamt
1990	15.713.306	2.506.888	75.242	18.295.436
1995	16.736.415	2.458.860	75.058	19.270.333
2000	19.378.699	2.394.843	98.598	21.872.139
2005	15.710.560	2.343.105	101.136	18.154.800
2010	13.125.861	2.231.085	97.792	15.454.738
2015	13.435.683	2.214.472	93.401	15.743.556
2016	15.100.984	2.091.143	93.193	17.285.321
2017	18.088.074	2.277.756	96.250	20.462.081
2018	16.451.045	2.184.920	94.002	18.729.967
2019	14.669.497	2.187.953	88.099	16.945.549
2020	12.787.503	1.863.439	85.360	14.736.302
2021	14.281.570	2.138.109	89.474	16.509.153
2022	12.668.622	1.993.260	81.305	14.743.187
2023	12.882.079	1.975.390	72.645	14.930.114
2024	14.349.724	1.956.614	80.087	16.386.424

4.4.1.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (2.C.1)

Die Zeitreihenkonsistenz ist gegeben, da die Aktivitätsraten bei allen Anlagen erhoben und die Emissionen für alle Jahre nach derselben Methode ermittelt wurden. Da die Aktivitätsraten für das Jahr 2017 von der WV Stahl aufgrund wettbewerbsrechtlicher Probleme nicht vereinbarungsgemäß bereitgestellt werden konnten, wurden ersatzweise für das Jahr 2017 aggregierte Werte aus dem Emissionshandel verwendet. Die Konsistenz der Angaben aus dem Emissionshandel wurde anhand von Vergleichswerten für vorangegangene Jahre überprüft; die Abweichungen betragen unter 1 %, nur bei der Sinterproduktion sind sie geringfügig höher (maximal +8 %).

Bei den CO_2-Emissionen aus dem Kalksteineinsatz gab es von 2004 zu 2005 einen Methodenbruch durch den Wegfall der bis 2004 verwendeten Datenquelle. Die Entwicklung der Zeitreihe erscheint jedoch trotz Methodenbruch plausibel. Aufgrund der notwendigen Berechnung beträgt die Unsicherheit der Aktivitätsrate hier ±10 %. Eine erhöhte Unsicherheit weist auch die auf Basis der verifizierten Emissionsdaten aus dem CO_2-Emissionshandel geschätzte Aktivitätsrate für die Eigenerzeugung an Branntkalk auf; die damit verbundenen CO_2-Emissionen sind allerdings vergleichsweise unbedeutend.

Die Unsicherheit des Emissionsfaktors für den Elektrodenabbrand beträgt ±3 %, bei den übrigen Daten liegt die Unsicherheit bei ±5 %. Die Unsicherheiten beruhen nur auf Mess- und Analyseungenauigkeiten.

4.4.1.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (2.C.1)

Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung, die den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen entsprechen, wurden durch die Nationale Koordinierungsstelle durchgeführt.

Die Aktivitätsraten werden gemäß einer Kooperationsvereinbarung mit der Wirtschaftsvereinigung Stahl von dieser zusammengetragen und dem Umweltbundesamt jährlich übermittelt. Die Zeitreihe erscheint plausibel und weist keine Inkonsistenzen auf. Es wird davon ausgegangen, dass diese Angaben vereinbarungsgemäß qualitätsgesichert erhoben werden.

Die Emissionsermittlung in den Kategorien 1.A.2.a und 2.C.1 ist eine komplexe Aufgabe, da es zwischen der Energiebilanz, der Emissionsberichterstattung, dem Emissionshandel sowie den Verbandsstatistiken große methodische Unterschiede gibt. Zur Sicherung der Datenqualität werden von der Fachseite und der Nationale Koordinierungsstelle anlassbezogen Expertengespräche durchgeführt, in denen die Daten verglichen und bewertet werden. Aufgrund der methodischen Unterschiede ist eine Plausibilitätskontrolle der ermittelten Emissionsmengen mit den Daten der deutschen Emissionshandelsstelle nur auf einer hoch aggregierten Ebene möglich.

Eine Plausibilisierung der für diese Kategorie ermittelten Emissionen anhand der vom Klimasekretariat ermittelten implizierten Emissionsfaktoren (IEF) ist:

1. aufgrund des von Land zu Land sehr unterschiedlichen Anteils der CO_2-intensiven Primärstahlerzeugung an der gesamten Stahlerzeugung,
2. aufgrund der von Land zu Land unterschiedlichen Allokation der daraus resultierenden Emissionen auf die Kategorien 1.A.2.a, 2.C.1 sowie ggf. weitere Kategorien, in denen die bei der Eisen- und Stahlerzeugung anfallenden Prozessgase energetisch genutzt werden, und
3. aufgrund der von Land zu Land unterschiedlich berichteten Aktivitätsraten unter 2.C.1, deren Addition zudem z.T. nicht sachgerecht ist, nicht möglich.

Die genannten Faktoren führen zu einer extremen Streuung der ermittelten IEF für die genannten Kategorien, die keinen Rückschluss auf die „Richtigkeit“ der ermittelten Emissionen ermöglichen.

4.4.1.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.C.1)

Das Ersetzen von Daten gemäß vorläufiger Energiebilanz durch Daten aus der endgültigen Energiebilanz führt zu Rückrechnungen für das Jahr 2023.

4.4.1.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (2.C.1)

Derzeit sind keine neuen Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

4.4.2 Metallproduktion: Ferrolegierungen (2.C.2)

4.4.2.1 Beschreibung der Kategorie (2.C.2)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
-/-	2 C 2, Ferroalloys Production		CO_2	429,00	0,04	5,74	0,01	-98,66
-/-	2 C 2, Ferroalloys Production		CH_4	9,61	0,01	1,75	0,01	-81,75

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2	CS	IS	CS
NO_X, CO, NMVOC, SO_2			NE

Die Kategorie „Produktion von Ferrolegierungen“ ist keine Hauptkategorie.

Ferrolegierungen sind Zuschlagsstoffe, mit denen Stahl legiert wird. In Deutschland existieren fünf Hersteller von Ferrolegierungen: Ferrochrom, Ferrosilizium und Siliziummetall werden jeweils nur von einem Unternehmen hergestellt; weitere Ferrolegierungen nur in sehr geringem Umfang. Seit 1995 wird ausschließlich das Elektro-Lichtbogen-Verfahren verwandt, bei dem nur aus dem Elektrodenabbrand geringe Mengen an prozessbedingtem CO_2 freigesetzt werden.

Bis 1995 kam teilweise das Hochofenverfahren zum Einsatz, das mit vergleichsweise höheren CO_2-Emissionen verbunden war.

4.4.2.2 Methodische Aspekte (2.C.2)

Der verwendete CO_2-Emissionsfaktor zu beiden genannten Verfahren (Hochofen- und Elektro-Lichtbogen-Verfahren) wurden in dem Forschungsvorhaben „NEU-CO_2" (FKZ 203 41 253/02, Weiß et al. (2006)) ermittelt.

Er ist deutlich niedriger als der Standard-Emissionsfaktor nach IPCC-Guidelines 2006. Das liegt daran, dass unter 2.C.2 nur die prozessbedingten CO_2-Emissionen aus dem Elektrodenabbrand berücksichtigt werden. Die übrigen CO_2-Emissionen aus dem Verbrauch von Reduktionsmitteln werden aufgrund der Struktur der nationalen Energiebilanz unter 1.A.2 eingeordnet. Die Verwendung des Standard-Emissionsfaktors würde daher zu einer unzulässigen Doppelzählung führen.

Für die Berechnung der Methan-Emissionen wird der Standard-Emissionsfaktor nach IPCC-Guidelines 2006 genutzt.

Für die Aktivitätsrate wurden für die Jahre 1990 bis 1994 Daten aus der amtlichen Produktionsstatistik des Statistischen Bundesamtes verwendet. Seit 1995 wird auf Daten des *British Geological Survey* (Idoine et al., 2025) zurückgegriffen, weil keine nutzbaren Daten mehr in der amtlichen Produktionsstatistik enthalten sind. Die aktuell verfügbaren Daten stammen aus dem Jahr 2021. Für das Jahre 2024 ist die Aktivitätsrate fortgeschrieben worden.

4.4.2.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (2.C.2)

Die Aktivitätsraten des British Geological Survey beruhen teilweise auf Schätzungen und sind daher mit vergleichsweise hohen Unsicherheiten behaftet. Die Unsicherheit für die Aktivitätsrate wird auf ±50 % geschätzt.

Die Daten des British Geological Survey werden zudem regelmäßig mit Daten des *US Geological Survey* (USGS) verglichen. Die Daten des USGS liegen dabei zwar in derselben Größenordnung,

weisen aber einen geringeren Detail- und höheren Aggregationsgrad auf. Aus diesem Grund werden die Daten des British Geological Survey bevorzugt.

Für die Jahre 2001 bis 2006 liegen auch Daten des Statistischen Bundesamtes zum Absatz von Ferrolegierungen vor, welche aber um Faktor 0,7 unter den Produktionsdaten des British Geological Survey liegen. Aus Gründen der Zeitreihenkonsistenz werden daher auch für diese Jahre die Daten des British Geological Survey verwendet.

Die deutliche Abnahme des CO_2-Emissionsfaktors von 1994 zu 1995 bedeutet ebenfalls keine Inkonsistenz, sondern resultiert aus dem Wechsel des Produktionsverfahrens. Die Unsicherheit beträgt über die Jahre ±50 %.

4.4.2.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (2.C.2)

Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Die verwendeten AR des British Geological Survey wurden mit Hilfe der Angaben des Statistischen Bundesamtes und des USGS verifiziert (siehe oben).

4.4.2.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.C.2)

Rückrechnungen sind nicht erforderlich.

4.4.2.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (2.C.2)

Derzeit sind keine neuen Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

4.4.3 Metallproduktion: Aluminium (2.C.3)

4.4.3.1 Beschreibung der Kategorie (2.C.3)

KC	Category	Activity	EM of	1990/1995 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990/1995-2024
-/-	2 C 3, Aluminium Production		CO_2	1011,92	0,08	302,62	0,05	-70,09
-/-	2 C 3, Aluminium Production		SF_6	C	C	C	C	C
-/-	2 C 3, Aluminium Production	0	CF_4	1385,67	0,11	69,98	0,01	-94,95
-/-	2 C 3, Aluminium Production	0	C_2F_6	233,10	0,02	14,17	0,01	-93,92

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2	Tier 3	AS	CS
CH_4	-	-	NE
PFC	Tier 2	AS	CS
SF_6	CS	NS	CS
NO_X	-	-	NE
CO, SO_2		AS	CS

Primäraluminium - Nebenproduktemissionen

Die Kategorie „Primäraluminiumproduktion“ ist nach der Einordnung der Kategorie 2.C.3 Aluminiumproduktion keine Hauptkategorie.

In Deutschland wird in drei Hütten Aluminium in Elektrolyseöfen mit vorgebrannten Anoden erzeugt. Wesentliche Emissionsquellen sind die Abgase der Elektrolyseöfen und diffuse Emissionen über Hallendächern. An klimarelevanten Substanzen und Luftschadstoffen werden insbesondere CO, CO_2, SO_2, CF_4 und C_2F_6 emittiert.

Die größte Quelle für FKW-Emissionen ist in Deutschland trotz erheblicher Reduktionen seit 1990 weiterhin die Produktion von Primäraluminium. Durch umfangreiche Modernisierungsmaßnahmen in deutschen Aluminiumhütten und der Stilllegung von Produktionskapazitäten sanken die absoluten Emissionen aus diesem Sektor seit 1995 um über 90 %. Hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung der FKW-Emissionen ist eine Stagnation auf niedrigem Niveau zu erwarten.

Sekundäraluminium – Verwendung von F-Gasen in Gießereien

Die Kategorie „Verwendung von SF_6 in der Sekundäraluminiumproduktion“ (Alu-Giessereien) ist nach der Einordnung der Kategorie 2.C.3 Aluminiumproduktion für SF_6-Emissionen keine Hauptkategorie.

Zum Spülen von Sekundäraluminium-Schmelzen genügen in der Regel Inertgase ohne Additive. In einigen wenigen, meist kleineren Aluminium-Gießereien sowie in Laboren kam in der Vergangenheit aber ein Reinigungssystem aus Inertgasen zum Einsatz, dem SF_6 in Konzentrationen von 1 bzw. 2,5 % zugesetzt war. Solche Reinigungssysteme wurden letztmalig im Jahr 1999 eingesetzt (seit dem Jahr 2000 findet kein Verkauf in Deutschland mehr statt). Von 1990 bis 1999 lag der SF_6 –Verbrauch relativ konstant bei 0,5 t/a.

Vereinzelt wird seit dem Jahr 1999 reines SF_6 als Reinigungsgas eingesetzt.

4.4.3.2 Methodische Aspekte (2.C.3)

Primäraluminium - Nebenproduktemissionen

Die Aktivitätsraten werden dem Umweltbundesamt jährlich durch die WirtschaftsVereinigung Metalle oder teilweise direkt von den Industrieunternehmen übermittelt. Der durchschnittliche Anodenverbrauch zur Produktion von Primäraluminium liegt bei 430 kg Petrolkoks je Tonne Aluminium. In der Tabelle 179 sind die prozessbedingten Emissionsfaktoren dargestellt.

Die bei der Erzeugung von Primäraluminium anfallende Gesamtabgasmenge je Tonne Aluminium wurde mit einem mittleren Konzentrationswert, der aus mehreren Einzelwerten verschiedener Anlagen mit entsprechender Gewichtung gebildet wurde, multipliziert. Die Emissionsfaktoren berücksichtigen auch diffuse Emissionsquellen, wie Hallendachemissionen. Die verwendeten Emissionswerte für CO sind Ergebnisse aus Emissionsmessungen im Rahmen von Investitionsvorhaben.

Die SO_2- und CO_2-Emissionsfaktoren wurden aus dem spezifischen Anodenverbrauch errechnet. Die Anoden bestehen aus Petrolkoks; diese weisen spezifische Schwefelgehalte von ca. 1,2 % auf, woraus ein SO_2-Emissionsfaktor von 10,4 kg/t Al berechnet werden kann. Grundlage der Berechnung des CO_2-Emissionsfaktors ist der spezifische Kohlenstoffgehalt von Petrolkoks von 857 kg pro t. (vgl. Anhang 6.6). Durch Multiplikation des durchschnittlichen Anodenverbrauchs mit dem mittleren Kohlenstoffgehalt und der stöchiometrischen Umsetzung zu CO_2 ergibt sich ein CO_2-Emissionsfaktor von 1367 kg/t Aluminium. Der Emissionsfaktor vermindert sich theoretisch um den Anteil, der sich aus einem CO-Anteil von 180 kg/t Al ergibt, da sich auch CO

lediglich aus dem Verbrauch der Anoden bilden kann. Dies ist in dem unten genannten CO_2-Faktor nicht berücksichtigt. Dieser Ansatz entspricht der Tier 2 –Methodik nach den *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventorie*s (IPCC, 2006a).

Die in Tabelle 179 genannten Emissionsfaktoren wurden mit den Emissionsangaben in BAT-Merkblättern[58] und anderen Quellen (z.B. der VDI Richtlinie 2286 VDI (2013)Blatt 1) sowie mit den Daten aus dem EU-Emissionshandel (ETS) abgeglichen.

Tabelle 179: AR und prozessbedingte EF (in [kg/t]) der Primäraluminiumproduktion in 2013

		Emissionsfaktoren				
Anzahl Hütten	AR (Produktion)	CO_2	NO_X	SO_2	C gesamt	CO
3	221.373,4	1.367	k.A.	10,4	k.A.	180

Für die PFC-Emissionen aus Primäraluminiumhütten liegen aufgrund einer Selbstverpflichtung der Aluminiumindustrie Emissionsangaben vor. Seit 1997 berichtet die Aluminiumindustrie jährlich über die Entwicklung der PFC-Emissionen aus diesem Sektor. Die Messdaten werden nicht veröffentlicht, liegen dem Umweltbundesamt aber vor.

Basis für Berechnungen der CF_4 Emissionen sind die in den Jahren 1996 und 2001 in allen deutschen Hütten durchgeführten Messungen. Hierbei wurden je nach Technologie spezifische CF_4- Emissionswerte pro Anodeneffekt[59] ermittelt. Die Zahl der Anodeneffekte wird in den Hütten erfasst und dokumentiert. Die CF_4-Gesamtemission wurde durch Multiplikation der gesamten Anodeneffekte des Jahres mit der in 2001 ermittelten spezifischen CF_4-Emission pro Anodeneffekt errechnet. Der Gesamtemissionsfaktor für CF_4 ergibt sich durch Addition der CF_4-Emissionen der Hütten dividiert durch die Gesamtaluminiumproduktion der Hütten. C_2F_6 und CF_4 entstehen im festen Verhältnis von etwa 1:10. Die oben genannte Methode wurde auf die Zeitreihe bis 2010 angewendet, durch Rückrechnungen wurden die Emissionen für die Jahre 1990 bis 1996 ergänzt. Für den Emissionshandel hat die Aluminiumindustrie die Berechnung der PFC-Emissionen auf die IAI-Methode (entspricht UNFCC-Default Tier 2) umgestellt. Der dafür vorgesehene Default-Slope-Faktor wird auch von allen anderen europäischen Anlagen genutzt und ist im Rahmen des europäischen Emissionshandels anerkannt. Aus Konsistenzgründen hat die Aluminiumindustrie deshalb ab 2010 auch die Emissionsdaten für die Emissionsberichterstattung nach der IAI-Methode berichtet.

Sekundäraluminium – Verwendung von F-Gasen in Gießereien

Für die Aluminiumgießereien konnten durch anlagenspezifische Messungen Konkretisierungen des Emissionsfaktors und damit der Emissionen vorgenommen werden.

Für die Berichtsjahre 1990 bis 1994 wurden Berichte und archivierte Umfrageprotokolle aus dem Jahr 1996 zu Grunde gelegt.

Aus Vertraulichkeitsgründen werden die SF_6-Emissionen mit 2.C.4 Magnesiumproduktion zusammen berichtet.

[58] siehe http://www.bvt.umweltbundesamt.de/kurzue.htm

[59] „...Zu organischen Fluoriden kommt es jedoch nur unter besonderen Bedingungen, wenngleich diese in Intervallen von Stunden bis zu mehreren Tagen am Ofen immer wieder eintreten. Diese Bedingungen werden als Anodeneffekt bezeichnet. ... Das Gas an der Anode ändert seine Zusammensetzung von CO_2 zu CO und zu 5 bis 20 % CF_4...." Schwarz, W., & Leisewitz, A. (1996). *Aktuelle und künftige Emissionen treibhauswirksamer fluorierter Verbindungen in Deutschland* [Forschungsbericht 106 01 074/01](Gutachten im Auftrag des Umweltbundesamtes, Issue. U.-. Umweltbundesamt.

Emissionsfaktor Sekundäraluminium

Basierend auf von der Zulassungsbehörde anerkannten, vertraulichen Messprotokollen ist der Emissionsfaktor von SF_6 für die Aluminiumgiessereien für den Zeitraum von 1999 bis 2008 von 100 auf 3 % reduziert worden. Weitere Analysen ergaben einen Emissionsfaktor ab 2009 von 1,5 %. Dieser Wert ist ebenfalls durch von der Zulassungsbehörde anerkannte, vertrauliche Messprotokolle bestätigt. Die letzte Messung fand 2022 statt und ergab einen Emissionsfaktor von 0,08 %. Da dies eine Einzelmessung ist, wird ein Emissionsfaktor von 1,5 % beibehalten.

Aktivitätsdaten Sekundäraluminium

Der SF_6-Verbrauch wurde durch Befragung der Gasehändler ermittelt, wobei die Abfrage für das Berichtsjahr 2000 ergeben hat, dass die Gasemischung seit dem Jahr 2000 nicht mehr vermarktet wird.

Das seit 1999 wieder verwendete rein eingesetzte SF_6 wurde bei den Anwendern direkt erfragt und mit Daten der Gasehändler abgeglichen.

Seit dem Berichtsjahr 2006 werden die Daten vom Statistischen Bundesamt durch Abfrage der SF_6-Verkaufszahlen des Gasehandels (UStatG 2005) erhoben.

4.4.3.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (2.C.3)

Primäraluminium - Nebenproduktemissionen

Die Emissionsangaben zu FKW, CO, CO_2 und SO_2 genügen dem Tier 3b Ansatz und werden entsprechend als sehr genau bewertet. Für CO, CO_2 und SO_2 besteht eine Zeitreihenkonsistenz.

Allerdings wurde die anlagenspezifische Anzahl der Anodeneffekte in den Jahren 1991, 1992, 1993 und 1995 im Rahmen der freiwilligen Selbstverpflichtung nicht erhoben und für diese Jahre keine Berechnung durchgeführt.

Außerdem waren die Jahre 1991 bis 1994 wegen des Verfalls der Weltmarktpreise für Primäraluminium tiefe Krisenjahre für die deutsche Aluminiumindustrie. Aus diesem Grund wurden einige Anlagen stillgelegt. Der Abbau betraf alle Ofentypen, aber am stärksten betroffen waren die kurz zuvor modernisierten Öfen mit Punktdosierungstechnik. Deren Kapazität sank um 43 %, gemessen am Bestand 1990. Dies erklärt auch den kurzfristigen Anstieg bzw. die Stagnation des implizierten Emissionsfaktors für CF_4 in diesen Jahren. Absolut haben die Primärhütten 2007 nur 26 Tonnen CF_4 gegenüber 45 Tonnen in 2005 emittiert. Ursache hierfür ist ein Produktionsrückgang. Gegenüber dem Jahr 2006 ist jedoch eine geringe Produktionssteigerung zu verzeichnen, weil das teilweise Abschalten der Öfen im Werk Stade durch eine Produktionssteigerung am Produktionsstandort Hamburg mehr als ausgeglichen wurde. Im Jahr 2009 führte die Wirtschaftskrise u.a. zu drastischen Produktionseinbrüchen im Rheinwerk Neuss. Aufgrund der schwierigen ökonomischen Situation aller deutschen Primärhütten kam es in der Folgezeit immer wieder zu Prozessinstabilitäten durch häufige An- und Abfahrprozesse. Dies führte zu einer höheren Anzahl von Anodeneffekten und damit zu höheren PFC-Emissionen. Im Jahr 2010 stabilisierte sich die ökonomische Lage merklich. Die Prozesse konnten wieder kontinuierlich und stabil gefahren werden. Dadurch verringerte sich die Anzahl der Anodeneffekte in einem solchem Maße, dass die absoluten PFC-Emissionen trotz der Produktionssteigerung im Vergleich zu 2009 sanken. Dieser Trend setzte sich auch in den Folgejahren fort. Im Jahr 2018 sind die PFC-Emissionen zum ersten Mal seit 2010 wieder leicht angestiegen. In einer Hütte war die technische Umstellung des Anodenformats der Auslöser für einen temporären Anstieg der Anodeneffekte. In einer anderen Hütte führte der niedrige Pegelstand des Rheins (Lieferschwierigkeiten) und die temporäre Stilllegung von

Aluminiumoxid-Produktionsstätten dazu, dass zeitweise nur Aluminiumoxid minderer Qualität eingesetzt werden konnte, was ebenfalls die Anzahl der Anodeneffekte erhöhte.

Aufgrund von wirtschaftlichen Problemen sind die Aktivitätsraten für Primäraluminium in den Jahren 2022 bis 2024 stark eingebrochen. In einer Anlage wurde die Produktion in 2023 komplett stillgelegt, was zu einer signifikanten Absenkung der PFC-Emissionen führte. Der Anstieg der PFC-Emissionen in 2024 ist auf das erneute Hochfahren der Elektrolyseproduktion in den drei verbliebenen Anlagen zurückzuführen.

Die Unsicherheit des CO_2-Emissionsfaktors entspricht +/- 5 % nach der Tier 2 –Methodik der *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (IPCC, 2006a).

Sekundäraluminium – Verwendung von F-Gasen in Gießereien

Wie Untersuchungen belegen, wird ein Teil des SF_6 bei der Nutzung in der Aluminiumproduktion zersetzt. In der Aluminiumindustrie wurde der Emissionsfaktor auf die maximal gemessenen Emissionen gelegt und nach unten eine Unsicherheit von 50 % angenommen, da die Messungen gezeigt haben, dass die Emissionen häufig auch deutlich geringer sind.

4.4.3.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (2.C.3)

Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Die Aktivitätsraten für die Primäraluminiumproduktion stützen sich auf Eigenerhebungen der Wirtschaftsvereinigung Metalle und werden dem Umweltbundesamt jährlich übermittelt. Die Zeitreihe erscheint plausibel und weist keine Inkonsistenzen auf. Es wird davon ausgegangen, dass diese Angaben qualitätsgesichert erhoben werden.

4.4.3.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.C.3)

Rückrechnungen waren nicht erforderlich.

4.4.3.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (2.C.3)

Derzeit sind keine neuen Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

4.4.4 Metallproduktion: Magnesium (2.C.4)

4.4.4.1 Beschreibung der Kategorie (2.C.4)

KC	Category	Activity	EM of	1995 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1995-2024
-/-	2 C 4, Magnesium Production		SF_6	C	C	C	C	C
-/-	2 C 4, Magnesium Production		HFC-134a	0,00	0,00	7,19	0,01	0,00

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
SF_6	D	PS	D
HFC	D	PS	CS

Die Kategorie „SF_6 und HFKW-134a in der Magnesiumproduktion“ ist keine Hauptkategorie.

In Deutschland wird kein Primärmagnesium hergestellt. Es werden lediglich Gussteile aus Magnesiumlegierungen produziert.Beim Gießen von Magnesium wurde SF_6 seit Mitte der 1970er Jahre als Schutzgas über der Schmelze eingesetzt, um ihre Oxidation und Entzündung zu verhindern. Die eingesetzte Menge an SF_6 pro Tonne Magnesium (spezifischer SF_6-Koeffizient) hat sich seit 1995 stark reduziert, da es seit 2003 in zunehmendem Maße durch HFKW-134a ersetzt wurde. SF_6 wird sowohl beim Sandgussverfahren zur Fertigung von Prototypen, Einzelteilen und kleinen Serien, als auch beim Druckgussverfahren als Schutzgas eingesetzt.

Die Verwendung von SF_6 im Magnesiumdruckguss ist gemäß Artikel 13 der Verordnung (EU) Nr. 517/2014 über fluorierte Treibhausgase ab dem 01. Januar 2018 auch in kleinen Produktionsanlagen verboten. Bereits seit dem 01. Januar 2008 ist SF_6 als Schutzgas in Magnesium-Druckgießereien mit mehr als 850 kg SF_6-Jahresverbrauch, untersagt. Die vom Verbot betroffenen deutschen Betriebe haben seitdem schrittweise auf den HFKW-134a umgestellt.

4.4.4.2 Methodische Aspekte (2.C.4)

Der Einsatz von SF_6 als Reinigungs- und Schutzgas bei der Magnesiumherstellung ist eine offene Anwendung, d.h. die eingesetzte SF_6–Menge emittiert vollständig beim Gebrauch in die Atmosphäre. Die Gleichsetzung von Verbrauch (AR) und Emission entspricht der Methode in den *2006 IPCC Guidelines* (IPCC (2006a): Vol. 3, Kapitel 4.5).

Die *2006 IPCC Guidelines* enthalten keine Aussagen zum Emissionsfaktor für die Verwendung des HFKW-134a. Daher wurde bisher der verwendete Emissionsfaktor identisch mit der Verwendung von SF_6 in der Magnesiumproduktion gesetzt. Im Jahr 2018 wurde der Emissionsfaktor rückwirkend für die gesamte Zeitreihe auf 50 % gesetzt.

Aus Vertraulichkeitsgründen werden die SF_6-Emissionen aus 2.C.3.b Sekundäraluminium hier mit berichtet.

Emissionsfaktoren

Für die Magnesiumgießereien wird für SF_6 der Default-Emissionsfaktor von $EF_{Anwendung}$ = 100 % angenommen, da genauere Daten zu Zersetzungsgraden fehlen.

Ab dem Berichtsjahr 2017 wird der Emissionsfaktor rückwirkend für die gesamte Zeitreihe (also ab 2003) auf 50 % gesetzt. Die IPCC Emission Factor Data Base (EFDB) hat 2017 "Destruction rates of cover gas HFC-134a“ in Höhe von 71 und 77 %, als nicht-verbindliche Anhaltspunkte für die nationalen Emissionsinventare, aufgenommen. Diese Werte entsprechen Emissionsraten von 29 bzw. 21 %. Untersuchungen im Auftrag der US-Umweltbehörde EPA zeigten 2007, dass die Zersetzungsrate von verschiedenen Rahmenbedingungen wie Temperatur der Schmelze, Trägergas, Durchflussmenge des Schutzgases sowie der Konzentration von HFKW-134a abhängig ist. In Ermangelung weiterer Untersuchungen schlagen die Experten daher einen Sicherheitsemissionsfaktor von 50% vor (Gschrey et al., 2018).

Aktivitätsdaten Magnesiumproduktion

Im Jahr 1996 wurde im Auftrag des Umweltbundesamtes eine Mengenbefragung bei allen inländischen Magnesiumgießereien mit SF_6–Einsatz durchgeführt. Hierbei wurden die Verbrauchsmengen für die Jahre 1990 bis 1995 ermittelt.

Bis zum Berichtsjahr 2007 wurden die verwendeten Mengen direkt bei den Anwendern erfragt. Seit dem Berichtsjahr 2006 werden die Daten durch Abfrage der SF_6-Verkaufszahlen des Gasehandels erhoben. Im Berichtsjahr 2006 erfolgte ein Vergleich beider Methoden.

Seit dem Berichtsjahr 2007 werden die Daten des Statistischen Bundesamtes für SF_6 (UStatG 2005) verwendet.

Für die Verwendung des HFKW-134a erfolgt die Befragung der Betriebe direkt.

4.4.4.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (2.C.4)

Wie Untersuchungen belegen, wird ein Teil des SF_6 und HFKW-134a bei der Nutzung in der Magnesiumproduktion zersetzt. Daher werden die Emissionen von SF_6 sowie auch noch teilweise bei dem HFKW-134a durch die Annahmen zu den Emissionsfaktoren wahrscheinlich überzeichnet.

4.4.4.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (2.C.4)

Eine allgemeine Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Für eine Überprüfung der für die Emissionsberichterstattung ermittelten F-Gas Mengen als Grundlage zur Verifikation stehen außer den vom Statistischen Bundesamt zur Verfügung gestellten Daten keine weiteren Datenquellen zur Verfügung. Vergleiche mit anderen Ländern zeigen keinen Verbesserungsbedarf. Der Emissionsfaktor für SF_6 entspricht dem Default-Emissionsfaktor der *2006 IPCC Guidelines* (IPCC, 2006a) und der Emissionsfaktor für den HFKW-134a liegt zur Absicherung aller Emissionen über dem in *der IPCC Emission Factor Data Base* (EFDB) enthaltenen.

4.4.4.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.C.4)

Rückrechnungen sind nicht erforderlich.

4.4.4.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (2.C.4)

Derzeit sind keine neuen Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

4.4.5 Metallproduktion: Blei (2.C.5)

4.4.5.1 Beschreibung der Kategorie (2.C.5)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
-/-	2 C 5, Lead Production		CO_2	157,87	0,02	64,89	0,01	-58,89

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2	Tier 1	AS	D/CS

Die Kategorie „Metallproduktion: Blei“ ist keine Hauptkategorie.

Die Bleiproduktion erfolgt in Deutschland aus primären Bleikonzentraten und sekundären Vorstoffen wie bleihaltigen Schrotten oder Blei-Säure-Batterien.

Die Primärbleiproduktion erfolgt in Deutschland ausschließlich durch das Direktschmelzverfahren (DS) im Badschmelzofen (Isasmelt-Ausmelt) oder im QSL-Reaktor.

Prozessbedingtes CO_2 entsteht maßgeblich durch die Zugabe von kohlenstoffhaltigen Reduktionsmitteln (z.B. Kohlenstaub). Das Imperial Smelting Verfahren (ISF) wird in Deutschland nicht mehr angewendet.

Die Sekundärbleiproduktion in Deutschland wird maßgeblich durch die Aufbereitung von Blei-Säure-Batterien bestimmt. Dabei kommt entweder der Kurztrommelofen- oder der Schachtofenprozess zum Einsatz. Prozessbedingte CO_2-Emissionen entstehen maßgeblich durch die Zugabe von kohlenstoffhaltigen Reduktionsmitteln(z.B. Koks).

Die Aktivitätsraten werden dem Umweltbundesamt jährlich durch die WirtschaftsVereinigung Metalle übermittelt.

4.4.5.2 Methodische Aspekte (2.C.5)

Die verwendeten Emissionsfaktoren entstammen den *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (IPCC (2006a): Werte aus Table 4.21) und entsprechen der Tier 1 Methodik. In Deutschland existieren nur das Direktschmelzverfahren (DS) zur Primärbleiproduktion sowie das Sekundärproduktionsverfahren (S).

4.4.5.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (2.C.5)

Es werden Default-Unsicherheiten der *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (IPCC, 2006a) verwendet.

4.4.5.4 Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.C.5)

Rückrechnungen sind nicht erforderlich.

4.4.5.5 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (2.C.5)

Eine allgemeine Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Die Aktivitätsraten stützen sich auf vertrauliche Eigenerhebungen der WirtschaftsVereinigung Metalle und werden dem Umweltbundesamt jährlich übermittelt. Die Zeitreihe erscheint plausibel und weist keine Inkonsistenzen auf. Es wird davon ausgegangen, dass diese Angaben qualitätsgesichert erhoben werden.

4.4.5.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (2.C.5)

Derzeit sind keine neuen Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

4.4.6 Metallproduktion: Zink (2.C.6)

4.4.6.1 Beschreibung der Kategorie (2.C.6)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
-/-/2	2 C 6, Zinc Production		CO_2	670,80	0,06	81,65	0,02	-87,83

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2	Tier 1	AS	D

Die Kategorie „Metallproduktion: Zink“ ist eine Hauptkategorie nach der Methode 2 Analyse.

Die Zinkproduktion erfolgt in Deutschland aus primären Zinkkonzentraten und sekundären Vorstoffen wie zinkhaltigen Schrotten oder Stahlwerksstäuben.

Die Primärzinkproduktion erfolgt in Deutschland ausschließlich durch das hydrometallurgische Verfahren. Das pyrometallurgische Imperial Smelting Verfahren (ISF) wird nicht angewendet.

Prozessbedingte Treibhausgasemissionen entstehen in Deutschland vorrangig bei der Sekundärzinkproduktion. Durch die Nutzung von Koks als Reduktionsmittel entstehen vor allem bei der Aufbereitung von zinkhaltigen Sekundärmaterialien im Wälzofen prozessbedingte CO_2-Emissionen.

Die Aktivitätsraten werden dem Umweltbundesamt jährlich durch die WirtschaftsVereinigung Metalle übermittelt.

4.4.6.2 Methodische Aspekte (2.C.6)

Es wird der CO_2-Emissionsfaktor der *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (IPCC (2006a): Default-Faktor) verwendet. Dies entspricht der Tier 1 Methodik.

4.4.6.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (2.C.6)

Es werden Default-Unsicherheiten der *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (IPCC, 2006a) verwendet.

Aufgrund von wirtschaftlichen Problemen kam es im Jahr 2023 zu einer vorübergehenden Stillegung großer Produktionskapazitäten. In diesem Zeitraum sind daher auch die Emissionen stark gesunken. Im Jahr 2024 wurde die Produktion auf einem niedrigeren Niveau wieder hochgefahren.

4.4.6.4 Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.C.6)

Rückrechnungen sind nicht erforderlich.

4.4.6.5 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (2.C.6)

Eine allgemeine Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Die Aktivitätsraten stützen sich auf vertrauliche Eigenerhebungen der WirtschaftsVereinigung Metalle und werden dem Umweltbundesamt jährlich übermittelt. Die Zeitreihe erscheint plausibel und weist keine Inkonsistenzen auf. Es wird davon ausgegangen, dass diese Angaben qualitätsgesichert erhoben werden.

4.4.6.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (2.C.6)

Derzeit sind keine neuen Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

4.4.7 Metallproduktion: Sonstige (2.C.7)

Da die CRF-Reporter-Software eine Zuordnung von Lachgasemissionen unter 2.C.1 nicht ermöglicht, werden diese Emissionen stattdessen unter 2.C.7 berichtet. Ansonsten werden in Kategorie 2.C.7 keine Treibhausgasemissionen berichtet; die Kategorie ist nur für andere Schadstoffemissionen relevant.

4.4.7.1 Beschreibung der Kategorie (2.C.7)

Die unter 2.C.7 berichteten Lachgasemissionen resultieren aus dem Einsatz von Hochofen- und Konvertergas in den Winderhitzern der Hochöfen (Kategorie 2.C.1).

Unter diese Kategorie fällt in Deutschland vor allem die Produktion von Kupfer und die Feuerverzinkung. Die beim Feuerverzinken entstehenden Treibhausgasemissionen stammen jedoch ausschließlich aus Prozessfeuerungen und werden folglich unter 1.A.2 berichtet.

Der Hauptteil der Treibhausgasemissionen aus der Kupferindustrie stammt ebenfalls aus Prozessfeuerungen und wird unter 1.A.2.b berichtet.Die Prozessemissionen aus der Feuerraffination im Anodenofen werden ebenfalls unter 1.A.2.b berichtet, da das hierfür eingesetzte Reduktionmittel Erdgas in der Statistik des produzierenden Gewerbes nicht getrennt von den Prozessfeuerungen erfasst wird. Die nicht aus Prozessfeuerungen stammenden Treibhausgasemissionen sind zudem vergleichsweise sehr gering.

4.4.7.2 Methodische Aspekte (2.C.7)

Die Berechnung der eigentlich 2.C.1 zuzuordnenden Lachgasemissionen erfolgt auf der Basis der statistischen Angaben zum Einsatz von Hochofen- und Konvertergas in den Winderhitzern der Hochöfen sowie eines Emissionsfaktors für Feuerungsanlagen in Deutschland, der im Rahmen eines Forschungsprojekts des UBA (Rentz et al., 2002) ermittelt wurde.

Für andere Treibhausgasemissionen aus 2.C.7 sind keine Emissionfaktoren vorhanden.

4.4.7.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (2.C.7)

Keine Angaben.

4.4.7.4 Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.C.7)

Rückrechnungen sind nicht erforderlich.

4.4.7.5 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (2.C.7)

Die Aktivitätsraten stützen sich auf vertrauliche Eigenerhebungen der WirtschaftsVereinigung Metalle oder auf direkte Angaben von Industrieunternehmen. Sie werden dem Umweltbundesamt jährlich übermittelt. Die Zeitreihe erscheint plausibel und weist keine Inkonsistenzen auf. Es wird davon ausgegangen, dass diese Angaben qualitätsgesichert erhoben werden.

4.4.7.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (2.C.7)

Derzeit sind keine neuen Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

4.5 Verwendung von nichtenergetischen Produkten aus Brennstoffen und von Lösemitteln (2.D)

4.5.1 Anwendung von Schmiermitteln (2.D.1)

4.5.1.1 Beschreibung der Kategorie (2.D.1)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
-/-	2 D 1, Lubricant Use		CO_2	188,64	0,02	191,41	0,03	1,47

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2	Tier 2	NS	CS

Die Kategorie „Anwendung von Schmierstoffen“ ist für CO_2-Emissionen keine Hauptkategorie.

Schmierstoffe sollen die Reibung und Beanspruchung bei sich bewegenden Maschinenteilen vermindern. Dabei können sie auch zur Kraft- oder Wärmeübertragung genutzt werden. Auch das Dichten, das Vermeiden von Ablagerungen und der Korrosionsschutz können Anforderungen an Schmierstoffe sein. Die ebenfalls als Schmierstoffe betrachteten Prozessöle werden zudem entweder als Rohstoff- oder als Hilfs- und Betriebsstoff angewendet. Darüber hinaus gibt es noch andere Industrieöle, die auch nicht zum Schmieren eingesetzt werden.

Der Verbrauch an Schmierstoffen in stationären Anwendungen ist in Deutschland bis 2019 relativ konstant geblieben. Seitdem sinkt der Verbrauch. Nur in den Krisenjahren 2009 und 2020 gab es deutliche Vebrauchsrückgänge, die im darauffolgenden Jahr wieder aufgeholt wurden. Im Jahr 2024 betrug der Verbrauch ohne mobile Anwendungen 539.605 t.

4.5.1.2 Methodische Aspekte (2.D.1)

Aufgrund unterschiedlicher Berechnungsmethoden erfolgt eine Unterteilung des Schmierstoffeinsatzes in Kraftfahrzeugen einschließlich anderer mobiler Quellen und in der Industrie.

Innerhalb des deutschen Treibhausgas-Inventars werden für sämtliche mobile Quellen CO_2-Emissionen aus der Schmierstoff-Mitverbrennung erfasst. Gemäß den Anforderungen an die Emissionsberichterstattung werden dabei auf Zweitakt-Ottomotoren entfallende Emissionen direkt der jeweiligen Emissionsquelle zugeordnet, da hier der Schmierstoff als Teil des Kraftstoffes (Zweitakter-Gemisch) betrachtet wird. Die Beschreibung der diesbezüglichen Berechnungsmethoden erfolgt in Anhang 7.1.3. Alle nicht von Zweitaktern verursachten Mitverbrennungs-Emissionen werden dagegen als Produktanwendung betrachtet und zusammen mit den Emissionen aus der stationären Schmierstoffanwendung im industriellen Bereich unter 2.D.1 berichtet.

Stationäre Schmierstoffanwendung

Für den Schmierstoffeinsatz in der Industrie werden als Aktivitätsraten die Inlandsablieferungen (Einheit: Tonnen) aus der Statistik „Amtliche Mineralöldaten für die Bundesrepublik Deutschland“ (Mineralölstatistik) des Bundesamtes für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) verwendet (Tabelle 10j). In der Statistik werden folgende Sortengruppen unterschieden:

- Kompressorenöle
- Turbinenöle
- Getriebeöle

  - KFZ
  - ATF
  - Industriegetriebeöle
- Hydrauliköle
- Elektroisolieröle
- Maschinenöle
- Andere Industrieöle nicht zum Schmieren
- Prozessöle
- Metallbearbeitungsöle
  - Härteöle
  - Wassermischbare
  - Nicht-wassermischbare
  - Korrosionsschutzöle
- Schmierfette
  - darunter für KFZ
- Basisöle
- Extrakte aus der Schmierölraffination

Für diese Sortengruppen werden vom BAFA regelmäßig (monats- und jahresspezifisch) auf Meldungen von Unternehmen basierende Absatzzahlen veröffentlicht. Die meldenden Unternehmen können in der sogenannten Erhebungskreisliste[60] eingesehen werden.

In den 2006 IPCC Richtlinien wird nicht konkretisiert, welche Emissionsquellen bei der Schmierstoff-anwendung berücksichtigt werden müssen. Es können Verluste auf der Inputseite (Befüllung), während der Nutzung und auf der Outputseite (Entnahme) auftreten. Um hier Klarheit zu schaffen und die Genauigkeit der Emissionsberechnung zu erhöhen, wurde ein Sachverständigen-gutachten in Auftrag gegeben (Zimmermann & Jepsen, 2018). In dem Vorhaben wurden die Sortengruppen einzeln betrachtet und Emissionsfaktoren hergeleitet, die eine Tier2-Methode ermöglichen. Das Gutachten konnte belegen, dass bei den verschiedenen Schmierstoffsortengruppen diverse Arten von Verlusten auftreten, die jedoch nur zum Teil zu Emissionen in die Luft führen.

Typische Verluste auf der Inputseite, also bei der Befüllung am geplanten Einsatzort (d.h. beispielsweise Befüllung KFZ-Motor, Getriebe, Maschinen (-teile)) sind:

- Tropfverluste und sonstige durch das Handling bedingte Verluste sowie
- Restanhaftungen in Gebinden

Mögliche Verluste in der Nutzung sind vielfältig. Sie umfassen:

- Verdampfung
- (Mit-) Verbrennung
- Leckagen
- Export (Betrifft insbesondere Schmierstoffe im KFZ)
- Umwandlung in Produkte
- Anhaftung an Produkten

[60] http://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/Mineraloel/moel_erhebungskreisliste.xls;jsessionid=8F5CC4170FEBCC89A69DE21218062873.2_cid378?__blob=publicationFile&v=4

Auf der Outputseite, bei der Entnahme gebrauchter Schmierstoffe, können folgende Verluste auftreten:

- Tropfverluste und sonstige durch das Handling bedingte Verluste sowie
- Restanhaftungen am Einsatzort

In Bezug auf „gasförmige“ Emissionen besonders relevant sind die Freisetzung von Treibhausgasen aus der (Mit-)Verbrennung der Schmierstoffe sowie die Bildung von VOC infolge von Leckagen oder offenen Anwendungen in Abhängigkeit von den jeweils herrschenden Anwendungsbedingungen (insbesondere Temperatur).

Mit dem Standard-Emissionsfaktor aus den 2006 IPCC Richtlinien kann nicht zwischen Anwendungen, in denen durch Mitverbrennung von Schmierstoffen überwiegend CO_2-Emissionen entstehen und Anwendungen die hauptsächlich zu NMVOC-Emissionen führen, unterschieden werden. Die CO_2-Emissionen aus der industriellen Anwendung von Schmierstoffen würden sich mit der Standard-Tier 1 Methode verdoppeln.

Auf Basis der in dem Vorhaben durchgeführten Analysen konnten folgende auf Sortengruppen bezogene Emissionsfaktoren abgeleitet werden:

Tabelle 180: sortengruppenspezifische Emissionsfaktoren für Schmierstoffe, in Prozent

Sortengruppe	Anteilsspanne am Gesamtabsatz, ab 1990	NMVOC		
		Ø	Min	Max
Kompressorenöle	≤ 1 %	1,5 %	*1 %*	*2 %*
Turbinenöle	< 1 %	0,5 %	*0 %*	*1 %*
Kfz-Getriebeöle	5-10 %	1 %	*0 %*	*2 %*
Industriegetriebeöle	2-3 %	1,5 %	*1 %*	*2 %*
Hydrauliköle	6-15 %	1,5 %	*1 %*	*2 %*
Maschinenöle	1-7 %	2,5 %	*0 %*	*5 %*
andere Industrieöle, nicht zum Schmieren	2-7 %	25 %	*0 %*	*50 %*
Metallbearbeitungsöle	5-9 %	5 %	*0 %*	*10 %*
Basisöle	4-16 %	10 %	*5 %*	*15 %*
Elektroisolieröle	1-2 %			
Prozessöle	4-20 %			
Schmierfette	2-4 %			
Extrakte aus der Schmierstoffraffination	≤ 5 %			

Die Berechnung der NMVOC-Emissionen erfolgt nach einer Tier 2-Methode, bei der die Emissionsfaktoren auf die gesamte Zeitreihe angewendet werden.

Um konform mit den 2006 IPCC Guidelines und der Emissionsberichterstattung der EU zu sein, werden die NMVOC-Emissionen in CO_2-Emissionen umgerechnet und nur die CO_2-Emissionen im Inventar berücksichtigt. Dazu wird der gleiche Kohlenstoffgehalt zugrundegelegt, wie für 2.D.3 beschrieben.

Für die Berichterstattung von Luftschadstoffen im *Informative Inventory Report* (IIR) werden die NMVOC-Emissionen ausgewiesen und unter 2.G allokiert.

1995 wurden Kategorien in der Mineralölstatistik umgestellt. Drei Sortengruppen, die ab 1995 aufgeführt wurden, gab es vor 1995 in der Mineralölstatistik noch nicht, wohingegen vier andere Kategorien geführt wurden. Dies erfordert eine leichte Anpassung des Vorgehens für die Jahre 1990 bis 1994. In folgender Tabelle sind die betroffenen Kategorien der Jahre 1990 bis 1994 sowie der Umgang mit ihnen in der Berechnung dargestellt.

Tabelle 181: Umgang mit Kategorien der BAFA-Statistik 1990-1994

Kategorie	Anmerkung zum Vorgehen	Emissionsfaktor
Sonstige Schmieröle, spezialisiert Sonstige Schmieröle, unspezialisiert	Es erfolgt eine Berücksichtigung analog zur 1990-1994 fehlenden Sortengruppe „Maschinenöle“, welche verschiede spezialisierte und unspezialisierte Schmieröle umfasst.	2,5 %
Sonstige mineralische Öle für besondere Anwendungszwecke	Diese Kategorie umfasst keine Öle zum Schmieren. Es erfolgt eine Berücksichtigung analog zu 1990-1994 fehlenden Kategorie „Andere Industrieöle nicht zum Schmieren“.	25 %
Helle Weichmacher und Extenderöle	Extenderöle und Weichmacher sind den Prozessölen zuzuordnen. Es erfolgt eine entsprechende Berücksichtigung.	0 %

Mobile Schmiermittelanwendung

Da hinsichtlich der Schmierstoff-Mitverbrennung in Viertakt-Ottomotoren sowie sonstigen Motoren in mobilen Quellen nur unvollständige Daten zu insgesamt eingesetzten Schmierstoffmengen vorliegen, werden die mitverbrannten Mengen weitestgehend auf Basis von Angaben des Verbandes der Schmierstoff-Industrie e. V. (VSI) aus den eingesetzten Kraftstoffmengen berechnet Wallfarth (2014).

Gemäß Wallfarth (2014) werden in den verschiedenen Einsatzbereichen folgende auf die jeweils eingesetzten Kraftstoffmengen bezogenen Mitverbrennungsanteile erreicht:

Tabelle 182: Übersicht der verwendeten spezifischen Mitverbrennungsanteile

Sektor	Kraftstoff	Anteil	Quelle / Anmerkung
1.A.2.g vii	OK	0,00 %	Annahme, basierend auf Wallfarth (2014)
	DK	0,10 %	Annahme, basierend auf Wallfarth (2014)
1.A.3.a, 1.D.1.a, 1.A.5.b ii	Ke & FB	0,01 %	Flugbenzin: analog zu Kerosin
1.A.3.b	alle	-	Berechnung anhand TREMOD
1.A.3.c	DK	0,05 %	Annahme, basierend auf Wallfarth (2014)
1.A.3.d, 1.D.1.b. 1.A.4.c iii, 1.A.5.b iii	DK, HEL & HOS	0,15 %	Schweröl & leichtes Heizöl: analog zu Diesel
1.A.4.a ii	DK	0,10 %	Annahme, basierend auf Wallfarth (2014)
	LPG	0,10 %	Annahme, basierend auf Wallfarth (2014)
1.A.4.b ii	OK	0,00 %	Annahme, basierend auf Wallfarth (2014)
1.A.4.c ii	OK	0,00 %	Annahme, basierend auf Wallfarth (2014)
	DK	0,10 %	Annahme, basierend auf Wallfarth (2014)
1.A.5.b i	OK	0,00 %	Annahme, basierend auf Wallfarth (2014)
	DK	0,15 %	analog zu 1.A.3.d: Berücksichtigung Panzerfahrzeuge

OK: Ottokraftstoffe (inkl. Bioethanol), nur Viertakter; DK: Dieselkraftstoffe (inkl. Biodiesel), Ke: Kerosin; FB: Flugbenzin; HOS: Schweröl; LPG: Flüssiggas

Anhand der in den einzelnen Sektoren in Nicht-Zweitaktern eingesetzten Energiemengen und der oben genannten Mitverbrennungsanteile werden die Mengen mitverbrannter Schmierstoffe ermittelt, aus denen wiederum über den einheitlichen Emissionsfaktor von 73.300 kg CO_2 / TJ die sektorspezifischen Kohlendioxid-Emissionen aus der unbeabsichtigten Schmierstoff-Mitverbrennung berechnet werden.

Tabelle 183: Kohlendioxid aus unbeabsichtigt in mobilen Nicht-Zweitaktmotoren mitverbrannten Schmierstoffen, in Kilotonnen

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023	2024
1.A.2.g vii	2,44	1,35	1,18	1,00	1,51	2,14	2,41	2,36	2,25	2,24	2,26
1.A.3.a	0,23	0,23	0,25	0,23	0,23	0,21	0,09	0,07	0,10	0,11	0,11
1.A.3.b	86,1	104	114	118	121	129	117	120	121	122	124
1.A.3.c	1,41	1,14	0,93	0,71	0,57	0,51	0,43	0,43	0,41	0,40	0,37
1.A.3.d	4,43	3,58	2,38	3,10	2,83	2,73	2,47	2,27	1,86	1,93	2,02
1.A.4.a ii	0,69	0,54	0,57	0,57	0,69	0,76	0,78	0,75	0,73	0,73	0,71
1.A.4.b ii		*hier nur Einsatz von Ottokraftstoff-Zweitaktern*									
1.A.4.c ii	5,27	5,53	5,53	5,17	5,14	5,40	5,49	5,50	5,31	5,27	5,23
1.A.4.c iii	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,02	0,02	0,03
1.A.5.b	1,99	1,04	0,26	0,42	0,16	0,11	0,12	0,08	0,10	0,09	0,12
NATIONAL	**103**	**117**	**126**	**129**	**132**	**141**	**129**	**132**	**132**	**133**	**135**
1.D.1.a	1,20	1,49	1,94	2,30	2,43	2,45	1,37	1,82	2,72	2,84	2,72
1.D.1.b	9,91	8,26	8,88	10,52	11,90	10,02	5,02	5,38	5,79	5,07	4,93

Quelle: eigene Berechnungen

4.5.1.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (2.D.1)

Die Unsicherheiten der sortengruppenspezifischen Emissionsfaktoren für die stationären Schmierstoffanwendungen ergeben sich aus den Spannbreiten der Emissionsfaktoren in Tabelle 180.

Für die Unsicherheiten der Aktivitätsraten werden durch Expertenschätzung im Rahmen des Gutachtens aufgrund von ausgewerteten Fehlmeldungen in der Mineralölstatistik 5 % angenommen.

Da die bei der mobilen Schmierstoffanwendung mitverbrannten Mengen mit einem konservativen Ansatz berechnet werden, wird hier mit ±25 % eine deutlich höhere Unsicherheit angenommen. Gleiches gilt für den genutzten default-Emissionsfaktor für CO_2, dessen Unsicherheit aufgrund der verhältnismäßig heterogenen Produktgruppe der Schmierstoffe mit ±10 % angenommen wird.

Durch die Änderung der Sortenaufteilung 1995 in der Mineralölstatistik sind keine Auswirkungen auf die erfassten Schmierstoffmengen erkennbar. Dadurch erfolgte lediglich eine Neuzuordnung von Schmierstoffen aus Kategorien für nicht spezifizierte Anwendungen zu Kategorien für spezifizierte Anwendungen. Die Emissionen der Jahre 1990 bis 1994 können dadurch zwischen 5 und 25 % zu hoch berechnet sein.

4.5.1.4 Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.D.1)

Für die stationären Schmierstoffanwendungen erfolgten keine Rückrechnungen.

Für die mobilen Schmierstoffanwendung erfolgte dagegen eine Anpassung der ungewollt mitverbrannten Mengen für alle Jahre ab 2023:

Tabelle 184: revidierte ungewollt mitverbrannte Schmierstoffmengen, in Terajoule

	2003	2004	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
mobile Anwendung, in Terajoule [TJ]									
Submission 2026	1.754	1.784	1.757	1.803	1.922	1.757	1.796	1.797	1.818
Submission 2025	1.754	1.784	1.757	1.804	1.922	1.770	1.801	1.803	1.811
Änderung absolut	-0,13	-0,35	-0,44	-0,29	-0,32	-13,3	-4,58	-5,99	7,11
Änderung relativ	-0,01%	-0,02%	-0,02%	-0,02%	-0,02%	-0,75%	-0,25%	-0,33%	0,39%

Quelle: TREMOD und TREMOD MM

Die Emissionen aus dieser ungewollten Mitverbrennung wurden entsprechend für die Jahre neu berechnet und die Gesamtemissionen aus der Schmierstoffanwendung angepasst:

Tabelle 185: revidierte CO_2-Emissionen aus der Anwendung von Schmierstoffen, in Kilotonnen

	2003	2004	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
Submission 2026	189	190	188	194	219	181	202	200	195
Submission 2025	189	190	188	194	219	182	202	200	195
Änderung absolut	-0,01	-0,03	-0,03	-0,02	-0,02	-0,98	-0,34	-0,44	0,52
Änderung relativ	-0,01%	-0,01%	-0,02%	-0,01%	-0,01%	-0,53%	-0,17%	-0,22%	0,27%

Quelle: eigene Berechnungen; stationäre Anwendung: CO_2, berechnet aus freigesetztem NMVOC

4.5.1.5 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (2.D.1)

Für die stationäre Anwendung: Vom Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle konnten im Rahmen der Amtlichen Mineralöldaten für das Jahr 2024 keine Inlandsablieferungen für Metallbearbeitungsöle und Turbinenöle bereitgestellt werden. Es wurde darum der Wert aus dem Vorjahr 2023 übernommen.

Eine allgemeine Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung, die den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen entsprechen, wurden durch die Nationale Koordinierungsstelle durchgeführt.

Weitergehende Qualitätskontrollen wurden im zuvorgenannten Gutachten durchgeführt und auch im NIR 2021 im Abschnitt 4.5.1.5 beschrieben.

Für die mobile Anwendung: Eine allgemeine Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

4.5.1.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (2.D.1)

Derzeit sind keine Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

4.5.2 Anwendung von Paraffinwachsen (2.D.2)

4.5.2.1 Beschreibung der Kategorie (2.D.2)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
-/-/2	2 D 2, Paraffin Wax Use		CO_2	242,70	0,02	442,71	0,07	82,41
-/-	2 D 2, Paraffin Wax Use		N_2O	0,62	0,01	1,13	0,01	82,41

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2	Tier 1	NS	D
N_2O	Tier 1	NS	D

Die Kategorie „Anwendung von Paraffinwachsen“ ist eine Hauptkategorie für CO_2 nach der Methode-2-Analyse.

Die wesentliche Anwendung von Wachsen erfolgt in Kerzen, daneben stellen noch Verpackungen und synthetisches Holz sowie Heißklebstoffe bedeutende Anwendungsgebiete dar.

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens (Zimmermann & Jepsen, 2018) konnte durch Befragung von Branchenexperten die Annahme bestätigt werden, dass außer Kerzen keine anderen Wachsanwendungen für die Emissionsberichterstattung relevant sind, weil außer beim Kerzenabbrand unter den Anwendungsbedingungen mit keinen Emissionen zu rechnen ist. Es werden darum im Inventar weiterhin nur die Wachsanwendungen in Kerzen berücksichtigt. In dem Forschungsvorhaben wurden auch zwei Studien aus den Jahren 2002 und 2010 ausgewertet, die die Anteile nachwachsender Rohstoffe in Kerzen auf 15 % (Matthäi & Petereit, 2004) bzw. 22 % (Matthäi et al., 2010) beziffern. Die nachwachsenden Rohstoffe umfassen neben Bienenwachs (2 %) auch pflanzliche und tierische Fette (12 %) sowie Stearine (8 %), die vorrangig aus Palmölen gewonnen werden.

Deutschland ist ein bedeutender Markt für Kerzen innerhalb der Europäischen Union. 2016 belief sich der Marktanteil auf knapp 27 % (European Candle Association, 2017) Im Gegensatz zum europäischen Trend wuchs der Bedarf in Deutschland von 1990 bis 2013, veringerte sich dann aber bis 2019. Im Jahr 2023 scheint sich der Trend vorzusetzen während in den Jahren 2020 bis 2022 eine signifikante, wahrscheinlich krisenbedingte Zunahme des Kerzenabbrandes zu verzeichnen ist.
Bei einem konstanten Exportanteil und sinkender Produktion wird der Bedarf seit 2013 überwiegend durch Importe gedeckt.

4.5.2.2 Methodische Aspekte (2.D.2)

Dem Berechnungsmodell liegen die Annahmen zugrunde, dass alle Kerzen innerhalb eines Jahres verbraucht und vollständig verbrannt werden.

Die Berechnungen der CO_2 und N_2O-Emissionen erfolgen nach einer Tier 1 Methode.

Aktivitätsraten

Die Produktionsmengen sowie die Import- und Exportmengen an Kerzen für die Jahre ab 1996 entstammen dem Statistischen Bundesamt (Statistisches Bundesamt (jährlich - FS 4, R. 3.1), Produzierendes Gewerbe, Produktion im Produzierenden Gewerbe sowie Außenhandelsstatistik).

Die Berechnung der Verbrauchsmenge erfolgt gemäß Produktion + Import – Export. Für die Bestimmung der CO_2-Emissionen wird noch ein fester biogener Anteil von 15 % abgezogen, wohingegen die N_2O-Emissionen auch den biogenen Anteil umfassen. Die Verrbauchsmenge im Jahr 2022 betrug 224.978,8 t Wachs inkl. biogenemAnteil.

Für die Jahre 1990 bis 1995 erfolgt die Berechnung der Verbrauchsmenge über den ProKopf-Verbrauch, der aus den Jahren 1996 bis 2013 abgeleitet wird. Dabei wird davon ausgegangen, dass auch in diesen Jahren der Verbrauch linear gestiegen ist.

Emissionsfaktoren

Der Emissionsfaktor für CO_2 beträgt 2,9467 t/t Produkt und für N_2O 0,024 kg/t Produkt.

Zur Herleitung der Emissionsfaktoren, die auf die gesamte Zeitreihe angewendet werden, wurde auf Standardwerte zurückgegriffen (IPCC (2006a): Vol. 2 Chapter 1 table 1.2 und IPCC, 2006: Vol. 2, Ch. 2 Tab. 2.4).

4.5.2.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (2.D.2)

Da eine Tier 1 Methode mit Standardwerten der 2006 IPCC Guidelines angewendet wird, gelten auch die entsprechenden Unsicherheiten für Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren (IPCC (2006a): Vol. 3, Ch- 5).

Aufgrund des festen biogenen Anteils für alle Jahre wird die Unsicherheit für die Aktivitätsrate auf +30%/-10% geschätzt.

4.5.2.4 Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.D.2)

Für 2023 ist eine Korrektur der CO_2 und N_2O-Emissionen notwendig, da sich Anpassungen der Außenhandelsstatistik ergaben. Die Anwendungsmengen fielen aber nur um 0,6 % für das Jahr und dementsprechend auch die CO_2- und N_2O-Emissionen. Auf eine tabellarische Darstellung wird aufgrund der Geringfügigkeit der Änderungen verzichtet.

4.5.2.5 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (2.D.2)

Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung, die den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen entsprechen, wurden durch die Nationale Koordinierungsstelle durchgeführt.

Für eine Überprüfung der Import-, Export- und Produktionsmengen als Grundlage zur Verifikation der Verbrauchsmengen stehen national außer den von Statistischen Bundesamt zur Verfügung gestellten Daten keine weiteren Quellen zur Verfügung. Soweist die amtliche Mineralölstatistik die Anwendung in Kerzen nicht extra aus. Und der europäische Kerzenverband ECA (*european candle association*) greift auf die Daten von EUROSTAT zurück. Ein Vergleich mit den Daten von EUROSTAT wurde durchgeführt.

Ein Vergleich mit den Berechnungsmethoden anderer Länder wurde im Rahmen der Berichterstattung 2018 durchgeführt. Unterschiede konnten nur in der Erfassung der Wachsmengen festgestellt werden.

4.5.2.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (2.D.2)

Derzeit sind keine neuen Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

4.5.3 Sonstige: Lösemittel - NMVOC (2.D.3 Lösemittel)

4.5.3.1 Beschreibung der Kategorie (2.D.3 Lösemittel)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
-/-	2 D 3, Other		CO_2	2551,10	0,20	1224,63	0,18	-52,00

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2	D	NS	D
NMVOC	Tier 2	NS	CS

Die Kategorie CO_2 aus NMVOC-Emissionen aus dem Bereich „Lösemittel und andere Produktverwendung“ (CRF 2.D.3) ist aufgrund der Einordnung der übergeordneten Kategorie „2.D.3 – Weitere“ keine Hauptkategorie. Die CO_2-Emissionen der übergeordneten Kategorie enthalten 896,31 kt CO_2-.eq. aus dem Einsatz von Lösemitteln und 328,32 kt CO_2 aus dem Einsatz von AdBlue. Die folgenden Inhalte beziehen sich dabei nur auf den Einsatz von Lösemitteln. Die Freisetzung von CO_2 aus der Nutzung von AdBlue wird in Kapitel 4.5.6 gesondert betrachtet.

Die aus dem Gebrauch von Lösemitteln oder aus der Anwendung lösemittelhaltiger Produkte freigesetzten NMVOC-Emissionen entstammen allen Subgruppierungen dieser Kategorie.

Um der sehr heterogenen Struktur dieser Kategorie bei der Datenermittlung besser gerecht zu werden, werden für die Berechnung der Inventardaten die UNECE/EMEP Substrukturen verwendet, die auf der CORINAIR97 (CORINAIR: COordination d’ INformation Environmentale; Teilprojekt AIR) SNAP-Systematik[61] basieren.

Für die Kategorien 2.D.3.a, d, e, f, g, h, i werden folgende Anwendungen bzw. Aktivitäten einbezogen:

2.D.3.a: Häusliche Verwendung von Lösemitteln inklusive Fungizide

a) Häusliche Verwendung von Lösemitteln

- Seifen
- Waschmittel, Spülmittel und Reiniger (Weichspüler; Universalwaschmittel; Waschmittel; Waschhilfsstoffe; Geschirrspülmittel; Reinigungsmittel für Fußbodenbeläge und Teppiche; Autowaschmittel; Fensterputzmittel; WC-Reinigungsmittel);
- Schuhcreme, Schuh- und Lederpflegemittel, Möbel- und Bohnerwachs; Lackpflegemittel für Autos
- Zubereitungen zum Polieren von Metall
- Duftstoffe (für Räume, Parfüme, Toilettenwässer, Aftershaves)
- Kosmetika und Schminkmittel (Make-up; Zubereitungen zur Hand-, Nagel- und Fußpflege; Gesichtspflegemittel; Körperpflegemittel; Sonnenschutzmittel und andere Zubereitungen)

[61] hier in der Detaillierung des sogenannten SNAP-Level 3

- Haarwaschmittel und Haarpflegeprodukte (Shampoos; Dauerwell- und Entkrausungsmittel; Haarsprays; Haarcremes und Brillantine; Tönungsshampoo, Haarfärbemittel, Haarbleichmittel und andere Pflegeprodukte)
- Andere persönliche Pflegeprodukte (Rasiercremes; Körperdesodorierungs- und Antitranspirationsmittel; Badeessenzen; Zubereitungen zur Körperintimpflege, Haarentfernungsmittel, Schönheitsmittel und anderes)
- Kfz-Frostschutz

b) Häusliche Verwendung von pharmazeutischen Produkten

2.D.3.d: Anwendung von Farben und Lacken

a) Dekorative Farben und Lacke, Bautenanstrichmittel

- Kfz-Reparatur
- Professionelle Anwendungen von Farben und Lacken in Konstruktionen und Gebäuden (Dispersionsfarben innen; Fassadenfarben / Silikat; Kunstharzputze / Silikat; Bautenlacke / Lasuren; Grundierungen / Überzüge; andere Anwendungen)
- Do-it-yourself Anwendungen von Farben und Lacken in Konstruktionen und Gebäuden (Dispersionsfarben innen; Fassadenfarben / Silikat; Kunstharzputze / Silikat; Bautenlacke / Lasuren; Grundierungen / Überzüge; andere Anwendungen)
- Holzbeschichtungen (Holzinnenausbau; Schreinerarbeiten)

b) Industrielle Beschichtungen

- Kfz-Herstellung (Grundierung, Füller, Deck- und Klarlacke)
- Kfz-Reparatur von Nutzfahrzeugen und sonstigen Fahrzeugen
- Spulenbeschichtung
- Beschichtungen im Schiffsbau
- Holzbeschichtungen (Möbel)
- Andere industrielle Beschichtungen (Lackspray (ohne Treibgas); Elektro / Haushalt; Maschinenbau; Autozubehör / Metall; Metallwaren, Blechemballagen; Drahtlacke; Tränk- und Gießmittel; Bauelemente ohne Bandbeschichtung; Kunststoffe; Papier / Folie; Übrige Verarbeitung)

c) Andere nichtindustrielle Farbbeschichtungen
(Markierungsfarben; Korrosionsschutz; Anderes)

2.D.3.e Entfettung

- Metallentfettung
- Herstellung von Elektronikkomponenten
- Andere industrielle Reinigung (Feinmechanik, Optik, Herstellung von Uhren)

2.D.3.f Chemische Reinigung

- Chemische Reinigung

2.D.3.g Herstellung und Verarbeitung von chemischen Produkten

- Verarbeitung von Polyester
- Verarbeitung von Polyvinylchlorid
- Verarbeitung von Polyurethan
- Verarbeitung von Polystyrolschaum
- Gummi-Verarbeitung (Reifenherstellung)
- Herstellung von pharmazeutischen Produkten
- Herstellung von Farben und Lacken
- Herstellung von Druckfarben und Tinten
- Herstellung von Klebstoffen
- Herstellung von Haftmaterialien, Magnetbändern, Filmen und Fotografien
- Herstellung von lösemittelhaltigen Produkten
- Herstellung von Holzschutzmitteln
- Herstellung von Baustoffadditiven
- Herstellung lösemittelhaltiger Konsumgüter
- Herstellung von Oberflächenreinigungsmitteln
- Herstellung von Frostschutz- und Enteisungsmitteln
- Herstellung von Be- und Entwachsungsmitteln
- Herstellung von Abbeizmitteln
- Behandlung von Bitumen (asphalt blowing)

2.D.3.h Druckindustrie-Druckanwendungen

- Coldset-Offsetdruck (Zeitungsdruck)
- Bogenoffsetdruck (konventionell, UV-basiert)
- Heatset-Offsetdruck
- Endlos-Offsetdruck
- Buchdruck
- Verpackungs-Flexodruck (lösemittelbasiert, wasserbasiert)
- Verpackungs-Tiefdruck (lösemittelbasiert, wasserbasiert)
- Illustrationstiefdruck
- Siebdruck
- Andere Druckanwendungen
- Farben für Kunstmaler in Zusammenstellungen

- Farben für Kunstmaler, nicht in Zusammenstellungen
- Tinte und Tusche zum Schreiben oder Zeichnen u. ä., auch konzentriert oder in fester Form (ohne Druckfarben)

2.D.3.i: Andere Anwendungen

- Behandlung von Glas- und Mineralwolle
- Extraktion von Ölen und Fetten
- Anwendung von Klebstoffen und Haftmaterialien (Papier und Verpackung; Bau, Holz; Transport; Schuhe; Heimwerkeranwendungen; anderes)
- Anwendung von Holzschutzmitteln
- Anwendung von Unterbodenschutz und Fahrzeugkonservierung
- Entwachsen von Fahrzeugen
- Sonstige
  - Verwendung von Pflanzenschutzmitteln
  - Abbeizen mit Dichlormethan
  - Entlackung (fehlbeschichtete Aluminiumteile, Stahlteile und Stahlgehänge)
  - Betonzusatzmittel
  - Enteisung (Flugzeuge; Betriebsflächen; Sonstiges)
  - Wissenschaftliche Laboratorien

Für die Definition von „NMVOC“ wird auf die VOC-Definition der EG-Lösemittelrichtlinie (European Parliament (EP), 2010) zurückgegriffen[62]. Zur Konkretisierung des Begriffes „Lösemittelanwendung“ (*solvent use*) wird für die Lösemitteldefinition ebenfalls auf die EG-Lösemittelrichtlinie zurückgegriffen[63].

Dabei ist jedoch zu beachten, dass einige dieser flüchtigen organischen Verbindungen sowohl als Lösemittel als auch als chemische Reaktionskomponente eingesetzt werden, z. B. Toluol - als Lösemittel in Lacken und Klebstoffen und als Reaktionskomponente bei der Herstellung von Toluoldiisocyanat (TDI) - oder Methylethylketon (Butanon) - als Lösemittel in Druckfarben und als Ausgangsmaterial bei der Synthese von Methylethylketonperoxid. VOC (genauer Stoffe oder Mengenanteile von Stoffen oder Produkten), die als chemische Reaktionskomponente eingesetzt werden, werden dementsprechend in dieser Kategorie nicht betrachtet.

Durch die skizzierte Abgrenzung der Kategorie wird ein sehr heterogenes Feld von emissionsverursachenden Vorgängen einbezogen. Dies gilt für:

- ► den Anteil und die Flüchtigkeit der eingesetzten VOC.
  (Die Spannbreite reicht von der Verwendung von leichtflüchtigen Einzelstoffen als Lösemittel z.B. bei Reinigungsvorgängen über den Einsatz von Produkten mit

[62] Demnach sind flüchtige organische Verbindungen (VOC) alle organischen Verbindungen, die bei 293,15 K einen Dampfdruck von mindestens 0,01 kPa oder unter den entsprechenden Gebrauchsbedingungen eine entsprechende Flüchtigkeit haben.

[63] Demnach ist ein organisches Lösemittel eine flüchtige organische Verbindung, die, ohne sich chemisch zu verändern, alleine oder in Kombination mit anderen Stoffen Rohstoffe, Produkte oder Abfallstoffe auflöst oder als Reinigungsmittel zur Auflösung von Verschmutzungen, als Lösungsmittel, als Dispersionsmittel oder als Mittel zur Einstellung der Viskosität oder der Oberflächenspannung oder als Weichmacher oder Konservierungsmittel verwendet wird.

Lösemittelgemischen z.B. in Farben & Lacken bis zu Anwendungen, in denen nur kleine Teile der Zubereitung (auch) Lösemitteleigenschaft haben, wie dies z.B. bei der Polystyrolschaumherstellung der Fall ist.)

- die sehr unterschiedlichen Emissionsbedingungen.

Lösemitteleinsätze können umweltoffen (wie bei der Verwendung von Kosmetika) bis weitgehend geschlossen (wie bei der Extraktion von nativen Ölen oder in Anlagen zur chemischen Reinigung) sein.

4.5.3.2 Methodische Aspekte (2.D.3 Lösemittel)

Die Berechnung der NMVOC-Emissionen erfolgt außer für die Bitumenbehandlung auf der Basis eines produktverbrauchsorientierten Ansatzes. Dabei werden die NMVOC-Einsatzmengen, die über Lösemittel oder lösemittelhaltige Produkte zu diesen Quellkategorien zugeordnet werden, ermittelt und daraus über (für jede Quellkategorie) spezifische Emissionsfaktoren die NMVOC-Emissionen berechnet. Diese Methodik ist unter der Bezeichnung „consumption-based emissions estimating“ explizit als eine von zwei für die Emissionsberechnung dieser Kategorie anzuwendenden Methoden aufgeführt.

Die Methodik erfordert - differenziert nach den Quellkategorien - belastbare Informationen über die folgenden Eingangsgrößen:

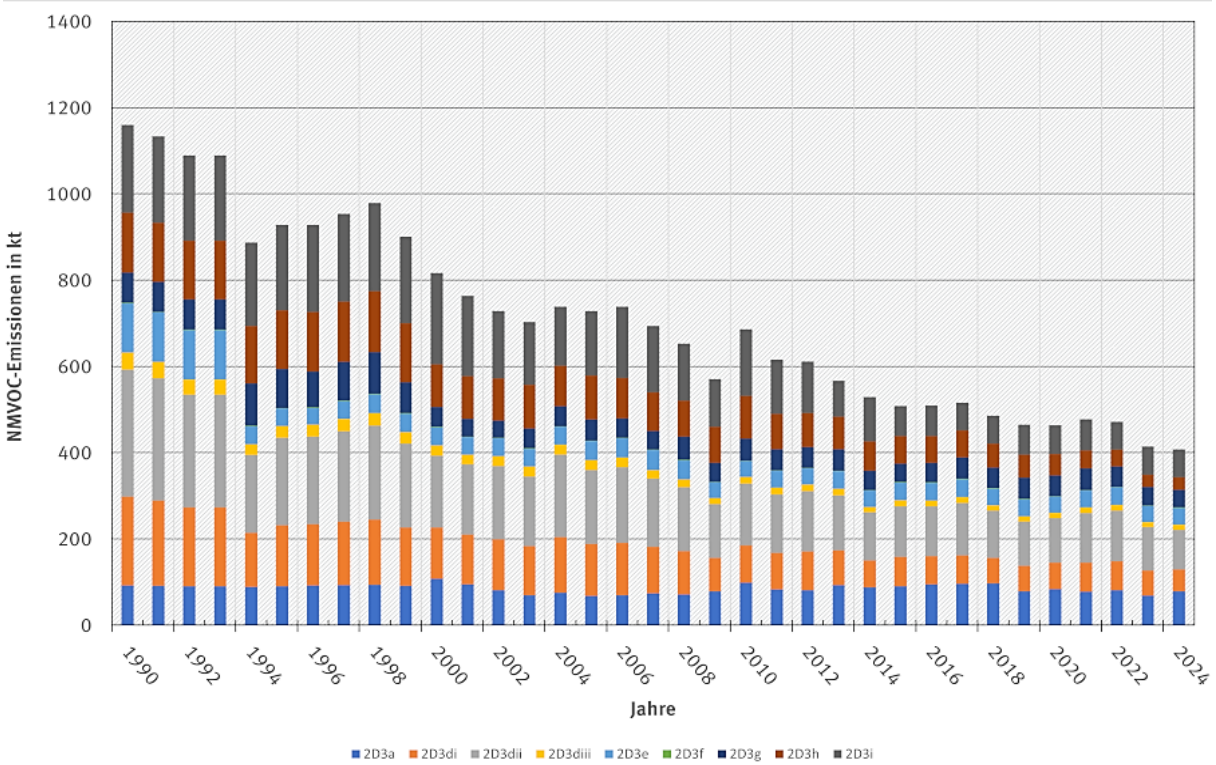
- die im Berichtsjahr eingesetzten Mengen an VOC-haltigen (Vor-) Produkten und Hilfsmitteln,
- den VOC-Gehalt dieser Produkte (Stoffe und Zubereitungen),
- die jeweiligen Anwendungs- und Emissionsbedingungen (bzw. den daraus resultierenden spezifischen Emissionsfaktor).

Um der sehr heterogenen Struktur innerhalb der Kategorie gerecht zu werden, werden die Eingangsgrößen nach 37 differenzierten Verursacherprozessen (wie oben aufgeführt, analog zu CORINAIR SNAP Level 3) bestimmt und die errechneten NMVOC-Emissionen anschließend aggregiert. Die eingesetzten Produkt-/Stoffmengen werden auf der Ebene von Produktgruppen unter Verwendung der Produktions- und der Außenhandelsstatistik ermittelt. Wo möglich, werden die so ermittelten Inlandsverbrauchsmengen durch den Abgleich mit Branchenstatistiken weiter verifiziert.

Für die durchschnittlichen VOC-Gehalte der Einsatzstoffe sowie die Emissionsfaktoren werden Werte angesetzt, die aus Fachgutachten und Branchendialoge für die einzelnen Kategorien oder Kategorienbereiche basieren. Für die Berechnung der NMVOC-Emissionen des jeweils aktuellsten Jahres liegen die benötigten statistischen Basisangaben noch nicht abschließend vor, so dass die Berechnung auf vorläufigen Daten beruhen muss. Sobald die statistischen Basisdaten für das jeweils aktuellste Jahr in der endgültigen Fassung vorliegen, werden damit die Inventardaten der NMVOC-Emissionen aus der Lösemittelverwendung neu berechnet und die Neuberechnung dokumentiert.

Seit 1990 sind die NMVOC-Emissionen aus der Verwendung von Lösemitteln und lösemittelhaltigen Produkten insgesamt um mehr als 50 % zurückgegangen.

Abbildung 45: NMVOC-Emissionen aus lösemittelbasierten Produkten und Anwendungen (2.D.3.a, d-i)



Quelle: eigene Darstellung, UBA

Der Schwerpunkt der Emissionsminderung lag in den Jahren 1999 bis 2009. Zu diesem Minderungserfolg trugen insbesondere ordnungsrechtliche Regelungen wie die „Chemikalienrechtliche Verordnung zur Begrenzung der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen (VOC) durch Beschränkung des Inverkehrbringens lösemittelhaltiger Farben und Lacke (Lösemittelhaltige Farben- und Lack-Verordnung - ChemVOCFarbV)“, die 31. Verordnung zur Durchführung des Bundemmissionsschutzg (Verordnung zur Begrenzung der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen bei der Verwendung organischer Lösemittel in bestimmten Anlagen – 31. BImSchV, (BfJ, 2024)) und die 2. Verordnung zur Durchführung des (Verordnung zur Emissionsbegrenzung von leichtflüchtigen halogenierten organischen Verbindungen – 2. BImSchV, (1990)) sowie die TA Luft bei. Aber auch das deutsche Umweltzeichen „Blauer Engel“, in dessen Rahmen unter anderem lösemittelarme Lacke, Wandfarben oder Klebstoffe ausgezeichnet werden, hat daran einen wichtigen Anteil.

Seit der Berichterstattung 2009 werden die CO_2-Emissionen aus NMVOC berechnet.

Da der methodische Hintergrund für die Umrechnung der NMVOC-Emissionen in CO_2-Emissionen vor allem die Kompatibilität zur Emissionsberichterstattung der EU ist, haben wir für die Berichterstattung den in Vol 1, *Chapter 7 Precursors and Indirect Emissions* der 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories vorgeschlagenen Referenzansatz verwendet:

Gleichung 7:

$$EM_{\text{indirektes } CO_2} = EM_{NMVOC} \times Molmasse_{CO2} / Molmasse_C \times 60/100$$

Im Rahmen von Expertengutachten und von Fachgesprächen mit den betroffenen Branchen in den Jahren 2013, 2015 und 2017 konnten die Lösemittelgehalte von verschiedenen Lacken, Beschichtungsstoffen und Druckfarben dem aktuellen Stand der Technik angepasst und damit verringert werden. Ebenso konnten die NMVOC-Emissionen aus der Anwendung von Metallbearbeitungsölen (Kühlschmierstoffe) sowie sonstigen Schmierstoffen (Industrieschmierstoffe) einer anderen Kategorie (2.D.1. „Anwendung von Schmiermitteln“) zugeordnet werden (siehe Kapitel 4.5.3.1).

Für die Berechnung der NMVOC-Emissionen, die bei der Veredelung von Bitumen durch das Einblasen von Luft entstehen, erfolgt mittels eines auf die Menge an behandeltem Bitumen bezogenen Emissionsfaktors. Für die Herleitung des NMVOC-Emissionsfaktors wurden Grenzwerte und Anforderungen an Minderungsmaßnahmen aus der TA Luft berücksichtigt. Der Emissionsfaktor bleibt für alle Jahre konstant und beträgt 27,2 mg/t.

Die Menge an behandeltem Bitumen wird aus dem Gesamtaufkommen an Bitumen berechnet, das vom Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle in den Amtlichen Mineralöldaten (BAFA, 2025a) jährlich veröffentlicht wird. Der prozentuale Anteil des Blasbitumens stammt aus einer einmaligen Datenerhebung bei der Arbeitsgemeinschaft der Bitumenindustrie e.V für das Jahr 1994, die im Rahmen eines vom Umweltbundesamt beauftragten Projektes durchgeführt wurde. Der Anteil bleibt für alle Jahre konstant und beträgt 10 %.

Eine ausführlichere Darlegung der Methodik und Analyse der Trends von NMVOC-Emissionen aus lösemittelhaltigen Produkten und Anwendungen liegt im Informative Inventory Report (IIR)[64] vor.

4.5.3.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (2.D.3 Lösemittel)

Für die NMVOC-Emissionen liegt eine Fehlerbetrachtung auf der Basis von Expertenschätzungen für alle Eingangsgrößen (in allen 37 differenzierten Quellbereichen) nach der Methode der Fehler-Fortpflanzung vor. Die Unsicherheiten liegen vor allem in der mangelnden Trennschärfe der Basis-Statistiken (Produktions- und Außenhandelsstatistik) in Hinblick auf die Unterteilung in VOC-haltige und VOC-freie Produkte sowie in Bezug auf die Verwendung in verschiedenen Quellbereichen mit sehr unterschiedlichen Emissionsbedingungen.

Für eine Konsistenzprüfung des Inventars wurden im Rahmen eines Sachverständigengutachtens eine Dokumentation der Datenbasis und der Berechnungsmethoden für die 37 SNAP Codes vorgenommen; die Zeitreihen der Emissionen ab dem Jahr 2005 wurden in Bezug auf größere Sprünge (>10 % von Jahr zu Jahr) hin geprüft und eine Ursachenanalyse vorgenommen. Für alle identifizierten Sprünge konnten dabei die Ursachen nachvollzogen werden. Im Ergebnis konnten wir keine Inkonsistenzen in den Zeitreihen feststellen.

Eine Quantifizierung der Unsicherheiten für die Unterkategorie „Bitumen blasen“ ist durch Expertenschätzung erfolgt. Für den prozentualen Anteil des Blasbitumens am Gesamtaufkommen an Bitumen und den Emissionsfaktor für NMVOC müssen aufgrund der schlechten Datenlage eine größere Unsicherheit bis zu 100 % angenommen werden.

4.5.3.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (2.D.3 Lösemittel)

Eine allgemeine Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung, die den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen entsprechen, wurden durch die Nationale Koordinierungsstelle durchgeführt. Daten anderer Länder können aufgrund der

[64] Informative Inventory Report – Germany http://iir.umweltbundesamt.de

unterschiedlichen Detailtiefe nicht zum Vergleich bzw. Verifikation genutzt werden. Zur Bestimmung der NMVOC-Emissionen werden Bundesstatistiken und Verbandsdaten sowie Datenerhebungen genutzt. Andere Quellen zum Vergleich bzw. Verifikation der genutzten Daten konnten nicht gefunden werden.

4.5.3.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.D.3 Lösemittel)

Die im Emissionsinventar verwendeten Daten für die NMVOC-Emissionen des vorangehenden Jahres werden routinemäßig einer kategoriespezifischen Rückrechnung unterzogen. Diese Vorgehensweise ist in der Methodik des produktverbrauchsorientierten Ansatzes begründet und notwendig, da die endgültigen Daten der Außenhandelsstatistik erst nach Abschluss der Berichterstattung des betreffenden Berichtsjahres vorliegen.

4.5.3.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (2.D.3 Lösemittel)

Derzeit sind keine neuen Verbesserungen geplant, siehe erster Absatz unter kateoriespezifische Rückrechnungen.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

4.5.4 Sonstige: Verwendung von Bitumen zur Dachdeckung (2.D.3 Bitumen)

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
NMVOC	Tier 1	AS	CS
CO_2	NE	NE	NE

Die Kategorie „Verwendung von Bitumen zur Dachdeckung“ weist nach derzeitigem Kenntnisstand keine Emissionen an Treibhausgasen auf[65] und ist somit keine Hauptkategorie.

4.5.4.1 Beschreibung der Kategorie (2.D.3 Bitumen)

Die Verwendung von Bitumen umfasst die Herstellung und Verlegung von Dach- und Dichtungsbahnen.

Die Menge an in Deutschland produzierten und verwendeten Mengen an Dach- und Dichtungsbahnen ist aus Tabelle 186 zu entnehmen, wobei eine Abweichung zwischen beiden Angaben vom Exportüberschuss abhängt (nur bis einschließlich 2021). Bei der Herstellung wird flüssiges Bitumen bei Temperaturen von 150 bis 220°C als Tränk- oder Deckmasse verarbeitet. Der Prozess ist mit Emissionen an organischen Stoffen verbunden (hier als NMVOC zusammen gefasst).

Die Verlegung von Dach- und Dichtungsbahnen erfolgt in Heiß- und Kaltverfahren. Beim Heißverfahren, dem Bahnenschweißen, treten relevante Emissionen an organischen Stoffen auf. Die Emissionsentwicklung wird hauptsächlich von der Entwicklung der Produktionsmenge an Polymerbitumenbahnen bestimmt. Die Verwendung von lösemittelhaltigen Voranstrichen wird hier nicht berücksichtigt, sondern erfolgt im Lösemittelmodell, siehe Kapitel 4.5.1.

Die Emissionen aus der Herstellung der Dach- und Dichtungsbahnen bleiben bei kaum sinkenden Produktionsmengen stabil. Die Emissionen aus der Verlegung der Dach- und

[65] siehe Diskussion um indirekte CO2-Emissionen unter methodische Aspekte

Dichtungsbahnen können bei sinkenden Verwendungsmengen leicht ansteigen, weil die Verwendung von Bitumenschweißbahnen einen zunehmend höheren Anteil hat.

Andere Substanzen als NMVOC haben nur eine untergeordnete Emissionsrelevanz (siehe Fußnote [66]).

4.5.4.2 Methodische Aspekte (2.D.3 Bitumen)

Die Daten zur Produktionsmenge und Anwendungsmenge (Aktivitätsrate) an Dach- und Dichtungsbahnen stellt auf Basis einer Kooperationsvereinbarung aus dem Jahre 2009 der Verband der Dachbahnenindustrie zur Verfügung (VDD, 2025). Momentan finden keine Datenergänzungen oder Hochrechnungen statt. Für eine international vergleichbare Angabe werden jedoch die Produktionsmengen in die Menge an eingesetztem Bitumen umgerechnet (je nach Bahnenart zwischen 1,3 und 3,3 kg Bitumen/m^2).

Es werden wegen der dominierenden Emissionsrelevanz nur die Emissionen an NMVOC betrachtet und im Emissionsinventar berücksichtigt und dabei zwischen Emissionen aus der Herstellung und Emissionen aus der Verlegung von Dach- und Dichtungsbahnen unterschieden.

Der Emissionsfaktor für die Herstellung der Dach- und Dichtungsbahnen stammt aus einer Berechnung auf Basis des Standes der Technik deutscher Hersteller (VDD, 2009). Der Emissionsfaktor für die Verlegung von Polymerbitumenbahnen ist einer Ökobilanz entnommen (Kreißig, 1996). Für Bahnen, die überwiegend mit Heißbitumen verklebt werden, wurde dieser Emissionsfaktor in Analogie übernommen. Dünne Bahnen werden nicht verklebt, sondern genagelt und weisen keine Emissionen auf. Wegen der zunehmenden Bedeutung der Polymerbitumenbahnen steigt der implizite Emissionsfaktor für die Kategorie leicht an.

Die Berechnung der NMVOC-Emissionen entspricht einer Tier-1-Methode, da keine detaillierten Daten vorliegen.

Tabelle 186: Herstellung und Verlegung von Dach- und Dichtungsbahnen mit Bitumen und dazugehörige AR und EF

	Produzierte oder verarbeitete Fläche in 2024 [Mio. m^2]	EF/ IEF [kg/ m^2]
Herstellung von Dach- und Dichtungsbahnen mit Bitumen	113	NMVOC 0,000358
Verlegung von Dach- und Dichtungsbahnen mit Bitumen	113	NMVOC 0,000027 – 0,000044

Die Emissionen von Kohlendioxid, die sich aus der Multiplikation der NMVOC-Emissionen mit einem Faktor für den Kohlenstoffgehalt in Höhe von 80 % und einer Umrechnung auf CO_2 ergeben würden, liegen vernachlässigbar niedrig. Diese werden deshalb nicht ausgewiesen, sondern in den CRF mit ‚NE' gekennzeichnet.

4.5.4.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (2.D.3 Bitumen)

Angaben zur Unsicherheit der Daten des vdd wurden zwischen vdd und Umweltbundesamt abgestimmt. Die Gesamtunsicherheit der Aktivitätsdaten von Herstellung und Verlegung wird auf einen Wert von circa ±1 % geschätzt. Daraus ergibt sich für den errechneten Bitumenverbrauch der Gesamtproduktion eine höhere Unsicherheit von circa ±2,5 %.

[66] Diskussion um weitere Luftschadstoffe im Rahmen der Genfer Luftreinhaltekonvention hier nicht thematisiert.

Die kumulierten Emissionsfaktoren werden für die Produktion und Verlegung der Dach- und Dichtungsbahnen auf circa ±5 % geschätzt.

4.5.4.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (2.D.3 Bitumen)

Aufgrund begrenzter Ressourcen und minimaler Relevanz wird für die Berichterstattung von Precursern keine QK/QS durchgeführt. Im Rahmen der Verbandsvereinbarung mit dem VDD wurde eine Checkliste zur QK/QS ausgefüllt und bestätigt.

Die Ermittlung der Aktivitätsraten wird als plausibel eingeschätzt. Die Emissionsfaktoren stehen im Einklang mit Erkenntnissen aus Forschungsprojekten des UBA und sind plausibel. Vor allem wird die Gültigkeit der Emissionsfaktoren damit begründet, dass hier keine Emissionen aus dem Einsatz lösemittelhaltiger Anstriche zu berücksichtigen sind (erfolgt im Lösemittelmodell, siehe oben).

4.5.4.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.D.3 Bitumen)

Rückrechnungen sind nicht erforderlich.

4.5.4.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (2.D.3 Bitumen)

Derzeit sind keine Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

4.5.5 Sonstige: Straßenasphaltierung (2.D.3 Asphalt)

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
NO_X, NMVOC, SO_2	Tier 1	AS	CS
CO_2	NE	NE	NE

Die Kategorie Straßenasphaltierung weist nach derzeitigem Kenntnisstand keine Emissionen an Treibhausgasen auf[67] und ist somit keine Hauptkategorie.

4.5.5.1 Beschreibung der Kategorie (2.D.3 Asphalt)

Aktuell werden in den Berichtstabellen Produktionsmengen von Asphaltmischgut und die Emissionen an NMVOC, NO_X und SO_2 berichtet (bezüglich CO_2 siehe Kapitel 4.5.5.2).

Im Jahr 2024 wurden in Deutschland ca. 38 Mio. t Asphalt (DAV, 2025) in ca. 600 Asphaltmischanlagen produziert (DAV, 2016). Das Produkt wird vornehmlich im Straßenbau eingesetzt und steht in direkter Konkurrenz zu hydraulisch gebundenen Betonstraßen. Nach einem deutlichen Anstieg der Produktion im Jahr 1991 nahm die produzierte Menge seit 2000 ab.

Die Emissionsentwicklung wird hauptsächlich von der Entwicklung der Produktionsmenge bestimmt, die in den letzten Jahren stagniert.

4.5.5.2 Methodische Aspekte (2.D.3 Asphalt)

Für den Brennstoffeinsatz existiert in der Kategorie 1.A.2 kein gesondertes Berechnungsverfahren. Die eingesetzten Brennstoffe sind aber über die Auswertung der Energiebilanz berücksichtigt und mit entsprechenden Emissionsfaktoren gekoppelt.

Die Produktionsmenge (Aktivitätsrate) an Asphaltmischgut wurde den Mitteilungen vom Deutschen Asphaltverband (DAV) entnommen.

Die Ermittlung der Emissionsfaktoren erfolgte länderspezifisch nach Tier 2. Zur Bestimmung der Emissionsfaktoren anderer Substanzen als CO_2 wurde auf Emissionsmessdaten von über 400 Asphaltmischanlagen im Messzeitraum 1989 bis 2000 zurückgegriffen. Der größte Teil der Emissionen entsteht beim Trocknen der Mineralstoffe. NMVOC-Emissionen stammen nahezu vollständig aus den organischen Rohstoffen und werden v.a. im Paralleltrommelbetrieb und sowie aus dem Mischer und im Verladebereich freigesetzt. NO_X und SO_2 stammen durchschnittlich zu etwa 50 % aus den mineralischen Einsatzstoffen (anteilige Prozessemission). CO entsteht überwiegend bei unvollständigen Verbrennungsvorgängen. Die Emissionen an CO werden ausschließlich beim Brennstoffeinsatz berechnet.

Tabelle 187: Emissionsfaktoren bei der Herstellung Asphaltmischgut

	NOx	NMVOC	SO_2
EF [kg/ t]	0,015	0,030	0,030

Es werden nur die Emissionen bei der Herstellung von Asphalt berichtet. Angaben über die Emissionen beim Einbau des Asphalts sind noch nicht ausreichend geprüft.

Die Emissionen von Kohlendioxid, die sich aus der Multiplikation der NMVOC-Emissionen mit einem Faktor für den Kohlenstoffgehalt in Höhe von 80 % und einer Umrechnung auf CO_2 ergeben würden, liegen vernachlässigbar niedrig. Diese werden deshalb nicht ausgewiesen, sondern in den CRF mit ‚NE' gekennzeichnet.

4.5.5.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (2.D.3 Asphalt)

Wie die umfangreichen Messdaten zeigen, liegen die Emissionen in einem vergleichsweise engen Bereich. Aufgrund der Anzahl der Messdaten lassen sich sehr verlässliche Mittelwerte bilden. Lediglich die Aufteilung der Emissionsmengen in brennstoff- und prozessbedingte Emissionen ist mit größeren Unsicherheiten behaftet.

Die Ermittlung der Produktionsmengen kann als sehr genau betrachtet werden, da es sich um ein verkaufsfertiges Produkt handelt und die Mengen von den Betreibern an den DAV übermittelt werden.

4.5.5.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (2.D.3 Asphalt)

Aufgrund begrenzter Ressourcen und minimaler Relevanz wird für die Berichterstattung von Precursern keine QK/QS durchgeführt.

4.5.5.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.D.3 Asphalt)

Rückrechnungen sind nicht erforderlich.

4.5.5.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (2.D.3 Asphalt)

Derzeit sind keine Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

4.5.6 CO_2-Emissionen aus dem Einsatz von AdBlue® (2.D.3 Sonstige: AdBlue®)

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2	CS / M	CS / M	D

4.5.6.1 Beschreibung der Kategorie (2.D.3 Sonstige: AdBlue)

Seit 2004 kommen in Deutschland zunehmend Fahrzeuge mit SCR (*Selective Catalytic Reduction*)-Katalysator zum Einsatz. In diesen Katalysatoren zur reduktiven Minderung von NO_x-Emissionen kommt eine wässrige Harnstofflösung[68] zum Einsatz, bei deren chemischer Umwandlung Kohlendioxid frei wird. In Deutschland wird dazu nahezu ausschließlich das Produkt AdBlue® verwendet (VDA, 2013).

4.5.6.2 Methodische Aspekte (2.D.3 Sonstige: AdBlue)

Da aktuell keine umfassenden Statistiken oder Marktstudien zum AdBlue®-Absatz vorliegen, werden die eingesetzten Mengen und resultierenden CO_2-Emissionen innerhalb TREMOD (Knörr, Heidt, et al., 2025) anhand der Angaben zum Kraftstoffverbrauch der SCR-Fahrzeuge berechnet.

Tabelle 188: modellierte AdBlue®-Einsatzmengen, in Tonnen

	2004	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023	2024
PKW	0	0	3.031	53.918	251.719	274.965	289.671	291.123	293.190
LNF	0	0	0	607	65.524	80.274	87.697	93.555	100.201
SNF: LKW	203	7.637	344.649	574.915	725.285	748.694	735.377	698.991	700.500
SNF: Busse	50,8	199	17.345	38.307	39.751	44.456	52.703	55.955	57.290
Straßenverehr	**254**	**7.836**	**365.024**	**667.746**	**1.082.279**	**1.148.389**	**1.165.447**	**1.139.624**	**1.151.181**
Bauwirtschaft	0	0	0	6.016	75.446	90.623	99.515	109.609	126.588
GHD	0	0	0	334	7.552	9.089	9.745	9.651	9.055
Landwirtschaft	0	0	0	915	10.859	12.996	14.691	16.443	18.629
Forstwirtschaft	0	0	0	2.668	35.840	44.990	53.172	62.402	72.109
NRMM	**0**	**0**	**0**	**9.933**	**129.697**	**157.697**	**177.124**	**198.104**	**226.382**
Gesamt	**254**	**7.836**	**365.024**	**677.679**	**1.211.975**	**1.306.086**	**1.342.571**	**1.337.728**	**1.377.563**

Quelle: Heidt et al. (2025); Knörr, Heidt, et al. (2025)

Die Berechnung der resultierenden CO_2-Emissionen erfolgt anhand folgender Formel gemäß 2006 IPCC GL (IPCC (2006a): Band 2, Kap. 3.2 - Road Transportation, S. 3.12, Formel 3.2.2):

$$EM_{CO_2} = AR_{AdBlue®} \times \frac{12}{60} \times \frac{32{,}5}{100} \times \frac{44}{12}$$

[68] mittlerer Harnstoffgehalt gemäß DIN 70070: 32,5 %

Die folgende Tabelle stellt die so ermittelten CO_2-Emissionen dar.

Tabelle 189: aus dem Einsatz von AdBlue® resultierende CO_2-Emissionen, in Kilotonnen

	2004	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023	2024
PKW	0,00	0,00	0,72	12,9	60,0	65,5	69,0	69,4	69,9
LNF	0,00	0,00	0,00	0,14	15,6	19,1	20,9	22,3	23,9
SNF: LKW	0,05	1,82	82,1	137	173	178	175	167	167
SNF: Busse	0,01	0,05	4,13	9,13	9,47	10,6	12,6	13,3	13,7
Straßenverehr	**0,06**	**1,87**	**87,0**	**159**	**258**	**274**	**278**	**272**	**274**
Bauwirtschaft	0,00	0,00	0,00	1,43	18,0	21,6	23,7	26,1	30,2
GHD	0,00	0,00	0,00	0,08	1,80	2,17	2,32	2,30	2,16
Landwirtschaft	0,00	0,00	0,00	0,22	2,59	3,10	3,50	3,92	4,44
Forstwirtschaft	0,00	0,00	0,00	0,64	8,54	10,7	12,7	14,9	17,2
Σ NRMM	**0,00**	**0,00**	**0,00**	**2,37**	**30,9**	**37,6**	**42,2**	**47,2**	**54,0**
Gesamt	**0,06**	**1,87**	**87,0**	**162**	**289**	**311**	**320**	**319**	**328**

Quelle: Heidt et al. (2025); Knörr, Heidt, et al. (2025)

Im deutschen Treibhausgas-Inventar werden diese Emissionen gemäß Fußnote (6) zur CRF-Tabelle 2(I).A-Hs2 unter *2.D.3 – Non-energy products from fuels – Other* berichtet.

4.5.6.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (2.D.3 Sonstige: AdBlue®)

Die hier zugrundegelegten Unsicherheitenangaben stellen Expertenschätzungen dar. Datenquellen, Methoden und Emissoinsfaktoren werden über die gesamte Zeitreihe hinweg konsistent angewendet.

Für die Aktivitätsdaten wird - konservativ - eine Unsicherheit von ±20 %, für den Emissionsfaktor von ±10 % angenommen.

4.5.6.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (2.D.3 Sonstige: AdBlue®)

Eine allgemeine Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Eine Verifizierung der Daten anhand vergleichbarer Inventare für Deutschland ist nicht möglich. Ein Vergleich mit Inventaren anderer Länder erfolgte im Rahmen eines EU-weiten Austausches zu neuen Emissionsquellen zuletzt 2018.

4.5.6.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.D.3 Sonstige: AdBlue®)

Tabelle 190: revidierte jährliche Kraftstoffverbräuche der SCR-Fahrzeuge, in Terajoule

	2012	2013	2014	2015	2020	2021	2022	2023
Submission 2026	598.371	715.207	845.969	983.590	1.315.096	1.388.620	1.406.713	1.387.686
Submission 2025	598.376	715.212	846.260	983.596	1.325.796	1.395.269	1.416.654	1.394.691
Änderung Absolut	-4,71	-4,98	-291	-5,69	-10.700	-6.650	-9.941	-7.005
Änderung relativ	0,00%	0,00%	-0,03%	0,00%	-0,81%	-0,48%	-0,70%	-0,50%

Quelle: eigene Berechnungen basierend auf Heidt et al. (2025); Knörr, Heidt, et al. (2025)

Aus der Revision der Kraftstoffverbräuche der SCR-Fahrzeuge resultiert eine Neuberechnung der eingesetzten AdBlue®-Mengen. Hier ist zu beachten, dass diese sich nicht 1:1 zu den Kraftstoffverbräuchen ändern. Grund hierfür ist, dass die betrachteten Offroad-Fahrzeuge im Schnitt mehr Harnstofflösung je Liter Diesel verbrauchen, als Straßenfahrzeuge.

Tabelle 191: revidierte AdBlue®-Einsatzmengen, in Tonnen

	2012	2013	2014	2015	2020	2021	2022	2023
Submission 2026	465.628	511.079	578.352	677.679	1.211.975	1.306.086	1.342.571	1.337.728
Submission 2025	465.634	511.086	578.360	677.689	1.221.502	1.314.916	1.356.419	1.352.956
Änderung Absolut	-6,49	-6,94	-7,44	-9,50	-9.527	-8.830	-13.848	-15.228
Änderung relativ	-0,001%	-0,001%	-0,001%	-0,001%	-0,78%	-0,67%	-1,02%	-1,13%

Quelle: eigene Berechnungen basierend auf Heidt et al. (2025); Knörr, Heidt, et al. (2025)

Aus den korrigierten AdBlue®-Mengen resultiert nachfolgend dargestellte Anpassung der Kohlendioxid-Emissionen.

Tabelle 192: revidierte CO_2-Emissionen, in Kilotonnen

	2012	2013	2014	2015	2020	2021	2022	2023
Submission 2026	111	122	138	162	289	311	320	319
Submission 2025	111	122	138	162	291	313	323	322
Änderung Absolut	-0,002	-0,002	-0,002	-0,002	-2,27	-2,10	-3,30	-3,63
Änderung relativ	-0,001%	-0,001%	-0,001%	-0,001%	-0,78%	-0,67%	-1,02%	-1,13%

4.5.6.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (2.D.3 Sonstige: AdBlue®)

Derzeit sind keine über die allgemeine Pflege der zugrundeliegenden Modelle TREMOD und TREMOD MM hinaus gehenden Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

4.6 Elektronik-Industrie (2.E)

KC	Category	Activity	EM of	1995 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1995-2024
-/-	2 E, Electronics Industry		N_2O	0,66	0,01	36,00	0,01	5333,96
-/-	2 E, Electronics Industry		CF_4	92,06	0,01	72,53	0,02	-21,21
-/-	2 E, Electronics Industry		C_2F_6	147,83	0,02	37,63	0,01	0,00
-/-	2 E, Electronics Industry		C_3F_8	0,00	0,00	14,58	0,01	0,00
-/-	2 E, Electronics Industry		cC_4F_8	0,00	0,00	5,15	0,01	0,00
-/-	2 E, Electronics Industry		C_6F_{14}	21,57	0,01	0,00	0,00	-100,00
-/-	2 E, Electronics Industry		HFC23	14,34	0,01	13,14	0,01	0,00
-/-	2 E, Electronics Industry		HFC32	0,00	0,00	0,10	0,01	0,00

KC	Category	Activity	EM of	1995 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1995-2024
-/-	2 E, Electronics Industry		SF_6	48,73	0,01	63,92	0,01	31,16
-/-	2 E, Electronics Industry		NF_3	4,95	0,01	20,45	0,01	0,00

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
HFC	Tier 3	AS, NS	PS
PFC	CS	AS, NS	CS
SF_6	CS	AS, NS	CS
NF_3	CS	AS, NS	CS

Die Kategorie „Elektronik-Industrie“ ist keine Hauptkategorie.

4.6.1 Halbleiter- und Platinenproduktion (2.E.1)

4.6.1.1 Beschreibung der Kategorie (2.E.1)

Für die Fertigungsschritte in der Halbleitertechnik werden eine Vielzahl von Chemikalien und Gasen verwendet. Nicht alle sind Treibhausgas relevant. Erfasst werden gegenwärtig FKW (CF_4, C_2F_6, C_3F_8, c-C_4F_8), HFKW (CHF_3, CH_2F_2, CH_3F), Stickstofftrifluorid (NF_3), Schwefelhexafluorid (SF_6) und Distickstoffmonoxid (N_2O, Lachgas). Diese Gase werden zum Strukturätzen dünner Schichten und zum Reinigen der Reaktionskammern nach dem CVD-Prozess (Chemical Vapour Deposition) eingesetzt. Einige der in die Plasmakammern eingebrachten FKW werden im Produktionsprozess teilweise zu CF_4 umgewandelt.

Die Emissionen aus der Halbleiterindustrie hängen zum einen von der Häufigkeit des Einsatzes von Abgasreinigungstechniken ab. Zum anderen hat die jährlich produzierte Menge an Halbleitern direkten Einfluss auf die Emissionen. Daraus resultieren jährliche Schwankungen in den Emissionen.

In der Platinenfertigung gibt es Anlagen zur Bohrlochreinigung, die mit CF_4 arbeiten. Dieser Anwendungsbereich unterliegt kaum Veränderungen, wie eine wiederholte Befragung im Jahr 2019 ergab.

4.6.1.2 Methodische Aspekte (2.E.1)

Emissionsfaktoren

Während des Ätzprozesses setzen sich nur etwa 15 % des zugeführten CF_4 chemisch um. Der Emissionsfaktor als inverse Umsetzungsrate beträgt also 85 % des CF_4-Verbrauchs.

Die Emissionen der fluorierten Treibhausgase können nicht allein anhand der eingesetzten Mengen (Verkäufe des Gasehandels) ermittelt werden, weil die Differenz zwischen Verbrauch und Emission von verschiedenen Faktoren abhängig ist, nämlich neben der nur partiellen chemischen Umsetzung im Plasmareaktor vor allem auch von der Wirkung nachgeschalteter Abgasreinigungsanlagen. Sie werden daher anlagenspezifisch vom Industrieverband aggregiert und gemeldet. Das gilt auch für Distickstoffmonoxid.

Aktivitätsdaten

Die Verwendungsmengen von SF_6 (seit dem Berichtsjahr 2006) und NF_3 (seit dem Berichtsjahr 2015) werden durch Befragung des Gasehandels vom Statistischen Bundesamt ermittelt

(UStatG, 2005). Die Verwendungsmengen der anderen Stoffe werden vom Statistischen Bundesamt erhoben, der Halbleiterindustrie zugeordnet und von ihr bestätigt.

Gesicherte Emissionsdaten liegen für 1990 und 1995 vor. Für die Jahre 1991 bis 1994 wurde eine lineare Interpolation durchgeführt.

Bis zum Berichtsjahr 2000 basierten die Emissionsangaben auf Befragungen durch EECA-ESIA (European Electronic Component Manufacturers Association – European Semiconductor Industry Association). Die nationalen Hersteller wurden zu Produktionskapazitäten, eingesetzten Stoffmengen und Abgasbehandlungstechniken befragt.

Seit dem Jahr 2001 liegen aufgrund einer freiwilligen Zusage der Halbleiterindustrie Emissionsangaben für diese Teilgruppe für alle Einzelstoffe vor. Die Emissionsdaten werden nach einer einheitlichen Berechnungsformel (Tier 3-Ansatz) aus dem jährlichen Verbrauch für jede Produktionsstätte berechnet, aggregiert und vom ZVEI (Fachverband Bauelemente) an das Umweltbundesamt gemeldet.

Der Verband hat auch eine einmalige Angabe über die Einsatzmengen von Lachgas für die Jahre 1990, 1995, 2000, 2001 und 2008 gemacht. Zwischen den Jahren wird interpoliert. In 2020 hat der ZVEI rückwirkend bis 2015 die Emissionsdaten gemeldet. Diese jährliche Meldung ist in eine Vereinbarung zur Datenlieferung mit aufgenommen worden. Damit ist die langfristige Verfügbarkeit der Emissionsdaten sichergestellt.

Die Emissionen aus der Halbleiterindustrie steigen je nach Stoff oder sind konstant. Die Emissionen aus der Leiterplattenproduktion sind konstant.

4.6.1.3 Unsicherheiten & Zeitreihenkonsistenz (2.E.1)

Die Unsicherheiten der Halbleiterindustrie wurden vollständig erfasst. Die Unsicherheiten der Emissionen liegen laut des Verbandes bei U_{max}= 12 % und U_{min}= 7 %.

Die Unsicherheiten (U_{min}/U_{max}) für die Emissionen aus der Leiterplattenproduktion liegen bei 15%.

4.6.1.4 Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.E.1)

Rückrechnungen waren nicht erforderlich.

4.6.1.5 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (2.E.1)

Eine allgemeine Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Die Daten haben einen verbandsinternen Prozess der Qualitätssicherung /-kontrolle durchlaufen.

Eine Qualitätskontrolle (nach Tier 1) und eine Qualitätssicherung, die den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen entsprechen, wurden durchgeführt.

Für eine Überprüfung der für die Emissionsberichterstattung ermittelten F-Gas Mengen als Grundlage zur Verifikation stehen außer den vom Verband erhobenen Daten und den vom Statistischen Bundesamt zur Verfügung gestellten Daten keine weiteren Datenquellen zur Verfügung. Vergleiche mit anderen Ländern zeigen keinen Verbesserungsbedarf. Die Emissionsfaktoren liegen in derselben Größenordnung wie die anderer Länder.

4.6.1.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (2.E.1)

Derzeit sind keine Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 468zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

4.6.2 TFT (2.E.2)

Es findet keine Herstellung von TFT Flachbildschirmen in Deutschland statt.

4.6.3 Photovoltaik (2.E.3)

4.6.3.1 Beschreibung der Kategorie (2.E.3)

SF_6 und andere Fluorverbindungen wurden in Deutschland bei der Herstellung von Wafern zum Strukturätzen und zur Reinigung der Reaktionskammern im Fertigungsprozess eingesetzt. Da die Reinheit des Prozessgases niedriger ist als im analogen Produktionsprozess der Halbleiterindustrie, wird die Anwendung Photovoltaik gesondert berichtet. In Deutschland begann die Verwendung von SF_6 in der Solartechnik im Jahr 2003.

Die Zeitreihe zeigt zwischen 2003 und 2006 einen kontinuierlichen Anstieg der Emissionen, der auf steigende Produktionsmengen zurückzuführen ist. 2007 und 2008 ist ein sprunghafter Anstieg zu verzeichnen, da die Zahl der produzierten Wafer und damit auch der Anwendungsmengen von SF_6 stark stiegen. Sinkende Produktionsmengen führten ab dem Jahr 2010 wieder zu sinkenden Emissionen. Ab dem Jahr 2014 gab es in Deutschland keine Waferproduktion mit SF_6 mehr.

NF_3 ersetzte seit 2008 SF_6 in allen neu gebauten Produktionslinien zur Herstellung von Si-Dünnschichtzellen. Die Produktion wurde bis 2015 eingestellt.

Außerdem wurde der perfluorierte Kohlenwasserstoff CF_4 in den Jahren 2002/2003 zum so genannten Kantenisolieren kristalliner Solarzellen eingeführt. Er wurde aber bald durch ein leichter handhabbares Verfahren ersetzt. Der Verbrauch von CF_4, der seinen Spitzenwert im Jahr 2004 erreichte, ging seitdem stark zurück. Die Produktion wurde 2014 eingestellt.

4.6.3.2 Methodische Aspekte (2.E.3)

Wie auch in der Halbleiterindustrie traten die Emissionen in der Photovoltaik während der Produktion auf. Die Fertigungsemissionen konnten nicht allein anhand der eingesetzten Mengen (Verkäufe des Gasehandels) ermittelt werden. Die Differenzen zwischen Verbrauch und Emission resultierten aus der partiellen chemischen Umsetzung im Plasmareaktor und der Wirkung nachgeschalteter Abgasreinigungsanlagen.

Emissionsfaktoren

In Deutschland gab es im Jahr 2009 nur noch einen Hersteller ohne Abgasreinigungsanlage. Daher wurde der IPCC Default-Emissionsfaktor von 40 % nur für das erste Einsatzjahr 2003 angenommen. Danach sankt der Emissionsfaktor mit steigendem Anteil der Wafer-Produktion mit nachgeschalteter Abgasreinigungsanlage. Im Jahr 2010 lag er bei knapp 6 %. Ab 2011 hatten alle Produktionsstätten, die SF_6 einsetzten, Abgasreinigungsanlagen installiert, und der Emissionsfaktor betrug seitdem 4 %.

Bei der Waferproduktion mit NF_3 hatte der Emissionsfaktor einen Wert von 4 % und laeg deutlich unter dem IPCC Default-Emissionsfaktor von 20 %, da alle nationalen Produktionsstätten Abgasreinigungsanlagen betrieben haben.

Der Emissionsfaktor beim Kantenisolieren mit CF_4 betrug 7 %. Die Emissionen aus der Kantenisolierung werden aus Vertraulichkeitsgründen unter 2H3 berichtet.

Aktivitätsdaten

Die jährlichen Verbrauchsmengen wurden vom Statistischen Bundesamt durch Abfragen der Inlandsabsätze der Gaslieferanten (UStatG, 2005) ermittelt. Zusätzlich wurden die Daten in einer gesonderten Studie nachrecherchiert (Schwarz, 2009).

4.6.3.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (2.E.3)

Die Unsicherheiten wurden vollständig erhoben. Die Unsicherheiten der Emissionen (U_{min}/U_{max}) liegen laut Expertenschätzungen bei 10 % für SF_6, 20% für NF_3 und 50 % für CF_4.

4.6.3.4 Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.E.3)

Es waren keine Rückrechnungen erforderlich.

4.6.3.5 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (2.E.3)

Eine allgemeine Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Für eine Überprüfung der für die Emissionsberichterstattung ermittelten F-Gas Mengen als Grundlage zur Verifikation stehen außer den vom Statistischen Bundesamt und vom Forschungsnehmer zur Verfügung gestellten Daten keine weiteren Datenquellen zur Verfügung. Vergleiche mit anderen Ländern zeigen keinen Verbesserungsbedarf. Die Emissionsfaktoren liegen in derselben Größenordnung wie die anderer Länder, die Produktionsstätten mit Abgasreinigungsanlagen betreiben.

4.6.3.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (2.E.3)

Derzeit sind keine Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

4.6.4 Wärmeüberträger (2.E.4)

4.6.4.1 Beschreibung der Kategorie (2.E.4)

Der FKW C_6F_{14} fand als Wärmeüberträger in der Halbleiterindustrie und in ausgewählten ICE-Triebköpfen Anwendung. Die Verwendung von C_6F_{14} in der Halbleiterindustrie war in den 1990er Jahren weit verbreitet, ist aber 2015 zugunsten hydrofluorierter Ether eingestellt worden. Emissionen entstehen daher nur noch aus dem Bestand und bei der Entsorgung. Zur Kühlung in ICE-Triebköpfen kam C_6F_{14} bis 2009 zum Einsatz.

4.6.4.2 Methodische Aspekte (2.E.4)

Die Emissionsfaktoren werden mit 1 % für die Befüllung, 5 % für die Emissionen aus dem Bestand und 15 % für die Entsorgung angenommen. Die 2006 IPCC Guidelines (IPCC, 2006a) enthalten keine Default-Emissionsfaktoren nach Tier 2.

Die Verwendungsmengen und Emissionsfaktoren wurden durch Befragungen von Branchenexperten (Deutsche Bahn, ZVEI) und Literaturangaben im Rahmen eines Forschungsvorhabens ermittelt (Gschrey et al., 2015).

Die durchschnittliche Lebenszeit der Anlagen mit Wärmeüberträger in der Halbleiterindustrie beträgt 12 Jahre.

Wegen der Vertraulichkeit wird die Kategorie unter CRF 2.H.3 berichtet.

4.6.4.3 Unsicherheiten & Zeitreihenkonsistenz (2.E.4)

Die Unsicherheiten wurden vollständig erhoben. Die Unsicherheiten für die Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren (U_{min}/U_{max}) liegen laut Expertenschätzungen bei 20 %.

4.6.4.4 Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.E.4)

Es waren keine Rückrechnungen erforderlich.

4.6.4.5 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (2.E.4)

Eine allgemeine Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Für eine Überprüfung der für die Emissionsberichterstattung ermittelten F-Gas Mengen als Grundlage zur Verifikation stehen außer den vom Forschungsnehmer erhobenen Daten keine weiteren Datenquellen zur Verfügung. Vergleiche mit anderen Ländern zeigen keinen Verbesserungsbedarf. Die Emissionsfaktoren liegen in derselben Größenordnung der in anderen Ländern verwendeten Werte.

4.6.4.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (2.E.4)

Derzeit sind keine Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

4.7 Anwendungen als ODS-Ersatzstoff (2.F)

KC	Category	Activity	EM of	1995 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1995--2024
-/-	2 F, Product Uses as Substitutes for ODS		HFC-23	13,62	0,01	36,76	0,01	169,95
-/-	2 F, Product Uses as Substitutes for ODS		HFC-32	0,76	0,76	262,22	0,76	0,76
-/-	2 F, Product Uses as Substitutes for ODS		HFC-43-10mee	C	C	C	C	C
L/T	2 F, Product Uses as Substitutes for ODS		HFC-125	135,68	0,02	1604,04	0,23	1082,21
L/T	2 F, Product Uses as Substitutes for ODS		HFC-134a	2062,32	0,16	3863,22	0,55	87,32
-/T	2 F, Product Uses as Substitutes for ODS		HFC-143a	76,48	0,01	988,39	0,14	1192,35
-/-	2 F, Product Uses as Substitutes for ODS		HFC-152a	100,24	0,01	0,00	0,01	-100,00
-/-	2 F, Product Uses as Substitutes for ODS		HFC-227ea	0,67	0,67	106,84	0,67	0,67

KC	Category	Activity	EM of	1995 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1995--2024
-/-	2 F, Product Uses as Substitutes for ODS		HFC-236fa	C	C	C	C	C
-/-	2 F, Product Uses as Substitutes for ODS		HFC-245fa	C	C	C	C	C
-/-	2 F, Product Uses as Substitutes for ODS		HFC-365mfc	C	C	C	C	C
-/-	2 F, Product Uses as Substitutes for ODS		C_2F_6	0,00	0,00	3,32	0,01	0,00
-/-	2 F, Product Uses as Substitutes for ODS		C_3F_8	20,07	20,07	0,49	20,07	20,07
-/-	2 F, Product Uses as Substitutes for ODS		C_6F_{14}	C	C	C	C	C

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
HFC, PFC	s. Tabelle 193/Tabelle 194	s. Tabelle 193/Tabelle 194	s. Tabelle 193/Tabelle 194

Die Kategorie Anwendungen als ODS Ersatzstoff ist für HFKW-134a -Emissionen eine Hauptkategorie nach der Emissionshöhe und dem Trend sowie für HFKW-125-Emissionen nach Level und Trend und für HFKW-143a-Emissionen nach Trend.

Zu der Kategorie 2.F gehören Kälte- und Klimaanlagen (2.F.1), die Schaumherstellung (2.F.2), Feuerlöschmittel (2.F.3), Aerosole (2.F.4), Lösemittel (2.F.5) und andere Anwendungen, die ODS-Ersatzstoffe verwenden (2.F.6). Zwecks genauerer Datenerhebung erfolgt eine weitere Unterteilung dieser Unterkategorien, die in den folgenden Unterkapiteln beschrieben wird.

Die Verwendung als Kältemittel in der stationären und mobilen Kühlung ist mit über drei Vierteln der Emissionsmenge die größte Quelle der HFKW-Emissionen dieser Kategorie. Die verbleibenden Emissionen verteilen sich auf Schäume und Aerosole, sowie in geringen Mengen auf Feuerlöschmittel und Lösemittel.

Die FKW-Emissionen stammen aus dem Einsatz bestimmter Kältemittelgemische in Kälte- und Klimaanlagen.

Tabelle 193: Methoden und verwendete Emissionsfaktoren für das aktuelle Berichtsjahr in Kategorie 2.F.1 – Kälte- und Klimaanlagen

			Schadstoff		Lebensdauer	Herstellung	Anwendung	Entsorgung	
	QG	Methode	HFKW	FKW	[Jahre]	Emissionsfaktor (dimensionslos)	Emissionsfaktor (dimensionslos)	Restfüllstand (dimensionslos)	Rückgewinnungsrate (dimensionslos)
Kälte- und Klimaanlagen	**2.F.1**								
Gewerbekälte	2.F.1a								
- Steckerfertige Geräte					10 (D)	0,005 (D)	0,01 - 0,014 (D)	0,90 (CS)	0,326 - 0,6 (D)
- Verflüssigungssätze		Tier 2a	HFKW		12 (D)	0,01 (D)	0,049 - 0,097 (CS)	0,85 (D)	0,475 - 0,8 (D, CS)
- Zentralanlagen				FKW	12 - 14 (D)	0,01 (D)	0,0805 - 0,195 (D, CS)	0,875 (D)	0,429 - 0,8 (D, CS)
Haushaltskälte	2.F.1b								
- Haushaltskühlgeräte		Tier 2a	HFKW		15 (D)	NO	0,003 (D)	0,955 (CS)	0,733 (CS)
- Speiseeismaschinen		Tier 2a	HFKW		15 (CS)	NO	0,003 (CS)	0,955 (CS)	0,53 - 0,65 (CS)
Industriekälte	2.F.1c								
- Steckerfertige Geräte		Tier 2a	HFKW		10 (CS)	0,005 (D)	0,01 - 0,014 (CS)	0,9 (D)	0,337 - 0,6 (D)
- Großkälteanlagen				FKW	10 - 30 (CS, D)	0,01 (D)	0,0455 - 0,088 (CS, D)	0,85 (D)	0,45 - 0,8 (D)
Transportkälte	2.F.1d								
- Kühlfahrzeuge		Tier 2a	HFKW	FKW	10 (CS)	5 g/Anlage (CS, D)	0,15 - 0,3 (D)	0,875 (CS)	0,657 (D)
- Kühlcontainer					14 (CS)	NO	0,05 - 0,1 (CS)	0,875 (CS)	0,657 (D)
Mobile Klimaanlagen	2.F.1e								
- Nfz					15 (D)	5 g/Anlage (CS, D)	0,15 (D)	0,34 (D)	0,38 - 0,5 (D)
- Pkw		Tier 2a	HFKW		15 (D)	3 g/Anlage (CS, D)	0,1 (D)	0,34 (D)	0,38 - 0,5 (D)
- Busse					15 (D)	50 g/Anlage (D)	0,15 (D)	0,34 (D)	0,38 (D)

			Schadstoff		Lebensdauer	Herstellung	Anwendung	Entsorgung	
- Schiffe					25 (CS)	0,01 (CS)	0,1 - 0,35 (CS)	NO	NO
- Schienenfahrzeuge					25 (CS)	0,005 (D)	0,06 (CS)	0,875 (CS)	0,756 - 0,8 (CS)
- Landmaschinen					10 (CS)	5 g/Anlage (CS)	0,15 - 0,25 (CS)	0,34 (CS)	0,117 (CS)
- Flugzeuge					-	NO	0,05 (CS)	NO	NO
Stationäre Klimaanlagen	2.F.1f								
- Großklimaanlagen		Tier 2a	HFKW		15 - 25 (D)	0,005 (D)	0,028 - 0,06 (D)	0,9 (D)	0,658 - 0,8 (D)
- Wärmepumpen					15 (D)	0,005 (D)	0,01 - 0,025 (D)	0,75 (D)	0,5 - 0,65 (D)
- Wärmepumpentrockner					15 (CS)	0,005 (CS)	0,003 (CS)	0,955 (CS)	0,65 (CS)
- Spülmaschinen					12 (CS)	0,01 (CS)	0,003 (CS)	0,955 (CS)	0,82 - 0,85 (CS)
- mob. Raumklimageräte					10 (D)	NO	0,025 - 0,034 (D)	0,75 (D)	0,242 - 0,4 (D)
- Single-Split-Geräte					10 (D)	0,1 (CS)	0,05 - 0,069 (D)	0,875 (CS)	0,379 - 0,6 (D)
- Multi-Split-Geräte					10 (D)	0,01 (D)	0,042 - 0,079 (D)	0,875 (CS)	0,62 - 0,8 (D)
- VRF-Geräte					10 (D)	0,01 (D)	0,049 - 0,081 (D)	0,875 (CS)	0,72 - 0,8 (D)

Tabelle 194: Methoden und verwendete Emissionsfaktoren für das aktuelle Berichtsjahr in 2.F.2 (Schaumherstellung), 2.F.3 (Feuerlöschmittel), 2.F.4 (Aerosole), 2.F.5 (Lösemittel) und 2.F.6 (Andere Anwendungen, die ODS-Ersatzstoffe verwenden)

	QG	Methode	Schadstoff		Lebensdauer	Emissionsfaktor (dimensionslos)		
			HFKW	FKW	[Jahre]	Herstellung	Anwendung	Entsorgung
Schaumherstellung	2.F.2							
geschlossenzellig	2.F.2a							
- PU-Hartschaum mit 134a		Tier 2a	HFKW		50 (D)	0,1 (D)	0,005 (D)	NO
- PU-Hartschaum mit 41/227ea/245fa/365mfc					50 (D)	0,1 - 0,15 (D)	0,01 (D)	NO
- XPS-Schaum mit 134a/1234ze					50 (D)	C	0,0066 (CS)	NO
offenzellig	2.F.2b							
- XPS-Schaum mit 152a		Tier 2a	HFKW		-	1 (CS)	NO	NO
- PU-Integralschaum mit 134a/227ea/245fa/365mfc/ 1233zd/1336mzz		Tier 2a			-	1 (CS)	NO	NO
- PU-Montageschaum mit 134a/152a		Tier 2a			-	0,5 - 1,5 g/Dose (CS)	1 (CS)	NO
Feuerlöschmittel	2.F.3	CS	HFKW		20 (D)	0,001 (CS)	0,01 - 0,004 (CS, D)	0,01 – 0,09(CS)
Aerosole	2.F.4							
Dosieraerosole	2.F.4a	Tier 2a	HFKW		-	0,015 (CS)	1 (CS)	NO
Sonstige Aerosole/Novelties	2.F.4b/c	Tier 2a			-	0,015 (CS)	1 (CS)	NO
Lösemittel	2.F.5	Tier 2a	HFKW		-	NO	0,5 (D)	NO
Andere Anwendungen, die ODS Ersatzstoffe verwenden	2.F.6					NO	NO	NO

Halogenierte Kohlenwasserstoffe werden in verschiedenen Anwendungen eingesetzt. Während die eingesetzten Stoffe in einigen, so genannten offenen Anwendungen vollständig und noch im selben Jahr emittieren, kommt es in anderen Anwendungen zu großen Speichermengen (stocks). Aus diesen „stocks“ emittieren sie ganz oder teilweise über die gesamte Nutzungsphase und bei der Entsorgung. Die verwendeten Emissionsfaktoren (EF) sind länderspezifisch (CS) oder IPCC Default (D).

Die in einem Berichtsjahr langsam aus dem „stock“ entweichenden sowie bei der Herstellung und Entsorgung emittierenden Mengen an HFKW und FKW stellen die Emissionen dar, wie sie in den Inventartabellen angegeben sind.

Die für die einzelnen Produktgruppen erhobenen Emissionsdaten setzen sich im Allgemeinen aus Herstellungs-, Anwendungs- und Entsorgungsemissionen zusammen. Sofern nicht bei den jeweiligen Methoden etwas anderes angegeben ist, werden sie folgendermaßen berechnet:

1. Herstellungsemissionen werden über den Inlands-Neuverbrauch als Aktivitätsrate bestimmt:

Gleichung 8:

$$EM_{Herstellung} = \text{Inlands-Neuverbrauch} * EF_{Herstellung}$$

2. Anwendungsemissionen basieren auf dem Endbestand an Schadstoff als Aktivitätsrate und werden mit folgender Formel berechnet:

Gleichung 9:

$$EM_{Anwendung} = \text{Endbestand} * EF_{Anwendung}$$

Der Endbestand des aktuellen Jahres wird durch Summation der jährlichen Neuzugänge vom ersten bis zum aktuellen Berichtsjahr errechnet. Der Neuzugang eines Jahres ist der Inlands-Neuverbrauch, von dem Herstellungsemissionen und durch Abgänge verursachte Verluste subtrahiert werden. Hier muss auch noch der Außenhandel mit berücksichtigt werden.

3. Entsorgungsemissionen beziehen sich auf den Neuzugang des Jahres, das x Jahre (entsprechend der Produktlebensdauer x) vor dem aktuellen Berichtsjahr n liegt:

Gleichung 10:

$$EM_{Entsorgung} = \text{Neuzugang}(n\text{-}x) * EF_{Entsorgung}$$

4. Bei Kälte- und Klimaanlagen werden die Entsorgungsemissionen entsprechend Vol. 3, Gleichung 7.14 der 2006 IPCC-Guidelines berechnet:

Gleichung 11:

$$EM_{Entsorgung} = \text{Neuzugang}(n\text{-}x) * \text{Restfüllstand} * (1\text{-Rückgewinnungsfaktor})$$

In diesem Kapitel werden die Abschnitte „Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz, Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung, Kategoriespezifische Rückrechnungen“ und „Geplante Verbesserungen“ zum Teil auf die gesamte Kategorie, die Unterkategorie oder auch nur auf eine Teilgruppe bezogen. Der Bezug ist aus der Angabe der CRF-Nummer in der Abschnittsüberschrift ersichtlich.

4.7.1 Kälte- und Klimaanlagen (2.F.1)

4.7.1.1 Beschreibung der Kategorie (2.F.1)

Dieser Bereich wird in die Teilgruppen Gewerbekälte, Haushaltskälte, Industriekälte, Transportkälte, mobile Klimaanlagen und stationäre Klimaanlagen (siehe Tabelle 193) gegliedert.

Die mit Abstand wichtigsten HFKW-Kältemittel sind in Deutschland der HFKW-134a und der uHFKW-1234yf sowie die Gemische R-404A, R-407C und R-410A. uHFKW-1234yf ist kein berichtspflichtiges Gas unter der Klimarahmenkonvention und wird freiwillig als *additional greenhouse gas* berichtet (Kapitel 4.9.3).

Für die Berechnung der HFKW-Emissionen aus den Untergruppen der Kälte- und Klimaanlagen werden Einzeldaten erhoben oder Kältemittel-Modelle genutzt und bei der jeweiligen Methode beschrieben.

Die verwendeten Emissionsfaktoren sind das Ergebnis von Expertenbefragungen. Entsorgungsemissionen in dieser Kategorie treten erstmals im Jahr 2000 auf, in den Unterkategorien 2.F.1.a (Gewerbekälte) und 2.F.1.e (mobile Klimaanlagen).

4.7.1.2 Methodische Aspekte (2.F.1)

4.7.1.2.1 Gewerbekälte (2.F.1.a)

Die Gewerbekälte ist die größte und zugleich heterogenste Anwendung von (H)FKW. Es erfolgt eine Unterteilung in steckerfertige Geräte, Verflüssigungssätze und Zentralanlagen. Bei Zentralanlagen resultiert die Vielfalt in Bezug auf Bauart, Größe, Kältemitteltyp und Emissionsdichtheit aus der überwiegenden Konzeption individuell angepasster Lösungen. Bei steckerfertigen Geräten und Verflüssigungssätzen ist dies weniger ausgeprägt.

Der Einsatz der (H)FKW als Kältemittel begann nur zögerlich. So wurde der HFKW-134a erst 1993 in nennenswertem Umfang eingesetzt. Die Kältemittelgemische R-404A und R-407C kamen ebenfalls erst ab 1993 zum Einsatz, die verschiedenen R-422-Gemische, die als drop-in Kältemittel bei der Umrüstung von HFCKW-22-Anlagen eingesetzt wurden, wurden zwischen 2009 und 2013 verwendet. Daneben kamen seit 1993 in geringem Umfang auch FKW-haltige Kältemittelgemische wie R-403A/B, R-413A, Isceon 89 und R-508A/B als drop-in Kältemittel zum Einsatz. Seit 2007 findet R-410A Verwendung in kleinen Zentralanlagen. Für die Umrüstung von R-404A-Zentralanlagen kommen seit 2013 das Kältemittelgemisch R-449A und seit 2014 auch R-448A zum Einsatz. R-449A, R-452A und R-513A finden seit 2016 auch in Verflüssigungssätzen Verwendung, seit 2019 auch der nicht berichtspflichtige uHFKW-1234ze sowie R-454C und R-455A, die beiden letztgenannten ebenso in steckerfertigen Geräten. Als halogenfreie Alternativen werden seit 2002 auch CO_2 (R-744) und seit 2010 Propan (R-290) verwendet.

Heute sind neben HFKW-134a die Mischungen R-404A und R-449A die wichtigsten HFKW-Kältemittel im Bestand stationärer Gewerbekälteanlagen, daneben spielt das halogenfreie Kältemittel R-744 eine wichtige Rolle. Seit 2020 ist das Inverkehrbringen von gewerblich genutzten Kühl- und Gefriergeräten, die HFKW-Kältemittel mit einem Treibhauspotential (GWP) von 2.500 oder mehr verwenden, laut EU F-Gas Verordnung verboten, seit 2022 beträgt die GWP-Grenze sogar 150. Für stationäre Kälteanlagen gilt ebenfalls seit 2020 ein Verbot des Inverkehrbringens ab einem GWP des Kältemittels von 2.500 oder mehr. Ab 2030 liegt die GWP-Grenze für diese Anlagen bei 150 (EU, 2024b). Die Auswirkungen dieser Verbote sind bereits heute sichtbar – bei Neuanlagen und neuen Geräten kommt seit 2019 kein R-404A mehr zum Einsatz. In neuen Zentralanlagen von Supermärkten wird seit 2023 kein HFKW-Kältemittel mehr eingefüllt. Kältemittelemissionen in diesem Bereich stammen fortan nur aus dem Betrieb und der Entsorgung der Anlagen.

Aufgrund der außerordentlich großen Zahl an Kältefachbetrieben ist eine detaillierte statistische Erfassung der Kältemittel-Bestände nicht praktikabel, so dass eine andere Berechnungsmethode angewendet wird.

Zur Berechnung der Emissionen von Zentralanlagen der Gewerbekälte, die im Lebensmitteleinzelhandel zum Einsatz kommen, wird das folgende Kältemittelmodell verwendet (Schwarz et al., 2012):

- Der Außenhandel mit vor Ort errichteten Kälteanlagen ist vernachlässigbar, so dass der jährliche HFKW-Verbrauch für Neuanlagen gleich dem HFKW-Zugang in Neuanlagen ist.
- Ausgangspunkt für die Berechnungen ist nicht die Zahl der Betriebe oder die installierte Kälteleistung, sondern die Verkaufsfläche der Lebensmitteleinzelhandelsgeschäfte, da diese

jährlich statistisch erfasst wird. Für Discountmärkte, deren Verkaufsflächen in Deutschland relativ konstant bei 800 m² liegen, wird angenommen, dass der Kältebedarf und damit die Kältemittelmenge für alle Märkte gleich groß sind. Daher ist hier die Anzahl der Discountmärkte Ausgangspunkt für weitere Berechnungen. Auch die Anzahl der Discounter wird jährlich statistisch erfasst.

- Von einem typischen Supermarkt mittlerer Größe wird auf Basis einer Studie des EPEE[69] (SKM Enviros, 2010) der Koeffizient „Kilogramm pro Quadratmeter Verkaufsfläche" abgeleitet. Dieser beträgt 0,23 kg/m². Für Discounter wird der Koeffizient „Kilogramm pro Discountmarkt" bestimmt. Er hat eine Größe von 80 kg/Markt. Mit Hilfe dieser Koeffizienten wird der jährliche Kältemittelbestand für die drei Marktformate Discountmärkte, kleine und große Supermärkte berechnet.
- Die nach Kältemitteltypen untergliederten Kältemittelbestände der verschiedenen Marktformate werden mit Hilfe von prozentualen Anteilen der verwendeten Kältemitteltypen bestimmt. Die Kältemittelanteile werden in statischen Rechenmodellen abgeleitet, die auf Expertenschätzungen beruhen. Hierbei wird zwischen großen Supermärkten (Verkaufsflächen über 1.500 m²), kleinen Supermärkten (Verkaufsflächen zwischen 400 und 1.500 m²) und Discountmärkten (Verkaufsflächen von 800 m²) unterschieden.
- Die Division der Kältemittelbestände durch die durchschnittliche Lebensdauer der Anlagen (12 Jahre für Discountmärkte, 14 Jahre für alle anderen Marktformate) führt zum HFKW-Zugang in Neuanlagen.
- Herstellungsemissionen und Bestandsemissionen werden durch Gleichung 8 und Gleichung 9 errechnet. Die Herstellung erfolgt i.d.R. vor Ort.
- Der Austausch von FCKW und HFCKW in Altanlagen wird gesondert berücksichtigt.
- Entsorgungsemissionen treten bei Zentralanlagen erstmalig im Jahr 2000 auf. Der Abgang von Kältemittel wird mit Hilfe der durchschnittlichen Lebensdauer, bei Zentralanlagen in Discountmärkten 12 Jahre, bei Zentralanlagen aller anderen Marktformate 14 Jahre, errechnet. Die nominale Entsorgungsmenge entspricht dabei dem Neuzugang, den eine Anlage bei Inbetriebnahme enthielt. In der Praxis enthalten die Anlagen zum Zeitpunkt der Entsorgung jedoch weniger Kältemittel als die nominale Füllmenge, da in der Zeit vor der Außerbetriebnahme in der Regel nicht nachgefüllt wird. Daher wird der bei der Entsorgung vorliegende aktuelle Füllstand, die „effektive Entsorgungsmenge", mit Hilfe von prozentualen Restfüllständen ermittelt. In die Bestimmung der Restfüllstände fließt als wichtigster Faktor der Kältemittelverlust ein, bei dem eine Anlage nachgefüllt werden muss, um ihre Funktionsfähigkeit aufrecht zu erhalten. Der effektive Füllstand am Lebensende ist um die Hälfte der Differenz zwischen technischem Mindestfüllstand und Nominalfüllmenge größer als der technische Mindestfüllstand. Er beträgt für Zentralanlagen 87,5 % der Nominalfüllmenge.
- Die Entsorgungsemissionen werden durch Multiplikation der so bestimmten „effektiven Entsorgungsmenge mit dem umgekehrten Rückgewinnungsfaktor mit Gleichung 11 berechnet.

[69] EPEE: The European Partnership for Energy and the Environment.

- Emissionen der nicht berichtspflichtigen uHFKW-1234yf und uHFKW-1234ze aus den Kältemittelgemischen R-448A und R-449A werden gemäß den Empfehlungen der UNFCCC Reporting Guidelines 2014 (FCCC/CP/2013/10/Add.3, Decision 24/CP.19) freiwillig als „additional greenhouse gases“ berichtet. Die Emissionen sind aggregiert mit anderen nicht berichtspflichtigen Emissionen in Kapitel 4.9.3 aufgeführt. In den CTF-Tabellen sind keine Daten zu freiwillig berichteten Emissionen enthalten.

Auch bei Verflüssigungssätzen der Gewerbekälte ist der Kältemittelbestand zentraler Bezugspunkt des Kältemittelmodells zur Berechnung der Emissionen:

- Ausgangspunkt für die Berechnungen ist die Anzahl von Betrieben in den zahlreichen Anwendungssektoren von Verflüssigungssätzen, deren Auswahl auf einer Studie des VDMA VDMA (2011) beruht. Dazu zählen Getränkeabholmärkte, Tankstellenshops, Gärtnereien, Blumengeschäfte, Blumengroßhandel, Kantinen, Caterer, Krankenhäuser, Pflegeheime, Gaststätten- und Beherbergungsgewerbe, Fleischerfachbetriebe und -filialen, Bäckereihandwerk und -filialen, Discountmärkte, kleine Lebensmitteleinzelhandelsgeschäfte und der Facheinzelhandel mit Nahrungsmitteln. Die Anzahl der Betriebe wird aus öffentlich zugänglichen Statistiken jährlich aktualisiert.
- Der Kältemittelbestand für die einzelnen Sektoren berechnet sich als Produkt aus der jeweiligen Anzahl der Betriebe, den sektorspezifischen Füllmengen, die durch Literaturrecherche und Expertenbefragungen ermittelt wurden, und den prozentualen Anteilen der verwendeten Kältemitteltypen. Die Kältemittelanteile werden in einem statischen Rechenmodell abgeleitet (Schwarz et al., 2012).
- Die Division des Gesamtkältemittelbestands durch die durchschnittliche Lebensdauer von Verflüssigungssätzen (12 Jahre) führt zum HFKW-Zugang in Neuanlagen.
- Herstellungsemissionen und Bestandsemissionen werden durch Gleichung 8 und Gleichung 9 errechnet.
- Durch Gleichung 11 werden die Entsorgungsemissionen berechnet. Die nominale Entsorgungsmenge ist sowohl quantitativ als auch von den Kältemittelanteilen her mit der Erstbefüllung vor 12 Jahren identisch. Der effektive Füllstand am Lebensende beträgt für Verflüssigungssätze 85 % der Nominalfüllmenge.
- Emissionen der nicht berichtspflichtigen uHFKW-1234yf und uHFKW-1234ze aus den Kältemittelgemischen R-448A, R-449A, R-452A, R-454C, R-455A und R-513A bzw. aus der Verwendung als Einzelstoff werden gemäß den Empfehlungen der UNFCCC Reporting Guidelines 2014 ((UNFCCC, 2014), FCCC/CP/2013/10/Add.3, Decision 24/CP.19) freiwillig als „additional greenhouse gases“ berichtet. Die Emissionen sind aggregiert mit anderen nicht berichtspflichtigen Emissionen in Kapitel 4.9.3 aufgeführt. In den CTF-Tabellen sind keine Daten zu freiwillig berichteten Emissionen enthalten.

Die Anwendungssektoren für hermetische steckerfertige Geräte decken sich überwiegend mit denen für Verflüssigungssätze. Ergänzend kommen noch Verkaufsautomaten, wie zum Beispiel Getränkekühler, und Kühlzentrifugen hinzu. Die Berechnung der Emissionen entspricht dem unter Verflüssigungssätzen beschriebenen Kältemittelmodell. Die durchschnittliche Lebensdauer der Geräte beträgt 10 Jahre, der Restfüllstand bei Entsorgung 90 % der Nominalfüllmenge.

Emissionsfaktoren

Die verwendeten Emissionsfaktoren sind das Ergebnis von Expertenbefragungen und Literaturauswertungen und wurden zuletzt 2023 auf ihre Aktualität hin überprüft (Warncke & Gschrey, 2024).

Die Befüllungsemissionen sind bei kältetechnischen Anlagen im Allgemeinen gering. Die 2006 IPCC Guidelines geben für *initial emission* in Vol. 3, Tabelle 7.9 Werte von 0,5 bis 3 Prozent der Erstbefüllung für steckerfertige Geräte sowie mittelgroße und große Gewerbekälteanlagen an. Der länderspezifische $EF_{Herstellung}$ liegt mit 0,5 % für steckerfertige Geräte sowie 1 % für Zentralanlagen und Verflüssigungssätze innerhalb dieses Bereichs.

Die laufenden (H)FKW-Emissionen aus stationären Kälteanlagen der Gewerbekälte differieren nach der Anlagenbauart stark voneinander. So reicht der Kältemittelverlust von 1 bis 1,4 % für steckerfertige Einzelgeräte über 4,9 bis 9,7 % für Verflüssigungssätze bis zu 8,1 bis 19,5 % für Zentralanlagen. Die Emissionsfaktoren der Anwendung sinken für alle Anlagen und Geräte der Gewerbekälte von 1993 an kontinuierlich ab (siehe Tabelle 193), um dem Umstand des zunehmend sorgsameren Umgangs mit HFKW-Kältemitteln Rechnung zu tragen. Die verwendeten Emissionsfaktoren liegen verglichen mit den in den 2006 IPCC Guidelines (IPCC (2006a): Vol. 3, Tabelle 7.9) angegebenen Werten von 1 bis 15 % für Einzelgeräte und 10 bis 35 % für mittelgroße und große gewerbliche Kälteanlagen im unteren Bereich (Einzelgeräte und Zentralanlagen bis zum Berichtsjahr 2014) bzw. darunter (Verflüssigungssätze und Zentralanlagen ab dem Berichtsjahr 2015).

Die Entsorgung setzt nach einer durchschnittlichen Lebensdauer von 10 (Einzelgeräte), 12 (Verflüssigungssätze und Zentraleanlagen in Discountmärkten) bzw. 14 Jahren (Zentralanlagen in allen Marktformaten außer Discountmärkten) ein. Die verwendeten Lebensdauern liegen damit innerhalb der in den 2006 IPCC Guidelines (IPCC, 2006a) angegebenen Werten von 10 bis 15 (Einzelgeräte) bzw. 7 bis 15 Jahren (mittelgroße und große gewerbliche Kälteanlagen).

Der in den Geräten und Anlagen enthaltene Restfüllstand beträgt bezogen auf die Erstfüllmenge 90 % (Einzelgeräte), 85 % (Verflüssigungssätze) bzw. 87,5 % (Zentralanlagen). In den 2006 IPCC Guidelines sind Werte von 0 bis 80 % (Einzelgeräte) und 50 bis 100 % (mittelgroße und große gewerbliche Kälteanlagen) angegeben. Der verwendete Restfüllstand von Einzelgeräten liegt somit über dem angegebenen Wertebereich, alle anderen verwendeten Werte sind Default-Werte.

Die Rückgewinnungsfaktoren entwickeln sich kontinuierlich nach oben, so dass die bei der Entsorgung auftretenden Verluste bezogen auf die Erstfüllmenge bzw. Restfüllmenge über die Jahre kleiner werden. Für steckerfertige Einzelgeräte beträgt der Rückgewinnungsfaktor im Jahr 2003 32,6 % und ab dem Jahr 2020 60 %, bei Verflüssigungssätzen beträgt der Rückgewinnungsfaktor im Jahr 2005 47,5 % und ab dem Jahr 2020 80 %, bei Zentralanlagen steigt der Rückgewinnungsfaktor von 42,9 % im Jahr 2000 auf 80 % ab dem Jahr 2020. Damit liegen die meisten verwendeten Rückgewinnungsfaktoren innerhalb des in den 2006 IPCC Guidelines (IPCC (2006a): Vol. 3, Tabelle 7.9) angegebenen Wertebereichs von 0 bis 70 %, lediglich die für Zentralanlagen ab dem Berichtsjahr 2009 und für Verflüssigungssätze ab dem Berichtsjahr 2016 genutzten Rückgewinnungsfaktoren liegen über den IPCC Werten.

Aktivitätsdaten

Die Verkaufsflächen der Lebensmitteleinzelhandelsgeschäfte werden jährlich statistisch durch zwei Marktforschungsinstitute[70] erfasst. Das EHI erhebt ebenfalls die Anzahl der Discounter.

[70] EHI – EuroHandelsinstitut, Köln, The Nielsen Company GmbH, Frankfurt am Main.

Auch die Anzahl der Gewerbebetriebe wird jährlich aus verschiedenen, öffentlich verfügbaren Statistiken aktualisiert (Schwarz et al., 2012).

Der jährliche Neuzugang von FKW-116 (C_2F_6), FKW-218 (C_3F_8), HFKW-125 und HFKW-23, die in den Kältemittelgemischen R-508A, R-508B, Isceon MO 89 und R-413A enthalten sind bzw. im Fall von HFKW-23 auch als Einstoffkältemittel verwendet wird, wird der jährlichen nationalen Erhebung nach Umweltstatistikgesetz (UStatG, 2005) entnommen.

Die typische kältetechnische Ausstattung von Gewerbebetrieben beruht auf Literaturauswertung und Expertenschätzung. Der Koeffizient „Kilogramm pro Quadratmeter Verkaufsfläche“ bzw. „Kilogramm pro Discounter“ ist von Experten mit Hilfe von Fachliteratur (SKM Enviros (2010), Clodic and Barrault (2011), Clodic et al. (2012)) semiempirisch bestimmt worden. Die Füllmengen von Verflüssigungssätzen und steckerfertigen Geräten sind durch Fachgespräche mit deutschen Kälteanlagenbauern und durch Literaturrecherche bestimmt worden.

4.7.1.2.2 Haushaltskälte (2.F.1.b)

1994 stellten inländische Produzenten von Haushaltskühl- und Gefriergeräten von FCKW-12 auf HFKW-134a um, kurze Zeit später erfolgte in Deutschland die Umstellung auf Isobutan (R-600a). Ein geringer Anteil von Geräten mit HFKW-134a wurde aber zwischen 1993 und 2014 importiert. Ab 2015 ist der Import von Haushaltskühl- und -gefriergeräten, die Kältemittel mit einem GWP von 150 oder mehr verwenden, laut EU F-Gas Verordnung verboten ab 2026 ist das Inverkehrbringen von Geräten mit fluorierten Treibhausgasen generell verboten (EU, 2024b).

Herstellungsverluste und der Neuverbrauch für das Inland brauchen nicht bestimmt zu werden, da Befüllungen mit HFKW nur im Ausland erfolgten.

Mit Gleichung 9: werden die jährlichen HFKW-Emissionen auf Basis des Endbestands berechnet. Dazu ermittelt und aggregiert man den jährlichen HFKW-Neuzugang seit 1993 und subtrahiert die aggregierten jährlichen Abgänge durch Entsorgung.

Entsorgungsemissionen, die bei einer durchschnittlichen Lebensdauer von 15 Jahren ab dem Jahr 2008 auftreten, werden mit Gleichung 11 berechnet.

In Deutschland bieten eine Vielzahl von ausländischen Unternehmen seit Ende der 1990er Jahre „Speiseeismaschinen“ für den Heimbedarf an. Kompressorbetriebene Speiseeismaschinen arbeiten wie eine klassische Kälteanlage mit Kältemittel. Zum Einsatz kommen seit 1997 der HFKW-134a und das Kältemittelgemisch R-404A, seit 2015 zunehmend auch Geräte mit Isobutan (R-600a). Die Füllmengen der Speiseeismaschinen mit HFKW-Kältemittel bewegen sich, je nach Größe des Gerätes, zwischen etwa 30 g und über 100 g. Daraus ergibt sich eine mittlere HFKW-Füllmenge von etwa 75 g.

Da keine Produktion im Inland stattfindet, fallen keine inländischen Herstellungsemissionen an.

Die jährlichen HFKW-Emissionen auf Basis des Endbestands werden mit Gleichung 9 berechnet. Der Endbestand errechnet sich aus den aggregierten jährlichen HFKW-Neuzugängen seit 1997 abzüglich der aggregierten jährlichen Abgänge durch Entsorgung.

Die Entsorgung setzt nach einer durchschnittlichen Lebensdauer von 15 Jahren, also ab 2012, ein. Die dabei entstehenden Emissionen werden mit Gleichung 11 berechnet.

Emissionsfaktoren

Die laufenden HFKW-Emissionen aus Haushaltskühl- und -gefriergeräten werden auf 0,3 % geschätzt und liegen damit innerhalb des in den 2006 IPCC Guidelines (IPCC (2006a): Vol. 3, Tabelle 7.9) angegebenen Wertebereichs von 0,1 bis 0,5 %.

Die Entsorgung setzt nach einer durchschnittlichen Lebensdauer von 15 Jahren ein. Die verwendete Lebensdauer liegt damit innerhalb des in den 2006 IPCC Guidelines angegebenen Wertebereichs von 12 bis 20 Jahren.

Der in den Geräten enthaltene Restfüllstand beträgt bezogen auf die Erstfüllmenge 95,5 %. In den 2006 IPCC Guidelines sind Werte von 0 - 80 % angegeben. Der verwendete Wert liegt somit oberhalb des in den 2006 IPCC Guidelines angegebenen Bereichs. Der Grund dafür sind die geringen Kältemittelverluste während der Nutzungsphase (0,3 % pro Jahr, 4,5 % über die gesamte Nutzungsphase), die keinen kleineren Restfüllstand rechtfertigen.

Der Rückgewinnungsfaktor beträgt 73,3 % und liegt damit leicht oberhalb des in den 2006 IPCC Guidelines (IPCC (2006a): Vol. 3, Tabelle 7.9) angegebenen Wertebereichs von 0 bis 70 %. Der höhere Rückgewinnungsfaktor ist auf die laut Elektrogesetz (ElektroG, 2015) gesetzlich geregelte Entsorgung von Haushaltsgeräten zurückzuführen.

Für Speiseeismaschinen gibt es keine Vorgaben in den 2006 IPCC Guidelines (IPCC, 2006a). Alle zur Berechnung herangezogenen Werte sind somit länderspezifisch (siehe Tabelle 193). Die Bestandsemissionen werden auf 0,3 % geschätzt. Die durchschnittliche Lebensdauer beträgt 15 Jahre. Der Restfüllstand bezogen auf die Erstfüllmenge liegt ebenso wie bei Haushaltskühlgeräten bei 95,5 %, die Rückgewinnungsrate wird auf 53 % (2012) bis 65 % (ab 2020) geschätzt.

Aktivitätsdaten

Der jährliche Neuzugang von 1 % an Haushaltskühl- und Haushaltsgefriergeräten ist eine Schätzung führender Kühlgerätehersteller.

Unterstützt durch Aussagen eines namhaften Herstellers von Speiseeismaschinen wurde die Anzahl der in Deutschland befindlichen Speiseeismaschinen im Jahr 2016 auf 1,5 % der Gesamtzahl der Haushalte geschätzt. Der jährliche Neuzugang liegt konstant bei 6,7 % (Warncke et al., 2018).

4.7.1.2.3 Industriekälte (2.F.1.c)

Die im Sektor „Industriekälte“ zusammengefassten Kälteanwendungen im Industriebetrieb dienen der Erzeugung von Produkten, in der Regel von Nahrungsmitteln, die gekühlt oder gefroren werden. Wie in der Gewerbekälte ist die kältetechnische Ausstattung in der Regel nicht serienmäßig, sondern individuell angepasst, so dass für die Berechnung der Emissionen ein Kältemittelmodell verwendet werden muss.

Fluorhaltige Kältemittel sind in der Industrie, besonders in der Lebensmittelindustrie kein allgemeiner Standard und natürliche Kältemittel, hauptsächlich Ammoniak (NH_3), werden viel häufiger eingesetzt als in anderen Sektoren. Als fluorhaltige Kältemittel werden in der Industriekälte R-404A, HFKW-134a, R-407C, R-507A und R-422D als Ersatzkältemittel für umgerüstete HFCKW-22-Anlagen eingesetzt. Daneben spielen HFKW-23 und FKW-116 bei Tieftemperaturanlagen, sowie das Kältemittel HFKW-227ea zur Kranklimatisierung und für Hochtemperaturwärmepumpen eine Rolle.

Der Einsatz fluorhaltiger Kältemittel beginnt in Deutschland 1993. Entsorgungsemissionen treten erstmalig 2002 aus umgerüsteten FCKW-12 und HFCKW-22-Anlagen auf.

Für die Industriekälte wird folgendes Kältemittel-Modell genutzt:

- Der Kältemittelbestand ist zentraler Bezugspunkt des Modells. Er gliedert sich in die zwölf großen Sektoren der Industriekälte: Bierbrauereien, Weinerzeugung, Fleischproduktion, Molkereien, Kühlhäuser, Schokoladeproduktion, Tiefkühlkost- und Fruchtsafterzeugung,

Eisbahnen, Milchkühlung in der Landwirtschaft, sonstige Industrie (80 % Chemische Industrie) und hermetisch geschlossene Geräte der verarbeitenden Industrie. Die Berechnungsbasis zur Bestimmung des Kältemittelbestands sind die Produktionsmengen von Gütern, die über öffentlich zugängliche Waren-Statistiken jährlich aktualisiert werden.

- In den drei kleineren Sektoren der Industriekälte (Kranklimatisierung, Hochtemperatur-wärmepumpen und Tieftemperaturkühlung) mit HFKW-23 (vornehmlich in der Kunststoffindustrie) und R-508A/B, wird der jährliche Neuzugang als Ausgangsgröße zur Berechnung des Bestands und aller Emissionen verwendet.
- Basierend auf diesen Produktionsmengen erfolgt die Umrechnung in die für die Kühlung der Güter in den zwölf großen Sektoren installierte Kälteleistung. Die dafür benötigten Kennziffern „installierte Kälteleistung pro jährliche Güterproduktion“ wurden basierend auf Fachliteratur empirisch ermittelt.
- Die Abschätzung der Kältemittelmenge für diese Kälteleistungen erfolgt auf Basis von Kältemittelraten für Plus- und Minuskühlung sowie direkter und indirekter Kühlung. Die verwendeten Kältemittelraten wurden ebenfalls durch Literaturrecherche, u.a. Clodic and Barrault (2011) und Clodic et al. (2012), ermittelt. Sie liegen zwischen 2 kg/kW für indirekte Plus-Kühlung und 8,8 kg/kW für direkte Minus-Kühlung. Aus der Kombination dieser Werte mit jeweiliger sektorspezifischer Wichtung der vier Kühlungsformen errechnen sich die typischen Füllmengen pro installierte Kälteleistung für die zwölf Sektoren.
- Der Außenhandel mit vor Ort errichteten Kälteanlagen ist vernachlässigbar, so dass der jährliche HFKW-Verbrauch für Neuanlagen gleich dem HFKW-Zugang in Neuanlagen ist.
- Der Kältemittelbestand ist auch Berechnungsgrundlage für die Entsorgungsmenge. Sie wird in jedem Sektor durch Division des Bestands durch die Anlagenlebensdauer errechnet. Diese liegt für die meisten Sektoren bei 30 Jahren, für Milchviehbetriebe und Eisbahnen bei 20 Jahren, für steckerfertige Geräte, Kranklimaanlagen, Hochtemperaturwärmepumpen und Tieftemperaturanwendungen bei 10 Jahren.
- Die prozentualen Anteile der verwendeten Kältemitteltypen, die sich zeitlich für Bestand, Neuzugang und Entsorgungsmenge ändern, werden für jeden Sektor in einem statischen Rechenmodell abgeleitet (Schwarz et al., 2012).
- Der Austausch von FCKW und HFCKW in Altanlagen wird gesondert berücksichtigt.
- Herstellungsemissionen und Bestandsemissionen werden durch Gleichung 8 und Gleichung 9 errechnet.
- Entsorgungsemissionen werden durch Gleichung 11 berechnet. Die nominale Entsorgungsmenge ist mit der Erstbefüllung identisch. Der effektive Füllstand am Lebensende beträgt für alle Sektoren 85 % der Nominalfüllmenge, nur bei steckerfertigen Geräten ist er mit 90 % höher.

Emissionsfaktoren

Die den Emissionsdaten zugrunde liegenden Emissionsfaktoren sind in Tabelle 193 wiedergegeben.

Die verwendeten Emissionsfaktoren sind das Ergebnis von Expertenbefragungen und Literaturauswertungen.

Die Befüllungsemissionen sind bei Industriekälteanlagen im Allgemeinen gering. Die 2006 IPCC Guidelines (IPCC, 2006a) geben in Vol. 3, Tabelle 7.9 für *initial emission* 0,5 bis 3 Prozent der Erstbefüllung an, der länderspezifische $EF_{Herstellung}$ liegt mit 1 %, für die sektoralen Anwendungsbereiche bzw. mit 0,5 % für steckerfertige Geräte im unteren Bereich dieser Vorgaben.

Die laufenden HFKW-Emissionen aus Industriekälteanlagen gehen in allen Sektoren außer hermetischen Geräten kontinuierlich von 8,8 % im Jahr 1993 auf 4,55 % ab dem Jahr 2020 zurück, da die Kälteanlagen bedingt durch nationale und europäische gesetzliche Regelungen zunehmend dichter werden. Sie liegen im unteren Bereich bzw. unterhalb der in den 2006 IPCC Guidelines in Vol. 3, Tabelle 7.9 angegebenen Werte von 7 bis 25 Prozent. Bei steckerfertigen Geräten geht der entsprechende Rückgang wie in der Gewerbekälte auch von 1,4 % im Jahr 1994 auf 1 % ab dem Jahr 2009.

Die Entsorgung setzt nach einer durchschnittlichen Lebensdauer von 10 Jahren (steckerfertige Einzelgeräte, Kranklimaanlagen, Hochtemperaturwärmepumpen, Tieftemperaturanwendungen und Kunststoffindustrie), 20 Jahren (Milchviehbetriebe, Eisbahnen) bzw. 30 Jahren (Lebensmittelindustrie, Kühlhäuser, chemische Industrie) ein. Die verwendeten Lebensdauern liegen damit mit Ausnahme der Anwendungsbereiche mit 10 Jahren Lebensdauer innerhalb der in den 2006 IPCC Guidelines (IPCC (2006a): Vol. 3, Tabelle 7.9) angegebenen Werte von 15 bis 30 Jahren.

Der in den Geräten und Anlagen enthaltene Restfüllstand beträgt bezogen auf die Erstfüllmenge 90 % (Einzelgeräte) bzw. 85 % (sektorale Anwendungsbereiche). In den 2006 IPCC Guidelines (IPCC (2006a): Vol. 3, Tabelle 7.9) sind Werte von 50 bis 100 % für Industriekälteanlagen angegeben. Die verwendeten Werte sind somit alle innerhalb des in den 2006 IPCC-Guidelines angegebenen Wertebereichs.

Die Rückgewinnungsfaktoren entwickeln sich kontinuierlich nach oben, so dass die bei der Entsorgung auftretenden Verluste bezogen auf die Erstfüllmenge bzw. Restfüllmenge über die Jahre kleiner werden. Für steckerfertige Einzelgeräte beträgt der Rückgewinnungsfaktor im Jahr 2004 33,7 %, ab dem Jahr 2020 60 %, bei den Kälteanlagen der sektoralen Anwendungsbereiche beträgt der Rückgewinnungsfaktor im Jahr 2002 45 % und ab dem Jahr 2020 80 %. Damit liegen die verwendeten Rückgewinnungsfaktoren innerhalb des in den 2006 IPCC Guidelines (IPCC (2006a): Vol. 3, Tabelle 7.9) angegebenen Wertebereichs von 0 bis 90 %.

Aktivitätsdaten

Zahlreiche Zeitreihen für die Produktionsmengen von Nahrungsmitteln finden sich in den Statistiken des Bundesministeriums für Landwirtschaft, Ernährung und Heimat (BMLEH) oder des Statistischen Bundesamtes (DESTATIS). Zudem sind Daten von Industrieverbänden wie dem Verband Deutscher Kühlhäuser und Kühllogistikunternehmen e.V. (VDKL), dem Verband der Deutschen Fruchtsaftindustrie e.V. (VdF) oder dem Bundesverband der Deutschen Süßwarenindustrie e.V. (BDSI) sowie spezialisierten Instituten, z.B. dem Deutschen Tiefkühinstitut e.V. (dti) und dem Deutschen Weininstitut GmbH (DWI), verfügbar.

Die Stückzahlen der steckerfertigen Geräte stammen aus einer Studie des VDMA (2011) und Aussagen von Branchenexperten.

Der jährliche Neuzugang von HFKW-227ea und HFKW-23 (Kranklimatisierung, Hochtemperaturwärmepumpen und Tieftemperaturkühlung) wird der jährlichen nationalen Erhebung nach Umweltstatistikgesetz (UStatG, 2005) entnommen.

Die Kennziffern „installierte Kälteleistung pro jährliche Güterproduktion“ und die Kältemittelraten für Plus- und Minuskühlung sowie direkte und indirekte Kühlung wurden basierend auf Fachliteratur ermittelt.

4.7.1.2.4 Transportkälte (Kühlfahrzeuge und –container) (2.F.1.d)

HFKW werden in Kühlfahrzeugen seit 1993 als Kältemittel eingesetzt. Heute kommen überwiegend der HFKW-134a und die Kältemittelgemische R-404A und R-410A zum Einsatz. Seit 2015 auch R-452A. Dem Ladevolumen der Kühlfahrzeuge entsprechend variieren Größe und Kältemittelfüllung der Kälteaggregate.

Kühlcontainer werden vor allem für den Transport verderblicher Waren auf Seeschiffen eingesetzt. Da die Emissionen vorzugsweise in internationalen Gewässern erfolgen, werden die Kältemittelemissionen entsprechend dem Anteil eines Landes am Welthandel aufgeteilt. Deutschland werden 10 % der weltweiten Emissionen aus dem Bestand von Kühlcontainern zugerechnet. Bevorzugtes Kältemittel ist seit 1993 der HFKW-134a. Seit 1997 wird auch R-404A eingesetzt, seit 2018 kommen zunehmend die Kältemittelblends R-452A und R-513A und seit 2022 der nicht berichtspflichtige uHFKW-1234yf sowie das halogenfreie Alternativkältemittel Kohlendioxid (R-744) zum Einsatz.

Es wird folgendes Kältemittelmodell für Kühlfahrzeuge angewendet (Warncke et al., 2018):

- Die Kühlfahrzeuge werden entsprechend ihres Gewichts in fünf Größenklassen eingeteilt: Van <3,5 t, Van mit 3,5-7,5 t, Lkw mit 7,5-12 t, Lkw > 12 t und Trailer > 26 t Gesamtgewicht.
- Den Größenklassen werden Kältemittel (Typ) und spezifische Kältemittel-Füllmengen zugeordnet und jedem Kältemittel ein prozentualer Anteil an der Größenklasse zugeteilt.
- Bei Trailern > 26 t Gesamtgewicht dominierte lange Zeit das Kältemittel R-404A mit einem jährlichen Anteil von 95 % (1993-1994) bzw. 85 % (1995-2014). Ab 2018 liegt der R-404A-Anteil bei Null. Seit 2015 wird in zunehmendem Maße R-452A eingesetzt, das seit 2017 sogar den Markt dominiert. Sein Anteil lag 2015 bei 13% und 2024 bereits bei 90%. Darüber hinaus kamen in neuen Trailern von 1993 bis 2022 auch HFKW-134a (5 %) und seit 1995 R-410A (10 %) zum Einsatz.
- Bei Lkw > 12 t Gesamtgewicht lag der Anteil von R-404A bei 90 % (1993-1994) bzw. 80 % (1995-2014) und sank ab 2015 kontinuierlich auf Null im Jahr 2019 ab. Der Anteil von HFKW-134a lag von 1993 bis 2022 bei 10% und beträgt seit 2024 Null. Der Anteil von R-410A (ab 1995) beträgt 10 %. Seit 2015 wurde zunehmend R-452A verwendet, das seit 2018 das am häufigsten verwendete Kältemittel dieser Größenklasse ist. 2024 waren es 90 %.
- In Lkw mit 7,5 - 12 t Gesamtgewicht wurden seit 1993 R-404A und HFKW-134a verwendet. Der Anteil von HFKW-134a lag von 1993 bis 2022 bei 30 % und beträgt seit 2024 Null. Der Anteil von R-404A lag bei 70 % (1993-1994), sank dann auf 60 % (1995-2014) und ab 2015 kontinuierlich weiter auf Null im Jahr 2019. Ab 1995 kam auch R-410A mit einem Anteil von 10 % zum Einsatz. Der Anteil von R-452A lag 2015 noch bei 1 % und stieg bis 2024 kontinuierlich auf 90 %.
- In Vans mit 3,5 - 7,5 t Gesamtgewicht wurden seit 1993 70 % R-404A und 30 % HFKW-134a verwendet. 2018 betrug der Anteil von R-404A nur noch 15 %, 2019 wurde es nicht mehr verwendet. Der Anteil von HFKW-134a sank 2023 auf 15%, 2024 auf 5%. Dafür kam ab 2018 R-452A zum Einsatz, dessen Anteil 2024 bei 95% lag.

- Von 1993 bis 2005 wurde in Vans mit einem Gesamtgewicht unter 3,5 t ausschließlich HFKW-134a eingesetzt. Von 2006 bis 2017 wurde in 70 % der Vans das Kältemittel R-404A eingefüllt, in den restlichen 30 % HFKW-134a. Seit 2018 kommt auch das Kältemittel R-452A zum Einsatz, dessen Anteil 2024 bereits bei 85 % lag. Dafür ist der R-404A-Anteil ab 2019 auf Null abgesunken.
- Die Anzahl der neu zugelassenen Kühlfahrzeuge und der im Inland befüllten Kühlfahrzeuge (nach Kältemittel) wird für jedes Jahr ermittelt.
- Herstellungsemissionen werden mit Gleichung 8 über den Neuverbrauch zur Befüllung der im Inland produzierten Kühlfahrzeuge berechnet.
- Aus der Anzahl neu zugelassener Kühlfahrzeuge und den o.g. Annahmen ergibt sich der jährliche Neuzugang an Kältemitteln.
- Zwischen 1996 und 1999 wurden in einer gewissen Zahl von Altanlagen FCKW-12 durch HFKW ausgetauscht. Diese Mengen sind dem jährlichen Neuzugang zuzuschlagen.
- Der Jahresendbestand wird durch Aggregation der jährlichen HFKW-Neuzugänge seit 1993 und Subtraktion der Abgänge durch Entsorgung ermittelt.
- Mit Gleichung 9 werden die jährlichen HFKW-Emissionen auf Basis des Endbestands berechnet.
- Entsorgungsemissionen treten bei Kühlfahrzeugen erstmalig im Jahr 2003 auf. Diese werden durch Gleichung 11 errechnet. Die nominale Entsorgungsmenge ist mit dem Neuzugang vor 10 Jahren (bzw. 7 Jahren bei umgerüsteten FCKW-12 Anlagen) identisch. Der effektive Füllstand am Lebensende beträgt 87,5 % der Nominalfüllmenge.
- Emissionen des nicht berichtspflichtigen uHFKW-1234yf aus dem Kältemittelgemisch R-452A werden gemäß den Empfehlungen der UNFCCC Reporting Guidelines 2014 ((UNFCCC, 2014), FCCC/CP/2013/10/Add.3, Decision 24/CP.19) freiwillig als „additional greenhouse gases“ berichtet. Die Emissionen sind aggregiert mit anderen nicht berichtspflichtigen Emissionen in Kapitel 4.9.3 aufgeführt. In den CTF-Tabellen sind keine Daten zu freiwillig berichteten Emissionen enthalten.

Für Kühlcontainer wird folgendes Kältemittel-Modell angewendet:

- Die Anzahl der weltweit produzierten Kühlcontainer wird für jedes Jahr ermittelt.
- Der weltweite HFKW-Neuzugang für Kühlcontainer wird mit Hilfe der jährlichen Stückzahlen aus der Weltproduktion in Kombination mit den Füllmengen und den Kältemittelanteilen ermittelt.
- Von 1993 bis 1995 wurde in Kühlcontainern neben dem HFCKW-22 zunehmend HFKW-134a eingesetzt. 1996 lag der Anteil von HFKW-134a bei neuen Kühlcontainern bei 100 %. Ab 1997 kommt auch das Kältemittel R-404A zum Einsatz, mit Anteilen zwischen 10 und 20 %. Seit 2018 werden die Kälteaggregate von Kühlcontainern auch mit den Kältemitteln R-452A und R-513A befüllt, ihre Anteile sind mit 7 % bzw. 15 % im Jahr 2023 allerdings noch gering. Die Anteile des seit 2022 eingesetzten uHFKW-1234yf lagen 2024 bei 7,5 %, die von Kühlcontainern mit der halogenfreien Alternative Kohlendioxid (R-744) bei 4 %.

- Die durchschnittlichen Füllmengen der Kühlcontainer liegen in Abhängigkeit vom verwendeten Kältemittel bei 4 kg (R-452A), 4,5kg (R-513A, uHFKW-1234yf und R-744), 5kg (HFWK-134a ab 2012 und R-404A) und 6 kg (HFKW-134a in den Jahren 1993 bis 2011).
- Der HFKW-Neuzugang Deutschlands wird aus dem weltweiten Neuzugang entsprechend seinem Anteil am Welthandel, der bei 10 % liegt, berechnet.
- Da Kühlcontainer nur außerhalb Deutschlands produziert werden, fallen im Inland keine Emissionen aus der Befüllung an.
- Der Jahresendbestand wird durch Aggregation der jährlichen HFKW-Neuzugänge seit 1993 und Subtraktion der Abgänge durch Entsorgung ermittelt.
- Bestandsemissionen werden mit Gleichung 9 berechnet.
- Bei einer durchschnittlichen Lebensdauer von 14 Jahren, treten Entsorgungsemissionen bei Kühlcontainern erstmals im Jahr 2007 auf. Diese werden durch Gleichung 11 errechnet.
- Emissionen des nicht berichtspflichtigen uHFKW-1234yf werden gemäß den Empfehlungen der UNFCCC Reporting Guidelines 2014 ((UNFCCC, 2014), FCCC/CP/2013/10/Add.3, Decision 24/CP.19) freiwillig als „additional greenhouse gases“ berichtet. Die Emissionen sind aggregiert mit anderen nicht berichtspflichtigen Emissionen in Kapitel 4.9.3 aufgeführt. In den CRT-Tabellen sind keine Daten zu freiwillig berichteten Emissionen enthalten.

Emissionsfaktoren

Die den Emissionsdaten zugrunde liegenden EF sind in Tabelle 193 wiedergegeben.

Die verwendeten Emissionsfaktoren sind das Ergebnis von Expertenbefragungen und Literaturauswertungen.

Die Befüllungsemissionen sind bei Kühlfahrzeugen im Allgemeinen gering. Die Kältemittelverluste beim Befüllen werden auf 5 Gramm pro Anlage geschätzt, unabhängig von deren Größe. Dies ist ein Standardwert für Schlauchverluste bei Vor-Ort-Befüllungen. Werden die Befüllungsemissionen rechnerisch auf den Neuverbrauch bezogen, so ergeben sich Emissionsfaktoren zwischen 0,06 und 0,25 %. Die 2006 IPCC Guidelines geben in Vol. 3, Tabelle 7.9 für „initial emission“ in der Transportkälte 0,2 bis 1 Prozent der Erstbefüllung an. Damit liegen die verwendeten Werte zum größten Teil unter dem in den 2006 IPCC Guidelines (IPCC, 2006a) vorgeschlagenen Wertebereich.

Da es keine Inlandsproduktion von Kühlcontainern gibt, fallen keine Befüllungsemissionen an.

Die laufenden HFKW-Emissionen aus Kälteaggregaten von Kühlfahrzeugen werden für Neuanlagen der drei Größenklassen Lkw mit 7,5 - 12 t, Lkw > 12 t und Trailer > 26 t zulässigem Gesamtgewicht auf 15 % geschätzt. Für Vans < 3,5 t und 3,5 - 7,5 t zulässigem Gesamtgewicht beträgt der Emissionsfaktor 30 %. Für Kühlfahrzeug-Altanlagen (umgerüstete FCKW-12-Anlagen) wird der Emissionsfaktor des Bestands über alle Anlagengrößen auf durchschnittlich 25 % geschätzt. Die Emissionsfaktoren von Kühlfahrzeugen liegen damit an der unteren Grenze des in den 2006 IPCC Guidelines in Vol. 3, Tabelle 7.9 angegebenen Wertebereichs von 15 bis 50 %.

Der Bestandsemissionsfaktor für Kälteaggregate von Kühlcontainern liegt von 1993 bis 2011 konstant bei 10 %, sinkt aber von da an bis zum Jahr 2020 kontinuierlich auf 5 % (siehe Tabelle 193), um dem Umstand des zunehmend sorgsameren Umgangs mit HFKW-Kältemitteln Rechnung zu tragen. Alle verwendeten Emissionsfaktoren liegen unterhalb des in den 2006 IPCC Guidelines in Vol. 3, Tabelle 7.9 angegebenen Wertebereichs von 15 bis 50 %. Der im Vergleich

niedrigere länderspezifische Bestandsemissionsfaktor steht im Einklang mit den Aussagen führender Hersteller von Kühlcontainern sowie von Branchenexperten (Warncke & Gschrey, 2021). Begründet werden kann die Abweichung von den IPCC Guidelines damit, dass in der Transportkälte zwischen Kühlfahrzeugen und Kühlcontainern unterschieden werden muss: Kühlcontainer sind weitaus weniger in Bewegung als Kühlfahrzeuge, folglich treten geringere Emissionen auf. Das unterschiedliche Emissionsverhalten spiegelt sich nicht in den Default-Werten der 2006 IPCC Guidelines wider, die nur einen Wertebereich für die Transportkälte allgemein angeben.

Die Lebensdauer von Kühlfahrzeug-Altanlagen beträgt 7 Jahre, die von Kühlfahrzeug-Neuanlagen 10 Jahre. Die Entsorgung von Kühlcontainern setzt nach einer durchschnittlichen Lebensdauer von 14 Jahren ein. Die verwendeten Lebensdauern liegen damit, mit Ausnahme von Kühlfahrzeug-Altanlagen, über der in den 2006 IPCC Guidelines (IPCC (2006a): Vol. 3, Tabelle 7.9) angegebenen Größenordnung von 6 bis 9 Jahren.

Der in Kühlfahrzeugen und Kühlcontainern enthaltene Restfüllstand beträgt bezogen auf die Erstfüllmenge 87,5 %. In den 2006 IPCC Guidelines (IPCC (2006a): Vol. 3, Tabelle 7.9) sind Werte von 0 bis 50 % für Transportkälteanlagen angegeben. Die verwendeten Werte sind alle größer als in den Guidelines angegeben, da davon ausgegangen werden muss, dass Transportkälteanlagen, die nur noch über 50 % der Erstfüllmenge verfügen, nicht mehr einwandfrei funktionieren und so eine lückenlose Kühlkette gefährden. Dies ist mit deutschem Recht nicht vereinbar.

Die Rückgewinnungsfaktoren betragen für Kühlfahrzeuge und Kühlcontainer 65,7 %. Damit liegen die verwendeten Rückgewinnungsfaktoren innerhalb des in den 2006 IPCC Guidelines in Vol. 3, Tabelle 7.9 angegebenen Wertebereichs von 0 bis 70 % und sind Default-Werte.

Aktivitätsdaten

Die Zulassungszahlen von Kühlfahrzeugen nach Gewichtsklassen stammen bis 2008 und ab 2011 aus den statistischen Mitteilungen des Kraftfahrt-Bundesamtes. Da das Kraftfahrt-Bundesamt 2009 und 2010 keine gesonderten Erhebungen für Kühlfahrzeuge durchführte, wurde die Anzahl neuer Kühlfahrzeuge für diese beiden Jahre durch Extrapolation der Zulassungszahlen von Nutzfahrzeugen bestimmt. Die Füllmengen der Kälteaggregate, verwendete Kältemittel und Details zum FCKW-12-Ersatz stammen von Experten der wichtigsten Anbieter von Kühlfahrzeug-Kälteanlagen.

Der Kältemittel-Neuzugang bei Kühlcontainern wird anhand eines Kältemittelmodells, ausgehend von der Anzahl der weltweit produzierten Kühlcontainer, die dem Branchen-Informationsdienst "World Cargo News" entnommen wird, ermittelt. Ein Anteil von 10 % wird Deutschland zugerechnet. Die Füllmengen und Kältemittelanteile wurden basierend auf Expertenbefragungen führender Hersteller von Kühlcontainern ermittelt.

4.7.1.2.5 Mobile Klimaanlagen (2.F.1.e)

Mobile Klimaanlagen sind Fahrzeugklimaanlagen in Personenkraftwagen (Pkw), Lastkraftwagen bzw. Nutzfahrzeugen (Nfz), Bussen, Landmaschinen (Ackerschleppern, Mähdreschern, Feldhäckslern), Schienenfahrzeugen, auf Schiffen, in Flugzeugen und Hubschraubern. Teilfluorierte Kohlenwasserstoffe (HFKW) werden seit 1991 in mobilen Klimaanlagen eingesetzt. Als Kältemittel wird HFKW-134a verwendet. Seit dem Jahr 2012 kommt in Pkw-Klimaanlagen auch der uHFKW-1234yf zum Einsatz, seit 2016 auch in kleinen Nutzfahrzeugen der EG-Fahrzeugklasse N1. Seit 2020 werden in Deutschland nur noch PKW produziert, die Klimaanlagen mit uHFKW-1234yf enthalten.

Die Zeitreihen zeigen einen signifikanten Anstieg der Emissionen von HFKW-134a von 1995 bis 2015, was in direktem Zusammenhang mit dem vermehrten Einsatz von Klimaanlagen in Fahrzeugen steht, trotz rückläufiger Füllmengen. Danach sinken sie, bedingt durch den Ersatz von HFKW-134a in Neuanlagen durch den nicht berichtspflichtigen uHFKW-1234yf sowie der daraus resultierenden Abnahme des HFKW-134a-Bestands, kontinuierlich.

Für Pkw wird folgendes Kältemittelmodell angewendet:

- Die Stückzahlen deutscher Pkw-Produktion sind aus öffentlich zugänglichen Statistiken des Verbands der Automobilindustrie (VDA) jährlich verfügbar. Sie bilden die Datenbasis zur Berechnung der Verbrauchsmengen für die Befüllung.
- Die Jahrgangs-Klimaanlagenquote wird direkt über umfangreiche Herstellerbefragungen erhoben, da keine amtlichen oder öffentlich verfügbaren Statistiken verfügbar sind. Dies gilt auch für die durchschnittlichen Kältemittelfüllmengen, die aus den Angaben für jeden Fahrzeugtyp und den Aussagen von Branchenexperten bestimmt werden.
- Durch Multiplikation der produzierten Stückzahlen mit der Jahrgangs-Klimaanlagenquote und den durchschnittlichen Kältemittelfüllmengen wird die Verbrauchsmenge für die Befüllung berechnet.
- Herstellungsemissionen werden nach Gleichung 8 errechnet.
- Für die Ermittlung des jährlichen Neuzugangs und des Kältemittelbestands in Pkw-Klimaanlagen werden nicht die jährlichen Fahrzeug-Neuzulassungen des Kraftfahrtbundesamtes herangezogen, da der vorzeitige, vor Erreichen der durchschnittlichen Lebensdauer auftretende Fahrzeugschwund aus den Zulassungsjahrgängen, die den Bestand bilden, nicht quantitativ abgeschätzt werden kann. Der Kältemittelbestand wird vielmehr aus den zugelassenen Fahrzeugbeständen nach Alter seit Erstzulassung bestimmt. Diese amtlichen Zahlen sind bis 2021 in der Statistischen Mitteilung (FZ 15) des Kraftfahrtbundesamtes (Kraftfahrtbundesamt, Versch. Jahrgänge) für alle benötigten Jahre, d.h. ab 1991, verfügbar und ermöglichen die Bestimmung eines kontinuierlichen und chronologischen Fahrzeugbestands nach Zulassungsjahrgängen in Stückzahlen. Seit 2022 stellt das Kraftfahrtbundesamt dem Umweltbundesamt jährlich eine Sonderauswertung mit den benötigten Zulassungszahlen zur Verfügung.
- Auch die Bestimmung der Jahrgangs-Klimaanlagenquote für die zugelassenen Fahrzeuge erfolgt direkt über umfangreiche Herstellerbefragungen. Sie ist nicht identisch mit der Klimaquote für die in Deutschland produzierten Pkw, da auch im Ausland produzierte Pkw berücksichtigt werden müssen. Zu ihrer Bestimmung werden deshalb auch ausländische Unternehmen befragt. Dies gilt ebenso für die Bestimmung der durchschnittlichen Kältemittelfüllmengen der zugelassenen Fahrzeuge.
- Für die Berechnung des Kältemittelbestands eines Zulassungsjahrgangs wird die jahrgangsspezifische Füllmenge mit der Stückzahl klimatisierter Pkw multipliziert. Der Gesamtbestand entspricht der Summe der Kältemittelbestände aller Zulassungsjahrgänge seit 1991.
- Bestandsemissionen werden gemäß Gleichung 9 berechnet.
- Der Austausch von FCKW in Altanlagen und die Klimaanlagennachrüstung älterer Fahrzeuge werden gesondert berücksichtigt.

- Für die Bestimmung der Entsorgungsmenge werden nur die Altfahrzeuge berücksichtigt, die jährlich in deutschen Demontagebetrieben behandelt werden. Deren Anzahl wird amtlichen Daten für das Altfahrzeugaufkommen (Statistisches Bundesamt, jährlich - FS 19, R. 1) entnommen. Gebrauchtwagen- und Altfahrzeugexporte bleiben im Kältemittel-Modell unberücksichtigt, da die bei der Entsorgung auftretenden Emissionen in den Zielländern berichtet werden müssen, und eine Doppelnennung vermieden werden soll.
- Für die demontierten Altfahrzeuge wird eine durchschnittliche Lebensdauer von 15 Jahren angenommen. Durch Multiplikation der Stückzahlen demontierter Fahrzeuge mit der Klimaanlagenquote und der durchschnittlichen Kältemittelfüllmenge des Neuzulassungsjahrgangs vor 15 Jahren, wird die Kältemittelentsorgungsmenge ermittelt.
- Entsorgungsemissionen traten erstmals im Jahr 2002 auf und werden mit Gleichung 11 berechnet.
- Emissionen des nicht berichtspflichtigen uHFKW-1234yf berichtet Deutschland gemäß den Empfehlungen der UNFCCC Reporting Guidelines 2014 ((UNFCCC, 2014), FCCC/CP/2013/10/Add.3, Decision 24/CP.19) freiwillig unter „additional greenhouse gases“. Die HFKW-1234yf-Emissionen werden mit anderen nicht berichtspflichtigen Emissionen zusammengefasst und in Kapitel 4.9.3 aufgeführt. In den CRT-Tabellen sind keine Daten zu freiwillig berichteten Emissionen enthalten.

Die Kältemittelmodelle für Nutzfahrzeuge und Busse sind ähnlich aufgebaut wie das Modell für Pkw. Eine ausführliche Beschreibung der Modelle findet sich in (Schwarz et al., 2012).

Das für Landmaschinen, Schiffe und Schienenfahrzeuge genutzte Kältemittelmodell sieht folgendermaßen aus:

- Für Schiffe und Schienenfahrzeuge werden die Kältemittelemissionen auf Basis der jährlichen Neuinstallationen von Klimaanlagen in Schiffen (Ausgangsdaten: Schiffsneubauten für die deutsche Flotte) und in Schienenfahrzeugen (Ausgangsdaten: Neubeschaffungen der Deutschen Bahn und privater Unternehmen) und deren Füllmengen bestimmt.
- Das Kältemittelmodell für Klimaanlagen in Landmaschinen beruht auf der Ermittlung der Anzahl der jährlichen Fahrzeug-Neuzulassungen, der durchschnittlichen Klimaanlagenquote und der durchschnittlichen Füllmenge der verschiedenen Landmaschinentypen.
- Der jährliche Neuzugang sowie der Endbestand an HFKW-134a für jeden Bereich wird aus den Angaben zuvor ermittelt.
- Bestandsemissionen werden gemäß Gleichung 9 durch Multiplikation des Endbestandes für jeden Bereich mit dem jeweiligen $EF_{Anwendung}$ errechnet.
- Der inländische Verbrauch an HFKW-134a zur Herstellung von mobilen Klimaanlagen wird aufbauend auf Produktionsstückzahlen ermittelt. Die Herstellungsemissionen werden nach Gleichung 8 errechnet.
- Entsorgungsemissionen werden durch Gleichung 11 errechnet. Sie treten bei Landmaschinen erstmalig im Jahr 2004, nach Ablauf einer durchschnittlichen Lebensdauer von 10 Jahren, auf. Bei Schienenfahrzeugen kommt es erstmalig im Jahr 2017, nach Ablauf einer durchschnittlichen Lebensdauer von 25 Jahren, zu Entsorgungsemissionen.

- Bei Schiffen setzt die Entsorgung theoretisch im Jahr 2022, nach 25 Jahren Lebensdauer, ein. Allerdings war eine fachgerechte Entsorgung von Schiffen in Deutschland bis einschließlich 2024 nicht möglich, da keine Werft über eine Zulassung für Abwrackungen verfügte. Die Schiffe wurden daher zum Abwracken ins Ausland verbracht. Diese exportierten Altschiffe bleiben im Kältemittel-Modell unberücksichtigt, da die bei der Entsorgung auftretenden Emissionen in den Zielländern berichtet werden müssen, und eine Doppelnennung vermieden werden soll.

Für Flugzeuge und Hubschrauber wird folgendes Kältemittelmodell angewendet:

- Für die Ermittlung des Kältemittelbestands in Klimaanlagen mittelgroßer, mehrmotoriger Flugzeuge (Kennzeichenklasse I) und Hubschrauber (Kennzeichenklasse H) sowie in der Bordkühlung von Passagierflugzeugen der Kennzeichenklassen A, B und C wird die jeweilige Anzahl der in Deutschland zugelassenen Flugzeuge bzw. Hubschrauber herangezogen. Diese amtlichen Zahlen sind in den jährlich veröffentlichten Statistiken des Luftfahrt-Bundesamtes (Luftfahrt-Bundesamt, Versch. Jahrgänge, Bestand an Luftfahrzeugen) für alle benötigten Jahre, d.h. ab 1993, verfügbar.
- In Passagierflugzeugen der Kennzeichenklassen A, B und C werden bei Flügen von über vier Stunden durchschnittlich drei HFKW-134a-Chiller mit einer Füllmenge von jeweils 500 Gramm für die Bordkühlung eingesetzt.
- In Flugzeugen der Kennzeichenklasse I und Hubschraubern kommen laut Herstelleraussagen pro Flugzeug durchschnittlich 2 Kilogramm HFKW-134a zur Instrumentenkühlung und Klimatisierung zum Einsatz.
- Für die Berechnung des Kältemittelbestands wird die flugzeugspezifische Füllmenge mit der Stückzahl der zugelassenen klimatisierten bzw. gekühlten Flugzeuge multipliziert.
- Bestandsemissionen werden gemäß Gleichung 9 berechnet.
- Entsorgungsemissionen treten aufgrund der langen Lebensdauer der Flugzeuge bisher nicht auf.

Emissionsfaktoren

Die den Emissionsdaten zugrunde liegenden EF sind in Tabelle 193 wiedergegeben.

Die verwendeten Emissionsfaktoren sind das Ergebnis von Literaturauswertungen (z.B Schwarz and Harnisch (2003); Siegl et al. (2002); Clodic and Barrault (2011); Clodic et al. (2012); (Schwarz et al., 2012), Hafner et al. (2019), (Wang et al., 2022)), Messungen (Pkw), Auswertungen von Werkstattdokumentationen und umfangreichen Expertenbefragungen sowie Umfragen bei Pkw-Werkstätten und Demontagebetrieben. Zu den regulären Emissionen während des Betriebs kommen hier noch Emissionen durch Unfälle und andere äußere Einflüsse hinzu.

Die Befüllungsemissionen sind bei mobilen Klimaanlagen im Allgemeinen gering. Die Kältemittelverluste beim Befüllen werden bei Pkw auf 3 Gramm pro Anlage geschätzt, bei Nfz und Landmaschinen auf 5 Gramm pro Anlage und bei Bussen auf 50 Gramm pro Anlage. Dabei handelt es sich um Standardwerte für Schlauchverluste bei Vor-Ort-Befüllungen. Werden die Befüllungsemissionen rechnerisch auf den Neuverbrauch bezogen, so ergeben sich in Abhängigkeit von jährlich sich ändernden Erstfüllmengen Emissionsfaktoren zwischen 0,25 - 0,63 % (Pkw), 0,36 - 0,66 % (Nfz), 0,28 - 0,35 % (Landmaschinen) und 0,42 - 0,45 % (Busse). Bei Schienenfahrzeugen beträgt der Emissionsfaktor der Befüllung 0,5 % und bei

Schiffen 1 %. Die 2006 IPCC Guidelines geben in Vol. 3, Tabelle 7.9 für „initial emission“ bei mobilen Klimaanlagen (Pkw, Nfz, Busse und Schienenfahrzeuge) 0,2 bis 0,5 Prozent der Erstbefüllung an. Die verwendeten Werte für die in den 2006 IPCC Guidelines (IPCC, 2006a) beschriebenen Fahrzeuge liegen somit zum größten Teil innerhalb des vorgeschlagenen Wertebereichs. Die 2006 IPCC Guidelines geben keine Werte für Landmaschinen, Schiffe und Flugzeuge vor.

Die laufenden HFKW-Emissionen werden für Pkw auf 10 % geschätzt, für Nutzfahrzeuge und Busse auf 15 %, für Schienenfahrzeuge auf 6 %, für Landmaschinen auf 15 % (Ackerschlepper) bzw. 25 % (Mähdrescher, Feldhäcksler), für Schiffe auf 10 % (Binnenpersonenschiffe), 20 % (Seepersonenschiffe) bzw. 35 % (Seegüterschiffe) und für Flugzeuge auf 5 %. Die verwendeten $EF_{Anwendung}$ liegen damit größtenteils im Bereich des in Vol. 3, Tabelle 7.9 der 2006 IPCC Guidelines (IPCC, 2006a) gegebenen Vorschlags von 10 bis 20 % für Klimaanlagen in Pkw, Nfz, Bussen und Schienenfahrzeugen. Für Landmaschinen, Schiffe und Flugzeuge werden keine Vorschläge unterbreitet.

Die Entsorgung setzt nach einer durchschnittlichen Lebensdauer von 15 Jahren (Pkw, Nfz, Busse), 10 Jahren (Landmaschinen) bzw. 25 Jahren (Schienenfahrzeuge) ein. Mit Ausnahme von Schienenfahrzeugen liegen die verwendeten Lebensdauern innerhalb des in den 2006 IPCC Guidelines für Pkw, Nfz, Busse und Schienenfahrzeuge angegebenen Wertebereiches von 9 bis 16 Jahren.

Der in den Klimaanlagen enthaltene Restfüllstand beträgt bezogen auf die Erstfüllmenge 34 % (Pkw, Nfz, Busse, Landmaschinen) bzw. 87,5 % bei Schienenfahrzeugen, da diese kürzere Wartungsintervalle aufweisen, um den Fahrgastkomfort zu gewährleisten. In den 2006 IPCC Guidelines (IPCC (2006a): Vol. 3, Tabelle 7.9) sind Werte von 0 - 50 % angegeben. Bis auf die Restfüllstände bei Schienenfahrzeugen sind die verwendeten Werte alle Default-Werte.

Wegen der seit dem Jahr 2002 in der Altfahrzeugverordnung geforderten geregelten Entsorgung und Verwertung von Altfahrzeugen entwickeln sich die Rückgewinnungsfaktoren bei Pkw und Nfz kontinuierlich nach oben, so dass die bei der Entsorgung auftretenden Verluste bezogen auf die Erstfüllmenge bzw. Restfüllmenge über die Jahre kleiner werden. Sie liegen für Pkw und Nfz im Jahr 2000 bei 38 % und ab dem Jahr 2020 bei 50 %. Der Rückgewinnungsfaktor wird bei Bussen auf 38 %, bei Landmaschinen auf 11,7 % und bei Schienenfahrzeugen auf 75,6 % (2017) bis 80 % (ab 2020) geschätzt. Damit liegen die verwendeten Rückgewinnungsfaktoren für Pkw, Nfz und Busse innerhalb des in den 2006 IPCC Guidelines (IPCC (2006a): Vol. 3, Tabelle 7.9) angegebenen Wertebereichs von 0 bis 50 %. Der länderspezifische Wert für Schienenfahrzeuge liegt deutlich über dem Default-Wert, da bei der Entsorgung deutlich mehr Sorgfalt aufgewendet wird. Für Landmaschinen machen die 2006 IPCC Guidelines keine Vorschläge.

Aktivitätsdaten

Zugelassene Fahrzeugbestände von Pkw, Nfz und Bussen sowie Neuzulassungen von landwirtschaftlichen Zugmaschinen werden vom Kraftfahrtbundesamt gemeldet. Die Anzahl der zugelassenen Flugzeuge stammt vom Luftfahrt-Bundesamt. Produktionszahlen stammen vom Verband der Automobilindustrie (VDA), vom Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA), sind anderen Statistiken entnommen oder basieren auf Herstellerbefragungen.

Bei den Pkw-Klimaanlagen werden Füllmengen und Jahrgangs-Klimaanlagenquoten durch Direktbefragung von Automobilunternehmen ermittelt, bei den anderen Fahrzeugtypen durch eine Kombination aus amtlichen Statistiken, gezielter Herstellerbefragung und Expertenschätzung.

4.7.1.2.6 Stationäre Klimaanlagen (2.F.1.f)

Zu den stationären Klimaanlagen zählen Raumklimageräte, Kaltwassersätze zur Gebäudeklimatisierung und industriellen Flüssigkeitskühlung, Wärmepumpenanlagen, Wärmepumpen-Wäschetrockner und gewerbliche Spülmaschinen mit Wärmepumpenfunktion.

4.7.1.2.6.1 Raumklimageräte

Raumklimageräte dienen der Temperierung der Innenraumluft einzelner Räume, ganzer Stockwerke oder kleinerer bis mittelgroßer Gebäude und liegen von der Leistung her unter der von Großklimaanlagen. Als Kältemittel kommen seit 1998 das HFKW-Gemisch R-407C, ab 2003 das Gemisch R-410A und ab 2014 der HFKW-32 zum Einsatz. Als halogenfreie Alternative wird in beweglichen Raumklimageräten ab 1997 auch R-290 verwendet.

Eine inländische Produktion von Raumklimageräten gibt es nicht. Raumklimageräte werden in der Regel befüllt importiert. Bei der Installation von fabrikmäßig hergestellten Single-Split-, Multi-Split- und VRF-Multi-Split-Geräten erfolgt jedoch eine Auffüllung der vor Ort verlegten Kältemittelleitungen. Dies ist bei beweglichen, steckerfertigen Raumklimageräten nicht erforderlich.

Ab 2020 ist der Import von beweglichen Raumklimageräten, die Kältemittel mit einem GWP von 150 oder mehr verwenden, laut EU F-Gas Verordnung (EU, 2024b) verboten. Nach dem Abverkauf bereits importierter Geräte mit R-407C und R-410A in den Jahren 2020 und 2021 kommen daher ab 2022 nur noch Geräte mit dem halogenfreien Kältemittel Propan (R-290) neu auf den deutschen Markt. Ab 2027 gilt ein Verbot des Inverkehrbringens auch für Monoblock-Klimaanlagen mit einer Kälteleistung bis zu 50 kW, die Kältemittel mit einem GWP von 150 oder mehr verwenden (EU, 2024b). Der Import von Mono-Splitsystemen mit bis zu 3 kg Füllmenge, die Kältemittel mit einem GWP von 750 oder mehr enthalten, ist ebenfalls ab 2025 verboten. Auch für andere Split-Klimaanlagen sieht die EU F-Gas-Verordnung (EU, 2024b) Verbote des Inverkehrbringens vor, die starke Auswirkungen auf die zukünftig in diesen Geräten eingesetzten Kältemittel haben, So zeigt sich bereits heute ein deutlicher Trend hin zum Einsatz von HFKW-32. Bei Single-Split-Geräten kommen seit 2021 nur noch Geräte mit HFKW-32 auf den deutschen Markt.

Folgendes Kältemittelmodell wird für Raumklimageräte angewendet:

- Die Raumklimageräte werden in vier Kategorien eingeteilt, deren jeweilige Stückzahl von Neuanlagen jedes Jahr durch Anbieterbefragung und die in internationalen Publikationen veröffentlichten Zahlen ermittelt wird: kleine bewegliche Geräte, Single-Split-Geräte, Multi-Split-Geräte mit konstantem Volumenstrom des Kältemittels und VRF-Multi-Split-Systeme mit variablem Volumenstrom.
- Für jede Kategorie werden Füllmenge und prozentuale Anteile der verwendeten Kältemitteltypen entsprechend der jährlich verkauften Neuanlagen festgelegt. Aus der Absatzmenge und den o.g. Annahmen ergibt sich der jährliche Neuverbrauch, der identisch ist mit dem Neuzugang an Kältemitteln. Der Jahresendbestand wird durch Aggregation der jährlichen HFKW-Neuzugänge und Subtraktion der Abgänge durch Entsorgung ermittelt.
- Herstellungsemissionen treten nicht auf. Befüllungsverluste treten aber bei der Installation der ortsfesten Single-Split-Geräte, Multi-Split-Geräte und VRF-Multisplit-Systeme auf. Auf der Grundlage von Expertenbefragungen kommt es hierbei zu Installationsverlusten von 5 g pro Gerät (10 % der Auffüllmenge) bei Single-Split-Geräten, 20 g pro Gerät (1 % der Auffüllmenge) bei Multi-Split-Geräten und 45 g pro Gerät (1 % der Auffüllmenge) bei VRF-Multisplit-Systemen.

- Bestandsemissionen werden nach Gleichung 9 berechnet.
- Entsorgungsemissionen traten erstmals im Jahr 2008 nach einer durchschnittlichen Lebensdauer von 10 Jahren auf und werden mit Gleichung 11 berechnet.

Emissionsfaktoren

Die verwendeten Emissionsfaktoren sind das Ergebnis von Expertenbefragungen und Literaturauswertungen und sind in Tabelle 193 wiedergegeben.

Der länderspezifische $EF_{Herstellung}$ = 1 % für Multi-Split- und VRF-Multi-Split-Geräte liegt innerhalb des in den 2006 IPCC Guidelines in Vol. 3, Tabelle 7.9 vorgeschlagenen Wertebereichs von 0,2 bis 1 %. Bei Single-Split-Geräten beträgt der Emissionsfaktor 10 %, was einem Verlust von 5 g Kältemittel bei 50 g Auffüllung entspricht und über den in den Guidelines angegebenen Werten liegt.

Die Emissionsfaktoren der Anwendung sinken für alle Geräte innerhalb der Zeitreihe ab dem ersten Jahr der Anwendung kontinuierlich ab (siehe Tabelle 193). Sie liegen für bewegliche Raumklimageräte zwischen 3,4 % (1999) und 2,5 % (ab 2010), für Single-Split-Geräte zwischen 6,9 % (1998) und 5 % (ab 2010), für Multi-Split-Geräte zwischen 7,9 % (1998) und 4,2 % (ab 2020) und für VRF-Multi-Split-Geräte zwischen 8,1 % (2003) und 4,9 % (ab 2020). Die Anwendungs-Emissionsfaktoren liegen somit innerhalb des in den 2006 IPCC Guidelines in Vol. 3, Tabelle 7.9 vorgeschlagenen Wertebereichs von 1 bis 10 %.

Die geschätzte Lebensdauer liegt mit 10 Jahren im unteren Bereich des in den 2006 IPCC Guidelines in Vol. 3, Tabelle 7.9 vorgeschlagenen Wertebereichs von 10 bis 20 Jahren.

Der Restfüllstand bei Entsorgung beträgt 75 % bei beweglichen Raumklimageräten und 87,5 % bei allen anderen Typen. Die 2006 IPCC Guidelines (IPCC, 2006a) schlagen in Vol.3, Tabelle 7.9 Werte von 0 bis 80 % vor. Der für bewegliche Raumklimageräte verwendete Restfüllstand ist somit ein Default-Wert, die für die anderen Typen verwendeten Werte liegen oberhalb des angegebenen Bereichs.

Die Rückgewinnungsfaktoren entwickeln sich kontinuierlich nach oben, so dass die bei der Entsorgung auftretenden Verluste bezogen auf die Erstfüllmenge bzw. Restfüllmenge über die Jahre kleiner werden. Bei beweglichen Raumklimageräten beträgt der Rückgewinnungsfaktor im Jahr 2009 24,2 % und ab dem Jahr 2020 40 %, bei Single-Split-Geräten beträgt er im Jahr 2008 37,9 % und ab dem Jahr 2020 60 %, bei Multi-Split-Geräten liegt er im Jahr 2011 bei 62 % und ab dem Jahr 2020 bei 80 %. Bei VRF-Multi-Split-Geräten liegt er im Jahr 2016 bei 72 % und ab dem Jahr 2020 bei 80 %. Damit liegen die verwendeten Rückgewinnungsfaktoren innerhalb des in den 2006 IPCC Guidelines (IPCC (2006a): Vol. 3, Tabelle 7.9) angegebenen Wertebereichs von 0 bis 80 %.

Aktivitätsdaten

Die in Deutschland verkauften Stückzahlen der verschiedenen Gerätetypen sind über Fachpublikationen (JARN, Versch. Jahrgänge) und durch Anbieterbefragung jährlich verfügbar.

4.7.1.2.6.2 Kaltwassersätze (Chiller)

Kaltwassersätze zur Gebäudeklimatisierung und industriellen Flüssigkeitskühlung werden in vier Kategorien unterteilt: Chiller mit einer Kälteleistung unter 100 kW, Chiller mit einer Kälteleistung über 100 kW, Chiller mit einer Kälteleistung über 900 kW und Turboverdichteranlagen (Kälteleistung über 1500 kW). Die in Leistungsklassen eingeteilten Chiller verwenden Kolben-, Scroll- oder Schraubenverdichter.

In Turboverdichteranlagen kommt seit 1993 der HFKW-134a zum Einsatz, seit 2013 auch der nicht berichtspflichtige uHFKW-1234ze und seit 2017 der nicht berichtspflichtige uHFCKW-1233zd. Anlagen mit dem Kältemittelgemisch R-513A gibt es seit 2018 und mit R-515B seit 2022. HFKW-134a wurde auch für die Umrüstungen von FCKW-12-Turboverdichteranlagen in den Jahren 1995 bis 1999 genutzt. Die wichtigsten in Chillern eingesetzten Kältemittel sind HFKW-134a (Einsatz ab 1993), ab 1998 R-407C und seit 2004 auch R-410A. Seit 2015 wird auch der nicht berichtspflichtige uHFKW-1234ze verwendet und seit 2017 das Kältemittelgemisch R-513A. Seit 2021 kommen der HFKW-32 sowie R-454B zum Einsatz, seit 2022 R-515B und seit 2023 R-454B.

Es wird folgendes Kältemittelmodell für Kaltwassersätze angewendet (Warncke & Gschrey, 2024):

- Kaltwassersätze werden in vier Kategorien eingeteilt, deren Anzahl an Neuanlagen jedes Jahr durch Expertenbefragung und internationale Absatzstatistiken ermittelt wird: Chiller ‹100 kW Kälteleistung, Chiller ›100 kW Kälteleistung, Chiller ›900 kW Kälteleistung und Turboverdichteranlagen im Leistungsbereich über 1.500 kW.
- Für jede Kategorie werden eine durchschnittliche Füllmenge und die prozentualen Anteile der verwendeten Kältemitteltypen ermittelt. Die Füllmengen liegen bei 10 kg für Chiller ‹100 kW, 95 kg für Chiller ›100 kW, 300 kg für Chiller ›900 kW und 630 kg für Turboverdichteranlagen.
- Aus der Anzahl der Neuanlagen und den o.g. Annahmen ergibt sich der jährliche HFKW-Zugang zum inländischen Bestand. Hier muss auch noch der Verbrauch für den FCKW-Ersatz in Turboverdichter-Altanlagen berücksichtigt werden.
- Durch Kenntnis des Vorjahresbestands, des Neuzugangs und des Abgangs kann der Jahresendbestand an Kältemitteln errechnet werden.
- Herstellungsemissionen werden durch Multiplikation der Verbrauchsmengen für die Befüllung mit dem $EF_{Herstellung}$ gemäß Gleichung 8 errechnet.
- Bestandsemissionen werden gemäß Gleichung 9 errechnet.
- Entsorgungsemissionen traten erstmals im Jahr 2003 auf (FCKW-Umrüstanlagen) und werden mit Gleichung 11 berechnet.
- Emissionen der nicht berichtspflichtigen uHFKW-1234ze und uHFCKW-1233zd aus der Verwendung als Einzelstoff sowie von uHFKW-1234yf und uHFKW-1234ze aus dem Einsatz der Kältemittelgemische R-454B, R-513A und R-515B werden gemäß den Empfehlungen der UNFCCC Reporting Guidelines 2014 ((UNFCCC, 2014), FCCC/CP/2013/10/Add.3, Decision 24/CP.19) freiwillig als „additional greenhouse gases“ berichtet. Die Emissionen sind aggregiert mit anderen nicht berichtspflichtigen Emissionen in Kapitel 4.9.3 aufgeführt. In den CRT-Tabellen sind keine Daten zu freiwillig berichteten Emissionen enthalten.

Emissionsfaktoren

Die verwendeten Emissionsfaktoren sind das Ergebnis von Expertenbefragungen. Sie sind in Tabelle 193 aufgeführt.

Der Befüllungsverlust liegt mit 0,5 % innerhalb des in den 2006 IPCC Guidelines (IPCC, 2006a): Vol.3, Tabelle 7.9 vorgeschlagenen Wertebereichs von 0,2 bis 1 %. Um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass eine große Menge der Kaltwassersätze vorgefüllt importiert wird, wird nicht der eigentliche $EF_{Herstellung}$ von 1 % verwendet.

Die laufenden HFKW-Emissionen werden für alle Kälteleistungsklassen bzw. Verdichterbauarten, Altersstufen und Kältemittel-Typen bis zum Jahr 2000 auf 6 % geschätzt. Danach nimmt der $EF_{Anwendung}$ kontinuierlich auf 2,8 % (ab 2020) ab. Alle verwendeten Werte liegen damit im unteren Bereich des Vorschlags von 2 bis 15 Prozent der 2006 IPCC Guidelines (IPCC (2006a): Vol. 3, Tabelle 7.9).

Die Lebensdauer von Kaltwassersätzen wird in den 2006 IPCC Guidelines in Vol. 3, Tabelle 7.9 mit 15 bis 30 Jahren angegeben. Die verwendeten Werte liegen in diesem Rahmen: 15 Jahre für Chiller und 25 Jahre für Turboverdichteranlagen.

Der Restfüllstand bei Entsorgung beträgt 90 % für alle Typen von Kaltwassersätzen. Die 2006 IPCC Guidelines schlagen in Vol. 3, Tabelle 7.9 Werte von 80 bis 100 % vor. Die verwendeten Restfüllstände sind somit Default-Werte.

Die Rückgewinnungsfaktoren entwickeln sich bedingt durch technischen Fortschritt und zunehmende Sorgsamkeit im Umgang mit Kältemitteln kontinuierlich nach oben, so dass die bei der Entsorgung auftretenden Verluste bezogen auf die Erstfüllmenge bzw. Restfüllmenge über die Jahre kleiner werden. Bei Chillern beträgt der Rückgewinnungsfaktor im Jahr 2003 65,8 % und ab dem Jahr 2020 80 %, bei Turboverdichteranlagen beträgt er im Jahr 2003 69,5 % und ab dem Jahr 2020 80 %. Die verwendeten Rückgewinnungsfaktoren liegen alle innerhalb des in den 2006 IPCC Guidelines in Vol. 3, Tabelle 7.9 angegebenen Wertebereichs von 0 bis 95 %.

Aktivitätsdaten

Die Anzahl an Neuanlagen wird jährlich durch Expertenbefragung von Herstellern und internationale Absatzstatistiken (z.B. BSRIA Limited (Versch. Jahrgänge)) ermittelt.

Die durchschnittlichen Füllmengen und die prozentualen Anteile der verwendeten Kältemitteltypen wurden in Expertentreffen und persönlichen Gesprächen mit Industrievertretern über einen externen Forschungsnehmer ermittelt.

4.7.1.2.6.3 Wärmepumpenanlagen

Mit einer Wärmepumpenanlage wird mittels eines Kältemittelkreislaufs aus der Umgebungswärme in Luft, Erdreich oder Grundwasser Nutzwärme zur Heizung oder Klimatisierung von Innenräumen sowie für die Bereitstellung von Warmwasser erzeugt. Geräte, die die Umweltwärme der Außenwärme zur direkten Innenlufterwärmung nutzen, fallen unter die Kategorie der Raumklimageräte.

Als Kältemittel kommen in Wärmepumpen seit 1995 der HFKW-134a und die HFKW-Gemische R404A und R407C zum Einsatz, seit 2002 auch R410A, seit 2011 der HFKW-32 und seit 2022 das Gemisch R454C. Als halogenfreie Alternativen werden in Heizungswärmepumpen ab 1995 Propan (R290) und in Brauchwarmwasser-Wärmepumpen ab 2018 CO_2 (R744) verwendet.

Methodisch ist das Kältemittel-Modell für Wärmepumpen wie das für Raumklimageräte aufgebaut (Warncke & Gschrey, 2024):

- Es wird zwischen vier Kategorien von Heizungswärmepumpen unterschieden: Luft – Wasser Monoblock, Luft – Wasser Split, Erdreich (Grundwasser) - Wasser, Erdreich (Sole) - Wasser. Daneben gibt es als fünfte Kategorie Brauchwarmwasser-Wärmepumpen.
- Ausgangs- und Bezugspunkt für die Berechnungen sind die jährlichen Stückzahlen neu installierter Wärmepumpen aller fünf Kategorien, die jährlich vom Bundesverband Wärmepumpe (BWP) veröffentlicht werden. Die Stückzahlen der neu installierten Brauchwarmwasser-Wärmepumpen werden auch als Produktionszahlen genutzt. Die Produktionszahlen von Heizungswärmepumpen sind bis einschließlich 2021 um den Faktor

2 größer als die Installationszahlen. Ab 2022 sind die Stückzahlen der im Inland produzierten Heizungswärmepumpen identisch mit der Anzahl neu installierter Geräte. Den verschiedenen Wärmepumpentypen werden basierend auf den Werten des Neuzugangs mittlere HFKW-Füllmengen und prozentuale Anteile der HFKW-Typen zugeordnet. Das Modell enthält außerdem die Lebensdauern und Emissionsraten.

- Herstellungsemissionen werden durch Multiplikation der Verbrauchsmengen für die Befüllung mit dem $EF_{Herstellung}$ gemäß Gleichung 8 errechnet, Bestandsemissionen gemäß Gleichung 9.
- Wärmepumpen mit HFKW werden seit 1995 hergestellt und vertrieben. Bei einer Lebensdauer von durchschnittlich 15 Jahren treten Entsorgungsemissionen ab dem Jahr 2010 auf. Sie werden mit Gleichung 11 berechnet.
- Emissionen des nicht berichtspflichtigen uHFKW-1234yf aus dem Einsatz des Kältemittelgemisches R-454C werden gemäß den Empfehlungen der UNFCCC Reporting Guidelines 2014 ((UNFCCC, 2014), FCCC/CP/2013/10/Add.3, Decision 24/CP.19) freiwillig als „additional greenhouse gases" berichtet. Die Emissionen sind aggregiert mit anderen nicht berichtspflichtigen Emissionen in Kapitel 4.9.3 aufgeführt. In den CRT-Tabellen sind keine Daten zu freiwillig berichteten Emissionen enthalten.

Emissionsfaktoren

Die den Emissionsdaten zugrunde liegenden Emissionsfaktoren (EF) sind in Tabelle 193 wiedergegeben.

Die verwendeten Emissionsfaktoren sind das Ergebnis von Expertenbefragungen.

Der Befüllverlust beträgt 0,5 %. Damit ist der $EF_{Herstellung}$ innerhalb des in den 2006 IPCC Guidelines (IPCC (2006a): Vol. 3, Tabelle 7.9) vorgeschlagenen Wertebereichs von 0,2 bis 1 %.

Die jährlichen HFKW-Emissionen werden für Heizungswärmepumpen bis einschließlich 2017 auf 2,5 % geschätzt, für Brauchwarmwasser-Wärmepumpen auf 2 %. Ab 2018 betragen sie nur noch 2 % für Heizungswärmepumpen der Typen Luft – Wasser Split, Erdreich (Grundwasser) - Wasser, Erdreich (Sole) – Wasser und 1 % für Luft – Wasser Monoblock-Wärmepumpen. Der Emissionsfaktor für Brauchwarmwasser-Wärmepumpen sinkt auf 1,5 %. Nach Aussagen von Branchenexperten kann dies begründet werden mit der nationalen und europäischen Gesetzgebung, wodurch ein sorgsamerer Umgang mit HFKW-Kältemitteln eingetreten ist, und damit einhergehend verminderte Leckageraten. Die verwendeten $EF_{Anwendung}$ liegen damit im Bereich des Vorschlags der 2006 IPCC Guidelines (IPCC (2006a): Vol. 3, Tabelle 7.9) von 1 bis 10 %.

Die Entsorgung setzt nach einer durchschnittlichen Lebensdauer von 15 Jahren ein. Die verwendete Lebensdauer liegt damit innerhalb des in den 2006 IPCC Guidelines in Vol. 3, Tabelle 7.9 angegebenen Wertebereichs von 10 bis 20 Jahren.

Der in den Wärmepumpen enthaltene Restfüllstand beträgt bezogen auf die Erstfüllmenge 75 %. In den 2006 IPCC Guidelines (IPCC (2006a): Vol. 3, Tabelle 7.9) sind Werte von 0 - 80 % angegeben. Der verwendete Wert ist somit ein Default-Wert.

Der Rückgewinnungsfaktor für Wärmepumpen entwickelt sich, ebenfalls bedingt durch einen zunehmend sorgsameren Umgang mit Kältemitteln, kontinuierlich nach oben, so dass die bei der Entsorgung auftretenden Verluste bezogen auf die Erstfüllmenge bzw. Restfüllmenge über die Jahre kleiner werden. Der Rückgewinnungsfaktor beträgt im Jahr 2010 50%, ab dem Jahr 2020 65 % und ab dem Jahr 2025 75%. Damit liegen alle verwendeten Rückgewinnungsfaktoren

innerhalb des in den 2006 IPCC Guidelines (IPCC (2006a): Vol. 3, Tabelle 7.9) angegebenen Wertebereichs von 0 bis 80 %.

Aktivitätsdaten

Der Bundesverband Wärmepumpe (BWP) veröffentlicht jährlich die Zahl der inländischen Neuinstallationen von Wärmepumpen, die die Grundlage für die Emissionsberechnung bilden.

Das Verhältnis von Produktions- und Installationszahlen basiert auf Aussagen von Wärmepumpenproduzenten.

4.7.1.2.6.4 Wärmepumpen-Wäschetrockner

Wärmepumpen-Wäschetrockner mit HFKW-Kältemitteln werden seit dem Jahr 2008 auf dem deutschen Markt vertrieben. Als Kältemittel im Wärmepumpenaggregat verwenden die Trockner den HFKW-134a, zwischen 2008 und 2021 nutzten sie auch das Kältemittelgemisch R-407C als Kältemittel. Die Füllmenge in den hermetischen Geräten liegt zwischen 220 g und 485 g. Als halogenfreie Alternative kommt in Wärmepumpen-Wäschetrocknern ab 2015 in stark steigendem Umfang Propan (R-290) zum Einsatz.

Von 2008 bis 2012 produzierte ein inländisches Unternehmen Wärmepumpen-Wäschetrockner mit dem Kältemittel HFKW-134a. Die Produktion wurde Ende 2012 ins Ausland verlagert.

Das Kältemittelmodell für Wärmepumpen-Wäschetrockner ist ähnlich aufgebaut wie das Modell für Raumklimageräte:

- Die wichtigsten Ausgangswerte sind die Stückzahlen für den Inlandsabsatz und die inländische Produktion sowie die Untergliederung in die verwendeten Kältemittel, die den Werten des Inlandsabsatzes folgen. Der Gerätebestand wird aus der Summe der Neuzugänge errechnet.

- Herstellungsemissionen werden durch Multiplikation der Verbrauchsmengen für die Befüllung mit dem $EF_{Herstellung}$ gemäß Gleichung 8 errechnet, Bestandsemissionen gemäß Gleichung 9.

- Wärmepumpen-Wäschetrockner mit HFKW werden seit 2008 hergestellt und vertrieben. Bei einer Lebensdauer von durchschnittlich 15 Jahren treten Entsorgungsemissionen ab dem Jahr 2023 auf. Sie werden mit Gleichung 11 berechnet.

Emissionsfaktoren

Die verwendeten Emissionsfaktoren sind das Ergebnis von Expertenaussagen. Sie sind in Tabelle 193 wiedergegeben.

Der Befüllverlust beträgt 0,5 %. Der $EF_{Herstellung}$ ist länderspezifisch, da die 2006 IPCC Guidelines diese Geräte nicht erfassen.

Die laufenden HFKW-Emissionen dieser hermetischen Geräte werden auf 0,3 % geschätzt. Auch hierfür gibt es keine Vorgaben in den 2006 IPCC Guidelines.

Die Entsorgung setzt nach einer durchschnittlichen Lebensdauer von 15 Jahren ein. Die 2006 IPCC Guidelines machen hierzu keine Angaben.

Der in den Wärmepumpen-Wäschetrocknern enthaltene Restfüllstand beträgt bezogen auf die Erstfüllmenge 95,5 %. In den 2006 IPCC Guidelines (IPCC, 2006a) sind keine Werte angegeben. Der verwendete Wert ist somit ebenfalls länderspezifisch.

Der Rückgewinnungsfaktor beträgt im Jahr 2023 65 %. Ein Vergleich mit den 2006 IPCC Guidelines (IPCC, 2006a) ist nicht möglich.

Aktivitätsdaten

Wärmepumpen-Wäschetrockner sind ein relativ neues Produkt, über das erst wenige statistische Daten und technische Informationen vorliegen. Das Kältemittelmodell basiert daher fast ausschließlich auf Aussagen von Herstellerunternehmen (Schwarz et al., 2012).

4.7.1.2.6.5 Spülmaschinen mit Wärmepumpenfunktion

Um in Großküchen die Abwärme von gewerblichen Geschirrspülmaschinen zu nutzen, sind seit dem Jahr 2005 einzelne Modelle mit Wärmepumpenfunktion auf dem deutschen Markt erhältlich. Als Kältemittel kommt ab 2005 der HFKW-134a zum Einsatz, ab 2020 auch das Kältemittelgemisch R-513A, ab 2021 das Kältemittelgemisch R450A und ab 2024 der uHFKW-1234yf. Die durchschnittlichen Füllmengen liegen, abhängig vom verwendeten Kältemittel zwischen 0,8kg (R-450A) und 3kg (R-513A). Als halogenfreie Alternative wird seit 2017 zunehmend das Kältemittel Kohlendioxid verwendet.

In Deutschland gibt es zwei Hersteller von gewerblichen Geschirrspülmaschinen mit Wärmepumpenfunktion. Die Produktion der Geschirrspülmaschinen startete 2005 und deckt fast den kompletten nationalen Markt ab. Die Anlagen werden in Deutschland gebaut, die darin verbauten Wärmepumpen aber vorbefüllt von externen Zulieferern aus dem Ausland bezogen. Bei der Montage vor Ort finden zusätzlich Nachfüllungen zwischen 64g (R-450A) und 240g (R-513A) pro Anlage statt.

Der nationale Markt für gewerbliche Spülmaschinen ist recht stabil und seit einigen Jahren auf relativ konstantem Niveau.

Das Kältemittelmodell für Spülmaschinen mit Wärmepumpenfunktion ist ähnlich aufgebaut wie das Modell für Raumklimageräte (Warncke et al., 2018):

- Die wichtigsten Ausgangswerte sind die Stückzahlen für den Inlandsabsatz und die inländische Produktion. Der Gerätebestand wird aus der Summe der Neuzugänge abzüglich der Abgänge durch Entsorgung errechnet.
- Herstellungsemissionen werden durch Multiplikation der Verbrauchsmengen für die Befüllung mit dem $EF_{Herstellung}$ gemäß Gleichung 8 errechnet, Bestandsemissionen gemäß Gleichung 9.
- Gewerbliche Geschirrspülmaschinen mit Wärmepumpenfunktion werden seit 2005 hergestellt und vertrieben. Bei einer Lebensdauer von durchschnittlich 12 Jahren treten Entsorgungsemissionen ab dem Jahr 2017 auf. Sie werden mit Gleichung 11 berechnet.

Emissionsfaktoren

Die verwendeten Emissionsfaktoren sind das Ergebnis von Expertenaussagen. Sie sind in Tabelle 193 wiedergegeben.

Der Befüllverlust beträgt 1 %. Der $EF_{Herstellung}$ ist länderspezifisch, da die 2006 IPCC Guidelines diese Geräte nicht erfassen.

Die laufenden HFKW-Emissionen von Spülmaschinen mit Wärmepumpenfunktion werden auf 0,3 % geschätzt. Auch hierfür gibt es keine Vorgaben in den 2006 IPCC Guidelines.

Die Entsorgung setzt nach einer durchschnittlichen Lebensdauer von 12 Jahren ein. Die 2006 IPCC Guidelines machen hierzu keine Angaben.

Der in den Spülmaschinen enthaltene Restfüllstand beträgt bezogen auf die Erstfüllmenge 95,5 %. In den 2006 IPCC Guidelines (IPCC, 2006a) sind keine Werte angegeben. Der verwendete Wert ist somit ebenfalls länderspezifisch.

Der Rückgewinnungsfaktor steigt wie bei Wärmepumpen und Raumklimageräten kontinuierlich an und beträgt im Jahr 2017 82 % und ab dem Jahr 2020 85 %. Ein Vergleich mit den 2006 IPCC Guidelines (IPCC, 2006a) ist nicht möglich.

Aktivitätsdaten

Über gewerbliche Geschirrspülmaschinen mit Wärmepumpenfunktion gibt es nur wenige statistische Daten und technische Informationen. Das Kältemittelmodell basiert daher fast ausschließlich auf Aussagen von Herstellerunternehmen (Warncke et al., 2018).

4.7.1.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (2.F.1 alle)

Die Emissionsfaktoren sind mit größeren Unsicherheiten behaftet. Die in der Literatur (s. Kältemittelmodelle) zu findende breite Streuung von Emissionsfaktoren für identische Anwendungen ist nur teilweise Folge technischer Veränderung, der Anlagendichtheit oder Ausdruck nationaler Unterschiede. In großem Maße resultiert sie aus realer Unsicherheit, da es nur wenig solide empirische Erforschungen ihrer Größen gibt (Schwarz, 2007).

Aufgrund der genannten Unsicherheit bei den Emissionsfaktoren, aber auch aufgrund der Vielzahl von Einzelanwendungen (Anlagen) wird für die Emissionsdaten noch Präzisierungsbedarf gesehen. Zur Verbesserung der Datenqualität wurden die Daten mit den Verkaufsdaten (stoffbezogen) der Hersteller abgeglichen.

Bis zum Berichtsjahr 2001 hatte Deutschland nur aggregierte Emissionen über alle Untergruppen gemeldet. Im Rahmen der Emissionserhebung für die Jahre 1999 bis 2001 und der Emissionserhebung für das Berichtsjahr 2002 wurden auch die Emissionen der Berichtsjahre 1995 bis 1998 überprüft und aufgrund neuer Erkenntnisse zu Einsatzmengen und Emissionsfaktoren aktualisiert. Alle Daten unterliegen weiterhin einer kontinuierlichen Verbesserung. Eine umfassende Überprüfung der Aktualität der verwendeten Kältemittelmodelle, Ausgangsdaten und Emissionsfaktoren erfolgte 2012. Die Aufnahme neuer Anwendungsbereiche von HFKW-Kältemitteln erfolgt kontinuierlich, zuletzt 2018 mit der Aufnahme von Speiseeismaschinen und gewerblichen Spülmaschinen in das nationale Inventar.

Die Datenqualität der Emissionen aus mobilen Klimaanlagen ist gut. Denn es können die Jahresverbräuche von HFKW über die zugelassenen Fahrzeugbestände, Neuzulassungen, die Produktion und den Im- und Export von Pkw, die den Großteil dieses Sektors ausmachen, sowie der jährlichen Ermittlung der modellspezifischen Ausstattungsquoten mit Klimaanlagen und der zugehörigen Füllmengen statistisch recht genau ermittelt werden. Lediglich bei den Nutzfahrzeugen sind die Angaben mit größeren Unsicherheiten behaftet.

Auf der Grundlage der Ergebnisse eines Gutachtens im Auftrag des Umweltbundesamtes (Schwarz et al., 2012) wurden die Emissionsfaktoren aktualisiert und weisen jetzt in vielen Anwendungsbereichen eine kontinuierliche Entwicklung innerhalb der Zeitreihe auf. Insgesamt werden die EF als genau bewertet. In dem Gutachten wurden ebenfalls Restfüllstände und Rückgewinnungsfaktoren für alle Anwendungsbereiche von Kälte- und Klimaanlagen bestimmt, um den Anforderungen der 2006 IPCC Guidelines gerecht zu werden.

Eine Quantifizierung der Unsicherheiten für die gesamte Unterkategorie Kälte- und Klimaanlagen ist für die Berichterstattung 2015 erfolgt.

4.7.1.4 Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.F.1 alle)

Bei steckerfertigen Geräten und Verflüssigungssätzen der Gewerbekälte (Subkategorie 2.F.1.a) wurde die Anzahl von Krankenhäusern, Pflegeheimen und Facheinzelhandelsgeschäften mit Nahrungsmitteln basierend auf neuen Veröffentlichungen des Statistischen Bundesamtes für das Jahr 2023 aktualisiert. Außerdem wurde die Anzahl der Tankstellenshops für die Jahre 1999-2023 auf Basis von veröffentlichten Daten vom Bundesverband freier Tankstellen e.V. (bft) rekalkulisiert. Bei Verflüssigungssätzen der Gewerbekälte (Subkategorie 2.F.1.a) wurde zudem die Anzahl von Blumenläden für die Jahre 2022 und 2023 aufgrund neu veröffentlichter statistischer Daten des Statistischen Bundeamtes aktualisiert. Dies führte zu Änderungen der Emissionen der Produktion, Anwendung und Entsorgung von HFKW-125, HFKW-134a, HFKW-143a und HFKW-32 in den Jahren 1999 bis 2023.

Bei Zentralanlagen der Gewerbekälte in Discountmärkten (Subkategorie 2.F.1.a) wurde die durchschnittliche Lebensdauer der Kälteanlagen von 10 auf 12 Jahre erhöht. Grund dafür sind die Ergebnisse eines noch laufenden Forschungsvorhabens, in dem die vom Verband Deutscher Kälte-Klima-Fachbetriebe e.V. (VDKF) erhobenen Datensätze ausgewertet wurden. Dadurch kam es zu Änderungen der Emissionen der Produktion, Anwendung und Entsorgung von HFKW-125, HFKW-134a, HFKW-143a und HFKW-32 in den Jahren 2001 bis 2023.

Bei Tieftemperaturanwendungen der Gewerbekälte und HFCKW-22-Umrüstanlagen (Subkategorie 2.F.1.a) werden für die Erstfüllung von Neuanlagen und die Erstfüllung der Umrüstanlagen mit R-413A, R-508A, R-508B, Isceon 89, HFKW-152a und HFKW-23 die vom Statistischen Bundesamt erhobenen Daten nach Umweltstatistikgesetz (UStatG, 2005) verwendet. Da die UStatG-Zahlen für HFKW erst im Dezember des Folgejahres vorliegen, erfolgt jährlich eine Rekalkulation der Vorjahreszahlen. Dies führt jeweils zu Änderungen der Emissionen der Produktion und Anwendung von FKW-116, FKW-218, HFKW-125, HFKW152a und HFKW-23 für das Vorjahr. Darüber hinaus wurde der Wert für die Ersterfüllung mit HFKW-152a für das Jahr 2022 aktualisiert.

In der Industriekälte (Subkategorie 2.F.1.c) werden für die Erstfüllung von Neuanlagen und die Erstfüllung der Umrüstanlagen mit HFKW-23 und HFKW-227ea die vom Statistischen Bundesamt erhobenen Daten nach Umweltstatistikgesetz (UStatG, 2005) verwendet. Eine Rekalkulation ist jährlich für den Neuzugang im Vorjahr notwendig, da die nach UStatG erhobenen Daten erst im Dezember des Folgejahres vorliegen. Dies führt jeweils zu Änderungen der Emissionen der Produktion und Anwendung von HFKW-227ea und HFKW-23 für das Vorjahr.

Bei den in der Industriekälte eingesetzten steckerfertigen Kühlgeräten wurde der Anteil der neuen Geräte, die mit HFKW-134a befüllt sind, ab 2014 korrigiert. Dadurch kam es zu Änderungen der Emissionen der Produktion und Anwendung von HFKW-134a in den Jahren 2014 bis 2023.

Bei den zur industriellen Großkälte gehörenden Milchviehbetrieben und Molkereien wurde die national hergestellte Produktmenge Milch für die Jahre 2022 bis 2023 basierend auf Statistiken des Bundesministeriums für Landwirtschaft, Ernährung und Heimat, BMLE, (Erzeugung von Milch, Milchfett und Milcheiweiß, Anlieferung Erzeugerstandort; Reihe 406004001_01) rekalkuliert. Aufgrund einer Modellüberprüfung wurde die Anzahl an neu installierten Anlagen und die Anzahl der Kälteanlagen im Bestand, die R-404A und R-407C als Kältemittel nutzen, verringert, da die Recherchen ergeben haben, dass zunehmend Kälteanlagen mit halogenfreien Kältemitteln installiert wurden. In Bierbrauereien, Schlachthöfen und der Tiefkühlkostproduktion kam es zu Rekalkulationen für die Jahre 2021 bis 2023, in der Schokoladenproduktion für die Jahre 2019 bis 2023 und in Kühlhäusern für die Jahre 2016 bis

2023. Bei Eisbahnen kam es zu Änderungen bei den Kältemitteln HFKW-134a, R-404A und R-407C für die Jahre 2021 bis 2023. Dies führte zu Änderungen der Emissionen der Produktion und Anwendung von HFKW-125, HFKW-134a, HFKW-143a und HFKW-32 in der Industriekälte (Subkategorie 2.F.1.c) ab dem Jahr 2016.

Bei Kühlfahrzeugen (Subkategorie 2.F.1.d) wurden bei allen Größenklassen die Kältemittelanteile von HFKW-134a und R-452A für das Jahr 2023 aktualisiert. Auf Grund der vom Kraftfahrtbundesamt (KBA) veröffentlichten Zulassungszahlen (Zulassungen von fabrikneuen Kraftomnibussen, Lastkraftwagen, Zugmaschinen, Sonstigen Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern zur Lastenbeförderung nach zulässiger Gesamtmasse; Fachserie FZ 26) gab es Rekalkulationen bei der Anzahl von Neuzulassungen in den Jahren 2022 und 2023. Dies führte zu Änderungen der Emissionen der Produktion und Anwendung von HFKW-125, HFKW-134a, HFKW-143a und HFKW-32 in der Transportkälte (Subquellgruppe 2.F.1.d) in den Jahren 2022 und 2023.

Bei Flugzeugen (Subkategorie 2.F.1.e) wurde die Anzahl der in Deutschland betriebenen Flugzeuge der Kennzeichenklasse H (Hubschrauber) für das Jahr 2022 basierend auf Veröffentlichungen des Luftfahrt-Bundesamtes (LBA) aktualisiert. Dies führte zu Änderungen der Emissionen der Anwendung von HFKW-134a im Jahr 2022.

Bei Pkw und Nutzfahrzeugen (Subkategorie 2.F.1.e) wird die Anzahl der entsorgten Fahrzeuge (Pkw und N1 Nutzfahrzeuge) jährlich der Abfallstatistik des Statistischen Bundesamtes entnommen. Da die Daten erst zwei Jahre später veröffentlicht werden, ist eine jährliche Rekalkulation der Vorjahreszahl erforderlich. Dies führt jeweils zu Änderungen der Emissionen der Entsorgung von HFKW-134a für das Vorjahr.

Bei Pkw (Subkategorie 2.F.1.e) wurden die Anzahl der national produzierten, die HFKW-134a als Kältemittel nutzen, ab 2020 auf Null korrigiert. Ab diesem Jahr wurde nur noch das Kältemittel uHFKW-1234yf in neue Klimaanlagen gefüllt. Dadurch änderten sich die Emissionen der Produktion von HFKW-134a aus PKW-Klimaanlagen ab 2020.

Bei Nutzfahrzeugen (Subkategorie 2.F.1.e) wurden die Klimaquoten der neu zugelassenen Fahrzeuge für die Jahre 2016 bis 2023 korrigiert. Dadurch kam es zu Änderungen der Emissionen der Anwendung von HFKW-134a in Nutzfahrzeugen ab 2016.

Bei Schiffen (Subkategorie 2.F.1.e) musste die Anzahl der im Inland produzierten Binnenkabinenschiffe im Jahr 2023 und die der Kreuzfahrtschiffe für die Jahre 1997-2000, 2003-2005, 2010, 2012, 2019 und 2021 auf Basis von Zahlen des Verbands für Schiffbau und Meerestechnik e.V. (VSM) und Angaben der Meyer Werft Papenburg korrigiert werden. Geändert werden musste auch die Anzahl der betriebenen Kreuzfahrtschiffe; das bisher einzige Kreuzfahrtschiff unter deutscher Flagge (MS Deutschland, 1998-2014) hatte eine Klimaanlage mit dem nicht berichtspflichtigen ozonabbauenden Stoff HFCKW-22. Bei Marineschiffen wurde die Füllmenge im Jahr 2002 von 500 kg auf 1.250 kg korrigiert. Korrekturen waren auch bei der Entsorgung von Schiffen nötig: neue Recherchen ergaben, dass bis einschließlich 2024 keine Schiffsentsorgung in Deutschland stattfand, sondern dass ausgemusterte Schiffe zum Abwracken ins Ausland gebracht wurden. Daher fielen bisher keine Entsorgungsemissionen in Deutschland an und die bisher berichteten Emissionen der Entsorgung von HFKW-134a in den Jahren 2022 und 2023 wurden auf Null korrigiert. Insgesamt kam es zu Änderungen der Emissionen von HFKW-134a aus Schiffsklimaanlagen ab dem Jahr 1997.

Bei Raumklimageräten (Subkategorie 2.F.1.f) wurde die Anzahl neuer beweglicher Raumklimageräte aufgrund der Berücksichtigung neuer Statistiken von JARN und BSRIA aktualisiert. Basierend auf den Ergebnissen eines noch laufenden Forschungsvorhabens, in dem

die vom Verband Deutscher Kälte-Klima-Fachbetriebe e.V. (VDKF) erhobenen Datensätze ausgewertet wurden, wurde die durchschnittliche Lebensdauer von Multi-Split- und VRF-Multi-Split-Klimageräten von 13 auf 10 Jahre abgesenkt. Dies führte zu Änderungen der Emissionen der Produktion, Anwendung und Entsorgung von HFKW-125, HFKW-134a und HFKW-32 ab 2008.

Bei Wärmepumpen-Wäschetrocknern (Subkategorie 2.F.1.f) mussten Korrekturen bei den Kältemittelanteilen von großen Trocknern mit dem Kältemittel HFKW-134a vorgenommen werden: aufgrund von vorzeitigen Marktverschiebungen wegen eines nahenden Verbots des Inverkehrbringens dieser Geräte ab dem Jahr 2027 entsprechend der EU F-Gas-Verordnung (EU, 2024b) wurden die Anteile ab 2018 aktualisiert. Dies führte zu Änderungen der Emissionen der Produktion und Anwendung von HFKW-134a in den Trocknern ab 2018.

Bei Spülmaschinen mit Wärmepumpenfunktion (Subkategorie 2.F.1.f) wurden die durchschnittlichen Füllmengen von Aggregaten mit dem Kältemittel R-450A von 2.500 auf 800 g pro Gerät und von Spülmaschinen mit R-513A von 2.500 auf 3000 g pro Gerät geändert. Ebenso angepasst wurden die Auffüllmengen bei der Produktion von Maschinen mit R-450A von 200 auf 64 g pro Gerät und von Maschinen mit R-513A von 200 auf 240 g pro Gerät. Die führte zu geänderten Emissionen der Produktion und Anwendung von HFKW-134a ab dem Jahr 2020.

Die Änderungen der Emissionen von FKW-116, FKW-218, HFKW-125, HFKW-134a, HFKW-143a, HFKW-152a, HFKW-227ea, HFKW-23 und HFKW-32 in der Unterkategorie Kälte- und Klimaanlagen (2.F.1) in den Jahren 1995 (Basisjahr für fluorierte Treibhausgase) bis 2023 sind in Tabelle 195 aufgeführt

Tabelle 195: Rekalkulierte Emissionen von HFKW-23, HFKW-32, HFKW-125, HFKW-134a, HFKW-143a, HFKW-152a, HFKW-227ea, FKW-116 und FKW-218 in der Unterkategorie Kälte- und Klimaanlagen (2.F.1) in den Jahren 1995-2023, in t CO_2eq

	Einheit	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
EM HFKW-23															
Submission 2026	t CO_2eq														
Submission 2025	t CO_2eq														
Differenz	t CO_2eq														
EM HFKW-32															
Submission 2026	t CO_2eq					9.718	12.754	14.733	17.402	21.063	25.822	31.587	38.314	46.436	54.946
Submission 2025	t CO_2eq					9.715	12.751	14.727	17.395	21.055	25.814	31.580	38.307	46.430	54.939
Differenz	t CO_2eq					+3	+3	+6	+7	+8	+8	+7	+7	+6	+7
EM HFKW-125															
Submission 2026	t CO_2eq	135.681	284.635	428.611	570.811	682.107	822.656	913.183	1.001.137	1.097.938	1.231.044	1.321.258	1.369.809	1.441.325	1.504.032
Submission 2025	t CO_2eq	135.741	284.744	428.722	570.926.	682.114	825.323	915.753	1.003.476	1.100286	1.234.463	1.334.052	1.378.214	1.442.597	1.507.007
Differenz	t CO_2eq	-60	-109	-111	-116	-7	-2.667	-2.569	-2.339	-2.348	-3.419	-12.794	-8.405	-1.273	-2.974
EM HFKW-134a															
Submission 2026	t CO_2eq	318.601	590.546	906.976	1.289.629	1.680.837	2.065.082	2.343.701	2.614.535	2.888.637	3.152.749	3.443.513	3.722.244	3.678.278	3.854.565
Submission 2025	t CO_2eq	318.642	590.634	907.077	1.289.734	1.680.832	2.067.204	2.345.724	2.616.168	2.890.907	3.156.601	3.451.580	3.727.774	3.680.141	3.856.728
Differenz	t CO_2eq	-41	-87	-101	-105	+5	-2.122	-2.023	-1.633	-2.270	-3.852	-8.066	-5.530	-1.863	-2.162
EM HFKW-143a															
Submission 2026	t CO_2eq	76.480	238.028	394.002	562.870	730.108	954.692	1.104.237	1.242.634	1.376.567	1.487.826	1.599.104	1.713.486	1.854.551	1.970.250
Submission 2025	t CO_2eq	76.587	238.222	394.200	563.077	730.152	959.492	1.108.893	1.246.884	1.380.842	1.494.022	1.622.067	1.728.588	1.856.887	1.975.635
Differenz	t CO_2eq	-107	-194	-198	-207	-44	-4.800	-4.656	-4.250	-4.275	-6.195	-22.963	-15.103	-2.336	-5.385
EM HFKW-152a															
Submission 2026	t CO_2eq														
Submission 2025	t CO_2eq														
Differenz	t CO_2eq														
EM HFKW-227ea															
Submission 2026	t CO_2eq														

	Einheit	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Submission 2025	t CO_2eq														
Differenz	t CO_2eq														
EM FKW-116															
Submission 2026	t CO_2eq														
Submission 2025	t CO_2eq														
Differenz	t CO_2eq														
EM FKW-218															
Submission 2026	t CO_2eq														
Submission 2025	t CO_2eq														
Differenz	t CO_2eq														

	Einheit	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
EM HFKW-23																
Submission 2026	t CO_2eq															33.828
Submission 2025	t CO_2eq															34.433
Differenz	t CO_2eq															-605
EM HFKW-32																
Submission 2026	t CO_2eq	62.686	71.547	81.818	93.905	107.196	119.981	132.120	146.248	159.996	164.940	170.177	187.482	208.563	225.221	245.381
Submission 2025	t CO_2eq	62.456	71.285	81.466	93.084	104.351	116.540	130.331	146.343	160.466	166.755	174.828	193.235	213.074	229.187	250.724
Differenz	t CO_2eq	+230	+262	+352	+821	+2.845	+3.441	+1.789	-95	-470	-1.815	-4.651	-5.753	-4.511	-3.966	-5.343
EM HFKW-125																
Submission 2026	t CO_2eq	1.569.633	1.702.910	1.839.303	1.967.132	1.976.642	2.006.485	2.006.884	2.024.422	1.996.999	1.935.326	1.786.131	1.690.514	1.669.187	1.633.696	1.625.925
Submission 2025	t CO_2eq	1.571.571	1.712.062	1.847.824	1.966.904	1.966.136	1.993.688	2.002.584	2.029.707	2.004.312	1.949.623	1.814.063	1.722.365	1.696.396	1.658.811	1.657.089
Differenz	t CO_2eq	-1.937	-9.152	-8.522	+227	+10.506	+12.797	+4.299	-5.285	-7.313	-14.296	-27.932	-31.851	-27.210	-25.116	-31.163
EM HFKW-134a																
Submission 2026	t CO_2eq	4.242.979	4.241.796	4.414.177	4.559.687	4.653.672	4.726.454	4.784.221	4.732.993	4.550.962	4.369.587	4.119.743	3.926.718	3.796.869	3.655.753	3.524.832

	Einheit	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Submission 2025	t CO_2eq	4.244.136	4.248.728	4.420.608	4.559.019	4.646.905	4.721.411	4.787.192	4.742.425	4.561.910	4.383.233	4.144.680	3.962.076	3.841.286	3.709.085	3.592.932
Differenz	t CO_2eq	-1.157	-6.932	-6.431	+669	+6.767	+5.043	-2.971	-9.431	-10.947	-13.646	-24.937	-35.358	-44.417	-53.331	-68.100
EM HFKW-143a																
Submission 2026	t CO_2eq	2.075.390	2.153.275	2.236.265	2.290.382	2.250.659	2.247.023	2.180.451	2.067.303	1.903.078	1.710.953	1.486.432	1.297.487	1.188.448	1.091.841	1.028.297
Submission 2025	t CO_2eq	2.080.949	2.172.042	2.254.722	2.297.450	2.257.334	2.254.415	2.187.957	2.075.128	1.911.319	1.720.257	1.495.398	1.303.934	1.197.243	1.101.944	1.039.423
Differenz	t CO_2eq	-5.559	-18.767	-18.458	-7.068	-6.675	-7.393	-7.506	-7.825	-8.241	-9.304	-8.967	-6.448	-8.795	-10.104	-11.126
EM HFKW-152a																
Submission 2026	t CO_2eq														1	0,619
Submission 2025	t CO_2eq														0	0,635
Differenz	t CO_2eq														+1	-0,02
EM HFKW-227ea																
Submission 2026	t CO_2eq															3.773
Submission 2025	t CO_2eq															3.795
Differenz	t CO_2eq															-23
EM FKW-116																
Submission 2026	t CO_2eq															3.057
Submission 2025	t CO_2eq															3.092
Differenz	t CO_2eq															-34
EM FKW-218																
Submission 2026	t CO_2eq															522
Submission 2025	t CO_2eq															533
Differenz	t CO_2eq															-11

4.7.1.5 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (2.F.1 alle)

Derzeit sind keine Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

4.7.2 Schaumherstellung (2.F.2)

Auch bei der Schaumherstellung werden seit 1992 teilfluorierte Kohlenwasserstoffe (HFKW) als Ersatz für die Ozonschicht schädigenden und klimaschädlichen FCKW und HFCKW als Treibmittel eingesetzt.

Dabei kann zwischen offenzelligen und geschlossenzelligen Schaumprodukten unterschieden werden. Bei offenzelligen Schaumprodukten emittiert das Treibmittel nur während des Produktionsprozesses bzw. kurz danach. Zu den offenzelligen Schaumprodukten, die in Deutschland produziert und verwendet werden, zählen Polyurethan-Integralschaum, Polyurethan-Montageschaum (OCF) und mit HFKW-152a-geschäumter extrudierter Polystyrolhartschaum (XPS). Bei geschlossenzelligen Schaumprodukten treten während der gesamten Lebensdauer Emissionen auf: bei der Produktion, bei der Anwendung und bei der Entsorgung. Hierzu zählen Polyurethan-Hartschaum und extrudierter Polystyrolhartschaum (XPS), der mit HFKW-134a oder uHFKW-1234ze geschäumt wurde. Beide geschlossenzelligen Schaumprodukte werden in Deutschland produziert und verwendet.

Die Aktivitätsdaten für die Produktion (Inlands-Neuverbräuche) von offenzelligen Schaumprodukten (Polyurethan-Integralschaum, Polyurethan-Montageschaum und mit HFKW-152a geschäumter Polystyrolhartschaum) sowie geschlossenzelligen Schaumprodukten (Polyurethan-Hartschaum und mit HFKW-134a geschäumter Polystyrolhartschaum) sind vertraulich, da es für jedes Produkt weniger als drei Hersteller in Deutschland gibt. Die entsprechenden Zellen für Aktivitätsdaten der Produktion in der Kategorie 2.F.2 sind in den Inventartabellen mit C (confidential) gekennzeichnet.

Da der Emissionsfaktor für die Herstellung von offenzelligen Schaumprodukten in allen Fällen 100 % beträgt, und so direkt auf die Aktivitätsraten der Produktion geschlossen werden kann, sind die Emissionen der Produktion ebenfalls vertraulich. Sie werden aggregiert mit den Emissionen der Produktion geschlossenzelliger Schaumprodukte in der Kategorie 2.F.2.b in den Inventartabellen berichtet. Bei den Emissionen der Produktion von geschlossenzelligen Schaumprodukten ist in den Inventartabellen I.E. (included elsewhere) angegeben.

4.7.2.1 Geschlossenzellige Polyurethan-Hartschaumprodukte (2.F.2 PU hard foam)

4.7.2.1.1 Beschreibung der Kategorie (2.F.2 PU hard foam)

Geschlossenzellige Polyurethan (PU)-Hartschaumprodukte kommen in vielen verschiedenen Anwendungen vor, z.B. in Haushaltsgeräten, Kühlfahrzeugen, flexibel beschichteten Dämmplatten oder starr beschichteten Sandwichelementen. Neben dem HFKW-134a, der von 1998 bis 2003 als Treibmittel zum Einsatz kam, sowie dem HFKW-245fa, der zwischen 2004 und 2020 verwendet wurde, wird seit 2002 HFKW-365mfc (mit einem geringen Zusatz an HFKW-227ea) eingesetzt. Zwischen 2014 und 2019 kamen geringe Mengen an HFKW-41 zu Testzwecken zum Einsatz. Die Verwendung von HFKW geht zugunsten von Kohlenwasserstoffen wie Pentan, und in geringen Mengen auch CO_2, zurück.

Die Zeitreihe beginnt erst 1998 und zeigt bis 2003 einen geringen Anstieg der Emissionen. 2004 ist ein größerer Anstieg zu verzeichnen. Dies steht in Einklang mit der historischen Entwicklung

des HFKW-Einsatzes in dieser Anwendung, der in Folge des langen HFCKW-Einsatzes erst langsam beginnt. Von 2005 bis 2009 sinken die Emissionen von PU-Hartschaumprodukten wieder ab. Nach einem leichten Anstieg im Jahr 2010 sind die Emissionen seitdem auf relativ konstantem Niveau.

4.7.2.1.2 Methodische Aspekte (2.F.2 PU hard foam)

Herstellungsemissionen werden durch Multiplikation der HFKW-Menge, die spätestens innerhalb eines Jahres nach Fertigungszeitpunkt emittiert ist (Erstjahresverlust), mit dem $EF_{Herstellung}$ gemäß Gleichung 8 errechnet, Bestandsemissionen gemäß Gleichung 9.

Bei einer durchschnittlichen Lebensdauer von bis zu 50 Jahren (Sandwichelemente) setzt die Entsorgung der PU-Hartschaumprodukte erst in einigen Jahren ein.

Emissionsfaktoren

Die verwendeten Emissionsfaktoren können Tabelle 194 entnommen werden.

Der Emissionsfaktor der Produktion mit HFKW-134a beträgt 10 % und entspricht dem in den 2006 IPCC Guidelines (IPCC (2006a) Vol. 3, Tabelle 7.6) vorgeschlagenen Standardwert für „Polyurethane continuous panels“.

Die Emissionsfaktoren für alle anderen HFKW wurden mit nationalen Experten abgestimmt und zum Teil angepasst. So wurde der Emissionsfaktor für die Herstellung von PU-Hartschaum unter Verwendung von HFKW-365mfc/HFKW-227ea ab 2004 von 10 % auf 15 % erhöht, da dieses HFKW-Gemisch verstärkt in offenen Anwendungen vor Ort, vor allem in Spritzschaum, eingesetzt wird. Der Emissionsfaktor der Produktion mit HFKW-245fa und HFKW-41 beträgt ebenfalls 15 %. Diese Werte liegen innerhalb der in den 2006 IPCC Guidelines (IPCC (2006a): Vol. 3, Tabelle 7.7) vorgeschlagenen Standardwerte für „first year loss“ der verschiedenen PU-Hartschaum-Anwendungen.

Die jährlichen HFKW-Emissionen aus dem „stock“ werden für PU-Hartschaum, der mit HFKW-134a geschäumt wurde, auf 0,5 % geschätzt. Dies entspricht dem Default-Wert der 2006 IPCC Guidelines (IPCC (2006a): Vol. 3, Tabelle 7.6) für „Polyurethane continuous panels“. Die mit HFKW-365mfc/HFKW-227ea, HFKW-245fa und HFKW-41 geschäumten Produkte emittieren jährlich 1 % und liegen damit innerhalb der in den 2006 IPCC Guidelines (IPCC (2006a): Vol. 3, Tabelle 7.7) vorgegebenen Default-Werten für verschiedene PU-Hartschaum-Anwendungen. Der verwendete Emissionsfaktor aus dem Bestand für HFKW-365mfc/HFKW-227ea stammt aus einer Abschätzung aus den Versuchsprodukten.

Aktivitätsdaten

Die Inlands-Neuverbräuche für jedes Treibmittel und jede Produktgruppe basieren auf den in Deutschland produzierten Mengen an Schaumprodukten. Die Bestände basieren auf den in Deutschland eingesetzten Mengen an Schaumprodukten (Verkauf in Deutschland) seit Einführung der HFKW. Abgänge, die den Bestand mindern, spielen bei einer Lebensdauer von bis zu 50 Jahren bis auf weiteres noch keine Rolle.

Inlands-Neuverbräuche und Inlands-Absatz an Schaumprodukten werden jährlich durch Herstellerbefragung, Anwenderbefragung, Befragung von Treibmittellieferanten, Verbandsinformationen (IVPU[71]) und den jährlichen Verwendungsmengen nach Umweltstatistikgesetz (UStatG, 2005) erhoben. Für den Inlands-Neuverbrauch von HFKW-41 werden die Daten aus der Erhebung nach Umweltstatistikgesetz (UStatG, 2005) herangezogen.

[71] IVPU - Industrieverband Polyurethan-Hartschaum e. V.

4.7.2.2 Geschlossenzelliger und offenzelliger XPS-Hartschaum (2.F.2 XPS)

4.7.2.2.1 Beschreibung der Kategorie (2.F.2 XPS)

Extrudierter Polystyrolhartschaum (XPS) wird für Dämmstoffplatten verwendet, die eine hohe Resistenz gegen Feuchtigkeit aufweisen sollen. Verbräuche und Emissionen von HFKW zur Herstellung von XPS-Dämmplatten gibt es erst seit 2001, da vorher HFCKW oder alternativ $CO_{2/Ethanol}$ eingesetzt wurde. Als Treibmittel kamen von 2001 bis 2018 der HFKW-134a und von 2001 bis 2022 der HFKW-152a zum Einsatz, entweder allein oder als Gemisch. Ab dem Jahr 2012 wird auch der uHFKW-1234ze als Treibmittel eingesetzt. In Abhängigkeit vom Treibmittel zeigen XPS-Dämmstoffplatten ein unterschiedliches Emissionsverhalten. Bei Verwendung von HFKW-152a kommt es nur während der Produktion zu HFKW-Emissionen, so dass man von offenzelligen XPS-Dämmstoffplatten sprechen kann. Werden HFKW-134a oder uHFKW-1234ze verwendet, entstehen geschlossenzellige XPS-Hartschaumprodukte, die auch während der Anwendung und bei der Entsorgung HFKW-Emissionen verursachen.

Die Zeitreihe beginnt im Jahr 2001 und zeigt zunächst einen Anstieg der Emissionen bis zum Jahr 2002. Ab dem Jahr 2003 sinken die Emissionen kontinuierlich ab, was mit dem zunehmenden Einsatz nichthalogenierter Treibmittel bei der XPS-Hartschaumproduktion in Deutschland zusammenhängt. In den Jahren 2018 und 2019 kommt es zu einem ausgeprägten Absinken der Emissionen, die danach auf niedrigem Niveau nahezu konstant bleiben.

4.7.2.2.2 Methodische Aspekte (2.F.2 XPS)

Herstellungsemissionen werden durch Multiplikation des HFKW-Neuverbrauchs der Produktion von XPS-Dämmplatten mit dem $EF_{Herstellung}$ gemäß Gleichung 8 errechnet.

Anwendungsemissionen errechnen sich gemäß Gleichung 9 aus dem inländischen HFKW-Endbestand in XPS-Dämmstoffen. Dieser erhöht sich jährlich nur durch Neuzugänge von HFKW-134a-haltigen und uHFKW-1234ze-haltigen Dämmplatten. Abgänge vom Bestand spielen bei einer Lebensdauer von 50 Jahren noch keine Rolle. Der HFKW-Neuzugang entspricht nicht dem jährlichen Neuverbrauch abzüglich der Herstellungsemissionen. Denn durch den Außenhandel, besonders den Export von HFKW-134a- oder uHFKW-1234ze-haltigem XPS, bilden nur 25 % (Kehrwert der Exportquote) des in den Produkten enthaltenen HFKW-134a bzw. uHFKW-1234ze einen Neuzugang zum inländischen HFKW-Bestand.

Bei einer durchschnittlichen Lebensdauer der XPS-Dämmplatten von 50 Jahren setzt die Entsorgung frühestens im Jahr 2051 ein. Entsorgungsemissionen sind daher bisher nicht relevant.

Die Emissionen des nicht berichtspflichtigen uHFKW-1234ze berichtet Deutschland gemäß den Empfehlungen der UNFCCC Reporting Guidelines 2014 ((UNFCCC, 2014), FCCC/CP/2013/10/Add.3, Decision 24/CP.19) freiwillig als „additional greenhouse gas“. Die uHFKW-1234ze-Emissionen werden aus Vertraulichkeitsgründen mit anderen nicht berichtspflichtigen Emissionen zusammengefasst und aggregiert in Kapitel 4.9.3 unter CRF 2.H.3 berichtet.

Emissionsfaktoren

Die verwendeten Emissionsfaktoren können Tabelle 194 entnommen werden.

Die Herstellungsemissionen (HFKW-Erstjahresverlust) für HFKW-152a betragen praktisch 100 % ($EF_{Herstellung}$ = 1), da es bei der Produktion nur als Treibmittel genutzt wird. Beim HFKW-134a emittiert bei der Schäumung nur eine Teilmenge des Verbrauchs, der Hauptteil geht in das Produkt ein. Der $EF_{Herstellung}$ von HFKW-134a wird empirisch bestimmt und vom Fachverband

CEFIC[72] bzw. dessen Branchenverband EXIBA[73] mitgeteilt. Er unterliegt der Geheimhaltung. Bis zum Vorliegen experimenteller Messwerte wird für mit uHFKW-1234ze geschäumte XPS-Dämmplatten der gleiche $EF_{Herstellung}$ angenommen wie für Dämmplatten, die mit HFKW-134a geschäumt wurden.

Das Auffangen und die Rückgewinnung der HFKW im Produktionsprozess wurden erprobt, bislang aber aus technischen und ökonomischen Gründen nicht umgesetzt.

Die 2006 IPCC (IPCC, 2006a) geben in Vol. 3, Tabelle 7.6 Default-Werte für mit HFKW-134a und HFKW-152a geschäumte Dämmplatten vor: Für den „first year loss" beträgt er 25 % für HFKW-134a und 50 % für HFKW-152a. Die in Deutschland verwendeten Werte weichen, besonders für HFKW-152a, stark davon ab, werden aber als repräsentativ eingeschätzt, da die Angaben auf Aussagen von Branchenexperten beruhen.

Der Sprecher des Fachverbands Polystyrol-Extruderschaumstoff e.V. (FPX) schätzte die jährlichen Ausgasungen von eingeschlossenem HFKW-134a-Zellgas im Jahr 2002 auf unter 1 %. Dem zugrunde liegt u.a. eine interne Studie der BASF über die Halbwertszeit verschiedener Zellgase, u.a. auch HFKW-134a (Weilbacher, 1987). Der $EF_{Anwendung}$ aus dieser Laborstudie wird für den HFKW-134a benutzt. Die Diffusion aus den Platten ist dickeabhängig und kann nur als Durchschnitt bzw. als Wert für bestimmte Plattenstärken angegeben werden. Der verwendete Wert $EF_{Anwendung}$ = 0,66 % ist auf eine mittlere Plattenstärke bezogen und liegt unter dem in den 2006 IPCC Guidelines (IPCC (2006a): Vol. 3, Tabelle 7.6) vorgeschlagenen Wert von 0,75 %. Für mit uHFKW-1234ze geschäumte Dämmplatten gibt es keine Default-Werte in den 2006 IPCC Guidelines. Es wird der gleiche $EF_{Anwendung}$ angenommen wie für HFKW-134a.

Aktivitätsdaten

Für den Inlands-Neuverbrauch von HFKW-134a und HFKW-152a werden die Daten aus der Erhebung nach Umweltstatistikgesetz (UStatG, 2005) sowie Informationen aus Herstellerbefragung herangezogen.

Für den Inlands-Neuverbrauch von uHFKW-1234ze werden die Daten aus der Erhebung nach Umweltstatistikgesetz (UStatG, 2005) und Informationen des Treibmittelherstellers herangezogen.

Alle für die Emissionsberechnung erforderlichen Daten, wie Verlustrate bei der Produktion und Außenhandelssaldo für HFKW-134a-haltige Dämmplatten stammen vom europäischen Fachverband (CEFIC bzw. EXIBA).

4.7.2.3 Offenzelliger Polyurethan-Integralschaum (2.F.2 PU integral foam)

4.7.2.3.1 Beschreibung der Kategorie (2.F.2 PU integral foam)

Offenzellige Polyurethan (PU)-Integralschäume sind Schaumstoffe, die einen porösen Kern und eine massive Randzone aufweisen. Ihre Herstellung erfolgt durch Reaktionsspritzgussverfahren. Dabei wird das Reaktionsgemisch inklusive des Treibmittels in flüssiger Form in die kalte Spritzgussform eingebracht. Bei der Verschäumungsreaktion emittiert das Treibmittel vollständig. PU-Integralschäume werden z.B. bei Sport- und Freizeitschuhsohlen, Autokarosserieteilen und Fensterprofilen eingesetzt. HFKW werden seit 1996 als Treibmittel bei der Produktion von PU-Integralschäumen eingesetzt.

In Deutschland wurden der HFKW-134a zwischen 1996 und 2021 als Treibmittel verwendet, der HFKW-245fa von 2004 bis 2022. Der HFKW-365mfc (mit einem geringen Zusatz an HFKW-

[72] CEFIC – The European Chemical Industry Council

[73] EXIBA – European Extruded Polystyrene Insulation Board Association

227ea) wird seit dem Jahr 2002 eingesetzt. Seit dem Jahr 2019 kommt auch der uHFKW-1336mzz (Z) und seit 2022 der uHFCKW-1233zd (E) zum Einsatz.

Die Zeitreihe beginnt 1996 und verläuft bis zum Jahr 2001 relativ konstant. Ab 2002 steigen die Emissionen kontinuierlich an. Der verzögerte Einsatz der HFKW ist auf den langen HFCKW-Einsatz in der PU-Integralschaumproduktion in Deutschland zurückzuführen. 2012 ist ein Rückgang der Emissionen zu verzeichnen. Der Grund hierfür ist der verstärkte Einsatz von Kohlenwasserstoffen (z.B. Pentan) als Treibmittel, die die HFKW zunehmend verdrängen Bis 2017 steigen die Emissionen jedoch wieder an, um nach einem sprunghaften Einbruch im Jahr 2018 ab 2019 auf relativ konstantem niedrigen Niveau zu bleiben. Ein weiteres sprunghaftes Absinken ist im ahr 2023 zu verzeichnen.

4.7.2.3.2 Methodische Aspekte (2.F.2 PU integral foam)

Gemäß 2006 IPCC-Guidelines (IPCC (2006a): Seite 7.34, Gleichung 7.8) wird bei dieser offenen Anwendung die Emission gleich der bei der Produktion verwendeten HFKW-Menge (HFKW-Neuverbrauch) gesetzt.

Herstellungsemissionen werden durch Multiplikation des HFKW-Neuverbrauchs der Produktion mit dem $EF_{Herstellung}$ gemäß Gleichung 8 errechnet.

Anwendungsemissionen und Entsorgungsemissionen fallen nicht an, da das Treibmittel bereits vollständig bei der Produktion emittiert.

Die Emissionen der nicht berichtspflichtigen uHFKW-1336mzz (Z) und uHFCKW-1233zd (E) berichtet Deutschland gemäß den Empfehlungen der UNFCCC Reporting Guidelines 2014 ((UNFCCC, 2014), FCCC/CP/2013/10/Add.3, Decision 24/CP.19) freiwillig als „additional greenhouse gas“. Die Emissionen werden aus Vertraulichkeitsgründen mit anderen nicht berichtspflichtigen Emissionen zusammengefasst und aggregiert in Kapitel 4.9.3 unter CRF 2.H.3 berichtet.

Emissionsfaktoren

Der verwendete Emissionsfaktor kann Tabelle 194 entnommen werden.

Die 2006 IPCC Guidelines geben für PU-Integralschäume, die mit HFKW-134a, HFKW-245fa oder HFKW-365mfc (mit einem Zusatz von HFKW-227ea) geschäumt werden, einen Default-Wert für den Erstjahresverlust (*first year loss*) von 95 % vor. Als jährlicher Verlust wird ein Wert von 2,5 % angegeben, so dass Emissionen über drei Jahre anfallen.

Laut den befragten inländischen Experten entweicht das Treibmittel bei Integralschäumen bis auf wenige Reste während des Schäumungsvorgangs. Die Reste gasen maximal innerhalb eines Zeitraums von zwei Jahren aus. Daher wird in Deutschland im Unterschied zu den 2006 IPCC Guidelines ein Emissionsfaktor der Produktion von 100 % als angemessen betrachtet.

Aktivitätsdaten

Die Inlands-Neuverbräuche für jedes Treibmittel basieren auf den in Deutschland produzierten Mengen an Integralschäumen.

Die Inlands-Neuverbräuche werden jährlich durch Herstellerbefragung, Anwenderbefragung, Befragung von Treibmittellieferanten, Verbandsinformationen (IVPU) und den jährlichen Verwendungsmengen nach Umweltstatistikgesetz (UStatG, 2005) erhoben.

Für den Inlands-Neuverbrauch von uHFKW-1336mzz und uHFCKW-1233zd werden die Daten aus der Erhebung nach Umweltstatistikgesetz (UStatG, 2005) herangezogen.

4.7.2.4 Offenzelliger Polyurethan-Montageschaum (2.F.2 one-component PU foam)

4.7.2.4.1 Beschreibung der Kategorie (2.F.2 one-component PU foam)

Unter dem Begriff „Montageschaum“ wird offenzelliger Polyurethanschaum (PU-Schaum) verstanden, der aus Druckbehältern (Dosen) vor Ort, z.B. bei der Fenster- oder Türzargenmontage, ausgetragen wird. Als Treibmittel werden seit dem HFCKW-Verbot Gemische mit HFKW sowie halogenfreie Treibmittel wie Propan, Butan oder Dimethylether (DME) eingesetzt. Der HFKW-Anteil in den Dosen wurde 1996 immer mehr reduziert und ist ab 2025 Null.

HFKW-134a wurde in Deutschland zwischen 1992 und 2022 bei der Produktion von PU-Montageschaumdosen eingesetzt, HFKW-152a fand zwischen 2002 und 2004 Verwendung in der nationalen Produktion. Importierte und in Deutschland verwendete Montageschaumdosen enthielten zwischen 1992 und 2024 HFKW-134a und zwischen 1995 und 2023 HFKW-152a.

Die Emissionen von PU-Montageschaum steigen von 1992 bis 1994 stark an, danach sinken sie deutlich und kontinuierlich ab. Seit dem 4. Juli 2008 gilt, mit wenigen Ausnahmen, in der EU ein Verbot für das Inverkehrbringen von Einkomponentenschäumen, die mit fluorierten Treibhausgasen mit einem Treibhauspotential (Global Warming Potential, GWP) über 150 befüllt wurden. Wegen dieses Verbotes sinken die Emissionen ab 2008 kontinuierlich ab und sind ab 2025 Null.

4.7.2.4.2 Methodische Aspekte (2.F.2 one-component PU foam)

Die Fertigungsemissionen werden aus der Zahl der jährlich in Deutschland abgefüllten Dosen und dem Treibmittelverlust pro Dose berechnet.

Gemäß 2006 IPCC-Guidelines (IPCC (2006a): Seite 7.34, Gleichung 7.8) wird bei dieser offenen Anwendung die Emission gleich der in den Dosen verkauften Menge HFKW gesetzt. Anwendungsemissionen werden über die in den Dosen verkaufte Menge an HFKW mit Gleichung 9 berechnet.

Entsorgungsemissionen fallen nicht an, da das in den Montageschaumdosen enthaltene HFKW bereits vollständig bei der Anwendung emittiert.

Emissionsfaktoren

Die verwendeten Emissionsfaktoren können Tabelle 194 entnommen werden.

Der $EF_{Herstellung}$ wurde durch Experten- und Herstellerbefragung ermittelt und hatte von 1992 bis 2002 einen Wert von 1,5 g/Dose, ab dem Jahr 2003 nur noch 0,5 g/Dose, da die Gesamtfüllmengen der Dosen seitdem kleiner waren.

Die 2006 IPCC Guidelines (IPCC, 2006a) geben in Vol. 3, Tabelle 7.6 einen Erstjahresverlust von 95 % und einen jährlichen Verlust von 2,5 % für Einkomponenten-Montageschäume an, so dass die Emissionen über insgesamt drei Jahre verteilt sind. Im Unterschied zur IPCC-Methode wird für das deutsche Inventar angenommen, dass sämtliche Emissionen im Verkaufsjahr entstehen ($EF_{Anwendung}$ = 100 %), da eine zügige Anwendung und Entsorgung erfolgt. Zwar sind verbrauchte Dosen bei der Entsorgung nicht vollständig leer, sondern enthalten noch etwa 8 % der ursprünglichen Schaummenge einschließlich Treibgas. Dieses Treibgas gelangt jedoch verzögert zum größten Teil ebenfalls in die Atmosphäre.

Aktivitätsdaten

Die für die Ermittlung der Befüllungsverluste (Fertigungsemissionen) benötigten Daten, die Anzahl der jährlich in Deutschland abgefüllten Dosen mit HFKW-134a bzw. HFKW-152a, der

HFKW-Gehalt je Dose in Gramm und der spezifische Befüllungsverlust werden durch Expertenbefragung und Informationen von Herstellern erhoben.

Die Anzahl der jährlich in Deutschland verkauften Dosen mit dem Treibmittel HFKW-134a bzw. HFKW-152a und der HFKW-Gehalt je Dose in Gramm, die für die Ermittlung der Anwendungsemissionen benötigt werden, stammen von den Herstellern von Montageschaumdosen.

Die Daten zu Montageschaum vor dem Jahr 1995 stammen aus einem Gespräch mit führenden ausländischen Einkomponenten-Montageschaum-Anbietern aus dem Jahr 2006 sowie älteren Veröffentlichungen.

4.7.2.5 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (2.F.2 alle)

Eine systematische Quantifizierung der Unsicherheiten für die Unterkategorie Schäume ist erfolgt.

Bei PU-Schaumprodukten werden die Emissionsangaben für die zurückliegenden Jahre als gut bewertet, da die eingesetzten HFKW-Mengen eher klein sind.

Der XPS-Markt ist in Deutschland wegen weniger Hersteller überschaubar. Da die EF und AR in Zusammenarbeit mit den Herstellern erarbeitet wurden, werden sie als hinreichend genau bewertet.

Die Einsatzmengen der beiden HFKW-152a und HFKW-134a zur Produktion von XPS-Hartschaum wurden seit 2001 vom Fachverband recherchiert. Seit 2006 liegen darüber hinaus Daten aus der Erhebung nach Umweltstatistikgesetz (UStatG, 2005) vor. Da nur drei Hersteller HFKW für die XPS-Schäumung einsetzen, ist an der Datensicherheit der Aktivitätsdaten wenig zu zweifeln. Dies gilt auch für die Exportquote und die ermittelten HFKW-Herstellungsemissionen beim Einsatz von HFKW-134a.

Die Fertigungsemissionen bei der Anwendung des HFKW-152a von 100 % stimmen nicht mit den bisherigen IPCC-Schätzungen überein, wurden jedoch vom Fachverband als realistisch eingeschätzt.

Die durch eine Laborstudie erhaltene Emissionsrate aus dem laufenden Bestand wird angewendet, solange es keine zuverlässigen Messungen an wirklich genutzten Dämmplatten gibt, die in der Aussagekraft noch höher zu bewerten wären als Laborwerte.

4.7.2.6 Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.F.2 alle)

Die Werte des Inlandsverbrauchs von HFKW-134a, HFKW-152a und uHFKW-1234ze für die Produktion von XPS-Hartschaum werden den Erhebungen nach Umweltstatistikgesetz (UStatG, 2005) entnommen. Eine Rekalkulation ist jährlich für den Inlandsverbrauch des Vorjahres notwendig, da die nach UStatG erhobenen Daten erst im Dezember des Folgejahres vorliegen. Dies führt jeweils zu Änderungen der Emissionen der Produktion und Anwendung für das Vorjahr.

Bei Polyurethan-Hartschaumprodukten und Polyurethan-Integralschäumen werden die Inlandsverbräuche für die Produktion mit HFKW-245fa und HFKW-365mfc wegen Berücksichtigung der nach Umweltstatistikgesetz (UStatG, 2005) erhobenen Anteile der verschiedenen Treibgase jeweils für das Vorjahr aktualisiert. Dadurch ändern sich die Emissionen der Produktion.

Bei Polyurethan-Integralschäumen werden die Inlandsverbräuche für die Produktion mit HFKW-134a den Erhebungen nach Umweltstatistikgesetz (UStatG, 2005) entnommen. Eine

Rekalkulation ist jährlich für den Inlandsverbrauch des Vorjahres notwendig, da die nach UStatG erhobenen Daten erst im Dezember des Folgejahres vorliegen. Dies führt jeweils zu Änderungen der Emissionen der Produktion.

Bei Polyurethan-Hartschaumprodukten und Polyurethan-Integralschäumen erfolgte eine Rekalkulation der Inlandsverbräuche für die Produktion mit HFKW-245fa für die Jahre 2017 bis 2020, da neue Erkenntnisse zu den eingesetzten Mengen vorlagen.

Die Änderungen der Emissionen von HFKW-152a und HFKW-245fa in der Unterkategorie Schaumherstellung (2.F.2) für die Jahre 2017 bis 2023 sind in Tabelle 196 aufgeführt.

Tabelle 196: Rekalkulierte Emissionen von HFKW-152a und HFKW-245fa 2017 bis 2023, in [t CO_2eq]

	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
HFKW-152a							
Submission 2025							1.717
Submission 2026							889
Differenz	-						-828
HFKW-245fa							
Submission 2025	157.497	108.702	107.998	172.802	178.432	178.432	178.432
Submission 2026	157.276	92.483	75.910	92.442	67.658	40.059	12.460
Differenz	-220	-16.219	-32.089	-80.360	-110.774	-138.373	-165.972

4.7.2.7 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (2.F.2 alle)

Derzeit sind keine Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

4.7.3 Feuerlöschmittel (2.F.3)

4.7.3.1 Beschreibung der Kategorie (2.F.3)

Die bis 1991 als Feuerlöschmittel erlaubten Halone sind weitgehend durch ökologisch unbedenkliche Stoffe ersetzt worden; vor allem Inertgase wie Stickstoff und Argon in Anlagen zur Beflutung von zu löschenden Innenräumen und Pulver, CO_2 oder Schaum in Handfeuerlöschern.

Als Halonersatz wurde in Deutschland 1998 der HFKW-227ea zugelassen. Danach folgte 2001 der HFKW 236fa, der aber nur im militärischen Bereich eingesetzt wird. Seit 2002 ist auch HFKW-23 zugelassen, wird aber erst seit 2005 eingesetzt. Eine Zulassung von Feuerlöschmitteln ist heute zwar nicht mehr notwendig, die Liste der eingesetzten Löschmittel hat sich aber trotzdem nicht erweitert, da alle Anwendungsbereiche mit halogenfreien und den genannten HFKW (besonders 227ea und 236fa) abgedeckt werden können.

Die HFKW-Feuerlöschmittel werden importiert und in Deutschland in Anlagen eingefüllt. Außenhandel bereits befüllter Anlagen kommt praktisch nicht vor. Die Zeitreihen beginnen erst 1998.

4.7.3.2 Methodische Aspekte (2.F.3)

Der jährliche HFKW-Neuzugang in inländischen Anlagen ist identisch mit der im Inland in Neuanlagen gefüllten Menge (HFKW-Neuverbrauch).

Da in Deutschland die Aktivitätsdaten für den HFKW-227ea und HFKW-236fa bis zum Jahr 2017 vorliegen, wird von 1995 bis 2017 ein bottom-up Ansatz angewendet. Im Gegensatz zum top-down Ansatz der 2006 IPCC Guidelines (IPCC (2006a): Vol. 3, Kapitel 7.6) werden Befüllungsemissionen berücksichtigt. Für den HFKW-227ea gibt es ab dem Jahr 2021 keine Erstbefüllungen mehr.

Ab dem Berichtsjahr 2018 wird der Top-down Ansatz der 2006 IPCC Guidelines ((IPCC, 2006a): Vol. 3, Kapitel 7.6) angewendet.

Für den HFKW-23 werden die installierten Mengen mangels Daten vom Umweltbundesamt geschätzt. Ab dem Berichtsjahr 2016 wird davon ausgegangen, dass aufgrund der Regelungen der EU F-Gas Verordnung (EU, 2024b) keine Neuanlagen mehr installiert werden.

Die durchschnittliche Lebensdauer von Feuerlöschanlagen wird auf 20 Jahre geschätzt und liegt in der gleichen Größenordnung wie der in den 2006 IPCC Guidelines (IPCC (2006a): Vol. 3, Kapitel 7.6.2.2) vorgeschlagene Wertebereich von 15 bis 20 Jahren.

Entsorgungsemissionen treten erstmals 2018, nach einer durchschnittlichen Lebensdauer von 20 Jahren, auf.

Emissionsfaktoren

Die verwendeten Emissionsfaktoren können Tabelle 194 entnommen werden.

Die $EF_{Herstellung}$ basieren auf Expertenschätzungen.

Der $EF_{Anwendung}$ liegt für den HFKW-236fa zwischen 1 und 0,4%. Der Emissionsfaktor berücksichtigt die große Unsicherheit bei den Bestandsschätzungn und basiert auf Nachfüllmengen für die Jahre 2001/2002 und 2019-2023. Aus Vertraulichkeitsgründen kann hier keine detailierte Rückrechnung erfolgen.

Für den HFKW-23 werden ebenfalls 4 % angenommen, um den Unsicherheiten in den Aktivitätsraten Rechnung zu tragen.

Für den HFKW-227ea liegen konkrete Installations- und Nachfüllmengen bis zum Berichtsjahr 2007 vor. Diese werden über den von der Firma geschätzten Marktanteil auf den gesamten deutschen Markt hochgerechnet.Vom Berichtsjahr 2008 bis zum Berichtsjahr 2017 werden die Emissionen aus der Anwendung mit einem Emissionsfaktor von 2,5% berechnet. Dieser $EF_{Anwendung}$ liegt leicht über dem in den Guidelines empfohlen EF von 2% für stationäre Löschanlagen.

Für alle HFKW beträgt der Emissionsfaktor der Entsorgung 1 % bis zum Berichtsjahr 2021. Dieser Wert weicht, auf Empfehlung der Experten von Öko-Recherche, von den Vorgaben der 2006 IPCC Guidelines (IPCC (2006a): Vol. 3, Kapitel 7.6.2.2) ab, da in der Praxis Gasflaschen von der Anlage getrennt werden und zur Wiederverwendung ins Ausland gehen. Ab dem Berichtsjahr 2022 wird er auf 9% hochgesetzt, da es neue Erkenntnisse aus dem Bericht zur Inventarermittlung 2021/2022 gab.

Aktivitätsdaten

Die Emissionsangaben zum HFKW-227ea basieren auf statistischen Erhebungen eines Unternehmens zu Einsatzmengen, Nachfüllmengen, Fehlauslösungen, Auslösungen im Brandfall und Probeflutungen in Deutschland (in Anlehnung an Tier 2). Aufgrund der von der Firma

geschätzten Marktanteile wird eine Hochrechnung vorgenommen. Diese Daten liegen in diesem Detaillierungsgrad bis zum Berichtsjahr 2007 vor. Ab dem Berichtsjahr 2008 berichten zwei Firmen ihre Verwendungsmengen. Beide Firmen haben einen Marktanteil von 90 %, Die Einsatzmengen werden auf 100 % hochgerechnet. Ab dem Berichtsjahr 2018 wird der Trend mangels Daten und mit der Aussage einer der beiden Firmen, dass man aus der Verwendung von des HFKW-227ea aussteigen will, fortgeschrieben. Ab dem Berichtsjahr 2021 wird kein weitere Wachstum angenommen, da es keine Diskussionen zu einem Verbot auf EU-Ebene gab.

Die Angaben zum HFKW-236fa basieren bis zum Berichtsjahr 2017 auf freiwilligen Firmenangaben. Ab dem Berichtsjahr 2018 wird die Bestandszunahme entsprechend dem Berichtsjahr 2017, fortgeschrieben. Ab dem Berichtsjahr 2021 wird kein weiteres Wachstum angenommen, da die Bundeswehr Servicegeräte angeschafft hat und davon ausgegangen werden kann, dass keine nennenswerte Steigerung des Bedarfs erfolgte.

Die Angaben zum HFKW-23 beruhen auf Schätzungen des UBA. Ab 2016 wird, aufgrund der Regelung in der EU-Verordnung (EU) 517/2014, keine Bestandszunahme mehr angenommen (F-GasV, 2014).

4.7.3.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (2.F.3)

Eine systematische Quantifizierung der Unsicherheiten für die Unterkategorie Feuerlöschmittel ist erfolgt.

4.7.3.4 Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.F.3)

Es waren Rückrechnungen für die Bestandsemissionen des HFKW-236fa für die Berichtsjahre 2004 bis 2023 erforderlich, die aber aus Vertraulichkeitsgründen hier nicht dargestellt werden können.

4.7.3.5 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (2.F.3)

Derzeit sind keine neuen Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

4.7.4 Aerosole (2.F.4)

In diesen Bereich fallen die Dosieraerosole (Metered Dose Inhalers, MDI), die im medizinischen Bereich angewendet werden, sowie die allgemeinen Aerosole und die sogenannten Novelty-Aerosole.

4.7.4.1 Dosieraerosole (2.F.4.a)

4.7.4.1.1 Beschreibung der Kategorie (2.F.4.a)

Dosieraerosole werden im medizinischen Bereich, überwiegend zur Behandlung von Asthma, aber auch COPD, eingesetzt. In Deutschland kam das erste HFKW-getriebene Dosieraerosol 1996 mit dem Treibmittel HFKW-134a auf den Markt. Ab dem Jahr 1999 wurden auch Dosieraerosole mit dem Treibmittel HFKW-227ea vertrieben. Seitdem ist die Anzahl der Präparate kontinuierlich gestiegen. Eine inländische Abfüllung mit dem HFKW-134a gibt es seit dem Jahr 2001.

Die Zeitreihe zeigt von 1996 bis 2002 einen steilen Anstieg der Emissionen, der in Einklang mit der zunehmenden Verwendung der HFKW als FCKW-Ersatzstoffe steht. Ein großer Sprung ist 2001 zu verzeichnen. Ab diesem Jahr wurden FCKW für die größte Wirkstoffgruppe, die

kurzwirksamen Beta-Mimetika, verboten. Ab dem Jahr 2003 sind die Emissionen relativ konstant auf gleichbleibend hohem Niveau, seit 2015 mit leicht steigender Tendenz.

4.7.4.1.2 Methodische Aspekte (2.F.4.a)

Da 98 % des Doseninhalts von Dosieraerosolen aus Treibgas besteht, wird der Doseninhalt als reiner HFKW aufgefasst.

Die Fertigungsemissionen werden aus der Zahl der jährlich in Deutschland abgefüllten Dosieraerosole und dem Treibmittelverlust pro Dose berechnet. Die Emissionen wären höher, wenn nicht ein Teil des Treibgases mithilfe einer Kältefalle aufgefangen und der Verbrennung zugeführt würde.

Anwendungsemissionen werden über die in den Dosieraerosolen verkaufte Menge an HFKW mit Gleichung 9 berechnet. Die große Mehrheit der Dosieraerosole in Deutschland wird in Apotheken verkauft. Auf weitere 10 % wird der Bedarf in Krankenhäusern geschätzt, und 3 % sind „unverkäufliche Muster“ für Ärzte und Pharmareferenten. Diese Anteile werden durch einen Zuschlagsfaktor von 13 % auf die Apothekenverkäufe berücksichtigt.

Die Zeitspanne zwischen Apothekenverkauf und Anwendung ist kurz. Bezugsgröße für die Anwendungsemissionen ist daher nicht wie in den 2006 IPCC Guidelines (IPCC (2006a): Vol. 3, Gleichung 7.6) vorgeschlagen die Summe der halben Käufe (Verkäufe) des vorherigen Jahres und des aktuellen Jahres, sondern die gesamten Käufe/Verkäufe des aktuellen Jahres. Der Ansatz der 2006 IPCC Guidelines böte sich an, wenn nicht verkaufte, sondern produzierte Dosen als Daten vorlägen, weil zwischen Produktion und Anwendung tatsächlich viel Zeit für Transport- und Lagerung vergehen kann.

Entsorgungsemissionen fallen nicht an, da die in den Dosieraerosolen enthaltenen HFKW bereits vollständig bei der Anwendung emittieren.

Emissionsfaktoren

Die verwendeten Emissionsfaktoren können Tabelle 194 entnommen werden.

Der den Herstellungsemissionen zu Grunde liegende $EF_{Herstellung}$ basiert auf im Betrieb von der einzigen deutschen Abfüllfirma von Dosieraerosolen sehr exakt ermittelten Befüllemissionen. Diese betragen 1,5 %, bezogen auf den Neuverbrauch zur Befüllung. Das entspricht etwa 0,2 g pro 10 ml-Dose.

In Übereinstimmung mit den IPCC Vorgaben ((IPCC, 2006a), Vol. 3, Seite 7.28) wird von einer 100 %igen Emission bei der Anwendung ausgegangen ($EF_{Anwendung} = 1$). Inhalierte HFKW setzen sich in den Atemwegen nicht um, sondern gelangen beim Ausatmen unverändert in die Atmosphäre. In Deutschland wird abweichend von den Guidelines nur eine einjährige Lebensdauer der Aerosoldosen zugrunde gelegt. Der Emissionsfaktor ist daher als „country specific“ eingestuft.

Aktivitätsdaten

Die Emissionsdaten bis zum Berichtsjahr 2005 (Produktion) bzw. 2006 (Anwendung) basieren auf Verkaufszahlen (Apothekenverkäufen) von Dosieraerosolen in Deutschland, die über Befragungen der Produzenten erhoben wurden. Dabei werden die gesamte Stückzahl, die durchschnittliche Füllmenge in ml und das eingesetzte Treibgas zur Aufbereitung herangezogen. Ab dem Berichtsjahr 2006 beruhen die Angaben zur Aktivitätsrate der Produktion bzw. ab dem Jahr 2007 auch die zur Aktivitätsrate der Anwendung auf den Daten von jährlich erscheinenden Arzneiverordnungs-Reporten (Ludwig et al., 2022). Ab dem Berichtsjahr 2008 ist die Aktivitätsrate der Produktion der jährlichen Erhebung bestimmter klimawirksamer Stoffe des

Statistischen Bundesamtes (UStatG, 2005) entnommen (Wirtschaftszweig 21). Die Daten sind vertraulich, da es weniger als drei Produzenten in Deutschland gibt.

4.7.4.2 Sonstige Aerosole (2.F.4.b)

4.7.4.2.1 Beschreibung der Kategorie (2.F.4.b)

In Deutschland werden sechs Arten allgemeiner Aerosole (ohne medizinische Dosieraerosole und Novelties) mit HFKW verwendet:

- Druckluftsprays,
- Kältesprays,
- Abflussreiniger-Sprays,
- Schmiermittelsprays,
- Insektizide und
- Abwehrsprays.

Die Produktion und Anwendung von allgemeinen Aerosolen mit HFKW-134a begann im Jahr 1992, HFKW-152a wurde zwischen1995 und 2017 eingesetzt. Seit dem Jahr 2013 kommt auch der uHFKW-1234ze als Treibmittel in Kältesprays und Reinigungssprays zum Einsatz. Die Zeitreihe zeigt von 1992 bis 1996 einen steilen Anstieg der Emissionen, der in Einklang mit der zunehmenden Verwendung der HFKW als FCKW-Ersatzstoffe steht. Zwischen 1996 und 2005 sind die Emissionen konstant. Ein großer Sprung nach unten ist 2009 zu verzeichnen, danach steigen die Emissionen wieder leicht an, um ab 2018 auf sehr niedrige Werte abzusinken.

Zu den sonstigen Aerosolen zählen auch die so genannten Novelty-Aerosole (künstlicher Schnee, Luftschlangensprays u.a.), die aber nicht in Deutschland hergestellt werden. Die Anwendung von Novelties mit HFKW-134a erfolgte in den Jahren 1995 bis 2016, zwischen 2000 und 2008 kam auch der HFKW-152a zum Einsatz. Der uHFKW-1234ze wird seit 2014 als Treibmittel eingesetzt. Die Zeitreihe zeigt von 1995 bis 2003 ein relativ konstantes, hohes Niveau. Ab 2004 sinken die Emissionen stark ab und befinden sich ab dem Jahr 2010 auf konstant niedrigem Niveau. Ein weiteres starkes Absinken der Emissionen ist ab 2017 zu beobachten, da der HFKW-134a seit diesem Jahr nicht mehr zum Einsatz kommt. Grund für die Emissionsentwicklungen ist das ab dem 4. Juli 2009 in der EU geltende Verbot für das Inverkehrbringen von neuartigen Aerosolen, die mit teilfluorierten Kohlenwasserstoffen mit einem Treibhauspotential (Global Warming Potential, GWP) über 150 befüllt sind, das zu einem vorzeitigen Umstellen der Produktion auf andere Treibgase führte.

Für technische Aerosole, die HFKW mit einem GWP über 150 verwenden, gilt mit wenigen Ausnahmen ein Verbot des Inverkehrbringens in die EU ab 01. Januar 2018. Ab 2030 gilt in der EU ein generelles Verbot des Einsatzes von HFKW in technischen Aerosolen.

4.7.4.2.2 Methodische Aspekte (2.F.4.b)

Bei allgemeinen Aerosolen halten sich Importe und Exporte die Waage, so dass der Inlandsmarkt mit dem Verbrauch für die inländische Abfüllung gleichgesetzt werden kann. Der inländische Verbrauch richtet sich nach den im Inland abgefüllten Dosen, unabhängig davon, wo diese angewendet werden. Die Fertigungsemissionen werden aus dem HFKW-Verbrauch für die inländische Abfüllung allgemeiner Aerosole und dem Treibmittelverlust bei der Produktion gemäß Gleichung 8 berechnet.

Novelty-Aerosole werden nicht in Deutschland hergestellt. Für Novelty-Aerosole ist der Anteil des deutschen Markts am EU-Markt Basis für die Berechnung der in den Novelty-Aerosoldosen verkauften HFKW-Mengen.

Anwendungsemissionen werden über die in den sonstigen Aerosolen verkaufte Menge an HFKW mit Gleichung 9 berechnet.

Da die Anzahl der verkauften und nicht der produzierten Aerosoldosen Ausgangspunkt für die Berechnungen ist, kann davon ausgegangen werden, dass die Zeitspanne zwischen Verkauf und Anwendung sehr kurz ist. Bezugsgröße für die Berechnung der Anwendungsemissionen sind daher die gesamten Käufe/Verkäufe des aktuellen Jahres und nicht, wie in den 2006 IPCC Guidelines ((IPCC, 2006a), Vol. 3, Gleichung 7.6) vorgeschlagen, die Summe der halben Käufe (Verkäufe) des vorherigen Jahres und des aktuellen Jahres.

Da die in den Aerosolen enthaltenen HFKW bereits vollständig bei der Anwendung emittieren, müssen keine Entsorgungsemissionen berichtet werden.

Die Emissionen des nicht berichtspflichtigen uHFKW-1234ze berichtet Deutschland gemäß den Empfehlungen der UNFCCC Reporting Guidelines 2014 ((UNFCCC, 2014), FCCC/CP/2013/10/Add.3, Decision 24/CP.19) freiwillig als „additional greenhouse gas“. Die uHFKW-1234ze-Emissionen werden aus Vertraulichkeitsgründen mit anderen nicht berichtspflichtigen Emissionen zusammengefasst und aggregiert in Kapitel 4.9.3 unter CRF 2.H.3 berichtet.

Emissionsfaktoren

Die verwendeten Emissionsfaktoren können Tabelle 194 entnommen werden.

Der den Herstellungsemissionen zu Grunde liegende $EF_{Herstellung}$ = 1,5 % von allgemeinen Aerosolen basiert auf Expertenschätzungen.

Es wird analog den IPCC Vorgaben (IPCC (2006a), Vol. 3, Seite 7.28) sachgerecht von einer 100 %igen Emission bei der Anwendung der sonstigen Aerosole ausgegangen ($EF_{Anwendung}$ = 1). Anders als in den Guidelines vorgeschlagen, wird von der in Deutschland abgesetzten Anzahl von Dosen angenommen, dass sie vollständig im gleichen Jahr verbraucht wird. Der Emissionsfaktor ist daher als „country specific“ eingestuft.

Aktivitätsdaten

Die Daten vor 1995 basieren auf Expertenschätzungen. Entsprechend einem bottom-up-Ansatz stammen sämtliche Mengendaten ab 1995 direkt von Produzenten, Abfüllern und Betreibern, Treibmittelherstellern bzw. der Branchenvereinigung. Für allgemeine Aerosole kommen noch Befüllungsemissionen (= Herstellungsemissionen) hinzu. Grundlage für eine Schätzung ist EU-weites Datenmaterial.

4.7.4.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (2.F.4 alle)

Eine systematische Quantifizierung der Unsicherheiten für die Unterkategorie Aerosole ist erfolgt.

Bei Dosieraerosolen kann der Zuschlagsfaktor für Krankenhäuser und Ärztemuster um 3 % nach oben oder unten von den 13 % abweichen.

Gegenüber den Emissionsangaben zu Dosieraerosolen werden die Angaben für die sonstigen Aerosole als nicht so gut bewertet, da aufgrund der Vielzahl von Produkten der Marktüberblick begrenzt ist. Auch sind hohe Importmengen, vor allem bei den „Novelties“ problematisch. Die Unsicherheiten sind daher deutlich höher (über 20 %).

Da der Umstieg von FCKW auf chlorfreie Treibgase bereits Anfang der 1990er Jahre vollendet war, ist die Zeitreihe von 1995 bis 2005 weitgehend unverändert, seit 2006 sind leichte Emissionsrückgänge zu verzeichnen.

4.7.4.3.1 Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.F.4 alle)

Die Werte des Inlandsverbrauchs von HFKW-134a für die Produktion von Dosieraerosolen werden direkt den Erhebungen nach Umweltstatistikgesetz (UStatG, 2005) entnommen. Eine Rekalkulation ist jährlich notwendig, da die nach UStatG erhobenen Daten erst im Dezember des Folgejahres vorliegen. Dies führt jeweils zu Änderungen der Emissionen der Produktion. Die Aktivitätsraten der Anwendung von HFKW-134a und HFKW-227ea in Dosieraerosolen wurden basierend auf neu verfügbaren Daten der Arzneiverordnungs-Reporte (Ludwig et al., 2022) aktualisiert. Dies führte zur Rekalkulation der Emissionen der Anwendung von HFKW-134a und HFKW-227ea in den Jahren 2022 und 2023.

Bei Novelty-Aerosolen wurden die Aktivitätsraten der Anwendung von HFKW-134a in den Jahren 2014 bis 2023 rekalkuliert. Grund hierfür ist die Berücksichtigung des zunehmenden Einsatzes von uHFKW-1234ze ab 2014, der ab 2017 das alleinige halogenhaltige Treibmittel in Novelty-Aerosolen ist.

Die Änderungen der Emissionen von HFKW-134a und HFKW-227ea in der Unterkategorie Aerosole (2.F.4) für die Jahre 2014 bis 2023 sind in Tabelle 197 aufgeführt.

Tabelle 197: Rekalkulierte Emissionen von HFKW-134a und HFKW-227ea 2014-2023, in t CO_2eq

	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
HFKW-134a										
Submission 2025	493.844	534.921	562.481	516.103	322.970	324.467	319.614	331.983	321.037	321.513
Submission 2026	492.999	533.231	559.946	512.723	319.590	321.087	316.234	328.603	368.313	414.099
Differenz	-845	-1.690	-2.535	-3.380	-3.380	-3.380	-3.380	-3.380	+47.276	+92.586
HFKW-227ea										
Submission 2025									51.654	51.654
Submission 2026									46.846	43.278
Differenz									-4.809	-8.376

4.7.4.3.2 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (2.F.4 alle)

Derzeit sind keine Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

4.7.5 Lösemittel (2.F.5)

4.7.5.1 Beschreibung der Kategorie (2.F.5)

Der Einsatz von HFKW als Lösemittel war in Deutschland bis zum Jahr 2001 verboten (2. BImSchV) und ist auch heute noch stark eingeschränkt. Jede Oberflächenbehandlungsanlage, die HFKW in Reinform oder in Gemischen mit trans-1,2-Dichlorethen einsetzt, muss einzeln beantragt werden, wobei eine Bewilligung nur im Sonderfall erteilt wird. Eingesetzt werden

heute neben dem HFKW-43-10mee auch in sehr geringem Umfang der HFKW-365mfc (seit 2013), der HFKW-245fa (seit 2010) und C_6F_{14} (seit 2006).

4.7.5.2 Methodische Aspekte (2.F.5)

Die Emissionsberechnung erfolgt nach Tier 2a der 2006 IPCC-Guidelines (IPCC (2006a): Vol. 3, Kapitel 7.2). Es fallen nur Emissionen während der Anwendung an.

Emissionsfaktoren

Es wird analog den IPCC Vorgaben (IPCC (2006a): Vol. 3, Gleichung 7.5) sachgerecht von einer 100 %igen Emission bei der Lösemittelanwendung innerhalb von 2 Jahren ausgegangen ($EF_{Anwendung} = 1$).

Aktivitätsdaten

Die Verbrauchsangaben für den HFKW-43-10mee basieren auf Verkaufsdaten eines autorisierten Händlers. Die verwendeten Mengen des HFKW-245fa und des HFKW-365mfc beruhen auf Angaben der Lösemittelproduzenten. Der Inlandsverbrauch von C_6F_{14} stammt aus der Erhebung nach Umweltstatistikgesetz (UStatG, 2005).

Da die Daten vertraulich sind, werden sie unter CRF 2.H.3 berichtet.

4.7.5.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (2.F.5)

Eine systematische Quantifizierung der Unsicherheiten für die Unterkategorie Lösemittel ist erfolgt. Die Verbräuche für die Lösemittel kommen direkt von Einzelfirmen. Die Unsicherheiten für die Emissionen (U_{min}/U_{max}) sind daher sehr gering und werden mit 2 % angenommen. Eine Ausnahme bildet das C_6F_{14}. Hier liegen die Unsicherheiten für die Emissionen laut Expertenschätzung (U_{min}/U_{max}) bei 20 %.

Vor 2006 waren die Emissionen auf konstant niedrigem Niveau. Zwischen 2006 und 2008 kam es kurzfristig zu einem starken Anstieg der Emissionen, u.a. durch die einsetzende Verwendung von C_6F_{14}. Seit 2009 sind die Verwendungsmengen und damit auch der Emissionen relativ konstant auf niedrigem Niveau.

4.7.5.4 Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.F.5)

Rückrechnungen waren nicht erforderlich.

4.7.5.5 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (2.F.5)

Derzeit sind keine neuen Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

4.7.6 Andere Anwendungen, die ODS Ersatzstoffe verwenden (2.F.6)

Deutschland berichtet keine Emissionen in dieser Kategorie.

4.7.7 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (2.F alle)

Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Die Daten für das aktuelle Berichtsjahr wurden, wie bereits für die meisten Vorjahre, im Rahmen eines Forschungsvorhabens im Auftrag des Umweltbundesamtes durch einen externen Experten erhoben.

Die Qualitätssicherung erfolgt im Wesentlichen durch den externen Experten. Darüber hinaus werden die Daten durch die Fachbegleiter des UBA bei Abnahme geprüft.

Der gesamte Sektor der F-Gas Emissionen wurde im Jahr 2011 einer freiwilligen trilateralen Überprüfung unterzogen. Experten aus England, Deutschland und Österreich überprüften die F-Gas Inventare der anderen Länder. Das Ziel der Überprüfung war der Informationsaustausch über die länderspezifischen Methoden der Erstellung der F-Gas Inventare, ein Einblick in die institutionellen und rechtlichen Regelungen für die F-Gas Inventare in jedem Land, die Identifizierung der Hindernisse zur Erstellung von vollständigen und exakten Inventaren und die Diskussion der Unterschiede und Ähnlichkeiten in den Methoden, die zur Erstellung der F-Gas Inventare verwendet werden. Das Treffen hat allen drei Ländern geholfen, die verwendeten Methoden zur Emissionsberechnung zu überprüfen. Weiterhin konnten die Transparenz, die Vollständigkeit und die Genauigkeit der Inventare bewertet werden. Das positive Ergebnis war, dass Deutschland ein gutes F-Gase-Inventar hat. Im Ergebnis wurden keine Empfehlungen für Verbesserungen des deutschen F-Gase-Inventars ausgesprochen.

Für eine Überprüfung der für die Emissionsberichterstattung ermittelten F-Gas Mengen als Grundlage zur Verifikation stehen außer den vom Statistischen Bundesamt, den vom Forschungsnehmer erhobenen und den von Firmen gemeldeten Daten keine weiteren Datenquellen zur Verfügung. Vergleiche mit anderen Ländern zeigen keinen Verbesserungsbedarf. Die Emissionsfaktoren entsprechen den Default-Emissionsfaktoren der 2006 IPCC Guidelines oder liegen in derselben Größenordnung der in anderen Ländern verwendeten Werte.

4.8 Sonstige Produktherstellung und -verwendung (2.G)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
-/-	2 G, Other Product Manufacture and Use		CH_4	5,07	5,07	16,73	5,07	5,07
-/2	2 G, Other Product Manufacture and Use		N_2O	C	C	C	C	C
L/T	2 G, Other Product Manufacture and Use		SF_6	C	C	C	C	C
-/-	2 G, Other Product Manufacture and Use		HFC-134a	0,00	0,00	0,18	0,01	0,00
-/-	2 G, Other Product Manufacture and Use		HFC-245fa	0,00	0,00	21,54	0,01	0,00
-/-	2 G, Other Product Manufacture and Use		HFC-365mfc	0,00	0,00	0,71	0,00	0,00
-/-	2 G, Other Product Manufacture and Use		$C_{10}F_{18}$	C	C	C	C	C

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2, CH_4, N_2O, SF_6, PFC, HFC	s. Tabelle 198	s. Tabelle 198	s. Tabelle 198

Die Kategorie „Sonstige Produktherstellung und –verwendung“ ist für SF_6-Emissionen eine Hauptkategorie nach der Emissionshöhe und dem Trend, sowie für N_2O nach der Methode 2 Analyse.

Zu der Kategorie 2.G gehören SF_6 aus elektrischen Betriebsmitteln (2.G.1), SF_6 und FKW aus sonstiger Produktverwendung (2.G.2), Verwendung von N_2O (2.G.3), Verwendung von F-Gasen in ORC-Anlagen (2.G.4 ORC-Anlagen) und in der Containerbegasung (2.G.4 Containerbegasung) sowie CO_2-, CH_4-, N_2O- und Staub-Emissionen aus der Anwendung von Holzkohle (2.G.4 Holzkohle). Aus der Anwendung von Zigaretten (2.G.4) und Feuerwerkskörpern (2.G.4) werden Staub, Vorläufersubstanzen und Schwermetalle berichtet. Zwecks genauerer Datenerhebung erfolgt im Folgenden z.T. eine weitere Unterteilung dieser Unterkategorien.

Die der Emissionsberechnung zugrunde liegenden Methoden, Emissionsfaktoren und Lebensdauern finden sich in Tabelle 198.

Tabelle 198: Überblick über Methoden und verwendete Emissionsfaktoren für das aktuelle Berichtsjahr in den Kategorien 2.G.1 (Elektrische Betriebsmittel), 2.G.2 (SF_6 und FKW aus sonstiger Produktverwendung) und 2.G.4 (ORC-Anlagen, Containerbegasung & Anwendung von Holzkohle)

	QG	Methode	Schadstoff			Lebensdauer	Emissionsfaktor (dimensionslos)		
			SF_6	HFKW	FKW	[Jahre]	Herstellung	Anwendung	Entsorgung
Elektrische Betriebsmittel	2.G.1								
Schaltanlagen	2.G.1a	Tier 3	SF_6			40	0,02 (CS)	0,001 – 0,01 (CS)	0,015 (CS)
SF_6 und FKW aus sonstiger Produkt-verwendung	2.G.2								
AWACS	2.G.2a	CS	SF_6				NO	1 (CS)	NO
Teilchenbeschleuniger	2.G.2b	CS					0,15 - 1 (CS)	0,006 – 0,003 (CS)	NO
Isolierglasfenster	2.G.2c	Equ. 3.24 ff					0,33 (D)	0,01 (D)	1 (D)
Adiabatisches Verhalten	2.G.2d								
- Autoreifen		Equ. 3.23	SF_6				NO	NO	1 (D)
- Sportschuhe		Equ. 3.23	SF_6		FKW		NO	NO	1 (D)
Sonstige	2.G.2e								
- Spurengas		Equ. 3.22	SF_6				NO	1 (D)	NO
- Schweißen		CS	SF_6				NO	1 (CS)	NO
- Optische Glasfasern		CS	SF_6				C	NO	NO
- Medizin- und Kosmetik		CS			FKW	-	NO	1 (D) 0,95 – 0,998 (CS)	NO
Verwendung von N_2O	2.G.3								
Halbleiterherstellung		D	N_2O				C		
Narkotikaanwendung		D						1	
Sprengstoffanwendung		D						0,1036 kg/t	
Sprühdosen		D						1	
Andere	2.G.4								

	QG	Methode	Schadstoff	Lebensdauer	Emissionsfaktor (dimensionslos)		
ORC-Anlagen	2.G.4a	CS	HFKW | FKW	20 – 30 (CS)	0,02 (CS)	0,04 (CS)	0,2 (CS)
Containerbegasung	2.G.4a	CS	SO_2F_2	-	NO	1 (CS)	NO
Anwendung von Holzkohle	2.G.4b	Tier 1	CO_2-, CH_4-, N_2O- und Staub		C	C	

4.8.1 Elektrische Betriebsmittel (2.G.1)

Diese Kategorie umfasst die Anwendungen der elektrischen Betriebsmittel (2.G.1), die sich in Hochspannungs (HS)- und Mittelspannungs (MS)- sowie sonstigen elektrischen Betriebsmitteln unterteilen.

4.8.1.1 Beschreibung der Kategorie (2.G.1)

In der elektrischen Energieübertragung und -verteilung findet SF_6 als Lösch- und auch als Isoliergas vor allem in Schaltanlagen und Schaltgeräten der Hochspannung (52-380 kV) und zunehmend auch in der Mittelspannung (10-52 kV) Verwendung. Außerdem wird es noch bei der Herstellung von Komponenten eingesetzt, die entweder in gasisolierten Innenraum-Schaltanlagen eingebaut werden (Wandler, Durchführungen) oder direkt zu Betreibern gelangen (HS-Freiluftwandler).

Durch die erstmalige Erfassung weiterer SF_6-Anwendungen im Berichtsjahr 2002 kam es in der Zeitreihe im Jahr 2002 zu einem sprunghaften Anstieg der Emissionen. Im Berichtsjahr 2005 wurden neue Unternehmen in die Berichtserstattung aufgenommen, insbesondere in der neuen Kategorie „Sonstige elektrische Betriebsmittel“. Konjunkturell bedingt wurden 2005 und 2006 mehr Anlagen verkauft. Insgesamt sanken die absoluten Emissionen, vor allem durch sinkende Emissionen aus der Hochspannung bis 2020. Emissionen aus der Mittelspannung und sonstigen Betriebsmittel steigen, nicht zuletzt durch eine stetig wachsende Anlagenzahl. Die Gesamtemissionen bleiben 2022 konstant. Die Industrie, vertreten durch die Hersteller- und Betreiberverbände sowie dem SF_6 -Produzenten, hat sich zu einer jährlichen freiwilligen Berichterstattung verpflichtet.

4.8.1.2 Methodische Aspekte (2.G.1)

Die verwendeten Emissionsfaktoren können Tabelle 198 entnommen werden.

Die Emissionsangaben basieren im Wesentlichen auf einer Massenbilanz, kombiniert mit Emissionsfaktoren für Teilbereiche, in denen Massenbilanzierung an messtechnische Grenzen stößt bzw. mit einem unangemessenen Aufwand verbunden wäre.

Die angewendete Methodik basiert auf der in den 2006 IPCC Guidelines (IPCC (2006a): Vol. 3, Kapitel 8.2.2) beschriebenen Methode „Tier 3 Hybrid Life-Cycle Approach“ (Hybride Methode nach Lebenszyklen).

Anwendungsemissionen

Der SF_6-Bestand in der Gesamtheit der elektrischen Betriebsmittel eines bestimmten Jahres n verändert sich jährlich um den Saldo aus Zugang und Abgang. Vereinzelte Abgänge (Hochspannung) wurden seit 1997 registriert; ein verstärktes Ausscheiden von Hochspannungsschaltanlagen und -geräten der ersten Generation findet bei einer auf mindestens 40 Jahre geschätzten Lebensdauer erst in den letzten Jahren statt.

Drei Besonderheiten sind bei der Berichterstattung zu Schaltanlagen zu beachten:

- Die Berechnung des Endbestandes für jedes Jahr n basiert zwar jeweils auf dem Endbestand des Vorjahres (n-1), jedoch nicht bis zum allerersten Einsatzjahr. Dieses sonst übliche Verfahren entfällt bei Schaltanlagen, weil die Betreiber/Hersteller den SF_6-Bestand für 1995 abgeschätzt haben, und zwar getrennt für Hoch- und Mittelspannung.
- Bestands- und Emissionsermittlung erfolgen in der Hochspannung durch regelmäßige Direkterhebungen bei den ca. 100 Betreibern. Diese werden unmittelbar nach ihrem aktuellen Bestand an SF_6 in Betriebsmitteln (GIS, Leistungsschalter, Freiluftwandler) befragt. Auf diese Bestandsdaten werden Emissionsfaktoren angewendet, die anhand von Referenzanlagen bestimmt worden sind.
- Mittelspannungs-Schaltanlagen haben sehr zahlreiche und zugleich sehr heterogene Betreiber. Direktbefragungen scheiden daher aus. Die Hersteller der Mittelspannungsanlagen haben es selbst übernommen, auf Basis ihrer Verkaufsdaten den inländischen Bestand fortzuschreiben. Die Emissionsermittlung ist dadurch möglich, dass die Anlagen praktisch wartungsfrei sind und per Definition (IEC 62271-1, "sealed for life" - hermetisch abgeschlossene Drucksysteme nach IEC) während der gesamten Lebensdauer keine Nachfüllung benötigen. Die Emissionen sind minimal (meist nur infolge äußerer Einwirkungen). Die Berechnung des Bestandes basiert auf dem Bestand des Vorjahres zuzüglich Neulieferungen und abzüglich Außerbetriebnahmen.

Entsorgungsemissionen

Wegen der langen Lebensdauer von Schaltanlagen (>40 Jahre) und dem Ersteinsatz von SF_6 Ende der 1960er Jahre kam es bis 2004 nur zu geringen Entsorgungsemissionen. Aus Altanlagen (Hoch- und Mittelspannung) zur Entsorgung anstehende SF_6-Mengen wurden daher bis 2004 nur grob geschätzt (auf konstante 3 t/a). Ab dem Berichtsjahr 2005 wurden die Entsorgungsmengen von den Verbänden aus dem Anlagenrückbau erstmals präzise ermittelt. Dies gilt auch für die Emissionen aus der Entsorgung, die vor 2005 mit 0,06 t abgeschätzt wurden.

Aktivitätsdaten

Im Rahmen der Selbstverpflichtung wird der Jahresverbrauch der Hersteller aller Betriebsmittel sowie der Bestand von Mittelspannungsschaltanlagen vom ZVEI, der Bestand von Hochspannungsschaltanlagen, Freiluftwandlern, gasisolierten Leitungen und Transformatoren vom Forum Netztechnik/Netzbetrieb (FNN) im Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (VDE) und seit 2004 vom Verband der industriellen Energie- und Kraftwirtschaft e.V. (VIK) dem Umweltbundesamt übermittelt. Die Außerbetriebnahmemengen ermitteln die Teilnehmer der Selbstverpflichtung gemeinsam.

In Tabelle 198 sind die Inventardaten für das aktuelle Jahr in Unterkategorien aufgeführt. Die Summe der elektrischen Betriebsmittel der Energieübertragung und -verteilung deckt sich mit den Daten in Tabelle 2 (II)F, Blatt 2, Kategorie 2.G.1 im CRF.

Tabelle 199: Inventardaten 2024 der Kategorie 2.G.1 mit Unterkategorien

Kategorie 2.G.1.: Elektrische Betriebsmittel der Energieübertragung und -verteilung	Aktivitätsdaten			Emissionen	
	Jahresverbrauch Herstellung	Bestand	Außer Betrieb genommen (Tonnen SF_6)	Herstellung	Betrieb
Elektrische Betriebsmittel der Energieübertragung und -verteilung 2.G.1 (Summe), darin:	632	3549	10,7	2,4	6,7
MS Schaltanlagen und -geräte *	216	1654	1,6	0,1	1,6

Kategorie 2.G.1.: Elektrische Betriebsmittel der Energieübertragung und -verteilung	Aktivitätsdaten			Emissionen	
	Jahresverbrauch Herstellung	Bestand	Außer Betrieb genommen (Tonnen SF_6)	Herstellung	Betrieb
HS Schaltanlagen und -geräte**	290	1416	9,0	0,8	3,7
Sonstige elektrische Betriebsmittel ***	126	480	0	1,8	1,3

IE=in HS Schaltanlagen enthalten; marginal

Erläuterungen

* hermetisch abgeschlossene Drucksysteme nach IEC 62271-1 über 1kV bis einschließlich 52 kV; auch „Sealed for life“ genannt

** Geschlossene Drucksysteme nach IEC 62271-1 über 52 kV

*** Gasisolierte Transformatoren: marginaler Restbestand im Netz; (keine Herstellungsemissionen) + Hochspannungs-Freiluftmesswandler (alle Emissionskategorien) + Gasisolierte Leitungen-GIL- (alle Emissionskategorien) + Hochspannungsdurchführungen (nur Herstellungsemissionen) + Mittelspannungs-Gießharzmesswandler (nur Herstellungsemissionen) + Prüfung von Mittelspannungskomponenten (nur Herstelleremissionen) + Kondensatoren 1000V (nur Herstellungsemissionen)

4.8.1.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (2.G.1)

Da es nur eine überschaubare Zahl an Herstellern der Betriebsmittel (einschließlich Durchführungen und Wandler) gibt, sind die Verbrauchsdaten, die Angaben zu Neulieferungen und Außerbetriebnahmen sehr sicher, zumal eine interne Buchführung dahintersteht und die Füllmengen mit hoher Präzision ermittelt und auf den Typenschildern dokumentiert werden. Die Ungenauigkeit liegt hier im Bereich von ± 5 %.

Bei den Emissionen ist die Erfassung schwieriger, da in den Betrieben mehrere Emissionsquellen vorhanden sind, die für sich genommen mitunter recht klein sind. Gasverluste entstehen beim Befüllen von Geräten, beim Testen, beim Öffnen von Ausschuss, in der Entwicklungsabteilung usw. Allerdings gehen mittlerweile alle inländischen Werke nach einem einheitlichen Fragebogen vor, der sämtliche möglichen Emissionsquellen nennt und der im Rahmen der Erhebung auf seine Richtigkeit geprüft wird. Aus diesem Grund und der geringen Anzahl an Herstellern hängt die Exaktheit der Erhebung letztlich von der Messgenauigkeit ab. Diese bewegt sich im Bereich von ± 10 % der Abschätzungen.

Die Emissionen aus dem Betrieb in der Hochspannung werden von ausgewählten Betreibern mit Referenzanlagen über die jährlichen Nachfüllungen ermittelt (Nachfüllungen erfolgen bei Unterschreitung von 90 % des Soll-Füllstandes, was in der Regel vom Gerät selbst angezeigt wird). Diese Methode ist als sehr sicher zu bewerten, d.h. die Abweichungen vom wahren Wert betragen etwa ± 5 %. Alle bisherigen Erhebungen führten zu nahe beieinander liegenden Größenordnungen für die Emissionsraten, die zwischen 0,55 und 0,88 % betrugen. Die einmalige Spitze bei der Emissionsrate von Hochspannungs- Schaltanlagen in 2004 erklärt sich aus Sonderereignissen; im Wesentlichen dem zeitgleichen Nachfüllen von alten, weniger dichten Anlagen älterer Bauart.

Beim HS-Bestand und damit auch bei den Emissionen, die sich beide seit 1995 grundsätzlich erhöhen, gibt es im Jahr 2000 einen Rückgang gegenüber dem Vorjahr um über 25 t beim Bestand (und 0,85 t bei den Emissionen). Dieser Rückgang, der auf HS-GIS (600 zu 567 t) zurückgeht, ist nicht durch Abgänge durch Außerbetriebnahme zu erklären, da diese noch keine nennenswerte Rolle spielen. Dem Verband der Netzbetreiber (VDN) zufolge, der die Erhebungen damals durchführte, steckt dahinter sowohl ein statistisches als auch organisatorisches Problem. Ende der 1990er Jahre fanden im Zuge der Liberalisierung des Strommarktes bei den Betreibern tiefgehende Umgruppierungen (durch Fusionen und Eigentumswechsel von Unternehmensteilen) statt, so dass die personellen Zuständigkeiten für den

Betriebsmittelbestand immer wieder wechselten. So sind Doppelzählungen im Jahr 1999 nicht auszuschließen, ebenso wie nicht erfasste Betriebsmittel im Jahr 2000. Aufgrund der Erfahrungen der letzten Jahre kann aber heute von einer Ungenauigkeit in der Größenordnung von ± 5 % HS-Bestand ausgegangen werden.

4.8.1.4 Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.G.1)

Rückrechnungen waren nicht erforderlich.

4.8.1.5 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (2.G.1)

Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Die Daten für das aktuelle Berichtsjahr wurden, wie in den Vorjahren, von den Hersteller- und Betreiberverbänden sowie dem SF_6 –Produzenten im Rahmen der Selbstverpflichtung an das UBA gemeldet.

Die Qualitätssicherung erfolgt im Wesentlichen durch die Verbände. Darüber hinaus werden die Daten durch die Fachbegleiter des UBA bei Abnahme geprüft.

Der gesamte Sektor der F-Gas Emissionen wurde im Jahr 2011 einer freiwilligen trilateralen Überprüfung unterzogen. Experten aus England, Deutschland und Österreich überprüften die F-Gas Inventare der anderen Länder. Das Ziel der Überprüfung war der Informationsaustausch über die länderspezifischen Methoden der Erstellung der F-Gas Inventare, ein Einblick in die institutionellen und rechtlichen Regelungen für die F-Gas Inventare in jedem Land, die Identifizierung der Hindernisse zur Erstellung von vollständigen und exakten Inventaren und die Diskussion der Unterschiede und Ähnlichkeiten in den Methoden, die zur Erstellung der F-Gas Inventare verwendet werden. Das Treffen hat allen drei Ländern geholfen, die verwendeten Methoden zur Emissionsberechnung zu überprüfen. Weiterhin konnten die Transparenz, die Vollständigkeit und die Genauigkeit der Inventare bewertet werden. Das positive Ergebnis war, dass Deutschland ein gutes F-Gase-Inventar hat. Im Ergebnis wurden keine Empfehlungen für Verbesserungen des deutschen F-Gase-Inventars ausgesprochen.

Für eine Überprüfung der für die Emissionsberichterstattung ermittelten F-Gas Mengen als Grundlage zur Verifikation stehen außer den von den Verbänden gemeldeten Daten keine weiteren Datenquellen zur Verfügung. Vergleiche mit anderen Ländern zeigen keinen Verbesserungsbedarf. Die Emissionsfaktoren liegen in derselben Größenordnung der in anderen Ländern verwendeten Werte.

4.8.1.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (2.G.1)

Derzeit sind keine Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

4.8.2 SF_6 und FKW aus sonstiger Produktverwendung (2.G.2)

Diese Kategorie umfasst die Anwendungen Militär-AWACs (2.G.2.a), Teilchenbeschleuniger (2.G.2.b), Isolierglasfenster (2.G.2.c), Adiabatisches Verhalten: Autoreifen und Sportschuhe (2.G.2.d), Sonstige: Spurengas, Schweißen, Optische Glasfasern, sowie medizinische und kosmetische Anwendungen (2.G.2.e).

4.8.2.1 Militär - AWACS Wartung (2.G.2.a)

4.8.2.1.1 Beschreibung der Kategorie (2.G.2a)

SF_6 wird in den großen militärischen Aufklärungsflugzeugen vom Typ Boing E-3A (ehemals AWACS) als Isolationsmedium für das Radar eingesetzt. Es soll elektrische Überschläge in den Hohlleitern zur Antenne verhindern, in denen hohe Spannungen von über 135 kV herrschen. Die laufenden Emissionen sind relativ hoch, da bei Aufstieg des Flugzeugs SF_6 zum Druckausgleich abgelassen wird.

4.8.2.1.2 Methodische Aspekte (2.G.2.a)

Die Emissionsangaben für die Berichtsjahre bis 2001 basieren auf Schätzungen, die als Grundlage eine Erhebung im Jahr 1996 haben. Daher sind die Emissionsdaten der Jahre 1997 bis 2001 ungenauer als in den Folgejahren. Für das Berichtsjahr 2002 wurden die Verbrauchsmengen neu erhoben, was zu einer signifikanten Erhöhung gegenüber dem Berichtsjahr 2001 führte. Ab dem Berichtsjahr 2006 werden die verwendeten Mengen vom Statistischen Bundesamt (UStatG, 2005) erhoben.

Für die SF_6-Emissionen der AWACS wird zunächst ein Emissionsfaktor von 100 % des Einkaufs angenommen. Nach Aussagen des BMVg wurden 2006 Servicegeräte für SF_6 angeschafft, so dass der Emissionsfaktor ab diesem Jahr reduziert werden konnte. Es wurde vereinbart, dass diese Reduktion alle 5 Jahre überprüft wird.

Die Emissionen sanken bis 2016. Seitdem unterliegen sie leichten Schwankungen, sind aber relativ konstant. Daten zur AWACS-Wartung werden unter CRF 2.H.3 berichtet, da diese Daten der Vertraulichkeit unterliegen.

4.8.2.2 Teilchenbeschleuniger (2.G.2.b)

4.8.2.2.1 Beschreibung der Kategorie (2.G.2.b)

Das Isolatorgas SF_6 wird zum Personenschutz und zum Schutz von Geräteteilen (Schutz vor Durchbrennen von Widerständen im Gerät) eingesetzt. Seine Funktion besteht darin, Hochspannungsteile durch die Umhüllung mit Gas zu isolieren (Schutz vor Spannungs-Überschlägen zwischen den Hochspannungsteilen und der Gerätewand).

Diese Schutzfunktion kann u.U. auch durch andere Gase (z.B. Stickstoff, Stickstoff/CO_2-Mischung), durch räumlichen Abstand (Luftisolation) oder z.B. durch Umgebung mit Betonwänden realisiert werden. Ob bei den Geräten SF_6 als Isolatorgas eingesetzt wird (allein oder als Beimischung) hängt von technischen Gegebenheiten, Konstruktion und Spannungshöhe ab. Daher benötigen die Anlagen, sofern sie nicht standardisiert sind, unterschiedliche Mengen an SF_6. Die SF_6-Füllmenge ist deshalb auch nicht von der Anlagengröße (etwa gemessen in MV) abhängig, sondern variiert je nach Geräteaufbau.

SF_6-isolierteTeilchenbeschleuniger werden in unterschiedlicher Größe, Bauart und Funktion genutzt. Hochspannungsgeräte (0,3 bis über 23 MV) werden an Hochschulinstituten, Forschungsgemeinschaften und in der Industrie eingesetzt. Bei diesen Hochspannungsgeräten befinden sich Beschleuniger und Hochspannungsquelle (Van-de-Graaff-Generatoren oder kompaktere Hochspannungsgeneratoren mit Dioden in Kaskadentechnik) in einem mit SF_6 oder SF_6-Beimischung isolierten Tank, der ggfs. unter Druck steht. Zur Einstellung der Geräte und zu Reparaturzwecken muss der Tank geöffnet werden, wobei das Isolatorgas in Reservetanks umgepumpt wird. Hierbei sowie beim Anspringen von Überdruckventilen bei Beschleuniger- und Reservetanks treten SF_6-Verluste auf. Die Forschungs-Beschleuniger, die unter variierenden Bedingungen gefahren werden, müssen häufiger geöffnet werden als die industriell genutzten Elektronenbeschleuniger.

In der Industrie kommen außerdem Niedrig-Energie-Geräte mit weniger als 0,3 MV zum Einsatz. Bei den Niederenergieanlagen ist die Eindringtiefe der Elektronen in das zu bearbeitende Material wesentlich geringer als bei den Hochenergieanlagen. "Elektronenstrahlwerkzeuge“ werden im industriellen Bereich beispielsweise zur Polymervernetzung, vornehmlich von Kabel- und Drahtisolationen eingesetzt. Die Niederenergieanlagen mit geringerer Beschleunigungs-spannung benötigen eine geringere Abschirmung (SF_6-Menge) als die Hochenergieanlagen.

Eine weitere Kategorie stellen Strahlentherapiegeräte in medizinischen Einrichtungen dar. Bei Krebsbehandlung durch Bestrahlung mit Elektronen bzw. Photonen werden industriell voreingestellte Teilchenbeschleuniger eingesetzt, bei denen der sog. Hohlleiter, in dem die Teilchen beschleunigt werden, zur Verhinderung von Spannungsüberschlägen mit SF_6 als Isolationsgas gefüllt ist. Vor 1996 wurden in diesen Geräten FCKW eingesetzt.

SF_6 dient ferner als Isolatorgas bei großen Elektronenmikroskopen (>100 kV Beschleuniger-spannung) und Elektronenstrahlschreibern, die als „sonstige Geräte“ zusammengefasst werden und erstmals für 2010 erfasst wurden.

Insgesamt gilt: Der SF_6-Verbrauch bei Erst- bzw. Neubefüllung der Geräte und beim Emissionsersatz ist von der Größe der Geräte, den Druckverhältnissen sowie den Betriebs-bedingungen abhängig.

4.8.2.2.2 Methodische Aspekte (2.G.2.b)

Anfang 2004 führte Öko-Recherche für das Umweltbundesamt eine Totalerhebung zu inländischen Teilchenbeschleunigern durch, um die teilweise bis auf 1996 zurückreichenden Daten zu aktualisieren. Dabei wurden sowohl Anwender als auch Hersteller befragt. Inhalt der Fragen waren sowohl die SF_6-Mengen in ihren Geräten als auch die SF_6-Nachfüllungen während der letzten sieben Jahre.

Das ZSE übernimmt die Gliederung dieser Erhebung und enthält für alle fünf Kategorien den jährlichen SF_6-Bestand und den jährlichen Ersatz für Emissionen. Letztere schließen außer den laufenden auch die Befüll- und Entsorgungsverluste ein.

Für das Berichtsjahr 2011 wurde nochmals eine Totalerhebung durchgeführt. Erstmals wurden Daten für Elektronenmikroskope gesammelt (Schwarz et al., 2012). Es war nur eine sehr geringe Gerätezu- und abnahme je nach Anwendung zu beobachten. Es werden daher konstante Verwendungsmengen angenommen. Eine Ausnahme bildet die Strahlentherapie. Hier sind leicht ansteigende Verwendungsmengen zu beobachten.

In den Jahren 2023/2024 erfolgte nochmals eine Überprüfung des Anlagenbestandes. Dabei wurde festgestellt, dass einige größere Teilchenbeschleuniger (z.B. 2012 an der Universität Heidelberg und 2020 an der Universität München) außer Betrieb genommen wurden. Die sich daraus ergebenden Änderungen der Bestands- und Emissionswerte sind im Abschnitt Rekalkulationen tabellarisch dargestellt.

Tabelle 200: SF_6-Bestand in Teilchenbeschleunigern in 5 Anwendungssektoren ab 1995, in t

Nutzer-Kategorie	1995	2005	2015	2024
(1) Universitäts- Institute	30,70	26,897	26,89	8,210
(2) Forschungs-Einrichtungen	19,55	19,30	6,30	6,28
(3) Industrie (Hochspannung)	11,61	19,04	16,54	16,54
(4) Industrie (Niederspannung)	1,6	1,55	1,42	1,58
(5) Strahlentherapie Einrichtungen	0,16	0,18	0,21	0,24

Nutzer-Kategorie	1995	2005	2015	2024
Gesamt (1-5)	63,63	66,95	51,38	32,87

Das SF_6 wird bei Öffnung der Tanks der großvolumigen Hochspannungsgeräte umgepumpt und danach rückgeführt. Dies kann mit beträchtlichen Gasverlusten verbunden sein. Auch andere Teilchenbeschleuniger (insbesondere die Strahlentherapiegeräte) werden jährlich mehrfach gewartet, wobei das Gas vollständig abgelassen wird. In den letzten Jahren sind an einer Reihe von Geräten Nachrüstungen vorgenommen worden, die ein Öffnen der SF6- Tanks nicht mehr erfordern bzw. wurden verstärkt Absauggeräte benutzt, um die Emissionen zu reduzieren.

Die gemeldeten Nachfüllungen schließen den Ausgleich von Emissionen durch Havariefälle ein.

Tabelle 201: SF_6-Emissionen aus Teilchenbeschleunigern nach fünf Anwendungsbereichen ab 1995, in t

Nutzer-Kategorie	1995	2005	2015	2024
(1) Universitäts-Institute	1,859	1,514	1,309	0,304
(2) Forschungs-Einrichtungen	1,259	1,196	0,796	0,617
(3) Industrie (Hochspannung)	0,958	1,593	1,543	0,538
(4) Industrie (Niederspannung)	0,020	0,020	0,017	0,018
(5) Strahlentherapie Einrichtungen	0,245	0,422	0,494	0,516
Gesamt	4,441	4,746	4,16	1,995

4.8.2.3 Isolierglasfenster (2.G.2.c)

4.8.2.3.1 Beschreibung der Kategorie (2.G.2.c)

SF_6 wird seit 1975 zur Erhöhung der Schalldämmung bei Mehrscheiben-Isolierglas in den Scheibenzwischenraum gefüllt. Nachteilig bei der Anwendung sind die schlechtere Wärmedämmleistung und das hohe Treibhauspotenzial von SF_6 Die Verschiebung der Priorität in Richtung Wärmeschutz, z. B. durch die Wärmeschutzverordnung und ein Bedeutungszuwachs SF_6-freier Scheibentechnologien hat dazu geführt, dass der Einsatz von SF_6 in dieser Anwendung seit Mitte der 1990er Jahre zurückgeht.

Schallschutzscheiben wurden in Deutschland in zahlreichen Betrieben hergestellt und mit Gas befüllt. Der Export fertiger Scheiben spielt keine nennenswerte Rolle.

Seit dem 4. Juli 2007 gilt in der EU ein Verbot für das Inverkehrbringen von Fenstern für Wohnhäuser, die mit fluorierten Treibhausgasen befüllt wurden. Ab dem 4. Juli 2008 gilt dieses Verbot auch für sonstige Fenster. Heutige und künftige Emissionen dieser Kategorie stammen daher vorwiegend aus der offenen Entsorgung alter Fensterscheiben, die im Mittel 20 Jahre (10% der Fenster) und 25 Jahre (90% der Fenster) nach der Befüllung angenommen wird. Aus diesem Grund stiegen die Gesamtemissionen bis zum Jahr 2019.

4.8.2.3.2 Methodische Aspekte (2.G.2.c)

Emissionen treten bei der Befüllung der Scheibenzwischenräume durch Überfüllung, (Herstellungsemissionen), während des Gebrauchs (Anwendungsemissionen) und bei der Entsorgung (Entsorgungsemissionen) auf. Die Emissionen werden analog den Gleichungen 3.24 – 3.26 der IPCC-GPG (Penman et al., 2000) mittels des Inlandsneuverbrauchs, des mittleren Jahresbestands und des Restbestands vor 25 Jahren berechnet.

Die Zeitreihen für Schallschutzfenster beginnen im Jahr 1975, da für die Bestandsemissionen des Jahres 1995 die Befüllungsmengen des Jahres 1975 von Bedeutung sind. Diese mit Branchenexperten 1996 rekonstruierten Daten wurden erstmals im Jahr 2004 veröffentlicht.

Aufgrund eines Fehlers im Berechnungsverfahren musste in diesem Jahr eine Rekalkulation der gesamten Zeitreihe ab 1995 vorgenommen werden.

Emissionsfaktoren

Vom SF_6-Verbrauch entweicht laut Expertenangaben von Scheiben- und Gasfüllgeräteherstellern, Branchenexperten und eines wissenschaftlichen Instituts bei der Befüllung des Scheibenzwischenraums ein Drittel. $EF_{Herstellung}$ ist daher 33 % bezogen auf den Jahres-Neuverbrauch.

Dieser Emissionsfaktor kommt folgendermaßen zustande: Sowohl bei Handgeräten als auch bei automatischen Gasfüllpressen sind Verwirbelungen im Innenraum unvermeidlich, so dass nicht nur Restluft, sondern auch ein Luft-SF_6-Gemisch austritt, und zwar umso mehr davon, je weiter fortgeschritten der Befüllungsvorgang ist. Der Gasverlust, die sog. Überfüllung, reicht von 20 bis 60 % der Einfüllmenge. Relativ ist er umso größer, je kleiner die Scheibe ist. Im Durchschnitt, d.h. über das gesamte Spektrum der befüllten Scheibenformate, beträgt die Überfüllung 50 % auf die tatsächlich im Scheibenzwischenraum verbleibende Menge. Das entspricht einem Drittel (33 %) der jeweiligen Verbrauchsmenge. Der Emissionsfaktor wird unverändert weiter genutzt, da sich die Befüllungstechnik oder auch das geometrische Spektrum der Scheiben nicht verändert hat.

Eine DIN-Norm (DIN EN 1279-3, DIN 2003) schreibt 10 Promille jährlichen Verlust der Gasfüllung durch die Randabdichtung der Scheibe als Obergrenze vor. Dieser Wert bezieht auch Gasverlust infolge von Glasbruch bei Transport, Einbau und Nutzung sowie der mit dem Alter zunehmenden Undichtheit des Randverbunds mit ein. Daraus resultiert ein Emissionsfaktor $EF_{Anwendung}$ von 1 % bezogen auf den seit 1975 akkumulierten SF_6-Bestand, der im Durchschnitt des Jahres n besteht.

Entsorgungsverluste fallen am Ende der Nutzungsphase der Scheiben an, durchschnittlich 25 Jahre nach der Befüllung. Darum sind erst ab dem Jahr 2000 Abgänge durch Entsorgung bei den Emissionen zu berücksichtigen.

Da die Scheiben in jedem Jahr 1 % Gas vom Vorjahreswert verlieren, wird bei der Entsorgung nur ein Teil der ursprünglichen Füllung emittiert. Da aber keine Rückgewinnung stattfindet, erfolgt eine 100 %ige Emission ($EF_{Entsorgung}$ = 1).

Aktivitätsdaten

Der Jahres-Neuverbrauch wurde mittels top-down-Erhebung gewonnen (Inlandsabsatz des Gasehandels).

Seit dem Berichtsjahr 2006 wird der Neuverbrauch vom Statistischen Bundesamt durch Abfrage der SF_6-Verkaufszahlen des Gasehandels (UStatG, 2005) ermittelt.

4.8.2.4 Adiabatisch - Autoreifen (2.G.2.d)

4.8.2.4.1 Beschreibung der Kategorie (2.G.2.d)

Autoreifen wurden aus Imagegründen (die verbesserte Druckkonstanz ist nicht praxisrelevant) ab 1984 mit SF_6 befüllt. Der größte Verbrauch lag im Jahr 1995. Hier bestand bei über 500 der rund 3.500 Verkaufsstellen des deutschen Reifenfachhandels die Möglichkeit, die Reifen mit SF_6-Gas zu befüllen. Wegen des großen Treibhauspotenzials von SF_6 stiegen viele Reifenhändler auf Stickstoff als Befüllungsalternative um, was zu einem deutlichen Rückgang geführt hat. Seit dem 4.

Juli 2007 gilt in der EU ein Verbot für das Inverkehrbringen von neuen Autoreifen, die mit fluorierten Treibhausgasen befüllt wurden. Es finden keine Emissionen mehr statt.

4.8.2.4.2 Methodische Aspekte (2.G.2.d)

Gasemissionen während der Reifenlaufzeit werden zur Vereinfachung nicht berücksichtigt, so dass nur Emissionen bei der Reifendemontage auftreten. Bei einer kalkulierten Laufzeit von ca. 3 Jahren folgen die Emissionen dem inländischen Verbrauch zur Befüllung, da es keinen Außenhandel mit befüllten Reifen gibt, dreijährig Zeit versetzt (Schwarz & Leisewitz, 1996). Zur Berechnung der Emissionen wird die Gleichung 8.19 der 2006 IPCC-Guidelines (Vol. 3) angewendet.

Emissionsfaktoren

Die sehr geringen Verluste bei der Reifenbefüllung werden nicht berücksichtigt. Da SF_6 bei der Reifendemontage vollständig entweicht, gilt $EF_{Entsorgung} = 1$.

Aktivitätsdaten

Die jährlichen Verbrauchsmengen wurden durch Abfragen der Inlandsabsätze der Gaslieferanten an Reifenhändler und Kfz-Werkstätten durch das Statistische Bundesamt (UStatG, 2005) ermittelt.

4.8.2.5 Adiabatisches Verhalten - Sportschuhe (2.G.2.d)

4.8.2.5.1 Beschreibung der Kategorie (2.G.2.d)

Der Einsatz von SF_6 erfolgte in den Sohlen von Sportschuhen zur Verbesserung der Dämpfung; das letzte Mal europaweit im Jahr 2003. Ab 2004 wurde FKW-218 (C_3F_8) eingesetzt, letztmals im Jahr 2006. Heute wird größtenteils Stickstoff verwendet. Das Inverkehrbringen von mit fluorierten Treibhausgasen hergestellter Fußbekleidung in die EU ist seit dem 4. Juli 2006 verboten. Es finden keine Emissionen mehr statt.

4.8.2.5.2 Methodische Aspekte (2.G.2.d)

Die Berechnung der Emissionen erfolgte über Gleichung 8.9 der IPCC-Guidelines (IPCC, 2006a) . Fertigungsemissionen fielen nur im Ausland an, laufende Emissionen wurden nicht ermittelt. Wegen der Vertraulichkeitszusage werden die Daten zu Sportschuhsohlen unter CRF 2.H.3 berichtet.

Emissionsfaktoren

Emissionen bei der Produktion wurden von den Herstellern nicht berichtet.

Während der Anwendung wird keine Emission angenommen.

Bei der Entsorgung können die Emissionen den eingesetzten Mengen gleichgesetzt werden ($EF_{Entsorgung} = 1$), wobei analog zur IPCC-Methode bei Autoreifen eine Zeitverzögerung von drei Jahren angenommen wird (IPCC (2006a): Vol. 3, Gleichung 8.19).

Aktivitätsdaten

Die Füllmengen beruhen auf europaweiten Verkaufszahlen der Hersteller. Diese Angaben werden auf Deutschland über die Bevölkerungszahl als Kriterium herunter gerechnet. Die Daten liegen dem Umweltbundesamt seit dem Berichtsjahr 2001 vor, werden aber aus Gründen der Vertraulichkeit nur in aggregierter Form unter CRF 2.H.3 berichtet.

4.8.2.6 Sonstige: Spurengas (2.G.2.e)

4.8.2.6.1 Beschreibung der Kategorie (2.G.2.e)

Als stabiles und auch in extrem geringer Konzentration gut nachweisbares Spurengas wird SF_6 von Forschungseinrichtungen für die Untersuchung bodennaher und atmosphärischer Luftströmungen und Gasausbreitungen sowie von Wasserströmungen eingesetzt. Außerdem dient es zur Prüfung von Laborabzügen.

Ab dem Berichtsjahr 2007 wurde SF_6 als Spurengas gegenüber den Vorjahren deutlich weniger eingesetzt.

4.8.2.6.2 Methodische Aspekte (2.G.2.e)

Die verwendeten Mengen wurden von Experten geschätzt.

Emissionsfaktoren

Es wird von einer offenen Anwendung ausgegangen, d.h. der jährliche Neueinsatz emittiert vollständig im selben Jahr und wird als Verbrauch zur Fertigung ($EF_{Herstellung} = 1$) betrachtet. Eine Rückgewinnung erfolgt nicht.

Aktivitätsdaten

Die Einschätzung des inländischen Gesamteinsatzes erfolgte 1996 durch die Experten aller Forschungseinrichtungen und dann jeweils im Abstand von 3 Jahren durch einen Experten. Die Einschätzungen zeigten nur geringe Variationen der Einsatzmengen. Die SF_6-Verwendungsmengen für die Jahre 2007 bis 2015 wurden 2017 nach oben korrigiert, da die Verwendung zur Prüfung von Laborabzügen in das deutsche Inventar aufgenommen wurde.

4.8.2.7 Sonstige: Schweißen (2.G.2.e)

4.8.2.7.1 Beschreibung der Kategorie (2.G.2.e)

Nach Angaben von Gaslieferanten begann die Verwendung von SF_6 beim Schweißen im Jahr 2001. SF_6 wird als Schutzgas beim Schweißen von Metall eingesetzt. Da es nur einen Anwender in Deutschland gibt, unterliegen die Daten der Vertraulichkeit.

4.8.2.7.2 Methodische Aspekte (2.G.2.e)

Es fallen nur Emissionen während der Anwendung an. Wegen der Datenvertraulichkeit werden Verbrauch und Emissionen beim Schweißen unter CRF 2.H.3 berichtet.

Emissionsfaktoren

Es stehen keine verlässlichen Daten über den Zerfall von SF_6 während der Anwendung zur Verfügung. Nach Expertenschätzung emittiert die eingesetzte SF_6–Menge bei der Anwendung vollständig in die Atmosphäre. Daher werden Verbrauch und Emissionen beim Schweißen gleichgesetzt. Für den Emissionsfaktor beim Schweißen gilt $EF_{Anwendung} = 1$.

Aktivitätsdaten

Die jährlichen Verbrauchsmengen werden durch Abfrage bei der Firma erfragt, die SF_6 zum Schweißen verwendet.

4.8.2.8 Sonstige: Optische Glasfasern (2.G.2.e)

4.8.2.8.1 Beschreibung der Kategorie (2.G.2.e)

Die Verwendung von SF_6 bei der Herstellung optischer Glasfasern begann im Jahr 2002. SF_6 wird bei der Herstellung spezieller optischer Glasfaserkabel zur Fluordotierung eingesetzt. Es gibt in Deutschland nur wenige Produktionsbetriebe.

4.8.2.8.2 Methodische Aspekte (2.G.2.e)

Wegen der Datenvertraulichkeit des Emissionsfaktors werden die Emissionen bei der Herstellung optischer Glasfasern vertraulich unter CRF 2.H.3 berichtet.

Emissionsfaktoren

Die 2006 IPCC Guidelines (IPCC (2006a): Vol. 3) enthalten keine Informationen über die Verwendung von SF_6 bei der Produktion optischer Glasfasern. Experten schätzten den Emissionsfaktor bisher auf 70 % ($EF_{Herstellung}$ = 0,7). Messungen ergaben aber einen deutlich geringeren Emissionsfaktor. Dieser wurde daher deutlich herabgesetzt, unterliegt aber der Vertraulichkeit. Die Zeitreihe der Emissionen wurde 2018 rückwirkend für alle Jahrgänge rekalkuliert.

Aktivitätsdaten

Die jährlichen Verbrauchsmengen werden durch Abfragen der Inlandsabsätze der Gaslieferanten durch das Statistische Bundesamt (UStatG, 2005) erhoben. Sie steigen seit 2001 mit leichten Schwankungen stetig an.

4.8.2.9 Sonstige: Medizinische und kosmetische Anwendungen (2.G.2.e)

4.8.2.9.1 Beschreibung der Kategorie (2.G.2.e)

In Deutschland werden fluorierte Treibhausgase nicht nur in medizinischen Dosieraerosolen (Kategorie 2.F.4) eingesetzt, sondern auch in verschiedenen medizinischen bzw. kosmetischen Anwendungen.

Perfluordecalin ($C_{10}F_{18}$, FKW-9-1-18) wird seit dem Jahr 2000 als Reinstoff in der Augenheilkunde und in der Forschung verwendet. In der Augenheilkunde wird Perfluordecalin in der Netzhautchirurgie innerhalb des Auges angewendet, insbesondere bei Netzhautablösungen, Netzhautrissen, Glaskörperproliferationen etc. In deutlich geringeren Mengen kommt Perfluordecalin in der Forschung zur Organkonservierung während Transplantationen, als Kontrastmittel in diagnostischen Abbildungstechniken (Magnetresonanztomographie, Ultraschall) und als Sauerstoffträger bei der Zellkultivierung zum Einsatz.

Perfluordecalin wird seit dem Jahr 2012 auch als Inhaltsstoff in Kosmetikprodukten (Hautpflege, Nagelpflege), in denen es als Träger- bzw. Speichermedium für Sauerstoff genutzt wird, verwendet. Die Einsatzkonzentration von Perfluordecalin in diesen Produkten beträgt laut Herstellerangaben 0,1 %.

Hydrofluorether (HFE) sind in Deutschland die Standard-Narkosegase für inhalative Anästhesien in der Humanmedizin und werden bei etwa 9 Millionen Operationen jährlich eingesetzt. Der hydrofluorchlorierte Ether Isofluran (HCFE-235da2, CHF_2-O-CHCl-CF_3) kommt bereits seit dem Jahr 1985 zum Einsatz. Desfluran (HFE-236ea2, CHF_2-O-CHF-CF_3) und Sevofluran (HFE-347mmz1, CH_2F-O-$CH(CF_3)_2$ sind seit 1996 in Gebrauch und haben gegenwärtig einen Marktanteil von zusammen etwa 90 %. Die Hydrofluorether werden bei der Anwendung mit speziellen Vorrichtungen verdampft und in Konzentrationen von 1 % bis 6 % in

einem Trägergas, das aus Sauerstoff und Lachgas (N_2O) besteht, verabreicht. Pro Operation werden durchschnittlich 8,2 g Isofluran, 32,6 g Desfluran bzw. 11,4 g Sevofluran eingesetzt. Die Verwendungsmengen der bei den Operationen verwendeten Hydrofluorether sind unterschiedlich, da die Konzentrationen der Narkosegase in der zugeführten Atemluft bzw. dem Trägergas stark differieren, um ihre Wirksamkeit zu gewährleisten.

Medizinische und kosmetische Anwendungen von FKW werden entsprechend des Vorschlags der 2006 IPCC Guidelines in der Kategorie 2.G.2 eingeordnet.

4.8.2.9.2 Methodische Aspekte (2.G.2.e)

Perfluordecalin emittiert vollständig bei der Anwendung als Reinstoff in der Augenheilkunde und in der Forschung. Das in Kosmetikprodukten enthaltene Perfluordecalin emittiert ebenfalls vollständig während der Anwendung ($EF_{Anwendung} = 1$).

Die als Inhalationsnarkotika verwendeten Hydrofluorether werden während der Operationen gesammelt und zentral in die Atmosphäre abgeleitet. Die verschiedenen Hydrofluorether werden bei den Operationen jedoch nicht unverändert wieder ausgeatmet, sondern teilweise und in unterschiedlichem Maße im Organismus metabolisiert. Die gasspezifischen Emissionsfaktoren haben jeweils Werte von 100 % abzüglich der Metabolisierungsrate.

Herstellungsemissionen bei medizinischen bzw. kosmetischen Anwendungen treten nicht auf, da keine Produkte in Deutschland produziert werden.

Anwendungsemissionen werden über die als Bulkware und in Kosmetikprodukten verkauften Mengen an Perfluordecalin mit Gleichung 9 berechnet. Dabei wird entgegen der in den 2006 IPCC Guidelines vorgeschlagenen Methode zur Berechnung der „prompten Emissionen“ (Gleichung 8.23) davon ausgegangen, dass die in einem Jahr verkauften Mengen vollständig im gleichen Jahr emittieren und nicht die Summe der halben Käufe (Verkäufe) des vorherigen Jahres und des aktuellen Jahres. Diese Vorgehensweise ist vertretbar, da die Zeitspanne zwischen Verkauf und Anwendung sehr kurz ist.

Anwendungsemissionen von den als Narkosegasen eingesetzten Hydrofluorethern errechnen sich mit Gleichung 9 über die in Deutschland verwendeten Mengen. Die 2006 IPCC Guidelines machen keine Vorgaben zur Berechnung der Emissionen.

Da Perfluordecalin und die Hydrofluorether bereits vollständig bei ihrer Anwendung emittieren, müssen keine Entsorgungsemissionen berichtet werden.

Wegen der Datenvertraulichkeit werden Verbrauch und Emissionen von Perfluordecalin unter CRF 2.H.3 berichtet.

Die Emissionen der nicht berichtspflichtigen Hydrofluorether werden gemäß den Empfehlungen der UNFCCC Reporting Guidelines 2014 ((UNFCCC, 2014), FCCC/CP/2013/10/Add.3, Decision 24/CP.19) freiwillig als „additional greenhouse gases“ berichtet. Die Emissionen sind aggregiert mit anderen nicht berichtspflichtigen Emissionen in Kapitel 4.9.3 aufgeführt. In den CTF-Tabellen sind keine Daten zu freiwillig berichteten Emissionen enthalten.

Emissionsfaktoren

Die verwendeten Emissionsfaktoren sind das Ergebnis von Expertenaussagen und sind in Tabelle 198 wiedergegeben.

Der $EF_{Anwendung}$ beträgt für alle medizinischen und kosmetischen Anwendungen von Perfluordecalin 100 %.

Bei den als Inhalationsnarkotika verwendeten Hydrofluorethern beträgt der $EF_{Anwendung}$ für Isofluran und Desfluran 99,8 %, für Sevofluran 95 %.

In Übereinstimmung mit den IPCC Vorgaben ((IPCC, 2006a), Seite 8.32) wird von einer 100 %igen Emission bei der Anwendung von Perfluordecalin ausgegangen ($EF_{Anwendung}$ = 100 %). In Deutschland wird abweichend von den Guidelines nur eine einjährige Lebensdauer zugrunde gelegt.

Für die Verwendung von Hydrofluorethern als Inhalationsnarkotika gibt es keine Vorgaben in den 2006 IPCC Guidelines.

Aktivitätsdaten

Die jährlichen Importe von $C_{10}F_{18}$ nach Deutschland für die Anwendung in der Augenheilkunde und der Forschung wurden vom Hersteller F2 Chemicals, UK, vertraulich zur Verfügung gestellt.

Die nach Deutschland importierten Mengen $C_{10}F_{18}$-haltiger Kosmetikprodukte wurden vom Handelsunternehmen P2 cosmetics, das diese Produkte in Deutschland vertreibt, vertraulich zur Verfügung gestellt.

Die Verwendungsmengen der als Inhalationsnarkotika eingesetzten Hydrofluorether wurden durch Befragungen von Branchenexperten (Kliniken, Hersteller von Narkosehilfsgeräten) und Literaturangaben im Rahmen eines Forschungsvorhabens ermittelt (Gschrey et al., 2015). In den Folgejahren erfolgt die Mengenabschätzung anhand der jährlich in Deutschland durchgeführten Operationen.

4.8.2.10 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (2.G.2 alle)

Eine systematische Quantifizierung der Unsicherheiten für die Kategorie ist erfolgt.

Bei Isolierglasfenstern erfolgte seit 2006 ein Datenabgleich des Jahres-Neuverbrauchs der top-down-Erhebung auf Basis von kommerziellen Verkaufsdaten mit den vom Statistischen Bundesamt jährlich durchgeführten Erhebungen (UStatG, 2005). Dadurch konnte die Datensicherheit erhöht werden und ist als verlässlich und vollständig zu bewerten. Der $EF_{Herstellung}$ kann angesichts der Vielfalt der Einflussfaktoren nicht verbindlich gemessen werden. Die Schätzung der 1996 und 1999 befragten zehn Branchenexperten (aus Kreisen der Scheibenhersteller, Füllgerätelieferanten und eines wissenschaftlichen Instituts) lässt den Schluss zu, dass sich der mittlere Befüllungsverlust zwischen 30 und 40 % bewegt. 1 % laufende Gasverluste werden als realistisch angesehen.

Bei Sportschuhen ist trotz der guten Datenqualität für die EU die Verteilung der Füllmengen auf die Mitgliedstaaten mit erheblichen Unsicherheiten verbunden.

Bei medizinischen Anwendungen wird die Datenqualität der Verwendungsmenge von Perfluordecalin als gut bewertet, da die Zahlen direkt vom Hersteller (F2 Chemicals Ltd, UK) stammen, der als einziger Anbieter Perfluordecalin nach Deutschland exportiert. Die Unsicherheiten bei den kosmetischen Produkten sind höher, da der Kosmetikmarkt in Deutschland sehr dynamisch ist und nicht auf Statistiken zurückgegriffen werden kann.

4.8.2.11 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (2.G.2 alle)

Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Die Daten für das aktuelle Berichtsjahr wurden, wie bereits für die meisten Vorjahre, im Rahmen eines Forschungsvorhabens im Auftrag des Umweltbundesamtes durch einen externen Experten erhoben bzw. stammen aus der Datenerhebung des Statistischen Bundesamtes (UStatG, 2005).

Die Qualitätssicherung erfolgt im Wesentlichen durch den externen Experten bzw. das Statistische Bundesamt. Darüber hinaus werden die Daten durch die Fachbegleiter des UBA bei Abnahme geprüft.

Der gesamte Sektor der F-Gas Emissionen wurde im Jahr 2011 einer freiwilligen trilateralen Überprüfung unterzogen. Experten aus England, Deutschland und Österreich überprüften die F-Gas Inventare der anderen Länder. Das Ziel der Überprüfung war der Informationsaustausch über die länderspezifischen Methoden der Erstellung der F-Gas Inventare, ein Einblick in die institutionellen und rechtlichen Regelungen für die F-Gas Inventare in jedem Land, die Identifizierung der Hindernisse zur Erstellung von vollständigen und exakten Inventaren und die Diskussion der Unterschiede und Ähnlichkeiten in den Methoden, die zur Erstellung der F-Gas Inventare verwendet werden. Das Treffen hat allen drei Ländern geholfen, die verwendeten Methoden zur Emissionsberechnung zu überprüfen. Weiterhin konnten die Transparenz, die Vollständigkeit und die Genauigkeit der Inventare bewertet werden. Das positive Ergebnis war, dass Deutschland ein gutes F-Gase-Inventar hat. Im Ergebnis wurden keine Empfehlungen für Verbesserungen des deutschen F-Gase-Inventars ausgesprochen.

Für eine Überprüfung der für die Emissionsberichterstattung ermittelten F-Gas Mengen als Grundlage zur Verifikation stehen außer den vom Statistischen Bundesamt, den vom Forschungsnehmer erhobenen und den von Firmen gemeldeten Daten keine weiteren Datenquellen zur Verfügung. Vergleiche mit anderen Ländern zeigen keinen Verbesserungsbedarf. Die Emissionsfaktoren entsprechen den Default-Emissionsfaktoren der 2006 IPCC Guidelines oder liegen in derselben Größenordnung der in anderen Ländern verwendeten Werte.

Bei medizinischen und kosmetischen Anwendungen (Subkategorie 2.G.2.e) ist keine Verifizierung der Methodik oder Daten möglich, da außer Deutschland kein Land Emissionen in diesem Bereich berichtet.

4.8.2.12 Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.G.2 alle)

Die Werte des Inlandsverbrauchs der als Narkosegase eingesetzten Hydrofluorether werden auf Basis der national durchgeführten Operationen an Menschen ermittelt. Eine Rekalkulation ist jährlich erforderlich, da die entsprechende nationale Statistik erst nach Abschluss der Inventarermittlung vorliegt. Dies führt jeweils zu Änderungen der Emissionen der Anwendung für das Vorjahr. Die Anteile der bei Narkosen eingesetzten Narkosegase wurden aufgrund neuer Rechercheergebnisse für die Jahre 2013 bis 2023 aktualisiert. Dies führte zu Änderungen der Verwendungsmengen und Emissionen der Anwendung von Isofluran, Desfluran und Sevofluran in den gleichen Jahren. Da die Hydrofluorether zu den freiwillig berichteten Stoffen zählen, wird auf eine Quantifizierung verzichtet.

In 2.G.2.b Teilchenbeschleuniger hat eine Überprüfung des Anlagenbestandes und der Emissionen zu folgenden Rekalkulationen geführt:

Tabelle 202: Rekalkulierte SF_6-Emissionen aus Teilchenbeschleunigern, in Tonnen [t]

	Submission 2026	Submission 2025	Differenz
1995	4,44	4,44	0,01
1996	4,65	4,65	0,01

	Submission 2026	Submission 2025	Differenz
1997	4,79	4,78	0,01
1998	4,90	4,90	0,01
1999	4,85	4,84	0,01
2000	4,85	4,98	-0,12
2001	4,71	4,83	-0,12
2002	4,76	4,89	-0,12
2003	4,77	4,88	-0,11
2004	4,73	4,89	-0,16
2005	4,75	4,91	-0,16
2006	4,76	4,92	-0,16
2007	4,77	4,93	-0,12
2008	4,79	4,95	-0,16
2009	4,61	4,96	-0,35
2010	4,61	4,13	0,48
2011	4,62	4,13	0,48
2012	4,22	4,13	0,08
2013	4,17	4,14	0,03
2014	4,16	4,17	0,02
2015	4,16	4,14	0,02
2016	4,00	4,15	-0,14
2017	4,01	4,15	-0,14
2018	4,01	4,15	-0,14
2019	2,98	4,16	-1,17
2020	1,99	4,16	-2,17
2021	1,99	4,16	-2,17
2022	1,99	4,17	-2,17
2023	1,99	4,17	-2,18

Anmerkung: Aufgrund von Rundungsdifferenzen können geringfügige Abweichungen in der Darstellung der Zahlen entstehen.

In 2.G.2.c Isolierglasfenster wurde eine Rekalkulation aufgrund eines Berechnungsfehlers ab dem Berichtsjahr 1995 vorgenommen:

Tabelle 203: Rekalkulierte SF_6-Emissionen aus Isolierglasfenstern, in Tonnen [t]

	Submission 2026	Submission 2025	Differenz
1995	107,9	107,8	0,1
1996	85,9	85,6	0,4
1997	75,6	75,0	0,6
1998	57,6	56,4	1,2

	Submission 2026	Submission 2025	Differenz
1999	53,8	51,9	1,8
2000	53,8	54,5	-0,7
2001	59,7	57,0	2,7
2002	55,1	52,3	2,8
2003	57,3	54,4	2,9
2004	63,0	60,0	3,0
2005	65,9	62,8	3,1
2006	71,0	67,8	3,2
2007	76,6	73,5	3,1
2008	82,6	79,7	2,9
2009	88,0	85,5	2,5
2010	94,9	93,0	1,9
2011	99,3	96,9	2,3
2012	105,0	102,0	3,1
2013	108,3	104,3	4,0
2014	110,3	105,8	4,5
2015	118,7	114,7	4,0
2016	125,8	126,7	-0,9
2017	134,6	138,6	-4,0
2018	136,7	144,4	-7,7
2019	140,0	149,0	-9,0
2020	105,0	110,7	-5,7
2021	86,9	91,5	-4,6
2022	57,1	60,4	-3,3
2023	48,9	52,2	-3,3

Anmerkung: Aufgrund von Rundungsdifferenzen können geringfügige Abweichungen in der Darstellung der Zahlen entstehen.

4.8.2.13 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (2.G.2 alle)

Derzeit sind keine Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

4.8.3 Verwendung von N_2O (2.G.3)

4.8.3.1 Beschreibung der Kategorie (2.G.3)

Der deutsche Lachgasmarkt wird von wenigen Unternehmen wie Air Liquide, Linde AG und Westfalen AG dominiert, die sowohl als Hauptthersteller als auch Importeur auftreten. Bei der Lachgasherstellung und dessen Abfüllung in Gasflaschen entstehen keine Lachgasemissionen. Emissionen treten lediglich bei der Anwendung auf: Als N_2O-Quelle ist hier vor allem der Einsatz

in der Medizin von Bedeutung. Weitere Emissionsquellen sind der Einsatz von Lachgas als Treibmittel in Sprühsahnedosen und der Einsatz in der Halbleiterindustrie, welcher bei 2.E.1 mit erfasst wird. Auch bei Sprengungen wird N_2O in geringen Mengen freigesetzt.

Medizin - Anästhesie

In der Medizin wird Lachgas als analgetisch wirkendes Gas zu Narkosezwecken genutzt. Bei der Anwendung wird Lachgas mit reinem Sauerstoff gemischt, um eine wirkungsvolle Gasmischung von 70 % Lachgas und 30 % Sauerstoff zu erhalten. In der modernen Anästhesie wird die Wirkung des Lachgases durch Zugabe von anderen Narkosemitteln verbessert. Bislang ist der Einsatz von N_2O in diesem Bereich nicht verboten, jedoch gab es starke Bestrebungen in der deutschen Medizin gegen dessen allgemeine Verwendung. Insbesondere in den Jahren von 1990 bis 2005 gingen die Lachgas-Emissionen der Anästhesie als dominierende Emissionsquelle stark zurück. Statt Lachgas wurde zunehmend alternative Betäubungen mit fluorhaltigen Narkosemitteln angewandt. Dieser Trend setzt sich seitdem abgeschwächt fort.

Lebensmittelindustrie - Sprühsahnedosen

Lachgas wird in der Lebensmittelindustrie mit der Bezeichnung E 942 für verschiedene Anwendungen eingesetzt. So dient es als Treibgas zum Aufschäumen von Lebensmittel, hauptsächlich für Sahne und Eis. Es wird aber auch zur Extraktion und Konservierung von Lebensmitteln genutzt.

Sprengstoffe

Sprengstoffe können militärisch und gewerblich eingesetzt werden. Zivile bzw. gewerbliche Sprengstoffe finden im Bergbau, bei Baumaßnahmen in felsigen Gegenden, bei Abrissunternehmen, in der Geologie und bei Feuerwerken Verwendung.

Lachgasemissionen entstehen vorwiegend bei der Detonation von ammoniumnitrathaltigen Sprengstoffen wie dem ANFO (Ammoniumnitrat- / Fuel Oil) und den Emulsionssprengstoffen. Im Allgemeinen enthalten die gewerblichen/zivilen Sprengstoffe zu ca. 60 bis 80 % Ammoniumnitrat (AN). Dagegen enthält der ANFO-Sprengstoff Andex bis zu 94 % Ammoniumnitrat.

In Deutschland werden Sprengstoffe zur zivilen Nutzung von zwei Firmen hergestellt: Orica Mining (früher Dynamit Nobel) und Westpreng GmbH (Wasag Chemie).

Bei der Herstellung von Sprengstoff entstehen keine Lachgasemissionen, jedoch kann bei der thermischen Zersetzung von Sprengstoffen Lachgas gebildet werden. Die Ursache dafür ist, dass Ammoniumnitrat (AN) beim thermischen Zerfall Distickstoffmonoxid (Lachgas) und Wasser bildet.

Bei vorsichtigem Erwärmen über die Schmelztemperatur läuft die Reaktion wie folgt ab:

$$NH_4NO_3 \longrightarrow N_2O + 2H_2O$$

Bei schnellen, detonativen Umsetzung des AN-haltigen Sprengstoffes, verläuft die Reaktion wie folgt:

$$NH_4NO_3 \longrightarrow 2H_2O + N_2 + 0{,}5O_2$$

Dies bedeutet, dass bei hohem Druck und hoher Temperatur AN vorwiegend zu Stickstoff, Sauerstoff und Wasser reagiert. Nur eine geringe Konzentration an primär gebildetem N_2O bleibt beim Detonationsprozess erhalten. So enthalten z.B. die Detonationsschwaden von Amatolen[74]

[74] Amatol x/y: militärische Sprengstoffe. Gießbare Gemische, i.a. aus x % TNT und y % Ammoniumnitrat

mit etwa 80 % an AN nur 0,1 Mol N_2O pro Mol Ammoniumnitrat. Aus diesem Betrag lässt sich eine theoretische maximale Lachgasbildung von etwa 68 g (dieser Wert wurde von einem Sprengstoffexperten mitgeteilt, der stöchiometrische Wert würde 44 g/Mol Amatol (80 %-AN) betragen) pro Kilogramm AN errechnen ((Ornellas, 1982); Volk (1986): Seite 74). Nach Aussage von Experten können Annahmen über die N_2O-Emissionen bezogen auf diesen AN-Gehalt für andere Sprengstoffe getroffen werden.

N_2O im Auto-Tuning

In der Antriebstechnik wird Lachgas zur Verbesserung des Verbrennungsprozesses in Benzinmotoren, der so genannten „Lachgas-Einspritzung", verwendet. Dabei wird das Lachgas in Stickstoff und Sauerstoff gespalten. Der Stickstoff kühlt den Verbrennungsprozess und der Sauerstoff erhöht die Verbrennungsleistung. Infolge dieser „Tuningmaßnahme" kann die Leistung des Motors kurzfristig gesteigert werden. Es gibt in Deutschland bisher eine Firma, die solche Tuning-Maßnahmen anbietet. Recherchen haben ergeben, dass die entsprechende Technik, die für ein solches Tuning genutzt wird, auf einen möglichst restlosen Verbrauch des Lachgases ohne nennenswerte Emissionen ausgelegt ist.

4.8.3.2 Methodische Aspekte (2.G.3)

Die Berechnungen der N_2O-Emissionen erfolgen mittels einer Tier 1-Methode, wenn die Methode bei den einzelnen Produktanwendungen nicht explizit genannt wird.

Anästhesie

Die Menge an N_2O-Emissionen aus medizinischen Anwendungen für das Jahr 1990 basiert auf einer Extrapolation der statistischen Anlagenerhebung im Gebiet der ehemaligen DDR im Jahr 1990. Damals wurde festgestellt, dass dort eine Anlage zur Produktion von N_2O für Narkosezwecke existiert hat. Die Anlage war zum damaligen Zeitpunkt noch nicht lange in Betrieb (Errichtung im Jahr 1988). Die Produktionskapazität betrug etwa 1.200 t pro Jahr. Nach Recherchen fand kein Export bzw. Import dieses Stoffes statt, so dass von der vollständigen Anwendung im Land ausgegangen wurde. Über die hierdurch für die ehemalige DDR ermittelte Pro-Kopf-Emission wurde unter der Annahme gleicher Verhältnisse in grober Näherung für das Jahr 1990 eine N_2O-Emission von 6.200 t für Deutschland festgelegt. Die N_2O-Angabe für das Jahr 2001 stammt aus einer schriftlichen Mitteilung des Industriegaseverbands e.V. (IGV) aus dem Jahr 2002. Dieser Wert hatte eine Bandbreite von 3.000 bis 3.500 t/a, woraufhin für die Zeitreihenentwicklung der N_2O-Emissionen der Mittelwert (3.250 t/a) verwendet wurde.

Seit dem Jahr 2005 wird durch den Industriegaseverband eine Erhebung der N_2O-Absatzmengen aller Anwendungen in Deutschland durchgeführt. Diese Gesamtabsatzmengen ohne Differenzierung der Anwendungen hat der IGV auch dem Umweltbundesamt für die Berichterstattung zur Verfügung gestellt. 2010 hat der IGV mit dem Bundeswirtschaftsministerium eine Selbstverpflichtung abgeschlossen über die jährliche Bereitstellung der N_2O Absatzmengen für die Emissionsberichterstattung. Die Absatzmengen können auch weiterhin nicht nach Anwendungen aufgeschlüsselt werden. Darum müssen die N_2O-Emissionen aus medizinischen Anwendungen aus den Verbandsangaben berechnet werden,

Die Datenlücken in der Anästhesie werden durch Interpolation und Extrapolation geschlossen.

Der Emissionsfaktor beträgt 100 %.

Sprühsahnedosen

Der Einsatz von N_2O in Sprühsahnedosen in Deutschland muss differenziert betrachtet werden. Es gibt in Deutschland einen Hersteller von Sprühsahnedosen, der diese auch in Deutschland befüllt. In den Emissionsberechnungen wird aufgrund der oben beschriebenen Recherchen

angenommen, dass diese Firma einen Anteil von ca. 3 % an den Lachgas-Absatzmengen des Industriegaseverbandes hat. Der größere Anteil der Unternehmen aber lässt ihre Sprühsahnedosen im Ausland befüllen und importiert diese nach Deutschland. Die Absatzmengen dieser Firmen sind deshalb nicht in den Daten des Industriegaseverbandes enthalten. Der Milchindustrieverband hat in einer einmaligen Erhebung dem Umweltbundesamt mitgeteilt, dass 2008 50,2 Mio. Einheiten Sprühsahnedosen verkauft worden sind. Der Milchindustrieverband gab aber an, dass die Einheiten verschiedene Größen haben und eine differenzierte Angabe nach den Größen nicht möglich ist. Eine Internetrecherche hat ergeben, dass im deutschen Handel Druckpatronen mit 8g N_2O für 0.5l Sahnedosen und 16g N_2O für 1,0l Sahnedosen verkauft werden. Vergleichsrechnungen haben ergeben, dass vereinfacht mit 8g N_2O pro verkaufte Einheit gerechnet werden kann. Dies ergibt eine Einsatzmenge von 401,6 t N_2O für Sprühsahnedosen im Jahr 2008 in Deutschland. Da für die Jahre vor 2008 keine Daten vorliegen wird dieser Wert als konstant angenommen.

Der Emissionsfaktor für Sprühsahnedosen wird mit 100 % angenommen.

Sprengstoffe

2003 wurden in Deutschland 59 kt Sprengstoff hergestellt. 13 kt wurden ins Ausland exportiert und 5,8 kt nach Deutschland importiert[75]. Das ergibt eine in Deutschland verbrauchte Menge von 51,8 kt. Der Anteil von ANFO an der Gesamtmenge beträgt 60 %, der der Emulsionssprengstoffe 25 % und der der Dynamitsprengstoffe 15 %. ANFO-Sprengstoffe bestehen aus 94 % Ammoniumnitrat und 6 % Brennstoffen. Für Emulsionssprengstoffe beträgt dieses Verhältnis 80 zu 20 % und für Dynamitsprengstoffe 50 zu 50 %.

Derzeit wird Lachgas als Schwadenkomponente im Gegensatz zu NO und NO_2 nicht ermittelt.

In der Regel ist die Bildung von N_2O nur bei Sprengstoffen relevant, die Ammoniumnitrat (AN) enthalten. Allerdings liegen bei ANFO-Sprengstoffen keine genauen Analysen der Detonationsschwaden vor. Aus diesem Grund muss man davon ausgehen, dass bei der Detonation von ANFO eine ähnlich hohe Konzentration von N_2O gebildet wird bezogen auf den AN-Gehalt wie bei den Amatolen und Ammoniten[76], von denen bereits Analysen vorliegen, um eine Abschätzung ermöglichen zu können. Man kommt zu folgendem Ergebnis: Amatole und Ammonite bilden bei der Detonation etwa 0,1 Mol N_2O pro Mol Ammoniumnitrat (AN).

Laut Aussage der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) ist die Menge des Sprengstoffverbrauchs in der BRD von 1990 bis 2005 konstant geblieben.

Der Emissionsfaktor für den Einsatz von Sprengstoffen beträgt 0,1036 kg N_2O/t Sprengstoff. Der Emissionsfaktor wurde von der Bundesanstalt für Materialprüfung im Februar 2010 durch Messungen ermittelt. Dadurch konnte der Emissionsfaktor gegenüber der Submission 2010 deutlich nach unten korrigiert werden.

4.8.3.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (2.G.3)

Die Aktivitätsdaten für die Anästhesie werden seit 2005 aus den Verbandsangaben ermittelt, deshalb wird die Unsicherheit auf 20 % geschätzt. Die Verbrauchsmengen für Sprühsahne und Sprengstoffe unterliegen einer sehr hohen Unsicherheit (75 %), da die Berechnungen auf mehreren Annahmen fußen und nur jeweils für ein Jahr eine Angabe vorliegt.

[75] Persönliche Mitteilung: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM).

[76] Ammonit: Zusammensetzung 70-88 % Ammoniumnitrat mit 5-20 % Nitroaromaten, 1-6 % Pflanzenmehl sowie z.T. 4 % Nitroglycerin, Aluminiumpulver und Kaliumperchlorat

Die Unsicherheit der Emissionsfaktoren für die Anästhesie und Sprühsahnedosen wird auf 0 % festgelegt, da zum gegenwärtigen Zeitpunkt davon ausgegangen wird, dass N_2O bei seiner Anwendung keiner Umwandlung unterliegt und somit nach der Anwendung vollständig in die Atmosphäre entweicht. Der Emissionsfaktor für Sprengstoffe wird auf 5 % Unsicherheit geschätzt, da der Emissionsfaktor in einer amtlichen Messung ermittelt worden ist.

Für den Verteilungstyp der Zeitreihen kann von einer Normalverteilung ausgegangen werden.

4.8.3.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (2.G.3)

Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung, die den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen entsprechen, wurden durch die Nationale Koordinierungsstelle durchgeführt.

Für die Verwendung in der Anästhesie zeigt ein Vergleich mit anderen Ländern, dass die meisten wie Deutschland den Emissionsfaktor von 1,0 verwenden. Dies entspricht auch dem Default-Wert der 2006 IPCC Guidelines (IPCC (2006a): Vol. 3, S. 8.36).

Für die Lachgas-Emissionen aus der Verwendung von Explosivstoffen ist ein Vergleich mit anderen Ländern oder Datenquellen nicht möglich, da Deutschland das einzige Land ist das diese Emissionen berichtet.

Eine Verifikation des Lachgaseinsatzes durch andere Datenquellen ist nicht möglich, da keine anderen Daten vorliegen mit denen eine Verifikation möglich wäre. Für die Berichterstattung wurden die Daten extra neu erhoben.

4.8.3.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.G.3)

Rückrechnungen sind nicht erforderlich.

4.8.3.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (2.G.3)

Derzeit sind keine neuen Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

4.8.4 Sonstige Produktherstellung und -verwendung: Andere - ORC-Anlagen (2.G.4 ORC-Anlagen)

4.8.4.1 Beschreibung der Kategorie (2.G.4 ORC-Anlagen)

In Deutschland werden fluorierte Treibhausgase seit dem Jahr 2003 in ORC-Anlagen eingesetzt und unter der Kategorie 2.G.4 berichtet.

Zur Stromerzeugung aus Wärmemengen, deren Temperaturen und Drücke für den üblichen Dampfkraftprozess mit Wasser zu niedrig sind, kann man den „Organischen Rankine Kreisprozess“ (*Organic Rankine Cycle*, kurz: ORC) verwenden. Die Haupteinsatzbereiche von ORC-Anlagen sind die Erdwärme- (Geothermie-) und die Abwärmenutzung von (Heiz)kraftwerken und Biogas-Anlagen.

Im ORC-Kreislauf werden organische Stoffe wie HFKW, FKW, Kohlenwasserstoffe oder Silikonöle mit niedrigeren Verdampfungstemperaturen als Wasser als Arbeitsmittel eingesetzt. Die Arbeitsmittel verdampfen im ORC-Kreislauf und treiben die Turbine an, analog dem Wasserdampf in herkömmlichen Kraftwerken. In der Geothermie werden die mit Abstand größten Füllmengen, bis zu 75 Tonnen fluorierte Arbeitsmittel, eingesetzt. Deutlich geringere

Füllmengen (0,2 bis 0,6 Tonnen) kommen bei der Nutzung von Abwärme in Biogas-Anlagen und in BHKW zum Einsatz.

In Deutschland begann die Verwendung von C_5F_{12} als Arbeitsmittel in einer ORC-Pilotanlage im Jahr 2003. Diese Anlage wurde bereits im Jahr 2010 außer Betrieb genommen. Der HFKW-134a kam erstmalig im Jahr 2008 in einer ORC-Anlage zum Einsatz. Im Jahr 2010 begann die Verwendung von HFKW-245fa als Arbeitsmittel. Ab dem Jahr 2011 wurden mehrere Anlagen mit dem HFKW-245fa sowie dem Arbeitsmittel „Solkatherm“, das aus HFKW-365mfc (65 %) und einem perfluorierten Polyether (PFPE) mit dem Handelsnamen „Galden“ (35 %) besteht, in Betrieb genommen. Die nicht berichtspflichtigen ungesättigten fluorierten Stoffe uHFCKW-1224yd, uHFCKW-1233zd und uHFKW-1234ze kamen ab 2020 zum Einsatz.

4.8.4.2 Methodische Aspekte (2.G.4 ORC-Anlagen)

Emissionen aus ORC-Anlagen treten während der Befüllung, des Betriebs und der Entsorgung auf.

Herstellungsemissionen werden über den Inlands-Neuverbrauch als Aktivitätsrate bestimmt und gemäß Gleichung 8 berechnet.

Anwendungsemissionen werden basierend auf dem Endbestand der Arbeitsmittel durch Multiplikation mit dem $EF_{Anwendung}$ gemäß Gleichung 9 bestimmt.

Entsorgungsemissionen beziehen sich auf den Neuzugang des Jahres, der x Jahre (entsprechend der Produktlebensdauer) vor dem aktuellen Berichtsjahr n liegt und werden gemäß Gleichung 10 berechnet.

Entsorgungsemissionen spielen bisher, mit einer Ausnahme, noch keine Rolle, da die Anlagen größtenteils neu sind und bei großen ORC-Anlagen in der Geothermie von einer Lebensdauer von 30 Jahren, bei kleineren Anlagen von einer Lebensdauer von 20 Jahren ausgegangen wird.

Die Emissionen des nicht berichtspflichtigen perfluorierten Polyethers „Galden“ sowie von uHFCKW-1224yd, uHFCKW-1233zd und uHFKW-1234ze werden gemäß den Empfehlungen der *UNFCCC Reporting Guidelines 2014* ((UNFCCC, 2014), FCCC/CP/2013/10/Add.3, Decision 24/CP.19) freiwillig als *additional greenhouse gas* berichtet. Die Emissionen sind aggregiert mit anderen nicht berichtspflichtigen Emissionen in Kapitel 4.9.3 aufgeführt. In den CRT-Tabellen sind keine Daten zu freiwillig berichteten Emissionen enthalten.

Emissionsfaktoren

Die verwendeten Emissionsfaktoren sind das Ergebnis von Expertenaussagen und sind in Tabelle 198 wiedergegeben.

Der Befüllungsverlust beträgt 2 % und ist länderspezifisch, da ORC-Anlagen nicht in den 2006 IPCC Guidelines aufgeführt sind und daher keine Default-Faktoren zur Verfügung stehen.

Die Anwendungsemissionen werden auf 4 % geschätzt. Auch hierfür gibt es keine Vorgaben in den 2006 IPCC Guidelines.

Nach derzeitigem Stand der Technik beträgt der Emissionsfaktor der Entsorgung 20 %. Dieser Wert ist ebenfalls länderspezifisch.

Aktivitätsdaten

ORC-Anlagen stellen einen neuen Anwendungsbereich fluorierter Treibhausgase dar, über den erst wenige Daten und technische Informationen vorliegen. Die verwendeten Daten basieren daher fast ausschließlich auf Aussagen von Herstellern und Betreibern von ORC-Anlagen. Ermittelt wurden die Daten durch Expertengespräche (Gschrey et al., 2015).

4.8.4.3 Unsicherheiten & Zeitreihenkonsistenz (2.G.4 ORC-Anlagen)

Eine systematische Quantifizierung der Unsicherheiten für die Unterkategorie ORC-Anlagen ist erfolgt.

Die Datenqualität der Verwendungsmengen wird insgesamt als gut bewertet. Die Zahl der Hersteller bzw. Vertreiber von ORC-Anlagen mit fluorhaltigen Arbeitsmitteln in Deutschland ist klein (weniger als 10 Unternehmen), und der Markt ist überschaubar. Die Datenqualität der jährlichen Verwendungsmengen von HFKW-245fa und Solkatherm (HFKW-365mfc und PFPE) ist gut, da die Zahlen direkt von den Herstellern dieser Arbeitsmittel (Honeywell und Solvay Solexis) stammen, die diese Stoffe als einzige Anbieter nach Deutschland exportieren. Ab 2018 stammen diese Zahlen vom führenden Anlagenhersteller (Orcan Energy). Dieselbe Firma stellt auch die Verwendungsmengen von uHFCKW-1224yd, uHFCKW-1233zd und uHFKW-1234ze zur Verfügung.

Die Emissionsfaktoren sind mit größeren Unsicherheiten behaftet. Da ORC-Anlagen erst seit wenigen Jahren in Deutschland betrieben werden, gibt es bisher keine soliden empirischen Erforschungen. Die Werte basieren auf Schätzungen von Anlagenbetreibern.

4.8.4.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (2.G.4 ORC-Anlagen)

Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Die Daten für das aktuelle Berichtsjahr wurden, wie bereits für die meisten Vorjahre, im Rahmen eines Forschungsvorhabens im Auftrag des Umweltbundesamtes durch einen externen Experten erhoben.

Die Qualitätssicherung erfolgt im Wesentlichen durch den externen Experten. Darüber hinaus werden die Daten durch die Fachbegleiter des UBA bei Abnahme geprüft.

Für eine Überprüfung der für die Emissionsberichterstattung ermittelten F-Gas Mengen als Grundlage zur Verifikation stehen außer den vom Forschungsnehmer erhobenen Daten keine weiteren Datenquellen zur Verfügung. Vergleiche mit anderen Ländern sind nicht möglich, da keine Emissionen aus ORC-Anlagen von anderen Ländern berichtet werden. Ebenso ist kein Vergleich der Emissionsfaktoren möglich. Die 2006 IPCC Guidelines geben keine Default-Emissionsfaktoren vor, so dass auch hier keine Vergleichbarkeit gegeben ist.

4.8.4.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.G.4 ORC-Anlagen)

Der Inlands-Neuverbrauch von HFKW-245fa in den Jahren 2018 bis 2023 wurde basierend auf neuen Rechercheergebnissen aktualisiert, was ebenfalls zu Änderungen des Bestands sowie der Befüllungs- und Bestandsemissionen führte.

Die Arbeitsmittel uHFCKW-1224yd, uHFCKW-1233zd und uHFKW-1234ze wurden in das Inventar aufgenommen. Da es sich hierbei um nicht berichtspflichtige fluorierte Treibhausgase handelt, wird auf eine Quantifizierung verzichtet.

Die Änderungen der Emissionen von HFKW-245fa in der Unterkategorie ORC-Anlagen (2.G.4) für die Jahre 2018 bis 2023 sind in Tabelle 204 aufgeführt.

Tabelle 204: Rekalkulierte Emissionen von HFKW-245fa 2018-2023, in t CO_2eq

	2018	2019	2020	2021	2022	2023
HFKW-245fa						
Submission 2025	8.641	9.011	11.033	13.288	14.603	24.445
Submission 2026	8.331	8.588	9.598	10.770	11.451	16.670
Differenz	-309	-424	-1.435	-2.517	-3.152	-7.775

4.8.4.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (2.G.4 ORC-Anlagen)

Derzeit sind keine Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

4.8.5 Sonstige Produktherstellung und -verwendung: Andere - Containerbegasung (2.G.4 Containerbegasung)

4.8.5.1 Beschreibung der Kategorie (2.G.4 Containerbegasung)

Als Ersatz für den ozonabbauenden Stoff Methylbromid, dessen Verwendung bereits seit vielen Jahren verboten ist, wird in Deutschland seit dem Jahr 2004 das fluorierte Treibhausgas Sulfuryldifluorid (SO_2F_2) zur Schädlingsbekämpfung in Containern mit Exportstammholz eingesetzt. Das Holz wird hierzu im Container mit dem Pflanzenschutzmittel *ProFume®*, das den Wirkstoff Sulfuryldifluorid enthält, behandelt. Das Pflanzenschutzmittel emittiert anschließend vollständig.

Die Verwendungsmengen und Emissionen von SO_2F_2 waren über einen langen Zeitraum auf konstant hohem Niveau. Im Zuge steigender Exportmengen von Stammholz wegen der in den Jahren 2018 bis 2020 national aufgetretenen Dürre und hohen Borkenkäferbefallen in Fichtenholzwäldern stiegen sie seitdem stark an.

Wegen der hohen Umweltrelevanz und der, auch global, stark ansteigenden Verwendung des potenten Treibhausgases Sulfuryldifluorid berichtet Deutschland diesen Stoff ab dem Berichtsjahr 2020 freiwillig unter der Kategorie 2.G.4.

4.8.5.2 Methodische Aspekte (2.G.4 Containerbegasung)

Emissionen treten nur während der Anwendung, d.h. der Begasung des Stammholzes in Containern, auf und werden über den Inlands-Neuverbrauch als Aktivitätsrate durch Multiplikation mit dem $EF_{Anwendung}$ gemäß Gleichung 9 bestimmt.

Die Emissionen des nicht berichtspflichtigen Sulfuryldifluorides werden gemäß den Empfehlungen der UNFCCC Reporting Guidelines 2014 ((UNFCCC, 2014), FCCC/CP/2013/10/Add.3, Decision 24/CP.19) freiwillig als *additional greenhouse gas* berichtet. Die Emissionen sind aggregiert mit anderen nicht berichtspflichtigen Emissionen in Kapitel 4.9.3 aufgeführt. In den CTF-Tabellen sind keine Daten zu freiwillig berichteten Emissionen enthalten.

Emissionsfaktoren

Der verwendete Emissionsfaktor ist das Ergebnis von Expertenaussagen und ist in Tabelle 198 wiedergegeben.

Nach derzeitigem Stand der Technik beträgt der Emissionsfaktor der Anwendung 100 %, da bisher keine Abgasreinigung durchgeführt wird. Dieser Wert ist länderspezifisch, da Containerbegasung nicht in den 2006 IPCC Guidelines aufgeführt ist und daher kein Default-Faktor zur Verfügung steht.

Aktivitätsdaten

Die Verwendungsmengen sind jährlich verfügbaren Statistiken der vom Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL) erhobenen Absatzmengen von Sulfurylfluorid als Pflanzenschutzmittelwirkstoff in Deutschland entnommen (BVL, 2022).

4.8.5.3 Unsicherheiten & Zeitreihenkonsistenz (2.G.4 Containerbegasung)

Eine systematische Quantifizierung der Unsicherheiten für die Unterkategorie Containerbegasung ist erfolgt.

Die Datenqualität der Verwendungsmengen wird insgesamt als gut bewertet, da sie offiziellen Statistiken des BVL entnommen sind.

Der Emissionsfaktor ist mit einer größeren Unsicherheit behaftet. Da SO_2F_2 erst seit wenigen Jahren verwendet wird, gibt es bisher keine soliden empirischen Erforschungen. Daher wird konservativ von einer vollständigen Emission ausgegangen.

4.8.5.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (2.G.4 Containerbegasung)

Die Qualitätssicherung erfolgt im Wesentlichen durch die Fachbegleitung des UBA.

Für eine Überprüfung der für die Emissionsberichterstattung ermittelten F-Gas Mengen als Grundlage zur Verifikation stehen keine weiteren Datenquellen zur Verfügung. Vergleiche mit anderen Ländern sind nicht möglich, da keine Emissionen aus Containerbegasung von anderen Ländern berichtet werden. Ebenso ist kein Vergleich der Emissionsfaktoren möglich. Die 2006 IPCC Guidelines geben keine Default-Emissionsfaktoren vor, so dass auch hier keine Vergleichbarkeit gegeben ist.

4.8.5.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.G.4 Containerbegasung)

Die vom Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL) erhobenen Absatzmengen von Sulfurylfluorid als Pflanzenschutzmittelwirkstoff liegen erst nach Abschluss der Inventarermittlung vor. Dies macht eine jährliche Rekalkulation der Vorjahresemissionen erforderlich. Da Sulfurylfluorid zu den freiwillig berichteten Stoffen zählt, wird auf eine Quantifizierung verzichtet.

4.8.5.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (2.G.4 Containerbegasung)

Derzeit sind keine Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

4.8.6 Sonstige Produktherstellung und –verwendung: Sonstige, Anwendung von Holzkohle (2.G.4 Holzkohle)

4.8.6.1 Beschreibung der Kategorie (2.G.4 Holzkohle)

In dieser Kategorie werden CO_2-, CH_4-, N_2O- und Staub-Emissionen aus der Anwendung von Holzkohle zum Grillen berichtet.

In Deutschland werden nur geringe Mengen an Holzkohle produziert – es gibt einen großen Betreiber und mehrere regionale Köhlereien. Die jeweiligen Mengen werden vom Statistischen Bundesamt (STBA) erhoben und unterliegen der Geheimhaltung. Die Produktion von Holzkohle wird unter 1.A.1.a berichtet.

Der Holzkohleverbrauch ist in den Jahren 1990 bis 2012 , abgesehen von einem konjunkturell bedingten Einbruch im Jahr 2008, kontinuierlich gestiegen und bis 2019 stagnierend. Seitdem ist der Holzkohlenverbrauch rückläufig, wobei er 2020 um rund 30 % im Vergleich zum Vorjahr und 2024 um 12 % sank. Der weitaus größte Teil wird importiert.

4.8.6.2 Methodische Aspekte (2.G.4 Holzkohle)

Dem Berechnungsmodell liegen die Annahmen zugrunde, dass alle Holzkohle innerhalb des Jahres verbraucht und vollständig verbrannt wird.

Die Berechnungen der CO_2-, CH_4- und N_2O-Emissionen erfolgen nach einer Tier 1 Methode.

Aktivitätsraten

Die Produktionsmengen sowie die Import- und Exportmengen an Holzkohle für die Jahre ab 1996 entstammen dem Statistischen Bundesamt ((Statistisches Bundesamt, FS 4, R 3.1), Produzierendes Gewerbe, Produktion im Produzierenden Gewerbe sowie der Außenhandelsstatistik).

Die Berechnung der Verbrauchsmenge erfolgt gemäß Produktion + Import – Export.

Für die Jahre 1990 bis 1995 erfolgt die Berechnung der Verbrauchsmenge über den Pro Kopf-Verbrauch, der aus den Jahren 1996 bis 2013 abgeleitet wird. Dabei wird davon ausgegangen, dass auch in diesen Jahren der Verbrauch linear gestiegen ist.

Emissionsfaktoren

Da Import- und Exportzahlen veröffentlicht werden, können aus Geheimhaltungsgründen keine exakten Emissionsfaktoren für CO_2, CH_4 und N_2O angegeben werden. Die Emissionsfaktoren sind aber vergleichbar mit den Emissionsfaktoren, die aus den 2006 IPCC Richtlinien abgeleitet werden können.

Jeder Emissionsfaktor wird für die gesamte Zeitreihe angewendet.

4.8.6.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (2.G.4 Holzkohle)

Da eine Tier 1 Methode mit Emissionsfaktoren, die den Standardwerten der 2006 IPCC Guidelines ähnlich sind, angewendet wird, gelten auch die entsprechenden Unsicherheiten für Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren (IPCC (2006a): Vol. 3, Ch. 5).

4.8.6.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (2.G.4 Holzkohle)

Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung, die den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen entsprechen, wurden durch die Nationale Koordinierungsstelle durchgeführt.

Für eine Überprüfung der Import-, Export- und Produktionsmengen als Grundlage zur Verifikation der Verbrauchsmengen stehen außer den vom Statistischen Bundesamt zur Verfügung gestellten Daten keine weiteren Quellen zur Verfügung. Ein Vergleich der Import- und Exportzahlen mit den Daten von EUROSTAT wurde durchgeführt. Die Zahlen zeigen gute Übereinstimmung mit den vom Statistischen Bundesamt an EUROSTAT übermittelten Zahlen. Die Produktionsmengen können nicht verglichen werden, weil sie auch bei EUROSTAT als geheim ausgewiesen sind.

Ein Vergleich der Emissionsfaktoren mit den Emissionsfaktoren anderen Länder wurde durchgeführt. Aus Vertraulichkeitsgründen kann das Vergleichsergebnis nur intern dokumentiert werden. Die Emissionsfaktoren sind vergleichbar.

4.8.6.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.G.4 Holzkohle)

Für das Jahr 2023 war eine Korrektur der Emissionen notwendig, da sich Anpassungen der Außenhandelsstatistik ergaben. Die Anwendungsmengen stiegen dadurch um 1,9 % und dementsprechend auch die Emissionen.

4.8.6.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (2.G.4 Holzkohle)

Derzeit sind keine neuen Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

4.9 Andere Produktionen (2.H)

Die Kategorie „Andere Produktionen“ ist keine Hauptkategorie.

Unter 2.H.1 Pulp and Paper sind im ZSE prozessbedingte Emissionen aus der Produktion von Spanplatten sowie aus der Produktion von Zellstoff aufgeführt.

Unter 2.H.2 Food and Drink sind prozessbedingte Emissionen aus der Produktion alkoholischer Getränke sowie Brot und anderer Nahrungsmittel zu finden.

Unter 2.H.3 werden vertrauliche Emissionen fluorierter Treibhause berichtet. Des Weiteren werden dort freiwillig zu berichtende F-Gase aggregiert berichtet.

4.9.1 Andere Produktionen: Zellstoff- und Papierherstellung (2.H.1)

4.9.1.1 Beschreibung der Kategorie (2.H.1)

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
NO_X, SO_2, NMVOC			CS

Die Kategorie „Andere Produktionen – Zellstoff- und Papierherstellung“ ist keine Quelle für Treibhausgas-Emissionen und daher auch keine Hauptkategorie.

Alle Emissionen von klimarelevanten Gasen aus der Zellstoff- und Papierindustrie sowie der Spanplattenherstellung in Deutschland resultieren aus der Verbrennung von Energieträgern und werden daher in Kapitel 3.2 als energiebedingte Emissionen berichtet. Prozessbedingte Emissionen von klimarelevanten Gasen im Sinne der 2006 IPCC *Guidelines* gibt es bei der Zellstoff- und Papiererzeugung nicht.

Die Herstellung von Zellstoff nach dem Sulfatverfahren erfolgt in zwei der fünf Zellstoffanlagen in Deutschland mittels Kaustifizierung, wonach die brennstoffbedingten CO_2-Emissionen des Kalkofens bereits über die Brennstoffangaben als energiebedingte Emissionen berücksichtigt sind. Die restlichen drei Anlagen arbeiten nach dem Sulfitverfahren.

Sowohl die Sulfat- als auch die Sulfitzellstoffproduktion ist eine potentielle SO_2-Emissionsquelle. In der Sulfatzellstoffproduktion treten aus den Laugenkesseln, Kalköfen, Rindenkesseln sowie Hilfskesseln auch Emissionen von NO_X, CO und NMVOC auf.

Spanplatten werden aus Holzspänen mit Zusatz von Bindemitteln unter Einwirkung von Druck und Wärme hergestellt. Hauptquelle der NMVOC Emissionen sind die eingesetzten Holzspäne, aus denen während der Trocknung durch Wärmeeinwirkung NMVOC ausgasen. Auch während des Pressvorgangs können NMVOC aus dem Holz und dem Bindemittel emittieren.

Die Produktion von Spanplatten erfolgt in ca. 20 Anlagen in Deutschland. Die Spanplattenindustrie ist überwiegend durch größere Unternehmen geprägt.

4.9.1.2 Methodische Aspekte (2.H.1)

In der Zellstoff- und Papierindustrie treten keine prozessbedingten Emissionen von klimarelevanten Gasen im Sinne der *IPCC Good Practice Guidance* (Penman et al., 2000) auf. Für die Vorläufersubstanzen Stickoxide, Schwefeloxide und flüchtigeVerbindungen wurden von den Anlagenbetreibern Emissionsfaktoren berichtet.

Tabelle 205: Emissionsfaktoren für die Produktion von Zellstoff, in [kg/t]

	NO_X	NMVOC	SO_2	CO
Sulfatzellstoff	1,071	C	0,017	0,474
Sulfitzellstoff	1,66		1,54	0,1

Ursprung: deutscher Beitrag zur Revision des BVT-Merkblattes für die Papier und Zellstoffindustrie 2007 (Spörl, 2009) und Überprüfung der Emssionsfaktoren anhand realer Anlagenmessdaten 2021

Zuletzt wurden in 140 Anlagen folgende Mengen produziert:

Tabelle 206: Zellstoff- und Papierherstellung, produzierte Mengen 2024

Produkt	Mengen 2024
Erzeugung von Papier, Pappe und Karton (PPK) Rohstoffproduktion:	19,19 Mio. t
Papierzellstoff	1,396 kt
Holzstoff	361 kt
Altpapierstoff	12,399 kt
Menge dazu eingesetzten Altpapiers	(16,075 kt)

Quelle: (Papierindustrie, 2025)

Diese Zahlen können bis 1990 zurückverfolgt werden und werden jährlich vom Verband DIE PAPIERINDUSTRIE e.V. (DPI) erhoben und in einem Leistungsbericht zusammengestellt.

Spanplatten

Die Emissionsfaktoren in Höhe von 0,9 kg/t für NMVOC und 0,3 kg/t für Staub wurden auf der Basis von Expertenschätzungen ermittelt .

Die Aktivitätsdaten entstammen der nationalen Statistik (Statistisches Bundesamt, 2025c), müssen zur weiteren Verwendung aber von Volumen- in Massenangaben umgerechnet werden. Die Zeitreihe wurde ab 1995 mit einem vervollständigten Datensatz des Statistischen Bundesamtes neu berechnet.

Tabelle 207: Umgerechnete Aktivitätsdaten der Spanplattenindustrie, in [t]

Jahr	Spanplattenproduktion	Jahr	Spanplattenproduktion	Jahr	Spanplattenproduktion
1995	5.302.304	2005	6.107.625	2015	4.401.951
1996	5.083.453	2006	6.038.427	2016	4.584.715
1997	5.424.305	2007	5.998.782	2017	4.708.521
1998	5.618.847	2008	5.592.744	2018	4.562.401
1999	5.596.004	2009	4.962.749	2019	4.489.681
2000	5.859.367	2010	4.991.234	2020	4.430.611
2001	5.574.354	2011	4.488.544	2021	4.775.500
2002	5.081.481	2012	4.430.381	2022	4.365.817
2003	5.528.671	2013	4.489.213	2023	4.041.418
2004	6.000.147	2014	4.446.688	2024	4.005.586

Quelle: Statistisches Bundesamt, Melde-Nr. bis 2018: 1621 13 131; 1621 13 133; 1621 13 163; 1621 13 500, Meldenummern ab 2019: 162112001, 162112002, 162112003, 162113160, 162114190, 162114500, umgerechnet und summiert in Tonnen

4.9.1.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (2.H.1)

Zellstoff & Papier

Die deutschlandspezifischen Emissionsfaktoren bilden die erheblichen Modernisierungsmaßnahmen in den deutschen Sulfatzellstoffwerken ab, die zu einer starken Emissionsminderung geführt haben. Für die Sulfitzellstoffwerke führten kontinuierliche Verbesserungen zu einer erheblichen SO_2-Minderung gegenüber 1990.

Die Unsicherheiten der Aktivitätsraten betragen schätzungsweise 5 %. Die Unsicherheiten der Emissionsfaktoren betragen schätzungsweise 20 %.

Spanplatten

Die Unsicherheiten für die Aktivitätsraten der Spanplattenindustrie betragen ±3 % (Expertenschätzung wegen Umrechnung statistischer Angaben).

4.9.1.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (2.H.1)

Aufgrund begrenzter Ressourcen und minimaler Relevanz wird für die Berichterstattung von Precursern keine QK/QS durchgeführt.

4.9.1.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.H.1)

Rückrechnungen waren nicht treibhausgasrelevant, so dass sich für die Treibhausgasemissionen keine Veränderungen ergeben.

4.9.1.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (2.H.1)

Derzeit sind keine Inventarverbesserungen für diese Kategorie geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

4.9.2 Andere Produktionen: Nahrungsmittel und Getränke (2.H.2)

4.9.2.1 Beschreibung der Kategorie (2.H.2)

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2	NA	NA	NA
NMVOC	CS	NS	CS/D

Die Kategorie „Andere Produktionen - Nahrungsmittel und Getränke“ ist keine Quelle für Treibhausgas-Emissionen und daher auch keine Hauptkategorie.

Emissionen der direkten Klimagase aus der Nahrungsmittel- und Getränkeindustrie in Deutschland resultieren aus der Verbrennung von Energieträgern und werden daher in CRF 1.A.2 berichtet. Als prozessbedingte Emissionen der Nahrungsmittel- und Getränkeherstellung sind Kohlenwasserstoffe ohne Methan (NMVOC) von Bedeutung (IPCC (2006a): Vol. 1 S. 7.13). Die Kohlendioxidemissionen aus den eingesetzten Nahrungsmitteln, die während bestimmter Prozesse bei der Produktion anfallen, werden nicht in CRF 2.H.2. berichtet, da sie aus der Verwendung von biologischem Kohlenstoff stammen und nicht zur Netto-CO_2-Emission beitragen. Die bei der Extraktion von Ölen & Fetten (Soja, Raps, Sonnenblumenkerne usw.) anfallenden Lösemittelemissionen - sozusagen die Lösemittelanwendung bei der Rohstoff-Herstellung - werden in der Kategorie 2.D.3 berichtet. Das bei der Zuckerherstellung eingesetzte, aus dem Brennen von Kalkstein gewonnene CO_2 wird während des Produktionsprozesses gebunden. Daher ist dieser Prozess nicht emissionsrelevant (s. Lechtenböhmer, Nanning and Buttermann (2006); Lechtenböhmer, Nanning, et al. (2006a).

Die Emissionen der Nahrungsmittel- und Getränkeindustrie werden im Inventar in der „Table2(I)s2“ des sektoralen Reports für Industrielle Prozesse zusammengefasst berichtet.

In der Kategorie der Nahrungsmittel und Getränke werden nach IPCC-Guidelines folgende Produkte für die Emissionsberichterstattung betrachtet:

Alkoholische Getränke

- Wein
- Bier
- Spirituosen

Brot und andere Nahrungsmittel

- Fleisch, Fisch und Geflügel
- Zucker
- Margarine und harte und gehärtete Fette
- Kuchen, Kekse und Frühstückscerealien
- Brot
- Tierfutter
- Kaffeeröstung

- Für diese Produkte werden Default-Emissionsfaktoren für die NMVOC-Emissionen im (EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019 (EMEP, 2019)) angegeben (EMEP/EEA (2023), Kapitel 2.H.2).

4.9.2.2 Methodische Aspekte (2.H.2)

Für die Berechnung von Emissionen wurden sofern vorhanden nationale Emissionsfaktoren, ansonsten die von EMEP/ EEA empfohlenen Emissionsfaktoren verwendet. Grundlage für die Auswahl der Emissionsfaktoren bildet der Forschungsbericht „Emissionen aus der Nahrungsmittelindustrie“ (Anderl et al., 2008; Theloke et al., 2008). Das Vorgehen erfolgt analog der Beschreibung im NIR (UBA et al., 2013).

Bis auf wenige Ausnahmen werden die Aktivitätsdaten direkt durch das Statistische Bundesamt per Datenlieferung zur Verfügung gestellt. Ergänzend werden Abfragen über das Internetportal Genesis-Online des Statistischen Bundesamtes gestellt. Bezüglich der Futterherstellung werden ergänzend Daten aus dem Statistischen Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft und zur Spirituosenwirtschaft Erhebungen des Bundesverbandes der Deutschen Spirituosen-Industrie genutzt. Zum Zwecke internationaler Vergleichbarkeit aggregiert die Nationale Koordinierungsstelle alle Produkte auf die gemeinsame Einheit Kilotonnen. Diese Gesamtangaben sind in den CRF-Tabellen als Aktivitätsdaten ablesbar, entsprechen aber einem Schätzverfahren.

Für die Kategorie 2.H.2 ergeben sich für 2024 insgesamt 16,4 kt NMVOC-Emissionen, wovon 4,1 kt NMVOC auf die Brotherstellung, 4,1 kt NMVOC auf die Zuckerherstellung und 3,7 kt NMVOC auf die Spirituosenherstellung zurückzuführen sind. Die Veränderungen im Vergleich zum Vorjahr liegen im Bereich der üblichen Schwankungen, lediglich im Bereich der Herstellung von Räucherwaren, bei der Spirituosenherstellung und der Weinherstellung gab es deutliche Minderungen. Eine Steigerung gab es bei der Zucker-, Brot- und Tierfettproduktion. Die Änderungen bei Wein und Zucker sind im Wesentlichen erntebedingt.

4.9.2.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (2.H.2)

Die Unsicherheiten der Aktivitätsraten betragen schätzungsweise 5-20 %. Weitere Informationen zu Unsicherheiten sind dem NIR (UBA et al., 2013) zu entnehmen.

4.9.2.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (2.H.2)

Aufgrund begrenzter Ressourcen und minimaler Relevanz wird für die Berichterstattung von Precursern keine QK/QS durchgeführt.

In Berichten anderer Staaten sind kaum Ausführungen zu 2.H.2 enthalten, so dass ein Vergleich zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht möglich ist. Ein Vergleich mit ETS-Daten ist nicht möglich, da in 2.H.2 keine emissionshandelspflichtigen Emissionen anfallen.

4.9.2.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (2.H.2)

Es wurden keine kategoriebezogenen Rückrechnungen durchgeführt.

4.9.2.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (2.H.2)

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

4.9.3 Andere Bereiche (2.H.3)

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
HFKW, FKW, SF_6	s. Kapitel 4.6.4: Tabelle 194/ Tabelle 198	s. Kapitel 4.6.4 / 4.7.5 / 4.8.2	s. Tabelle 194/ Tabelle 198

Die Emissionen von SF_6 aus der Anwendung bei der AWACS-Wartung (2.G.2.a Militärische Anwendungen), der Anwendung in Sportschuhen (2.G.2.d. Adiabatische Eigenschaften - Sportschuhe), der Anwendung beim Schweißen (2.G.2.e Sonstige – Schweißen) sowie der Anwendung bei der Herstellung optischer Glasfasern (2.G.2.e Sonstige – optische Glasfasern) werden aus Vertraulichkeitsgründen unter 2.H.3 berichtet.

Die Emissionen von HFKW aus der Verwendung der Lösemittel HFKW-43-10mee, HFKW-245fa sowie HFKW-365mfc (2.F.5 Lösemittel), werden auch unter 2.H.3 berichtet. Ebenso die Emissionen von HFKW-23, HFKW-134a und HFKW-227ea aus der Produktion (2.B.9 Produktion von halogenierten Kohlenwasserstoffen und SF6).

Die Emissionen von FKW aus der Produktion von CF_4 (2.B.9 Produktion von halogenierten Kohlenwasserstoffen und SF_6), aus der Herstellung von Solarzellen (2.E.3 Photovoltaik), der Verwendung als Wärmeüberträger (2.E.4), Lösemittel (2.F.5), aus der Anwendung in Sportschuhen (2.G.2.d Adiabatische Eigenschaften - Sportschuhe) sowie die Verwendung von Perfluordecalin in medizinischen und kosmetischen Anwendungen (2.G.2.e Sonstige – Medizinische und kosmetische Anwendungen) werden ebenfalls unter 2.H.3 berichtet. Entsprechend der Empfehlung des Expert Review Teams wird darauf verwiesen, dass sämtliche Informationen zu den unter 2.H.3 berichteten Emissionen zur Beschreibung der Kategorie, Methodischen Aspekten, Unsicherheiten & Zeitreihenkonsistenz, Kategoriespezifischen Rückrechnungen & Verifizierung sowie den geplanten Verbesserungen in den entsprechenden Kategorie-Kapiteln zu finden sind.

Zusätzlich zu den berichtspflichtigen Treibhausgasen hat sich Deutschland entschlossen, die in Tabelle 208 dargestellten nicht berichtspflichtigen Treibhausgase für die in Deutschland relevanten, ebenfalls aufgezählten Anwendungen zu berichten. In Tabelle 209 sind die Emissionen dieser nicht berichtspflichtigen Treibhausgase aus Vertraulichkeitsgründen in aggregierter Form dargestellt.

Tabelle 208: Überblick über freiwillig berichtete fluorierte Treibhausgase, ihre Treibhausgaspotenziale und ihre Anwendungsbereiche

Treibhausgas	Formel	GWP	Anwendungsbereich	QG
uHFCKW-1224yd	$CHCl=CF-CF_3$ (Z)	1	ORC-Anlagen	2.G.4
uHFCKW-1233zd	$CHCl=CH-CF_3$ (E)	1	stationäre Klimaanlagen PU-Integralschäume ORC-Anlagen	2.F.1.f 2.F.2.b 2.G.4
uHFKW-1234yf	$CF_3-CF=CH_2$	1	Gewerbekälte Transportkälte mobile Klimaanlagen stationäre Klimaanlagen	2.F.1.a 2.F.1.d 2.F.1.e 2.F.1.f
uHFKW-1234ze	$CF_3-CH=CHF$ (E)	1	Gewerbekälte stationäre Klimaanlagen XPS-Schäume allgemeine Aerosole ORC-Anlagen	2.F.1.a 2.F.1.f 2.F.2.a 2.F.4.b 2.G.4

Treibhausgas	Formel	GWP	Anwendungsbereich	QG
uHFKW-1336mzz	CF_3-CH=CH-CF_3 (Z)	2	PU-Integralschaum	2.F.2.b
HCFE-235da2 (Isofluran)	$CHF_2OCHClCF_3$	491	inhalatives Anästhetikum	2.G.2.e
HFE-236ea2 (Desfluran)	$CHF_2OCHFCF_3$	1.790	inhalatives Anästhetikum	2.G.2.e
HFE-347mmz1 (Sevofluran)	$CH_2FOCH(CF_3)_2$	216	inhalatives Anästhetikum	2.G.2.e
PFPE/PFPMIE	$CF_3(OCF(CF_3)CF_2)_n(OCF_2)_mOCF_3$	9.710	ORC-Anlagen	2.G.4
Sulfuryldifluorid	SO_2F_2	4.090	Containerbegasung	2.G.4

Quelle: 5. IPCC Assessment Report, Kapitel 8, S. 731, Appendix 8. A (Stocker et al., 2014).

Tabelle 209: Aggregierte Emissionen der nicht berichtspflichtigen fluorierten Treibhausgase uHFCKW-1224yd, uHFCKW-1233zd, uHFKW-1234yf, uHFKW-1234ze, uHFKW-1336mzz, HCFE-235da2, HFE-236ea2, HFE-347mmz1, PFPE/PFPMIE und SO_2F_2, in [t CO_2-Äquivalenten]

Jahr	Emissionen	Jahr	Emissionen	Jahr	Emissionen	Jahr	Emissionen	Jahr	Emissionen
1990	4.262	1997	32.320	2004	118.336	2011	310.949	2018	431.686
1991	5.323	1998	43.855	2005	130.831	2012	348.969	2019	820.063
1992	6.480	1999	56.254	2006	379.351	2013	424.875	2020	984.072
1993	7.733	2000	69.519	2007	416.911	2014	388.703	2021	554.427
1994	9.082	2001	80.526	2008	368.045	2015	402.409	2022	712.611
1995	10.527	2002	92.161	2009	417.697	2016	376.018	2023	443.024
1996	21.650	2003	104.423	2010	394.191	2017	338.785	2024	432.074

5 Landwirtschaft (CRF-Sektor 3)

5.1 Übersicht (CRF Sektor 3)

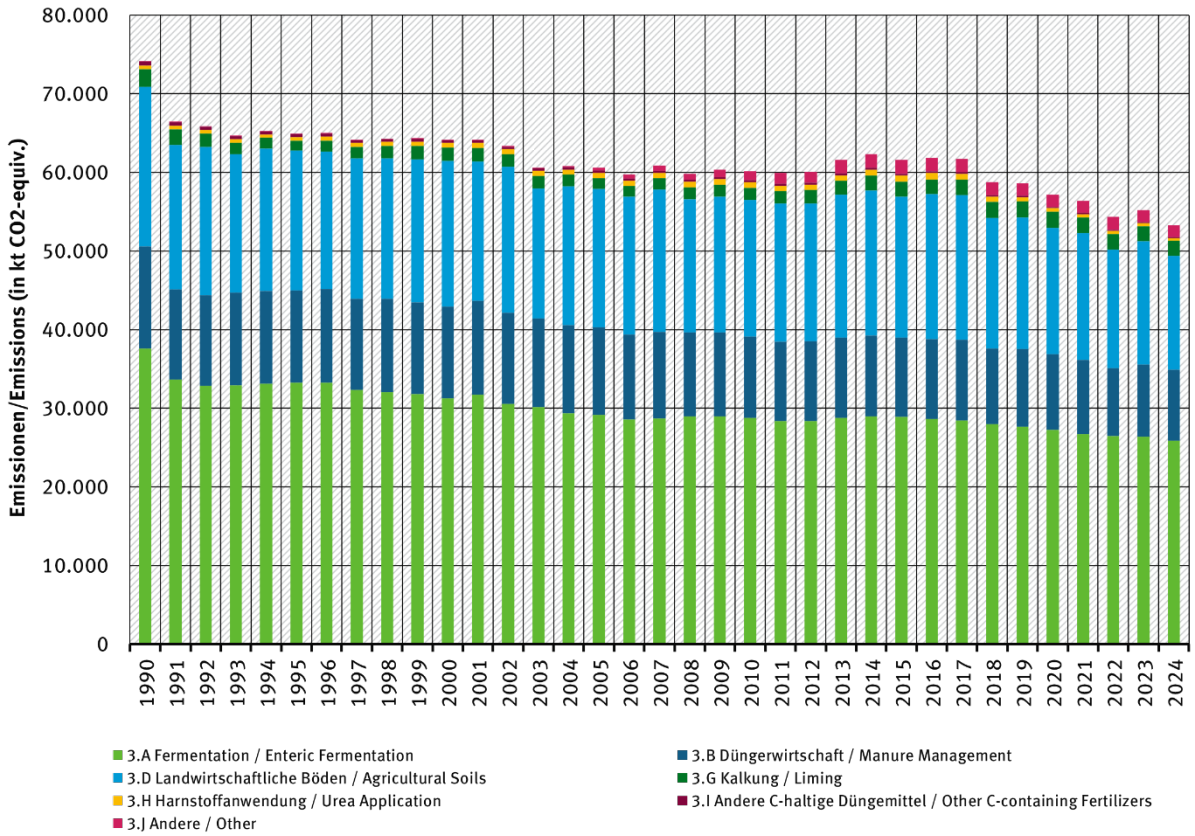
5.1.1 Kategorien und Gesamtemissionen 1990 - 2024

Deutschland berichtet in der Kategorie 3 „Landwirtschaft“ über die Emissionen aus der Fermentation bei der Verdauung (3.A), aus der Behandlung von Wirtschaftsdüngern (incl. Wirtschaftsdünger-Vergärung und deren Gärrestelagerung) (3.B), aus der Nutzung landwirtschaftlicher Böden (3.D), aus Kalkung (3.G), aus der Anwendung von Harnstoff (3.H) sowie der Anwendung anderer kalkhaltiger Dünger (3.I). Zusätzlich werden die im Zusammenhang mit der Energiepflanzen-Vergärung entstehenden Emissionen berichtet (3.J: Emissionen aus Vergärung von Energiepflanzen und deren Gärrestelagerung). Emissionen aus der Vergärung und Kompostierung anderer Stoffe, z. B. von Lebensmittelabfällen und Grünschnitt, werden im Abfall-Sektor 5.B.2 (siehe Kapitel 7.3.2) berichtet. Dagegen werden die Emissionen aus der Ausbringung von Gärresten aus Abfall sowie aus der Ausbringung von Komposten aus Bioabfall und Grünabfall unter 3.D berichtet.

Emissionen aus dem Reisanbau (3.C) kommen in Deutschland nicht vor, Brandrodung (3.E) wird in Deutschland nicht praktiziert (NO). Das Abbrennen von Feldern und Ernterückständen (3.F) ist in Deutschland per Gesetz (BGBl, 2004, und vorangehende bundes- und landesrechtliche Regelungen, siehe Vos et al. (2026), Kap.2.9, verboten (NO).

Abbildung 46 gibt für den vorliegenden NID 2026 eine Übersicht über die zeitliche Entwicklung der Treibhausgasemissionen aus den Bereichen 3.A, 3.B, 3.D, 3.G, 3.H, 3.I und 3.J seit 1990. Die Daten wurden mit dem Inventarmodell Py-GAS-EM (siehe 5.1.2) berechnet.

Abbildung 46: Übersicht über die Treibhausgas-Emissionen des CRF-Sektors 3



Quelle: eigene Darstellung, UBA

5.1.2 Das Emissionsinventarmodell Py-GAS-EM

5.1.2.1 Verwendete Regelwerke und ausführlicher Bericht

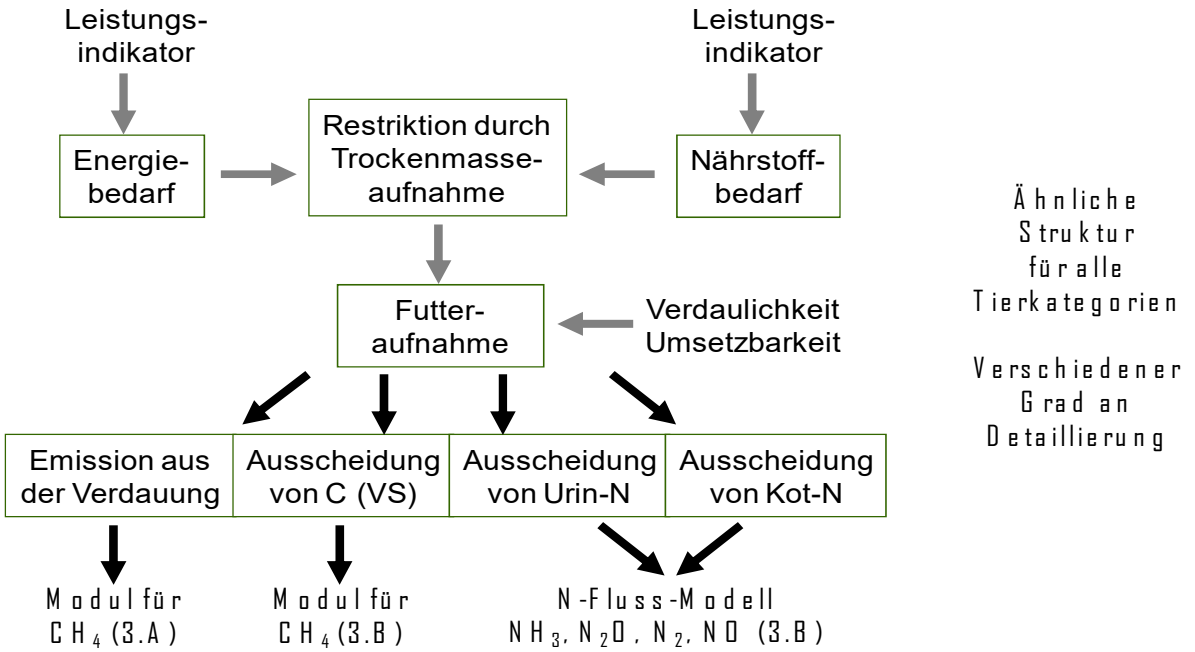
Das Emissionsinventarmodell Py-GAS-EM beruht im Wesentlichen auf der Umsetzung der entsprechenden Handbücher (Treibhausgase: IPCC (2006b, Vol. 1 & 4); (IPCC, 2019); Schadstoffe, insbesondere NH_3: EMEP (2023)).

Im Laufe der letzten Jahre wurden zahlreiche der in den Handbüchern beschriebenen Methoden für das Py-GAS-EM-Modell weiter entwickelt. Für die Berechnung von Emissionen aus der Vergärung von Energiepflanzen wurde eine nationale Methodik entwickelt. Eine umfassende Beschreibung des Inventarmodells Py-GAS-EM einschließlich der Dokumentation weiterer Quellen findet sich im ausführlichen Bericht (Vos et al., 2026). Die nachfolgenden Ausführungen repräsentieren eine Zusammenfassung des ausführlichen Berichtes.

5.1.2.2 Grundstruktur des Emissionsinventarmodelles Py-GAS-EM

Als Grundlage der Emissionsberechnungen in der Tierhaltung dient die Futteraufnahme, die als Funktion des erhaltungs- und leistungsbedingten Energiebedarfs berechnet wird, wie Abbildung 47 am Beispiel der Mutterkuh verdeutlicht. Daraus ergeben sich die CH_4-Emissionen aus der Verdauung (3.A) und die Ausscheidungen von Kohlenstoff und Stickstoff für die Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger- und Gärreste-Management (3.B). Letztere gehen auch in die Berechnungen des Stickstoffeintrags in landwirtschaftliche Böden (3.D) ein.

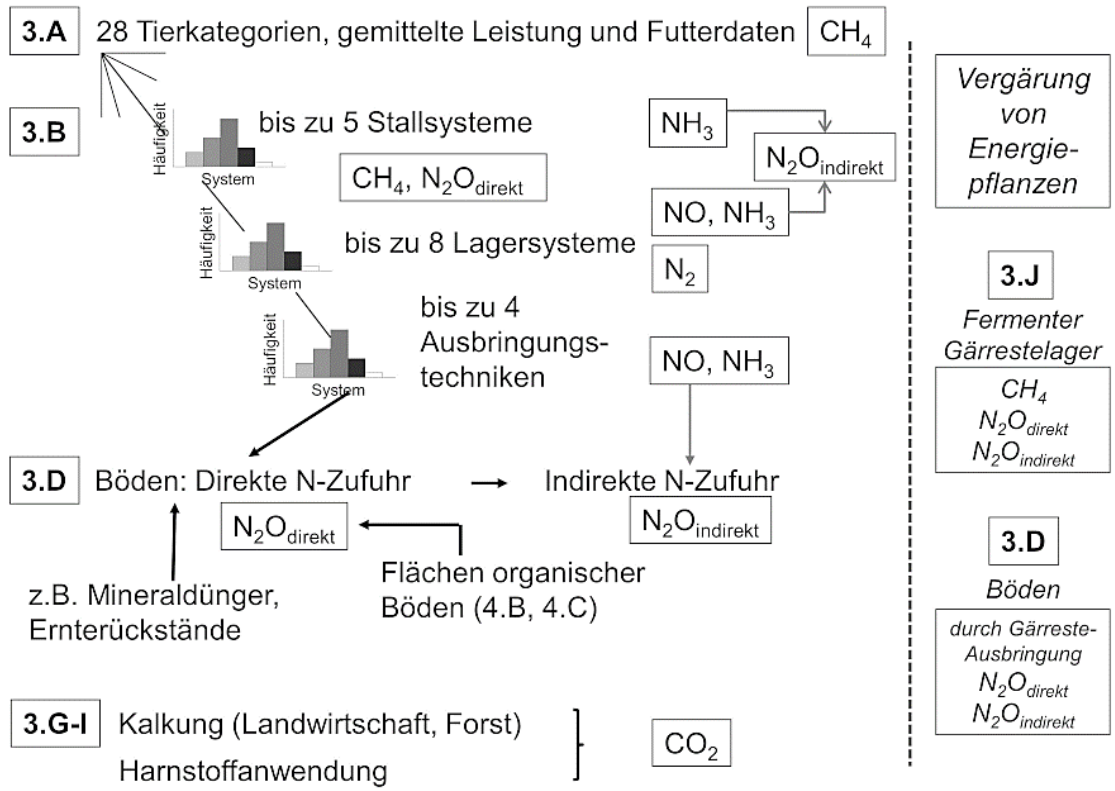
Abbildung 47: Logik der nationalen Methodik für die Emissionsberechnungen in der Tierhaltung am Beispiel der Mutterkuh. („Leistungsindikator“ steht hier für die Summe aus leistungs- und erhaltungsbedingtem Bedarf)



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

Abbildung 48 zeigt, wie das Py-GAS-EM-Modell erst nach Tierkategorien und –unterkategorien für die Berechnungen der Kategorien 3.A und 3.B differenziert und diese wiederum nach Stallsystemen, Lagerungssystemen (mit Vergärung als separatem Lagersystem) und Ausbringungsverfahren für Wirtschaftsdünger und Gärreste aufteilt. CH_4 wird für 3.A und 3.B getrennt für jede Tier-Subkategorie berechnet. N_2O wird für die Kategorien 3.B und 3.D auf der Basis eines N-Fluss-Konzeptes berechnet (s. Kapitel 5.1.2.4). CO_2-Emissionen werden im Bereich 3.G-I für Kalkung und Harnstoffeinsatz berechnet, wobei IPCC-konform auch die Kalkung im Forst eingeschlossen ist. Die Emissionen aus der Vergärung von Energiepflanzen werden in zwei getrennten Abschnitten berechnet: Emissionen aus Fermenter und Gärrestelagerung in 3.J, Emissionen aus Böden als Folge der Gärreste-Ausbringung in 3.D.

Abbildung 48: Konzept und thematische Inhalte des Py-GAS-EM-Modells



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

5.1.2.3 Die Behandlung von CH_4 im Emissionsinventar

Mit dem Inventarmodell Py-GAS-EM werden die CH_4-Emissionen aus der Verdauung und den VS-Ausscheidungen der landwirtschaftlichen Nutztiere (siehe Kapitel 5.2 und 5.3.2) berechnet, wobei gülle- und strohbasierte Systeme mit ihren typischen Lagerformen berücksichtigt werden. Die anaerobe Vergärung von Wirtschaftsdünger und Energiepflanzen in Biogasanlagen wird in die Berechnungen einbezogen (siehe Kapitel 5.1.3.6.5 und 5.1.4).

5.1.2.4 Das Stickstoff-Fluss-Konzept (3.B, 3.D)

Die Berechnung der Emissionen von N-Spezies mit Py-GAS-EM erfolgt auf Grundlage des N-Fluss-Konzeptes (Dämmgen & Hutchings, 2005), siehe dazu Kap. 4.2 in Vos et al. (2026).

Wesentliche Voraussetzung für die Anwendung des Konzeptes ist die Bestimmung der tierischen N-Ausscheidung (siehe dazu Kapitel 5.1.3.4). Bei Mutterkühen, Milch- und Schlachtfärsen, Mastbullen, Schweinen, Legehennen, Junghennen, Masthähnchen und -hühnchen, Enten sowie Putenhähnen und Putenhennen wird die N-Ausscheidung als Differenz zwischen aufgenommener N-Menge und erhaltungs- und leistungsbedingtem N-Bedarf (Tiergewicht, Gewichtszuwachs, jährliche Milchmenge oder Anzahl an Eiern, gegebenenfalls Anzahl der Nachkommen) berechnet. Die mit dem Futter aufgenommene N-Menge wird anhand des tierischen Energiebedarfs sowie des Energie- und N-Gehalts im Futter ermittelt. Für Milchkühe wird die N-Ausscheidung seit der vorliegenden Submission 2026 aus Milchleistung, Harnstoffgehalt der Milch und dem Proteingehalt der Milch abgeschätzt. Für die übrigen Tiere werden N-Ausscheidungswerte aus der deutschen Fachliteratur oder aus IPCC (2019) entnommen oder abgeleitet.

Bei der N-Ausscheidung wird zwischen den beiden Anteilen „organisches N“ und „leicht in NH_3 umsetzbares N (TAN, total ammoniacal nitrogen)“ unterschieden. TAN ist im Harn von Säugetieren vorhanden; im Py-GAS-EM-Modell wird TAN mit dem N-Gehalt im Harn gleichgesetzt. Geflügel scheidet UAN (uric acid nitrogen) aus, das im Inventar TAN gleichgesetzt wird. Aufgrund der Definitionen der Emissionsfaktoren werden prinzipiell die NH_3-Emissionen proportional zur verfügbaren TAN-Menge und die N_2O-, NO-, und N_2-Emissionen proportional zur verfügbaren N-Gesamtmenge berechnet. Daher werden zwei N-Pools parallel in den Rechnungen mitgeführt: Dies sind (1) die gesamte im jeweiligen Stadium zur Verfügung stehende N-Menge, d. h. die Summe aus organischem N und TAN, sowie (2) TAN allein.

Die für eine Tierkategorie ermittelten N-Ausscheidungen werden auf Stall und Weide aufgeteilt. Diese Aufteilung erfolgt entsprechend den im Stall und auf der Weide verbrachten Zeitanteilen.

Bei Festmistsystemen wird zusätzlich zu den N-Ausscheidungen der N-Eintrag durch Einstreumaterial berücksichtigt.

Für jede Tierkategorie werden die im Stall anfallenden N-Mengen im Verhältnis der relativen Anteile der in Deutschland üblichen Haltungsverfahren aufgeteilt. N-Verluste durch NH_3-Emission werden von TAN-Pool und Gesamt-N-Pool subtrahiert. Die verbleibenden N- und TAN-Mengen aller Ställe werden für güllebasierte Systeme einerseits und strohbasierte Systeme andererseits zusammengefasst und ins Lager transferiert.

Das Inventar berücksichtigt Abluftreinigungsanlagen in der Schweine- und Geflügelhaltung, siehe Kap. 4.2.2 in Vos et al. (2026). Das in Abluftreinigungsanlagen abgeschiedene N wird als TAN angesehen und direkt mit dem Wirtschaftsdünger ausgebracht (s. u.).

Die dem Lager zufließenden Gesamt-N- und TAN-Mengen (bei Festmistsystemen einschließlich des N-Eintrages durch Einstreu) werden getrennt nach festen und flüssigen Wirtschaftsdüngern zwischen den verschiedenen in Deutschland gängigen Lagerverfahren entsprechend ihren prozentualen Anteilen aufgeteilt. Die anaerobe Vergärung von Wirtschaftsdünger in Biogasanlagen wird berücksichtigt (siehe Kapitel 5.1.3.6.5). Aus dem Lager erfolgen Emissionen von NH_3 aus TAN- und Gesamt-N-Pool. Die N-Verluste durch die Emissionen von N_2O, NO und N_2 werden für Stall und Lager gemeinsam berechnet und aus dem Gesamt-N-Pool subtrahiert; parallel werden diese N-Verluste im Verhältnis von TAN- zu N-Gesamt-Menge auch dem TAN-Pool entzogen. Die verbleibenden N- bzw. TAN-Mengen werden ausgebracht, wobei noch das in Abluftreinigungsanlagen abgeschiedene N zugeschlagen wird.

Nach der Lagerung werden die verbleibenden N und TAN Mengen im Wirtschaftsdünger an das Transportmodul übergeben. Dieses verteilt die Wirtschaftsdünger auf die NUTS-3 Regionen (siehe Kap. 5.1.2.5).

Die zur Ausbringung kommende N-Menge wird auf die in Deutschland üblichen verschiedenen Ausbringungsverfahren und Einarbeitungszeiten von Wirtschaftsdüngern aufgeteilt. Dies geschieht im Verhältnis der relativen Anteile der verschiedenen Ausbringungsvarianten an der Gesamtmenge des auszubringenden Wirtschaftsdüngers, differenziert nach Tierkategorie und festen und flüssigen Wirtschaftsdüngern. Die N_2O-Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden infolge der Ausbringung von Wirtschaftsdünger und Gärresten aus Wirtschaftsdünger werden proportional zur ausgebrachten N-Menge berechnet.

Aus der beim Weidegang ausgeschiedenen Gesamt-N-Menge werden die N_2O-Emissionen infolge von Weidegang berechnet. Die N-Ströme, die im Zusammenhang mit der Vergärung von Energiepflanzen und der Lagerung und Ausbringung der resultierenden Gärreste entstehen, werden getrennt von den N-Strömen der Tierhaltung behandelt. Ihre Berechnung erfolgt,

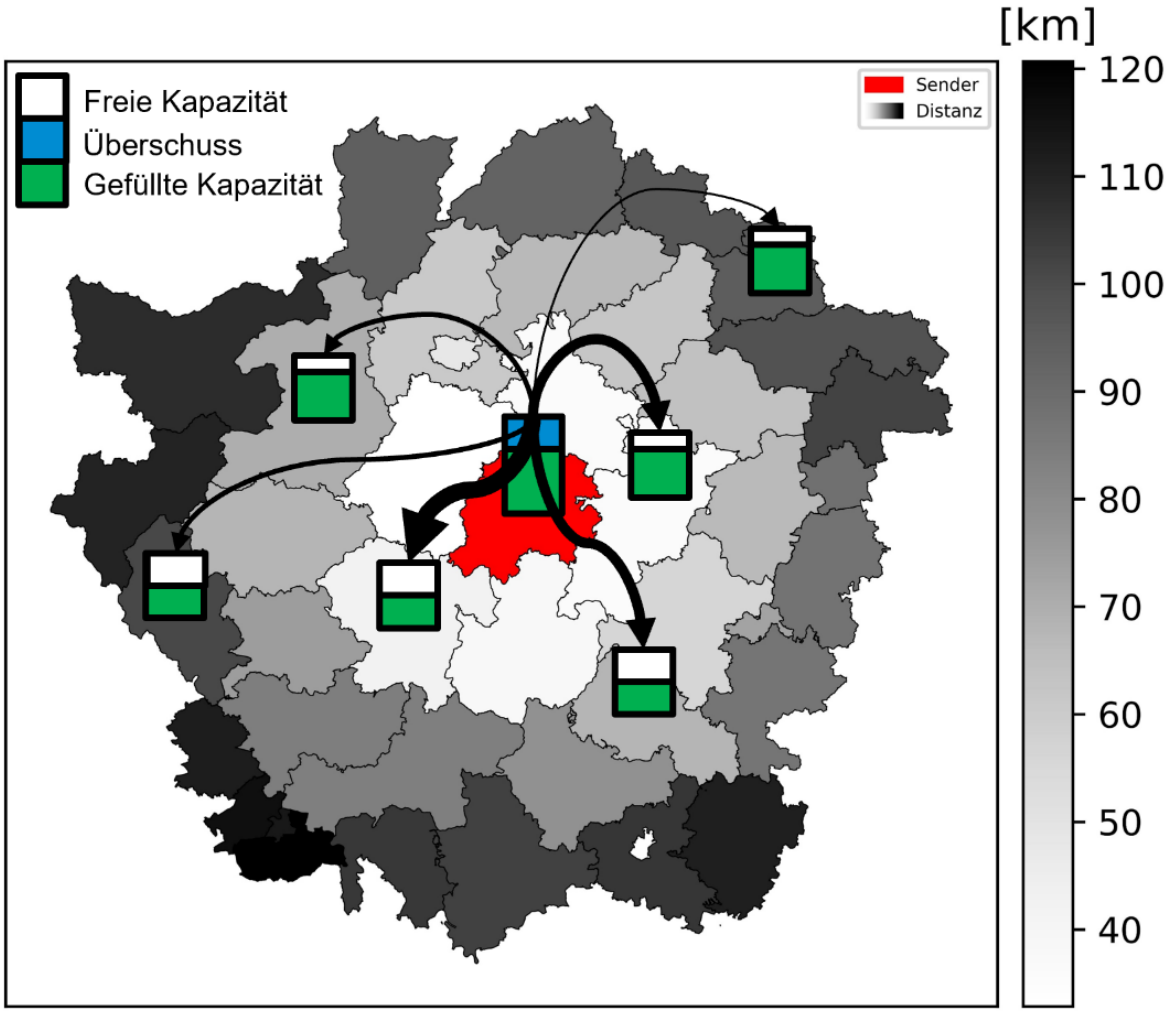
ausgehend von der N-Menge in den zu vergärenden Energiepflanzen (siehe Kapitel 5.1.4.2), sinngemäß wie oben für die tierischen N-Ausscheidungen beschrieben.

Wie beim Wirtschaftsdünger werden die durch die Ausbringung von Mineraldünger, Klärschlamm, Gärresten aus Abfall und Komposten aus Bioabfall oder Grünabfall verursachten N_2O-Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden proportional zur ausgebrachten N-Menge berechnet.

5.1.2.5 Transporte von Gärsubstraten, Gärresten und Wirtschaftsdüngern

Seit Submission 2026 werden Transporte von Wirtschaftsdüngern, Biogassubstraten und Gärresten zwischen NUTS-3-Regionen modelliert. Die Methode ist in Vos et al. (2026), Kapitel 1.2 detailliert beschrieben. Das Modell ermöglicht die Berücksichtigung von Transporten auch für Zeiträume und Regionen, in denen keine Daten zu Transporten erhoben wurden, sichert die Konsistenz der modellierten Masseflüsse in der Biomassevergärung und führt zu einer realitätsnäheren Verteilung von N-Einträgen in landwirtschaftliche Böden im Inventar. Im Modell separat transportiert werden transportwürdige Wirtschaftsdüngerarten aus der Viehhaltung (Geflügelkot, Rindergülle, Rindermist, Schweinegülle, Schweinemist), Energiepflanzen für die Vergärung in Biogasanlagen, Gärreste aus Biogasanlagen und gemeldete Wirtschaftsdüngerkategorien für Importe aus anderen EU-Ländern (siehe Kapitel 5.1.5.1.2). Treiber für Transporte im Modell sind Stickstoffüberschüsse, Düngebedarfe sowie Substratbedarfe der Biogasanlagen. Das Modell berücksichtigt die räumliche Distanz zwischen NUTS-3-Regionen. Aus den Niederlanden importierte Dünger werden mit demselben Ansatz transportiert und so auf deutsche NUTS-3-Regionen verteilt.

Abbildung 49: Prinzipieller Modellansatz für Transporte



Transport aus einer NUTS-3-Region mit Stickstoffüberschuss hängen ab von Höhe des Überschusses, Entfernungen zu anderen NUTS-3-Regionen und freier Kapazität zur Aufnahme von Stickstoff in diesen Regionen;
Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

Die primäre Grundlage für Design, Parametrisierung und Validierung des Transportmodells waren gemeldete Wirtschaftsdüngertransporte für den Zeitraum 2014-2024, welche im Rahmen der Niedersächsischen Verordnung über „Meldepflichten in Bezug auf Wirtschaftsdünger“ (WDüngMV) dokumentiert wurden. In Niedersachsen befinden sich die NUTS-2-Region mit der höchsten Viehdichte Deutschlands, aber auch ackerbauliche Regionen mit geringer Viehdichte, so dass ein hoher Anteil der deutschen Wirtschaftsdüngertransporte in Niedersachsen erfasst wird. Der Datensatz wurde von der Landwirtschaftskammer Niedersachsen zur Verfügung gestellt und enthält Nettotransporte einzelner Wirtschaftsdüngerarten zwischen den niedersächsischen NUTS-3-Regionen sowie Im- und Exporte aus bzw. in andere Bundes- und EU-Länder. Des Weiteren gibt der Datensatz darüber Aufschluss, welche der gemeldeten Transporte für die Vergärung in Biogasanlagen vorgesehen waren.

5.1.3 Charakterisierung der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung

5.1.3.1 Tierkategorien (3.A, 3.B)

Für die Berechnung der Emissionen aus der Tierhaltung in der deutschen Landwirtschaft werden die Tierbestände in Unterkategorien unterteilt, um die erforderliche Beschreibung leistungs- und haltungsmäßig homogener Teil-Tierbestände zu ermöglichen. Dies entspricht einem Tier 2 Verfahren nach (IPCC, 2006a) Kapitel 10.2.2. Tabelle 210 zeigt eine Gegenüberstellung der in den CR-Tabellen zu berichtenden Tierkategorien und der im deutschen Inventar verwendeten Tierkategorien.

Die CRF-Kategorien „Esel und Maultiere“ und „Büffel“ werden als „IE“ berichtet, da die Tierzahlen dieser Kategorien in den Tierzahlen der „Pferde“ bzw. „übrigen Rinder“ enthalten sind (siehe Kapitel 5.1.3.2.2).

Über die Kategorien Gehegewild, Kaninchen, Strauße und Pelztiere wird seit Submission 2024 berichtet, um konsistent zu der Schadstoffberichterstattung unter der EU-NEC-Verordnung (Directive 2016/2284/EU) (siehe EU (2016)) zu bleiben. Dort mussten diese Tierkategorien als Ergebnis eines Expertenreviews neu eingeführt werden, um die Vollständigkeit des Inventars sicherzustellen.

Tabelle 210: CRF -Tierkategorien und die für die deutsche Emissionsberichterstattung verwendete Unterteilung (3.A, 3.B)

CRF-Tierkategorien		Tierkategorien im deutschen Inventar
1	Milchkühe	„Milchkühe“ [a]
	Übrige Rinder	„Kälber“ (bis 4 Monate) [a]
		„Milchfärsen“ [b] (weibliche Jungrinder ab 4 Monaten) [a]
		„Schlachtfärsen“ [b] (weibliche Jungrinder ab 4 Monaten) [a]
		„Mastbullen“ (männliche Jungrinder ab 4 Monaten) [a]
		„Mutterkühe“ [a]
		„männliche Rinder ab 2 Jahren“ [a]
2	Schafe	„Erwachsene Schafe“
		„Lämmer“
3	Schweine	Jungsauen
		„Altsauen“ (incl. Saugferkel bis 8 kg)
		„Aufzuchtferkel“
		„Mastschweine“
		„Eber“
4	Büffel	--- [a]
	Kamele	--- [c]
	Gehegewild	„Gehegewild“
	Ziegen	„Ziegen“
	Pferde	„Großpferde“ [d]
		„Kleinpferde und Ponys“ [d]
	Esel und Maultiere	--- [d]

CRF-Tierkategorien		Tierkategorien im deutschen Inventar
	Geflügel	„Legehennen“
		„Masthähnchen und –hühnchen“
		„Junghennen“
		„Gänse“
		„Enten“
		„Puten, männlich“
		„Puten, weiblich“
	Kaninchen	„Kaninchen“
	Rentiere	--- [c]
	Strauße	„Strauße“
	Pelztiere	„Pelztiere“

[a] Im deutschen Inventar wurden Büffel bis 2012 den Mutterkühen zugeschlagen, ab 2013 sind Büffel nicht separierbar in den amtlichen Tierzahlen der übrigen Rinder und Milchkühe enthalten. Für Details siehe Kapitel 2.3.1 in Vos et al. (2026),

[b] Zur Definition von Milch- und Schlachtfärsen siehe Vos et al. (2026), Kapitel 2.2.

[c] Diese Tiere kommen in Deutschland nicht vor.

[d] Im deutschen Inventar wurden Esel und Maultiere bis 2009 den Kleinpferden und Ponys zugeschlagen, ab 2010 sind sie nicht separierbar in den amtlichen Tierzahlen der Pferde enthalten.

5.1.3.2 Tierplatzzahlen (3.A, 3.B)

Das Inventarmodell Py-GAS-EM rechnet in jährlichen Zeitschritten. Mögliche interanuelle Schwankungen u. a. der Tierpopulationen können nicht abgebildet werden. Das deutsche Inventar beruht daher auf der Annahme, dass die durch die Offizialstatistik an einem bestimmten Stichtag (siehe Kapitel 5.1.3.2.1) vorgefundenen Anzahlen besetzter und unbesetzer Tierplätze während eines Jahres konstant sind. Es lässt sich zeigen, dass mit diesem Konzept bei Tierkategorien mit Lebensdauern unter einem Jahr der zwischen zwei Produktionszyklen vorkommende Leerstand korrekt berücksichtigt ist, siehe Kap. 1.1.2.2 in Vos et al. (2026).

Die am Stichtag vorgefundenen Anzahlen besetzter Tierplätze werden für die Inventarberechnungen als Tierzahlen interpretiert. Dies entspricht der AAP-Definition („average annual population“) in IPCC (2006b Vol 4, Section 10.2.2): Vol. 4, Section 10.2.2., welche auch von EMEP übernommen wurde (s. (EMEP, 2023) 3B-13).

5.1.3.2.1 Erhebungen durch die statistischen Ämter des Bundes und der Länder

Das Statistische Bundesamt und die statistischen Landesämter führen Agrarstrukturerhebungen durch, bei denen zusammen mit anderen Daten die Tierzahlen für Rinder, Schweine, Schafe, Pferde (ab 2010: Equiden) und Geflügel erfasst werden. Diese Agrarstrukturerhebungen fanden 1990 - 1996 und 1999 - 2007 jedes zweite Jahr statt, 2010 im Rahmen der umfangreicheren Landwirtschaftszählung 2010 (StBA, 2010) sowie in den Jahren 2013, 2016,2020 und 2023. Die Erhebungen 1990, 1992, 1994 und 1996 erfolgten am 3. Dezember, während der Stichtag in den Jahren 1999 - 2007 am 3. Mai und in den Jahren 2010, 2013, 2016, 2020 und 2023 am 1. März war.

Neben den Agrarstrukturerhebungen finden jährlich Viehbestandserhebungen statt (Statistisches Bundesamt, FS 3, R 4.1). Bis 1998 einschließlich erfolgten diese Erhebungen halbjährlich für Rinder und Schafe (Juni, Dezember), viermonatlich für Schweine (April, August, Dezember), sowie alle zwei Jahre im Dezember der geraden Jahre für alle Tierarten, d. h. auch

für Pferde und Geflügel. Stichtag war jeweils der dritte Kalendertag im Monat. Seit 1999 erfolgt die Viehbestandserhebung für Rinder und Schweine zweimal jährlich zum Stichtag 3. Mai und 3. November. Für Schafe gilt 1999 bis 2009 der Stichtag 3. Mai und ab 2011 der 3. November, während 2010 die Erhebung am 1. März erfolgte.

Für Rinder, Schweine und Schafe liegen somit für alle Jahre seit 1990 Tierzahlen aus offiziellen Erhebungen vor. Dabei wurden im Inventar bis 1998 einschließlich die Daten von Dezember (für Schafe im Juni) und danach bis 2010 einschließlich die Daten von Mai verwendet (Schafe 2010: 1. März, da weder Mai- noch November-Daten verfügbar waren), während in Absprache mit dem Statistischen Bundesamt ab 2011 der November-Stichtag zu verwenden ist (European Parliament (EP), 2008 Article 4). Diese Zahlen entsprechen den vom Statistischen Bundesamt an EUROSTAT übermittelten Zahlen. Der Wechsel des Stichtages zum 3. November hat bei Rindern und Schweinen keinen signifikanten Einfluss auf die Tierzahlen. Bei den Schafzahlen erwies sich dagegen eine Tierzahlkorrektur als erforderlich, siehe Kapitel 5.1.3.2.2.

Die Anzahl der Ziegen in Deutschland wurde zwischen den Jahren 1977 und 2010 nicht erfasst. Bis 2004 schätzte das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) die Ziegenzahlen auf nationaler Ebene. Diese Zeitreihe wurde ab 2005 durch Schätzungen des Statistischen Bundesamtes ergänzt. Die 2010 im Rahmen der Landwirtschaftszählung 2010 (StBA, 2010) erstmalig wieder offiziell erfasste Gesamtzahl der Ziegen (Stichtag 1. März) liegt deutlich unter den Schätzungen der Vorjahre. Diese Schätzungen, die auch an EUROSTAT berichtet wurden, werden nach Abstimmung mit dem Statistischen Bundesamt weiter im Inventar verwendet. Für 2013, 2016, 2020 und 2023 liegen offiziell erhobene Ziegenzahlen des Statistischen Bundesamtes vor (Stichtag 1. März).

Für Pferde bzw. Equiden und Geflügel sind Tierzahlen nur alle zwei bis drei Jahre aus den Agrarstrukturerhebungen verfügbar (Stichtage: bis 1998 einschließlich 3. Dezember, 1999 – 2007 der 3. Mai, sowie der 1. März in den Jahren 2010, 2013, 2016, 2020 und 2023). Es erfolgten in Absprache mit dem Statistischen Bundesamt keine Tierzahlkorrekturen wegen der variierenden Stichtage.

Der Erhebung der Geflügelzahlen 2013 durch das Statistische Bundesamt und die Statistischen Landesämter lag eine Berichtskreisrevision zugrunde. Diese war erforderlich geworden, da in den Erhebungen zuvor (letztmalig 2010) aufgrund der seinerzeitigen Regeln zur Auswahl der zu befragenden Betriebe größere Geflügelbestände nicht erfasst wurden. Die 2013 erhobenen Geflügelzahlen sind damit deutlich höher, als dies aufgrund der Erhebungen in den Jahren zuvor zu erwarten war. Da das Statistische Bundesamt die offiziellen Geflügelzahlen der Vorjahre bis 2010 nicht korrigiert, weisen sie zwischen 2010 und 2013 einen markanten Anstieg auf, der nicht die reale Entwicklung der Geflügelzahlen abbildet. Seit Submission 2024 werden die Geflügelzahlen vor 2013 daher nach oben korrigiert (s.u.).

Für die Tierkategorien Gehegewild, Kaninchen, Straußen und Pelztiere existieren keine durch die statistischen Ämter des Bundes und der Länder erhobenen Tierzahlen. Diese werden anderweitig abgeleitet, siehe dazu Vos et al. (2026), Kapitel 2.3.5.

Für die Inventarberechnung mussten die Datenlücken geschlossen und die verfügbaren Tierplatzzahlen teilweise modifiziert werden, um den Erfordernissen der Emissionsberichterstattung zu entsprechen. Hierauf sowie auf die Berücksichtigung von Büffeln, Eseln und Maultieren geht Kapitel 5.1.3.2.2 ein.

5.1.3.2.2 Besonderheiten der Tierplatzzahlen im Inventar

Die Rinderbestände werden seit dem Jahr 2008 aus der Datenbank HIT (StMELF, diverse Jahrgänge) des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten

(StMELF) entnommen, in der jedes Rind registriert ist. Als Folge der neuen Erhebungsmethode ergeben sich für die Jahre ab 2008 allerdings systematisch höhere Tierzahlen als in den Jahren zuvor, in denen aufgrund von Erfassungsgrenzen nicht alle Tiere berücksichtigt wurden. Ein Vergleich des Statistischen Bundesamtes für das Jahr 2007 zeigt, dass die Rinderzahlen aus HIT 2,9 % höher als nach der herkömmlichen Erhebungsmethode sind (für Milchkühe allein 2,8 %). Laut Statistischem Bundesamt werden die Rinderzeitreihen vor 2008 nicht nachträglich angepasst. Als Folge werden die Emissionen aus der Rinderhaltung in den Jahren 1990 bis 2007 leicht unterschätzt. Zahlen der Milchkühe und männlichen Rinder > 2 Jahre werden direkt aus der Statistik entnommen. Die Zahl der Mutterkühe enthält bis 2007 auch die Zahl der Schlacht- und Mastkühe (danach wurde diese Kategorie nicht mehr separat erhoben). Die Kälber umfassen im Inventar nur Kälber bis zum Alter von 4 Monaten. In der Statistik werden Kälber aber bis zum Alter von 8 Monaten erfasst (vor 2008 bis zum Alter von 6 Monaten). Daher mussten hier Tierzahlen aus den restlichen Kategorien aus der amtlichen Statistik umgerechechnet werden, was auch Auswirkungen auf die Anzahl der Mastbullen, Schlachtfärsen und der Milchfärsen im Inventar hat (zur Definition von Milch- und Schlachtfärsen siehe Kapitel 2.2 in Vos et al. (2026). Die Gesamtzahl der übrigen Rinder im Inventar entspricht dabei aber immer der Gesamtzahl der erhobenen übrigen Rinder. Zu Details dazu siehe Kap. 2.3.1 in Vos et al. (2026).

Ab Zeitreihenjahr 2013 umfassen die vom Statistischen Bundesamt nach verschiedenen Kategorien (Kalb, Färse, Kuh, etc.) berichteten Rinderzahlen zusätzlich auch eine Aufteilung der Gesamtrinderzahl in Rassen. Darin wird auch die Summe der Bisons und Büffel genannt. Es ist aber nicht möglich, diese Summe so aufzulösen, dass sie auf die verschiedenen Kategorien (Kalb, Färse, Kuh, etc.) aufgeteilt werden könnte (Spielmanns, 2020). Somit gibt es keine Möglichkeit, die Büffel aus den o. g. Rinderzahlen herauszurechnen. Aus diesem Grund werden die Büffel im Inventar seit Submission 2015 nicht mehr als eigenständige Kategorie geführt (included elsewhere, IE); ihre Emissionen sind in den Emissionen der Rinder enthalten. Dazu war es allerdings erforderlich, auch für die Jahre vor 2013 eine Zuordnung der Büffel zu den Rindern zu finden. Zwar hat das Statistische Bundesamt für diesen Zeitraum keine Büffelzahlen veröffentlicht; die Lücke 2000 bis 2012 konnte aber durch Angaben des Deutschen Büffelverbandes geschlossen werden, siehe Kapitel 2.3.1 in Vos et al. (2026). Aufgrund der Empfehlung im Abschlussbericht zum „Initial Review under the Kyoto Protocol and Annual 2006 Review under the Convention“ wurde die Zeitreihe der Büffel-Population auf nationaler Ebene für die Jahre vor 2000 durch lineare Extrapolation der Daten der Jahre 2000 bis 2012 vervollständigt. (Für die Jahre 1990 bis 1995 ergaben sich rechnerisch negative Büffelzahlen, die durch Nullen ersetzt wurden.) Da für alle Jahre bis 2012 Informationen über die Struktur der Büffelpopulation fehlen, wurden für diesen Zeitraum alle Büffel der Rinderkategorie „Mutterkühe“ zugeschlagen. Die Berechtigung dieses Vorgehens wird in Kapitel 2.3.1 in Vos et al. (2026) nachgewiesen. Die Fehler, die mit der vorstehend beschriebenen Berücksichtigung der Büffel bei den Rindern möglicherweise verbundenen sind, werden als vernachlässigbar eingeschätzt, da das Verhältnis von Büffel- zu Rinderzahlen für die gesamte Zeitreihe ab 1990 zwischen null und einer Größenordnung von kleiner 0,1 % liegt (siehe Kapitel 2.3.1 in Vos et al. (2026)).

Auch bei den Schweinen wurden einige der in den amtlichen Erhebungen verwendeten Kategorien modifiziert, um möglichst homogene Tierkategorien zu bilden. Die offiziellen Tierzahlen für Ferkel bis 20 kg Tier^{-1} sowie Jung- und Mastschweine ab 20 kg Tier^{-1} werden nach dem in Haenel et al. (2011) beschriebenen Verfahren zu Tierzahlen für die Inventarkategorien „Aufzuchtferkel“ und „Mastschweine“ umgerechnet. Diese Umrechnung bleibt ohne Auswirkung auf die Gesamtzahl der Schweine. Letztere wird für die Emissionsberechnung allerdings um die Zahl der Ferkel verringert, die bis 8 kg wiegen. Dieses Vorgehen beruht auf dem

Inventarkonzept, dass Ferkel bis 8 kg als Saugferkel zu werten sind, deren Emissionen in den Emissionen der Altsauen enthalten sind.

Bei den Schafen werden für alle Jahre ab 2010 die amtlichen Schafzahlen korrigiert, siehe Kap. 2.3.4 in Vos et al. (2026). Grund ist der Wechsel des Erhebungstermins vom Frühjahr (bis 2009 Mai bzw. Juni) zum 1. März (2010) bzw. zum 3. November (seit 2011). Die mit diesem Wechsel verbundene scheinbare Abnahme der Lämmer (und damit der Schafe-Gesamtzahl) wird durch die Korrektur ausgeglichen.

Die amtlichen Ziegenzahlen für 2010, 2013, 2016, 2020 und 2023 wurden dazu verwendet, die nicht verfügbaren Zahlen in den dazwischen liegenden Jahren durch lineare Interpolation zu schätzen. Die Tierzahlen für 2024 wurden durch lineare Extrapolation des Trends zwischen 2020 und 2023 geschätzt.

Die Pferdezahlen werden im Inventar zur Berücksichtigung unterschiedlichen Emissionsverhaltens in „Großpferde“ und „Kleinpferde und Ponys“ unterteilt. In der Landwirtschaftszählung 2010 sowie den Zählungen 2013, 2016, 2020 und 2023 wurden statt Pferdezahlen Equidenzahlen erhoben. Deren Zahl schließt in nicht separierbarer Weise Esel und Maultiere ein (included elsewhere, IE). Seit Submission 2015 entfällt daher im Inventar die separate Kategorie „Esel und Maultiere“. Die Zahl der Esel- und Maultiere wurde bis zum Jahr 2009 zu der Zahl der Kleinpferde und Ponys addiert. Diese Zahl wurde nach Daten der IGEM (Schmutz, 2009) auf 8.500 Esel und Maultiere pro Jahr geschätzt. Datenlücken innerhalb der Pferdezeitreihe wurden durch lineare Interpolation geschlossen. Die Tieranzahl für 2024 wurden durch lineare Extrapolation des Trends zwischen 2020 und 2023 geschätzt. Die Pferdezahlen der amtlichen Statistik umfassen nur die Pferde, die auf landwirtschaftlichen Betrieben gehalten werden. Die Anzahl der tatsächlich gehaltenen Pferde in Deutschland ist deutlich höher. Laut einer repräsentativen Studie von IPSOS (IPSOS, 2019) lag im Jahr 2019 die Anzahl der Pferde in Deutschland bei ca. 1.247.000. Das ist etwa das 2,75- fache der in der landwirtschaftlichen Statistik erfassten Tiere zu dieser Zeit. In einer Vorgängerstudie aus dem Jahr 2001 (IPSOS, 2001) wird eine Pferdezahl von deutlich mehr als 1 Mio Pferde und Ponys hochgerechnet. Seit Submission 2025 werden die aus der landwirtschaftlichen Statistik abgeleiteten Pferdezahlen für die gesamte Zeitreihe mit dem Faktor 2,75 multipliziert um eine Unterschätzung der Pferdeemissionen zu vermeiden.

Junghennen wurden bis 2007 entgegen der Haltungspraxis (Aufstallung als Legehenne bereits nach der 18. Woche, wie es im Inventar auch berücksichtigt ist) offiziell bis zu einem Alter von 6 Monaten gezählt. Daher wurde für das Inventar ein Teil der Junghennen in die Legehennen-Kategorie verschoben, wobei die Gesamtsumme aus Jung- und Legehennen nicht verändert wurde, siehe Kap. 2.3.3 in Vos et al. (2026). Die nächste Geflügelzählung nach 2007 fand 2010 statt. Ab dieser Zählung entfällt die Umrechnung zwischen Junghennen und Legehennen, da die Tierzahlen entsprechend der Haltungspraxis erhoben wurden.

Die Korrektur der Geflügelzahlen vor 2013 (s. o.) wurde für die Tierkategorien Legehennen, Junghennen und Masthähnchen im Bundesland Niedersachsen durchgeführt, da die großen, bis 2013 nicht in den Geflügelzählungen erfassten Betriebe, fast ausschließlich in Niedersachsen ansässig sind. In einem ersten Schritt wurde die Geflügelzahl für das Jahr 2010 korrigiert, indem der Trend zwischen den Erhebungsjahren 2013 und 2016 auch für die Periode zwischen den Erhebungsjahren 2010 und 2013 angenommen wurde. Die so ermittelte Gefülgelzahl für 2010 wurde als wahr angenommen und der Faktor f_{2010} zwischen korrigierter und erhobener Geflügelzahl 2010 ermittelt. f_{2010} liegt für Legehennen bei etwa 1,6, für Junghennen bei etwa 2,2 und für Masthähnchen bei etwa 1,8. Die Geflügelzahlen, die für 1990 erhoben wurden, wurden als wahr angenommen, da es zu dieser Zeit wahrscheinlich noch keine großen, in der Statistik

nicht erfassten, Betriebe gab. Für das Jahr 1990 liegt der Faktor f_{1990} zwischen korrigierter und erfasster Geflügelzahl demnach jeweils bei 1. Für die dazwischen liegenden Erhebungsjahre (1992, 1994, 1996, 1999, 2003 und 2007) wurden entsprechende Faktoren durch lineare Interpolation zwischen 1 (f_{1990}) und dem jeweiligen f_{2010} bestimmt und mit diesem Faktor die jeweils erhobene Tierzahl multipliziert.

Für alle Geflügelkategorien wurden die Lücken in den Tierzahlzeitreihen durch lineare Interpolation geschlossen. Außer bei den Legehennen wurden für 2024 die Werte von 2023 beibehalten. Bei Legehennen wurden die Tierzahlen für 2024 auf Grundlage der Zahlen für 2023 und der Trends der vom Statistischem Bundesamt veröffentlichten Zahlen der Haltungsplätze geschätzt.

Die offiziell erhobenen Putenzahlen wurden im Inventar zur Berücksichtigung unterschiedlichen Wachstums für alle Jahre seit 1990 in Hähne und Hennen aufgeteilt.

5.1.3.2.3 Im Inventar verwendete Tierplatzzahlen (3.A, 3.B)

Die der deutschen Berichterstattung zugrunde liegenden Tierplatzzahlen sind in Tabelle 211 zusammengestellt. Die aufgelisteten Jahre entsprechen den Jahren, die in nachfolgenden Kapiteln bei Zeitreihendarstellungen verwendet werden. Die vollständige Zeitreihe der Tierzahlen findet sich in Kapitel 2.3 in Vos et al. (2026). Die starke Abnahme der Tierzahlen zu Beginn der 1990er Jahre ist eine direkte Folge des Strukturwandels in der deutschen Landwirtschaft nach der Wiedervereinigung, insbesondere in Ostdeutschland wurden große Tierbestände abgestockt. Seit 2017 haben die Zahlen der Milchkühe und der übrigen Rinder deutlich abgenommen. Auch bei den Schweinen ist eine merkliche Abnahme seit 2017 festzustellen nachdem es in den Jahren zuvor keinen einheitlichen Trend gab. Für Milchkühe und übrige Rinder sind die Tierzahlen des Jahres 2024 die niedrigsten im gesamten betrachteten Zeitraum seit 1990. Für Schweine sind es die des Jahres 2023. Die Ursache für diesen Rückgang kann nicht eindeutig ermittelt werden. Mögliche Gründe sind z.B. ungünstige ökonomische Rahmenbedingungen, der Futtermangel aufgrund der verbreiteten Trockenheit in Deutschland in den Jahren 2018 bis 2020 oder eine Reaktion der Landwirte auf die Verschärfungen der Vorschriften in der neuen Düngeverordnung (DüV, 2017). Die Schafzahlen sind seit 2015 in etwa konstant. Die Ziegenzahlen zeigen seit 2014 einen leicht zunehmenden Trend, ebenso die Pferdezahlen seit 2016. Die Geflügelzahlen sind seit 2016 etwa auf einem Niveau geblieben.

Zu den Unsicherheiten der Tierzahlen siehe Tabelle 250 in Kapitel 5.1.6.

Tabelle 211: Zahl der in die Berichterstattung eingehenden Tierplätze (3.A, 3.B), in 1.000

	Milchkühe	übrige Rinder	Schweine	Schafe	Ziegen	Pferde	Geflügel	Gehegewild	Kaninchen	Strauße	Pelztiere
1990	6.355	13.133	26.502	3.266	90	1.373	113.879	156	1.851	0	180
1995	5.229	10.661	20.387	2.991	100	1.744	119.644	204	1.566	1	180
2000	4.570	9.969	21.768	2.743	140	1.374	139.218	252	1.269	2	180
2005	4.236	8.800	22.743	2.643	170	1.398	149.030	262	997	4	153
2010	4.183	8.629	22.244	2.245	150	1.270	169.704	270	864	5	122
2015	4.285	8.351	22.979	1.867	136	1.233	174.827	277	721	8	34
2016	4.218	8.249	22.761	1.851	139	1.215	173.574	279	691	7	25
2017	4.199	8.082	22.921	1.863	143	1.223	173.468	280	643	7	15
2018	4.101	7.848	22.019	1.846	147	1.231	173.361	282	608	8	5
2019	4.012	7.628	21.626	1.814	151	1.240	173.255	283	594	7	5
2020	3.921	7.380	21.622	1.780	155	1.248	173.148	285	548	8	0

	Milchkühe	übrige Rinder	Schweine	Schafe	Ziegen	Pferde	Geflügel	Gehegewild	Kaninchen	Strauße	Pelztiere
2021	3.833	7.207	19.729	1.795	157	1.278	171.201	286	470	6	0
2022	3.810	7.187	17.692	1.806	160	1.308	169.255	288	431	5	0
2023	3.713	7.123	17.525	1.848	163	1.338	167.308	289	423	5	0
2024	3.589	6.872	17.643	1.824	165	1.368	167.583	291	422	4	0

5.1.3.2.4 Vergleich mit Tierzahlen der FAO (3.A, 3.B)

Die Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (FAO) veröffentlicht weltweite Tierzahlen in ihrer Internetdatenbank FAOSTAT (FAO, 2024). Die deutschen Angaben in FAOSTAT stammen grundsätzlich vom Statistischen Bundesamt in Deutschland, der Datenquelle, die auch Grundlage für das deutsche Inventar ist. Dennoch ergibt für Rinder, Schweine, Schafe, Ziegen, Pferde und Geflügel der Vergleich der Daten von FAOSTAT (Stand 15.08.2024: Zeitreihe bis 2022 für Geflügel und Pferde nur bis 2017, bei Geflügel zusätzlich Daten für 2020) und der in Submission 2025 verwendeten Daten zahlreiche Abweichungen: Zwischen 1990 und 2022 stimmen weniger als 15 % der FAOSTAT-Angaben mit den deutschen Daten überein (wenn dabei auch auf ganze 100 Tiere gerundete Zahlen berücksichtigt werden).

Hauptgründe für die zum Teil großen Unterschiede zwischen FAOSTAT und den deutschen Daten sind vor allem Einträge in FAOSTAT unter falschen Jahren und eine unsystematisch erscheinende Vorgehensweise bei der Schließung von Datenlücken in FAOSTAT.

Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse des Datenvergleichs aufgelistet.

Rinder: Die FAOSTAT-Tierzahlen stimmen nur in den Jahren 2014 – 2022 mit den offiziellen deutschen Daten überein. Vor dem Jahr 2000 sind die FAOSTAT-Zahlen um ein Jahr verschoben gegenüber den deutschen Zahlen. So steht z. B. in FAOSTAT unter 1999 die deutsche Rinderzahl von 1998. In den Jahren 2011 – 2013 enthält FAOSTAT die Daten der Mai-Zählung, während das Inventar aufgrund einer EU-Vorgabe (siehe Kapitel 5.1.3.2.1) die Daten der November-Zählung verwendet.

Schweine: Die FAOSTAT-Schweinezahlen sind generell nicht mit den Schweinezahlen im Inventar zu vergleichen, da im Inventar aus methodischen Gründen die Zahl der Ferkel mit einem Gewicht kleiner aus 8 kg abgezogen wird (siehe Kapitel 5.1.3.2.2). Vergleicht man die FAOSTAT-Zahlen daher mit den Schweinezahlen des Statistischen Bundesamtes *vor Abzug* der Saugferkel, so findet sich wie bei den Rindern in den FAOSTAT-Zahlen vor 2000 eine fehlerhafte Verschiebung um ein Jahr. Mit Ausnahme der Jahre 2011 – 2013, in denen die FAOSTAT-Zahlen der Mai-Zählung entsprechen, während das Inventar aufgrund einer EU-Vorgabe (siehe Kapitel 5.1.3.2.1) mit den Daten der November-Zählung rechnet, besteht eine große Ähnlichkeit zwischen den Tierzahlzeitreihen.

Schafe: In den Jahren 1991, 1993 – 2000 und 2005 - 2009 sind die FAOSTAT-Zahlen den Daten des Statistischen Bundesamtes sehr ähnlich; eine Übereinstimmung (unter Berücksichtigung der Rundung auf 100 Tierplätze) liegt aber nur für die Jahre 2007 – 2009 vor. In den Jahren 1990, 1992, 1993 sowie 2001 – 2004 gibt es z. T. größere Abweichungen, die mit vorliegenden Informationen nicht erklärbar sind. Ab 2010 ist ein Vergleich der beiden Zeitreihen nicht möglich, da im Inventar die offiziell erhobenen Schafzahlen korrigiert werden (siehe Kapitel 5.1.3.2.2).

Ziegen: Die FAOSTAT-Ziegenzahlen sind für die Jahre 1991 - 2002 einschließlich gegenüber den deutschen Zahlen um ein Jahr versetzt. So gibt z. B. die FAOSTAT-Ziegenzahl 1991 die deutsche Ziegenzahl von 1990 wieder. Für die Jahre 1990, 2003, 2005, 2007, 2008, 2013 und 2016 stimmen die FAOSTAT-Zahlen mit den deutschen Zahlen überein. In den Jahren dazwischen, in

denen Deutschland keine Daten erhoben bzw. geschätzt hat, gibt FAOSTAT Daten an, die ihrerseits geschätzt sein müssen, obwohl es sich laut FAOSTAT um offizielle Daten handeln soll. Diese Schätzungen sind insbesondere ab dem Jahr 2011 unplausibel, da sie den durch lineare Interpolation zwischen den Stützjahren geschätzen Trends zuwider laufen.

Pferde (incl. Esel und Maultiere): Die FAOSTAT-Zahlen vor 2010 geben nur die reinen Pferdezahlen ohne Esel und Maultiere wieder. Zieht man daher für einen Vergleich bei den unkorrigierten Inventarzahlen (ohne Multipliktion mit 2,75), die hinzuaddierten Esel und Maultiere (siehe Kapitel 5.1.3.2.2) ab, so ergibt sich, dass die FAOSTAT-Zahlen den deutschen Zahlen bis zum Jahr 2004 um ein Jahr hinterherlaufen, wobei sich allerdings häufig auch die Höhe der Tierzahlen zwischen FAOSTAT und offizieller deutscher Statistik unterscheidet. Ab 2005 gibt es eine Übereinstimmung zwischen FAOSTAT und den deutschen Daten nur für die Jahre 2013 und 2016. Nach 2017 enthält FAOSTAT keine Pferdezahlen für Deutschland. In denjenigen Jahren zwischen 2005 und 2016, in denen Deutschland keine Daten erhoben hat, zeigen die FAOSTAT-Schätzungen wie bei den Ziegen einen unplausiblen zeitlichen Verlauf.

Geflügel: In fast allen Jahren mit Tierzählungen stimmen die FAO Geflügelzahlen weitgehend mit den unkorrigierten Geflügelzahlen überein (1994, 1999, 2003, 2005, 2007, 2010, 2013, 2016 und 2020, nach 2020 und zwischen 2017 und 2020 enthält FAOSTAT keine Geflügelzahlen für Deutschland). Die Ergebnisse der Zählungen der Jahre 1990, 1996 und 2001 sind in FAOSTAT fälschlich im darauffolgenden Jahr eingetragen. Die Schließung der Datenlücken ab 2010 in FAOSTAT ist ähnlich unplausibel wie bei Ziegen und Pferden, woraus sich ein erratischer Zeitverlauf ab 2010 ergibt.

5.1.3.3 Leistungs-, Energie- und Futterdaten (3.A, 3.B)

Aufgrund von Qualitätssicherungsmaßnahmen und der Verfügbarkeit aktualisierter Eingangsdaten wurden gegenüber der Submission des Vorjahres Änderungen vorgenommen, die die Eingangsdaten, Leistung, den Energiebedarf und die Futteraufnahme betreffen. Die bzgl. Ihrer Auswirkung relevanten Änderungen finden sich in Kapitel 5.1.7.3.

Tabelle 212 zeigt die mittleren Tiergewichte für Milchkühe, übrige Rinder, Schweine und Geflügel. Das mittlere Tiergewicht der Milchkühe ergibt sich aus Anfangs- und Endgewichten (mit der Tierzahl gewichtet gemittelt über die Bundesländer), siehe Kap. 2.4.1 in Vos et al. (2026). Zur Berechnung der mittleren Tiergewichte von übrigen Rindern, Schweinen und Geflügel siehe ebenfalls Kap. 2.4.1 in Vos et al. (2026).

Tabelle 212: Mittlere Tiergewichte (3.A, 3.B), in kg/Tier

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Milchkühe	566,9	581,9	591,1	592,3	592,6	587,7	584,4	587,3	588,4	595,5	601,3	603,4	600,1	603,8	605,0
übrige Rinder	316,3	328,6	338,1	334,9	337,1	335,3	335,6	336,1	337,7	340,5	342,2	343,0	343,9	346,1	347,6
Schweine	73,9	76,7	75,7	75,7	74,6	73,2	73,3	73,2	73,6	73,5	73,4	74,8	73,8	73,7	74,3
Geflügel	1,61	1,57	1,60	1,64	1,62	1,70	1,70	1,69	1,69	1,68	1,68	1,65	1,62	1,60	1,60

Die Tiergewichte von Schafen, Ziegen und Pferden gehen nicht direkt in die Emissionsberechnungen ein, wurden aber für CRF-3.B geschätzt: Schafe 50 kg $Tier^{-1}$, Ziegen 40 kg $Tier^{-1}$ und Pferde 490 kg $Tier^{-1}$, siehe Kap. 2.4.1 in Vos et al. (2026).

Tabelle 213 zeigt die für Deutschland gemittelte tägliche Milchleistung bei Milchkühen, die der jährlichen Milchleistung dividiert durch 365 Tage entspricht.

Tabelle 213: Mittlere tägliche Milchleistung bei Milchkühen (3.A, 3.B), in kg/Tage

1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
13,4	15,4	17,3	19,2	20,2	21,6	22,0	22,0	22,9	23,4	24,0	24,0	24,0	25,1	25,9

Bei Milchkühen, Milch- und Schlachtfärsen, Mastbullen, Mutterkühen, Sauen, Aufzuchtferkeln und Mastschweinen wird die Aufnahme der Gesamtenergie (GE) leistungsabhängig berechnet. Siehe dazu Kapitel 2.4.5 in Vos et al. (2026). Die Berechnung beruht auf dem IPCC-Konzept (IPCC (2006b Vol 4, Chapter 10.2.2)), dass die Fütterung den tierischen Energiebedarf genau deckt. Der Energiebedarf wird bei der Milchkuh in der Einheit „Netto Energie Laktation (NEL)“ angegeben (siehe Kirchgessner et al. (2008)), während bei den anderen Tieren mit Energiebedarfsberechnung im deutschen Inventar die Einheit „Umsetzbare Energie (ME, metabolic energy)“ verwendet wird (siehe z. B. Gesellschaft für Ernährungsphysiologie (2006)).

Der NEL- bzw. ME-Bedarf umfasst alle erforderlichen Teilbedarfe (Erhaltung, Wachstum, Nachkommen und Produkte, Weidegang), soweit sie für die jeweilige Tierkategorie relevant sind. Aus dem Energiebedarf und dem mittleren NEL- bzw. ME-Energiegehalt des Futters wird ermittelt, welche Menge Futter bei gegebener Futterzusammensetzung zur Deckung des NEL- bzw. ME-Energiebedarfs aufgenommen wird. Aus der aufgenommenen Futtermenge und dem mittleren GE-Gehalt des Futters wird die vom Tier aufgenommene Gesamtenergie GE berechnet.

Bei der GE-Aufnahme von Ebern handelt es sich um einen Standardwert, bei Kälbern und männlichen Rindern ab 2 Jahren wird die GE-Aufnahme aus Standardwerten der ME-Aufnahme abgeleitet. Siehe dazu Kapitel 2.4.5 in Vos et al. (2026). Für die übrigen Tierkategorien (Schafe, Ziegen, Pferde, Geflügel, Gehegewild, Kaninchen, Straußen und Pelztiere) wird keine GE-Aufnahme ermittelt.

Tabelle 214 zeigt für Milchkühe, übrige Rinder sowie Schweine die tägliche Gesamtenergie-Aufnahme GE.

Tabelle 214: Mittlere tägliche Gesamtenergie-Aufnahme (GE) (3.A), in MJ / Platz

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Milchkühe	246,7	270,2	289,7	306,0	315,0	325,4	329,0	329,1	336,2	343,7	349,6	350,8	347,8	359,4	366,0
übrige Rinder	100,1	104,0	106,9	106,6	108,1	108,2	108,2	108,6	109,0	110,0	110,9	111,7	111,5	112,1	112,6
Schweine	30,4	32,0	32,8	33,0	33,5	34,7	35,0	35,2	35,5	35,6	35,9	36,4	36,3	36,5	37,1

Tabelle 215 bis Tabelle 217 zeigen für Milchkühe, übrige Rinder und Schweine die Eingangsdaten für die VS-Berechnung, die der Berechnung der CH_4-Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management (siehe Kapitel 5.3.2.2.1) zugrunde liegt. Es handelt sich um Trockenmasseaufnahme, Verdaulichkeit organischer Substanz und Aschegehalt des Futters. Zu Details der Trockenmasseaufnahme wird auf Kapitel 2.4.6 in Vos et al. (2026) verwiesen. Für Schafe, Ziegen, Pferde, Gänse, Gehegewild, Kaninchen, Straußen und Pelztiere erfolgt mangels Daten zur Fütterung keine Bestimmung der Trockenmasseaufnahme. Es sind auch keine Standardwerte verfügbar, so dass die VS-Ausscheidungswerte auf andere Weise gewonnen werden, siehe Kapitel 5.1.3.5.

Tabelle 215: Tägliche Trockenmasseaufnahme (3.B), in kg / Platz

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Milchkühe	13,5	14,8	15,8	16,7	17,2	17,7	17,9	17,9	18,3	18,7	19,0	19,0	18,9	19,5	19,8
übrige Rinder	5,5	5,7	5,8	5,8	5,9	5,9	5,9	5,9	6,0	6,0	6,1	6,1	6,1	6,1	6,2
Schweine	1,6	1,7	1,8	1,8	1,8	1,9	1,9	1,9	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0

Die Ermittlung von mittlerer Verdaulichkeit und mittlerem Aschegehalt des Futters beruht zum überwiegenden Teil auf deutschen Standardwerten für die einzelnen Futterkomponenten (DLG, 2005, 2014), ergänzt um Experteninformationen (Spiekers, 2019). Fehlende Daten wurden anhand anderer Quellen geschätzt (u. a. Beyer and Jentsch (2004); Herstellerangaben).

Tabelle 216: Verdaulichkeit von organischer Substanz im Futter (3.B), in %

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Milchkühe	75,5	75,4	75,6	75,9	75,8	75,8	75,8	75,8	75,9	76,0	76,0	76,1	76,0	76,2	76,3
übrige Rinder	74,5	74,3	74,1	74,2	74,1	74,1	74,1	74,1	74,1	74,0	74,0	74,0	74,0	73,9	73,9
Schweine	82,9	82,9	82,9	83,6	84,3	84,4	84,4	84,4	84,4	84,4	84,4	84,4	84,4	84,4	84,4

Tabelle 217: Aschegehalt des Futters (3.B), in kg/kg

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Milchkühe	0,084	0,084	0,083	0,082	0,078	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	0,074	0,074	0,074	0,074	0,074
übrige Rinder	0,089	0,090	0,090	0,090	0,089	0,088	0,088	0,088	0,088	0,087	0,087	0,087	0,087	0,087	0,087
Schweine	0,057	0,057	0,048	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046	0,046

Weitere Angaben zur Tierhaltung, z. B. zu Ausscheidungen (N, VS), finden sich in den nachfolgenden Kapiteln.

In keinem der verwendeten Tiermodelle wird die mittlere prozentuale Trächtigkeit als Eingangsgröße verwendet. Sie wird der Vollständigkeit halber für Rinder in CRT-Tabelle 3.A berichtet.

5.1.3.4 N-Ausscheidungen (3.B)

Die Ermittlung der N-Ausscheidungen wird in Kapitel 4.1.2 in (Vos et al., 2026) beschrieben.

Bei Milchkühen, Milch- und Schlachtfärsen, Mastbullen, Mutterkühen, Schweinen (außer den Ebern), Legehennen, Junghennen, Masthähnchen und -hühnchen, Enten sowie Putenhähnen und Putenhennen werden die N-Ausscheidungen leistungsabhängig berechnet, während für die übrigen Tiere die N-Ausscheidungswerte aus der deutschen Fachliteratur entnommen oder abgeleitet werden.

Die leistungsabhängige Berechnung der N-Ausscheidung basiert, außer bei Milchkühen, auf der Annahme einer Fütterung, die genau den Energiebedarf deckt (siehe Kapitel 5.1.3.3). Die vom Tier aufgenommene N-Menge ergibt sich aus der aufgenommenen Futtermenge und dem mittleren N-Gehalt der Futterration, der den nationalen Fütterungsempfehlungen entspricht. Von der aufgenommenen N-Menge werden die wachstumsbedingte N-Retention, die N-Abgabe über Produkte (Milch/Eier) sowie die N-Verluste durch Trächtigkeit/Nachwuchs abgezogen. Die verbleibende N-Menge ist die N-Ausscheidung.

Die Stickstoffausscheidung von Milchkühen wird seit Submission 2026 basierend auf der Milchleistung, dem Milchharnstoffgehalt und dem Milchproteingehalt der Kuh modelliert. Die Milchinhaltstoffe werden in Deutschland repräsentativ im Rahmen der Milchleistungsprüfung erfasst und anonymisierte einzelbetriebliche Daten wurden durch die Landeskontrollverbände bereitgestellt. Der Modellansatz ist in Honig et al. (2024) beschrieben: Milchkühe scheiden überschüssigen Stickstoff hauptsächlich als Harnstoff über den Urin aus. Der Harnstoffgehalt im Urin steht in engem Zusammenhang mit dem Harnstoffgehalt in der Milch. Anhand von Versuchsdaten von 1628 laktierenden Milchkühen verschiedener Rassen von 11 deutschen Forschungseinrichtungen aus dem Zeitraum 2018–2021 wurde ein lineares Modell entwickelt, das die tägliche Stickstoffausscheidung von Milchkühen in der Laktation basierend auf Milchmenge, Milchharnstoff- und Milchproteinwerten schätzt. Daten von 12 deutschen Forschungseinrichtungen (1664 Milchkühe verschiedener Rassen in der Laktation) wurden zur Validierung des Modells verwendet. Für das Emissionsinventar wurde das Modell für Holsteinkühe gewählt, da andere Rassen in Deutschland in der Minderheit sind. Details zur Berechnung finden sich in (Vos et al., 2026), Kapitel 4.1.2.

In die Berechnung der N-Ausscheidung gehen folgende Parameter ein:

- Milchkühe: Milchleistung, Milcheiweiß-Gehalt, Milchfett-Gehalt, Milchharnstoffgehalt;
- Mutterkühe: Milchleistung, Tiergewicht, Gewichtszunahme, Zahl der Geburten pro Jahr (jeweils konstante Werte), Futtereigenschaften (variabel wegen veränderlicher Weidezeit)
- Milchfärsen, Schlachtfärsen und Mastbullen: Gewichtszunahme, Endgewicht und Futtereigenschaften;
- Schweine: Tiergewicht; bei Sauen auch Zahl der Ferkel pro Jahr; bei Aufzuchtferkeln und Mastschweinen auch Gewichtszunahme und Futtereigenschaften;
- Legehennen, Junghennen, Enten, Puten: Gewichtszunahme, Endgewicht, Futtereigenschaften; bei Legehennen auch Legeleistung und Eigewicht;
- Masthähnchen und –hühnchen: Brutto-Schlachtfleischmenge, Futtereigenschaften.

Bei Tierkategorien mit Weidegang werden die pro Tierplatz und Jahr berechneten N-Ausscheidungen auf Weide und Stall aufgeteilt, da nur die Ausscheidungen im Stall in die Berechnung der N_2O-Emissionen unter 3.B einfließen. Die N-Ausscheidungen auf der Weide werden in der Berechnung der N_2O-Emissionen unter 3.D berücksichtigt. Die Aufteilung der N-Ausscheidungen zwischen Stall und Weide erfolgt proportional zu den relativen Zeitanteilen, die auf die Haltung im Stall und auf der Weide entfallen (siehe dazu Anhang 7.3.1, Tabelle 510).

Tabelle 218 zeigt die Zeitreihen der N-Ausscheidungen. Die nicht angegebene N-Ausscheidung der Ziegen ist zeitlich konstant (11,0 kg Platz^{-1} a^{-1}), ebenso wie die von Gehegewild (16,0 kg Platz^{-1} a^{-1}), Kaninchen (0,8 kg Platz^{-1} a^{-1}), Straußen (15,6 kg Platz^{-1} a^{-1}) und Pelztieren (4,59 kg Platz^{-1} a^{-1}).

Tabelle 218: jährliche N-Ausscheidungen (3.B(b)), in kg / Platz

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Milchkühe	106,3	110,8	114,3	117,5	114,3	115,2	116,8	118,7	120,3	121,4	119,7	117,0	116,1	118,6	120,2
übrige Rinder	37,9	39,9	41,3	41,2	42,1	42,5	42,5	42,7	42,9	43,4	43,7	43,9	43,9	44,2	44,4
Schweine	12,8	13,1	13,0	12,8	12,6	12,4	12,4	12,3	12,2	12,1	12,1	12,3	12,2	12,2	12,3

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Schafe	7,7	7,7	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8	7,8
Pferde	48,2	48,1	49,0	48,8	48,8	54,0	55,0	56,1	57,1	58,2	59,2	59,2	59,2	59,2	59,2
Geflügel	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7

Tabelle 219 zeigt die jährlichen N-Ausscheidungen für die vier Wirtschaftsdünger-Managementsysteme „güllebasiert (ohne Vergärung)“, „strohbasiert (ohne Tiefstreu und ohne Vergärung)“, „Tiefstreu (ohne Vergärung)“ und „Vergärung“ sowie für „Weidegang“.

Tabelle 219: Jahressummen der N-Ausscheidungen, aufgeteilt nach Wirtschaftsdünger-Managementsystemen (3.B(b)) und Weidegang (3.D), in Gg/a

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
insgesamt	1688,2	1460,9	1398,0	1340,5	1309,8	1339,9	1330,7	1332,8	1308,7	1290,1	1262,7	1216,9	1182,9	1180,1	1168,4
güllebasiert [a]	915,6	865,5	834,8	759,7	630,0	595,8	596,8	600,9	593,3	589,4	568,8	526,9	499,6	516,0	508,8
strohbasiert [b]	484,7	350,1	331,1	327,5	318,5	276,0	266,2	259,4	251,3	242,6	238,4	235,4	229,1	232,3	233,0
Tiefstreu [a]	48,5	50,1	53,7	61,8	68,5	89,9	93,8	97,2	99,3	102,2	99,3	96,1	94,7	95,1	92,0
Vergärung	0,0	0,6	5,4	36,3	146,3	235,6	233,1	235,2	227,1	220,4	223,1	228,0	229,0	205,0	204,8
Weidegang	239,4	194,6	173,2	155,3	146,5	142,7	140,9	140,1	137,7	135,6	133,1	130,5	130,5	131,7	129,8

[a] ohne Vergärung

[b] ohne Tiefstreu und ohne Vergärung

5.1.3.5 VS-Ausscheidungen (3.B)

Die Berechnung der VS-Ausscheidungen erfolgt für Milchkühe, übrige Rinder, Schweine und Geflügel (Ausnahme: Gänse) mit dem nationalen Verfahren von Dämmgen et al. (2011), siehe Kap. 4.1.1 in Vos et al. (2026).

Gleichung 12: Berechnung der VS-Ausscheidungen

$$VS_{\mathrm{i}} = m_{\mathrm{feed,\ DM,}\ i} \cdot (1 - X_{\mathrm{DOM,\,i}}) \cdot (1 - x_{\mathrm{ash,\ feed}})$$

- VS_i VS-Ausscheidung von Tierkategorie i (in kg Platz^{-1} d^{-1})
- $m_{\mathrm{feed,\ DM,\ i}}$ Trockenmasse-Aufnahme, Tierkategorie i (in kg Platz^{-1} d^{-1})
- $X_{\mathrm{DOM,\ i}}$ Verdaulichkeit organischer Substanz, Tierkategorie i (in kg kg^{-1})
- $X_{\mathrm{ash,\ i}}$ Aschegehalt des Futters, Tierkategorie i (in kg kg^{-1})

Für eine Übersicht der Eingangsdaten für Milchkühe, übrige Rinder und Schweine siehe Kapitel 5.1.3.3.

Für die restlichen Tierkategorien wird mit konstanten VS-Ausscheidungen gerechnet. Diese ist bei Schafen und Pferden, wegen der von Jahr zu Jahr variierenden Populationsanteile der jeweiligen Groß- und Kleintiere zeitlich nicht konstant. Zusätzlich steigt bei den Pferden wegen der unterstellten Änderung der Fütterungspraxis der Großpferde zwischen 2010 und 2020 die VS-Ausscheidung in diesem Zeitraum signifikant an.

Die berechneten mittleren VS-Ausscheidungen für Milchkühe, übrige Rinder, Schweine, Geflügel, Schafe und Pferde sind in Tabelle 220 dargestellt.

Tabelle 220: Tägliche VS-Ausscheidung für Milchkühe, übrige Rinder, Schweine, Geflügel, Schafe und Pferde (3.B(a)), in kg / Platz

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Milchkühe	3,02	3,33	3,54	3,70	3,82	3,96	4,00	4,00	4,08	4,15	4,21	4,22	4,19	4,30	4,36
übrige Rinder	1,27	1,33	1,38	1,37	1,39	1,40	1,40	1,40	1,41	1,42	1,44	1,45	1,45	1,46	1,47
Schweine	0,27	0,28	0,29	0,28	0,27	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,30	0,30	0,30	0,30
Geflügel	0,019	0,018	0,019	0,020	0,020	0,022	0,023	0,023	0,023	0,023	0,022	0,022	0,022	0,022	0,022
Schafe	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41
Pferde	2,36	2,36	2,39	2,39	2,38	2,72	2,78	2,85	2,92	2,99	3,05	3,05	3,05	3,05	3,05

Tabelle 221 zeigt die täglichen VS-Ausscheidungen für die restlichen Tierkategorien, inklusive der Unterkategorien von Schafen und Pferden. Siehe dazu Vos et al. (2026), Kapitel 4.1.1.

Tabelle 221: Tägliche VS-Ausscheidung für Schafe, Ziegen, Pferde und sonstige Tiere (3.B(a)) , in kg / Platz

	VS [kg Platz^{-1} d^{-1}]
erwachsene Schafe	0,53
Lämmer	0,21
Ziegen	0,30
Großpferde	2,59 (bis 2010) – 3,46 (ab 2020)
Kleinpferde und Ponys	1,73
Gehegewild	0,30
Kaninchen	0,10
Straußen	1,16
Pelztiere	0,14

5.1.3.6 Haltungs-, Lager- und Ausbringungsverfahren (CRF 3.B, 3.D)

5.1.3.6.1 Häufigkeitsverteilungen (3.B, 3.D)

Das deutsche Inventar verwendet, getrennt nach Tier-Unterkategorien, jährliche Häufigkeitsverteilungen von Haltungsformen (Anteile Weidehaltung/Stallhaltung; Anteile von Aufstallungsformen), Wirtschaftsdünger-Lagerungsformen und -Ausbringungstechniken sowie Weidezeiten. Auf Daten zu Wirtschaftsdünger-Vergärung und Gärrestelagerung wird in Kapitel 5.1.3.6.5 eingegangen. Die Datengewinnung und –aufarbeitung für das Inventar auf Ebene der Bundesländer wird in Kap. 2.5 in Vos et al. (2026) detailliert beschrieben. Für die Darstellung der Häufigkeitsverteilungen auf Deutschland-Ebene wird auf Anhang 7.3.1 im vorliegenden NID verwiesen.

Die nachfolgenden Tabellen zeigen für die wichtigen Tierkategorien „Milchkühe“, „übrige Rinder“, „Schweine“ und „Geflügel“ die Aufteilung der Tierpopulation auf die verschiedenen Kategorien von Wirtschaftsdünger-Managementsystemen in Prozent des ausgeschiedenen VS.

Änderungen im Vergleich zur Submission 2025 gehen vor allem auf die Korrektur der Eingangsdaten für die Wirtschaftsdünger-Vergärung zurück siehe Kapitel 5.1.3.6.5.

Tabelle 222: Güllebasierte Systeme ohne Vergärung, in % des ausgeschiedenen VS (3.B(a))

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Milchkühe	53,0	69,4	72,2	70,3	61,2	57,6	58,5	59,0	59,9	60,8	59,9	58,0	58,9	60,7	60,3
übrige Rinder	58,0	55,1	51,3	44,3	34,4	31,7	31,9	31,9	32,3	32,5	32,1	31,2	31,2	32,2	31,9
Schweine	81,2	87,5	89,3	87,5	77,8	70,9	71,1	71,1	71,4	72,1	71,9	70,9	66,8	70,6	71,1

Tabelle 223: Strohbasierte Systeme ohne Vergärung, in % des ausgeschiedenen VS (3.B(a))

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Milchkühe	26,9	15,1	14,7	15,4	14,9	10,9	10,1	9,3	8,6	7,8	7,8	7,7	7,6	7,7	7,7
übrige Rinder	19,8	18,4	19,1	21,1	22,9	17,1	15,9	14,8	13,8	12,7	12,7	12,5	12,5	12,7	12,8
Schweine	16,6	10,5	8,6	7,5	6,2	4,2	3,9	3,6	3,4	3,1	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Geflügel	100,0	99,9	99,2	95,6	87,3	76,7	76,7	77,1	77,9	77,6	76,5	77,1	72,9	74,1	74,5

Tabelle 224: Tiefstreu ohne Vergärung, in % des ausgeschiedenen VS (3.B(a))

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Milchkühe	0,1	0,2	0,2	0,2	0,5	2,3	2,7	3,1	3,4	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8
übrige Rinder	7,3	9,6	10,9	14,1	15,8	19,7	20,5	21,3	22,1	22,9	22,8	22,6	22,5	22,7	22,5
Schweine	2,2	1,9	1,6	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3

Tabelle 225: Alle Systeme mit Vergärung, in % des ausgeschiedenen VS (3.B(a))

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Milchkühe	0,003	0,045	0,45	2,9	13,6	20,6	20,6	20,7	20,5	20,2	21,1	23,1	22,3	20,4	20,9
übrige Rinder	0,003	0,032	0,27	2,0	7,7	11,4	11,3	11,4	11,1	11,0	11,5	12,8	12,8	11,1	11,4
Schweine	0,004	0,061	0,50	3,7	14,7	23,6	23,7	23,9	24,0	23,6	23,8	24,8	28,9	25,2	24,7
Geflügel	0,005	0,074	0,55	4,0	12,3	22,6	22,6	22,2	21,3	21,5	22,6	22,0	26,1	24,8	24,4

Tabelle 226: Weide, in % des ausgeschiedenen VS (3.B(a))

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Milchkühe	20,0	15,3	12,5	11,2	9,8	8,5	8,2	7,9	7,6	7,3	7,3	7,3	7,4	7,3	7,3
übrige Rinder	14,9	16,9	18,5	18,5	19,1	20,1	20,3	20,5	20,7	21,0	21,0	20,9	21,0	21,3	21,5
Geflügel	0,0	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	1,1

5.1.3.6.2 Einstreu bei Festmistsystemen

Bei Festmistsystemen gelangt mit der Einstreu zusätzlicher Stickstoff ins System, der im Inventar bei der Berechnung der Emissionen von N_2O und NO aus dem Wirtschaftsdünger-Management berücksichtigt wird. Tabelle 510 im Anhang 7.3.1 zeigt die vom Tierhaltungsverfahren abhängigen Einstreumengen in Frischmasse. Mit einem Trockenmassegehalt von 86 % und einem N-Gehalt der Trockenmasse von 0,58 % (siehe Kapitel 4.2.1 in Vos et al. (2026)) ergeben sich die in Tabelle 227 nach Tierkategorien angegebenen Einstreu-N- Mengen.

Tabelle 227: Jahressummen des N-Eintrags durch Einstreu in strohbasierten Systemen, in Gg

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
gesamt	64,1	55,1	50,5	50,4	50,2	50,3	49,8	49,6	49,1	48,6	47,9	47,4	47,5	47,5	47,0
Milchkühe	17,2	7,6	7,1	6,7	6,7	6,5	6,3	6,2	5,9	5,7	5,6	5,5	5,4	5,3	5,1
übr. Rinder	24,0	21,1	21,5	21,4	23,3	24,4	24,4	24,3	24,0	23,7	22,9	22,4	22,3	22,1	21,4
Schweine	3,18	1,78	1,56	1,38	1,15	0,95	0,92	0,89	0,83	0,78	0,78	0,70	0,62	0,62	0,62
Schafe	0,83	0,75	0,70	0,68	0,58	0,47	0,47	0,47	0,47	0,46	0,45	0,45	0,45	0,47	0,46
Ziegen	0,04	0,05	0,07	0,08	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08
Pferde	18,0	22,8	18,3	18,6	16,8	16,4	16,1	16,2	16,3	16,5	16,6	17,0	17,4	17,8	18,2
Geflügel	0,84	1,01	1,27	1,51	1,52	1,54	1,50	1,48	1,46	1,44	1,43	1,34	1,25	1,17	1,17
Gehegewild	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Kaninchen	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Straußen	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Pelztiere	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

5.1.3.6.3 Maximale Methan-Bildungsrate Bo (3.B(b))

Die mit der Lagerung von Wirtschaftsdünger verbundene Methanbildung wird für die Emissionsberechnung (siehe Kapitel 5.3.2.2.1) durch die tierspezifische maximale Methan-Bildungsrate B_o und den lagerspezifischen Methan-Umwandlungsfaktor MCF charakterisiert. Zum MCF siehe Kapitel 5.1.3.6.4.

Tabelle 228 zeigt die verwendeten B_o-Werte und die Datenherkunft. Bei Rindern und Schweinen handelt es sich um nationale Daten. Für die übrigen Tiere außer Junghennen, Gänsen und Gehegewild wurden IPCC-Default-Werte verwendet. Für Junghennen, Gänse und Gehegewild existieren keine IPCC-Default-Werte. Für Junghennen wurde konservativ der (IPCC (2006b): Vol. 4)-Default-Wert der Legehennen angenommen. Für B_o bei Gänsen wird nach Kap. 4.4.1.1 in Vos et al. (2026) ein Wert von 0,36 m^3 kg^{-1} angesetzt. Für Gehegewild wurde der (IPCC (2006b): Vol. 4)-Default-Wert der Ziegen angenommen.

Tabelle 228: Maximale Methan-Bildungskapazität B_o (3.B(b))

[m^3 kg^{-1}]	B_o	Quelle
Rinder	0,23	(Dämmgen, Amon, et al., 2012)
Schweine	0,30	(Dämmgen, Amon, et al., 2012)
Schafe	0,19	(IPCC, 2006b Vol 4, 10.82)
Ziegen	0,18	(IPCC, 2006b Vol 4, 10.82)
Pferde	0,30	(IPCC, 2006b Vol 4, 10.82)
Legehennen	0,39	(IPCC, 2006b Vol 4, 10.82)
Masthähnchen	0,36	(IPCC, 2006b Vol 4, 10.82)
Enten	0,36	(IPCC, 2006b Vol 4, 10.82)
Puten	0,36	(IPCC, 2006b Vol 4, 10.82)
Junghennen	0,39	Annahme (siehe Text)
Gänse	0,36	Kap. 4.4.1.1 in Vos et al. (2026)

[m^3 kg^{-1}]	B_o	Quelle
Gehegewild	0,18	Annahme (siehe Text)
Kaninchen	0,32	IPCC (2019), Table 10.15
Straußen	0,25	IPCC (2019), Table 10.15
Pelztiere	0,25	IPCC (2019), Table 10.15

Tabelle 229: Mittlere maximale Methan-Bildungskapazität B_o für Geflügel (3.B(b)), in m^3 kg^{-1}

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Geflügel	0,378	0,376	0,373	0,371	0,370	0,371	0,371	0,371	0,384	0,385	0,386	0,386	0,389	0,389	0,389

5.1.3.6.4 Methan-Umwandlungsfaktoren MCF (3.B)

In CRF 3.B(a) sind unter „Additional Information" die MCF-Werte der nationalen Wirtschaftsdünger-Managementkategorien zu berichten. In Deutschland sind dies „güllebasiert ohne Vergärung", „strohbasiert ohne Vergärung" (Festmistlager), „Tiefstreu ohne Vergärung", „Vergärung" und „Weide". Es handelt sich dabei um gewichtete Mittelwerte über alle Tierkategorien, die auf den nachfolgend beschriebenen MCF-Werten beruhen. Dabei umfasst die Kategorie „güllebasiert ohne Vergärung" alle güllebasiert gehaltenen Tiere, deren Wirtschaftsdünger nicht vergoren wird. Entsprechendes gilt für die Kategorien „strohbasiert ohne Vergärung (Festmistlager)" und „Tiefstreu ohne Vergärung". Die Kategorie „Vergärung" fasst alle Tiere zusammen, deren Wirtschaftsdünger vergoren wird.

In Tabelle 230 sind die MCF-Werte für Rinder nach den in Deutschland gebräuchlichen Lagerungsverfahren dargestellt. Die von Dämmgen, Amon, et al. (2012) vorgeschlagenen nationalen Werte sind fettgedruckt. Mangels IPCC-Defaultwerten oder nationalen Werten wurde für „Flüssigmist mit fester Abdeckung" (incl. Zeltstrukturen), „Flüssigmist mit Schwimmdecke aus Strohhäckseln" und „Flüssigmist mit schwimmender Abdeckfolie" konservativ der MCF von „Flüssigmist ohne Schwimmdecke" übernommen. Die Werte für Tiefstreu und Weide wurden aus IPCC (2006b Vol 4, 10.44) übernommen.

Tabelle 230: Methan-Umwandlungsfaktoren *MCF* (in % von B_o) für Rinder (3.B(a))

		MCF [%]
Flüssigmist	Außenlager ohne Abdeckung, ohne Schwimmdecke	17
	feste Abdeckung	17
	natürliche Schwimmdecke	10
	Schwimmdecke aus Strohhäckseln	17
	schwimmende Abdeckfolie	17
	Lager unter Spaltenboden > 1 Monat	17
Festmist	Tiefstreu	17
	Festmistlager	2
Weide		1

Tabelle 231 zeigt die Methan-Umwandlungsfaktoren MCF für die Wirtschaftsdüngerlagerung in der Schweinehaltung. Wie bei den Rindern handelt es sich um nationale Werte (Dämmgen, Amon, et al., 2012), Defaultwerte aus IPCC (2006b Vol 4, 10.44) sowie konservative Annahmen in Fällen, in denen kein MCF bekannt ist. Da bei den Rindern der MCF für „Tiefstreu" gleich dem

für Flüssigmist ohne Schwimmdecke ist, wurde dies auch für die Schweine angenommen. Freilandhaltung von Schweinen („Weide“) ist in Deutschland von sehr geringer Bedeutung und wird daher im Inventar nicht berücksichtigt. Etwaige Ausscheidungen auf der Weide sind in den anderen Haltungssystemen enthalten (included elsewhere, IE).

Tabelle 231: Methan-Umwandlungsfaktoren *MCF* (in % von B_o) für Schweine (3.B(a))

		MCF [%]
Flüssigmist	Außenlager ohne Abdeckung, ohne Schwimmdecke	25
	feste Abdeckung	25
	natürliche Schwimmdecke	15
	Schwimmdecke aus Strohhäckseln	25
	schwimmende Abdeckfolie	25
	Lager unter Spaltenboden > 1 Monat	25
Festmist	Tiefstreu	25
	Festmistlager	3

Die mittleren Methan-Umwandlungsfaktoren für güllebasierte Systeme ohne Vergärung bei Milchkühen, übrigen Rindern und Schweinen sind von der Häufigkeit der verschiedenen Haltungsverfahren abhängig und damit nicht konstant, wie Tabelle 232 zeigt.

Tabelle 232: Mittlere Methan-Umwandlungsfaktoren *MCF* (in % von B_o) für güllebasierte Systeme ohne Vergärung (3.B(a))

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Milchkühe	14,3	14,0	14,0	14,3	14,6	14,5	14,5	14,5	14,5	14,4	14,4	14,5	14,4	14,5	14,5
übrige Rinder	14,6	14,4	14,6	14,8	14,9	14,8	14,8	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
Schweine	24,7	23,7	23,6	22,7	22,2	22,7	22,8	22,9	23,0	23,0	23,0	23,1	23,0	23,1	23,1

Für die Wirtschaftsdüngerlagerung der übrigen Tiere werden Defaultwerte aus IPCC (2006b Vol 4, 10.44) verwendet (siehe Tabelle 233).

Tabelle 233: Methan-Umwandlungsfaktoren MCF (in % von B_o) für Ziegen, Schafe, Pferde, Gehegewild, Kaninchen, Straußen, Pelztiere und Geflügel (3.B(a))

	MCF [%]
Festmistlager	2
Geflügelmist	1,5
Weide	1

Bei Systemen, deren Wirtschaftsdünger vergoren wird, ergibt sich unter Berücksichtigung von Teilbeiträgen von Vorlager, Fermenter und Gärrestelager ein variabler MCF, siehe Kapitel 5.1.3.6.5.

5.1.3.6.5 Wirtschaftsdünger-Vergärung und Gärreste-Management (3.B)

Nach IPCC (2006b, Vol. 4, Tab. 10.17) gilt die anaerobe Vergärung von Wirtschaftsdünger und die Lagerung der daraus resultierenden Gärreste insgesamt als eigenständiger Lager-Typ. Dieser wird der deutschen Situation entsprechend für Rinder, Schweine und Geflügel berücksichtigt (Haenel and Wulf (2016); Kap. 2.6 und 4.4 in Vos et al. (2026)). Die Zeitreihen der Aktivitätsdaten wurden vor allem auf Grundlage von Daten des DBFZ und KTBL (Grebe et al., 2025) bereitgestellt.

(Grebe et al., 2025) leiteten die jährliche elektrische Arbeit $W_{\text{el, dig}}$ differenziert nach Bundesländern und Anlagen-Leistungsklassen aus Daten des Biogasanlagenregisters ab. Dabei werden über eine äquivalente elektrische Arbeit auch die Biogasanlagen berücksichtigt, die keinen Strom erzeugen, sondern Biomethan in das Gasnetz einspeisen. Der arbeitsspezifische Substratinput s_i wurde anhand der Daten von 1664 Biogasanlagen getrennt für Rindergülle, Rindermist, Schweinegülle und Geflügelmist berechnet. Die Zeitreihen wurden gegenüber Submission 2025 aktualisiert. Es wird statt der prozentualen Anteile an der Gesamtproduktion an Wirtschaftsdünger jetzt die absoluten, für die Vergärung benötigten, errechneten N-Mengen aus Rindergülle, Schweinegülle, Rindermist und Geflügelmist verwendet. Diese müssen jetzt nicht mehr wie in Submission 2025 in dem gleichen Bundesland zur Verfügung stehen. Der Input in die Biogasanlagen jeder NUTS-3-Region wird stattdessen über einen Transportalgorithmus gegebenenfalls aus weiteren NUTS-3-Regionen zur Verfügung gestellt, siehe Kapitel 5.1.2.5.

Tabelle 234 zeigt die absoluten N-Mengen aus Rindergülle, Rindermist, Schweinegülle und Geflügelmist , die in Biogasanlagen vergoren werden, sowie deren Summe. Für Schweinemist wird keine Vergärung berücksichtigt, da wegen des geringen Aufkommens die Datenlage unsicher ist.

Tabelle 234: N-Mengen aus Wirtschaftsdüngern, die in Biogasanlagen vergoren werden (in Gg N)

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Gesamt	0,04	0,55	4,7	32,0	129,7	208,7	206,6	208,4	201,7	195,8	198,5	203,5	204,2	183,0	183,0
Rindergülle	0,03	0,34	3,0	18,6	80,0	121,7	120,5	122,1	118,5	115,1	116,6	123,3	118,0	107,0	107,0
Rindermist	0,00	0,03	0,2	1,7	6,3	9,6	9,5	9,6	9,2	9,1	9,2	10,2	10,7	8,9	8,9
Schweinegülle	0,01	0,13	1,1	8,4	32,3	53,0	52,4	53,0	50,9	48,8	49,0	47,4	49,1	42,4	42,4
Geflügelmist	0,00	0,05	0,4	3,3	11,2	24,4	24,1	23,7	23,1	22,9	23,7	22,7	26,3	24,7	24,7

Die Daten aus Tabelle 234 werden auch dafür verwendet, den Anteil der dem Lager zugeführten VS-Mengen zu berechnen, der in die Vergärung geht.

Die Berechnung des Gesamt-MCF für die Vergärung von Wirtschaftsdünger in Biogasanlagen einschließlich Substrat-Vorlager und Gärrestelagerung erfolgt nach einer nationalen Methodik, siehe Gleichung 13. Zur Ableitung dieser Gleichung siehe Kap. 4.4.1.2 in Vos et al. (2026).

Gleichung 13: Berechnung des Gesamt- MCF für die Vergärung von Wirtschaftsdünger in Biogasanlagen einschließlich Vorlagerung des Substrats und Lagerung der Gärreste

$$MCF\% = MCF\%_{\text{ps}} + (100\ \% - MCF\%_{\text{ps}}) \cdot \left((1 - \mu_{\text{rg}}) \cdot L_{\text{dig}} + \mu_{\text{rg}} \cdot \frac{MCF\%_{\text{residues}}}{100\ \%}\right)$$

mit

- *MCF%* = Gesamt-MCF für das System "Vorlager + Fermenter + Gärrestelager" (in %)
- $MCF\%_{ps}$ = MCF für das Vorlager (in %)
- μ_{rg} = Restgaspotential bezogen auf B_o (with $0 \leq \mu_{rg} \leq 1$ m^3 m^{-3})
- L_{dig} = relative Leckagerate des Fermenters, bezogen auf die im Fermenter produzierte CH_4-Menge (mit $0 \leq L_{dig} \leq 1$ m^3 m^{-3})
- $MCF\%_{residues}$ = MCF für das Gärrestelager (in %)

Tabelle 235 zeigt die Methan-Umwandlungsfaktoren $MCF\%_{ps}$ für das Vorlager. Zur Ableitung siehe Kap. 2.6 in Vos et al. (2026).

Tabelle 235: Methan-Umwandlungsfaktoren für das Vorlager (in % von B_o)

	$MCF\%_{ps}$ [%]
Rindergülle	1,7
Rindermist	0,2
Schweinegülle	2,5
Geflügelkot	0,15

Basierend auf (Grebe et al., 2025) wurde die auf B_o bezogene potentielle CH_4-Restgasmenge μ_{rg} mit 4,6 % (bzw. 0,046 m^3 m^{-3}) angesetzt, siehe Kap. 2.6 in Vos et al. (2026).

Die Leckagerate des Fermenters L_{dig} wird in Anlehnung an Bachmaier and Gronauer (2007), Börjesson and Berglund (2007), Gärtner et al. (2008) und Roth et al. (2011) mit 1 % bzw. 0,01 m^3 m^{-3} angesetzt (Grebe et al., 2025). Das Umweltbundesamt geht in einer Studie von 2016 ebenfalls von einer Leckagerate von 1 % aus (Fehrenbach et al. (2016, p. 113).

Auch beim gasdichten Gärrestelager wird eine Leckagerate unterstellt; es wird angenommen, dass sie der Leckagerate des Fermenters entspricht. Unter Berücksichtigung des relativen Anteils der gasdichten Lager an der gesamten Gärrestelagerung, ergibt sich Gleichung 14.

Gleichung 14: Berechnung des *MCF* für das Gärrestelager

$$MCF\%_{residues} = x_{gts} \cdot (100 \cdot L_{sto,\,gt}) + (1 - x_{gts}) \cdot MCF\%_{ngts}$$

mit

- $MCF\%_{residues}$ = MCF für das Gärrestelager (in %)
- x_{gts} = relativer Anteil der gasdichten Gärrestelagerung (in kg kg^{-1})
- $L_{sto,\,gt}$ = relative Leckagerate bei der gasdichten Gärrestelagerung ($L_{sto,\,gt} = L_{dig}$)
- $MCF\%_{ngts}$ = MCF für das nicht gasdichte Gärrestelager (in %)

Gärreste sind im Allgemeinen flüssig. Dabei wird angenommen, dass sich bei der nicht gasdichten Gärrestelagerung aufgrund der Ko-Fermentierung von Energiepflanzen und des damit erhöhten Trockensubstanzgehaltes der Gärreste eine natürliche Schwimmdecke bildet. Die Lagerung ähnelt dabei der offenen Lagerung von unvergorener Rindergülle mit

Schwimmdecke. Daher wird für $MCF\%_{ngts}$ der entsprechende MCF für unvergorene Rindergülle verwendet: 10 % (siehe Kapitel 5.1.3.6.4).

Tabelle 236 zeigt den Anteil gasdichter Lagerung von Wirtschaftsdünger-Gärresten der gesamten Wirtschaftsdünger-Gärrestelagerung in Prozent des eingesetzten N. Diese Daten wurden durch (Grebe et al., 2025) aus den Gärsubstratinputmengen nach Ländern und Anlagenleistungsklassen und dem Anteil der Biogasanlagen mit gasdicht abgedeckten Gärrestlagern nach Leistungsklassen in Deutschland abgeleitet. Der starke Anstieg in der Verbreitung der gasdichten Gärrestlagerung von 2011 zu 2012 wird auf das Energieeinspeisegesetz 2012 zurückgeführt, das für alle Gärrestlager von Biogasanlagen mit mindestens 75 kW installierter Leistung, die ab 1. Januar 2012 in Betrieb genommen wurden, eine gasdichte Abdeckung vorschreibt. Für 2024 wurden mangels Daten die Werte von 2023 beibehalten.

Tabelle 236: Anteile der Lagerung von Wirtschaftsdünger-Gärresten in gasdichten und nicht gasdichten Lagern (in % der in Biogasanlagen eingesetzten N-Mengen)

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
gasdicht	0,0	4,5	9,1	15,2	40,6	61,3	62,7	64,1	65,5	69,1	72,7	76,4	76,8	79,8	79,8
Nicht gasdicht	100,0	95,5	90,9	84,8	59,4	38,7	37,3	35,9	34,5	30,9	27,3	23,6	23,2	20,2	20,2

Die sich aus Gleichung 13 ergebenden Gesamt-MCF-Werte der Systeme "Vorlager + Fermenter + Gärrestelager" bei Milchkühen, übrigen Rindern, Schweinen und Geflügel sind in der nachfolgenden Tabelle wiedergegeben.

Tabelle 237: Mittlere Methan-Umwandlungsfaktoren MCF (in %von B_o) für Wirtschaftsdüngersysteme mit Vergärung (3.B(a))

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Milchkühe	3,00	3,01	3,00	2,97	2,88	2,80	2,80	2,79	2,79	2,77	2,76	2,74	2,74	2,73	2,73
übrige Rinder	3,00	2,92	2,88	2,83	2,73	2,63	2,62	2,61	2,61	2,59	2,58	2,56	2,54	2,54	2,54
Schweine	3,88	3,86	3,84	3,82	3,72	3,63	3,63	3,62	3,62	3,60	3,59	3,57	3,57	3,55	3,55
Geflügel	1,56	1,54	1,52	1,50	1,39	1,31	1,30	1,30	1,29	1,27	1,25	1,23	1,23	1,22	1,21

Die mit der Vergärung verbundene Minderung der CH_4-Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management hängt vom Anteil des Wirtschaftsdüngers, der vergoren wird, und von der relativen Häufigkeit gasdichter Gärrestelager ab. Die sich in Deutschland ergebenden Minderungen sind in Kapitel 5.3.2.2.3, wiedergegeben.

Tabelle 238 zeigt, welche N_2O-Emissionen für die verschiedenen Teilsysteme und Wirtschaftsdünger im Inventar berücksichtigt werden. Zu Details siehe Kap. 4.3.2.2 und 4.4.2.2 in Vos et al. (2026).

N_2O-, und NO-Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden als Folge der Ausbringung der Gärreste werden in Kapitel 5.5 beschrieben.

Tabelle 238: Berechnung der N_2O-Emissionen aus der Vergärung

		Gülle	Mist/Geflügelkot
Vorlager		0	Gleichung 15
Fermenter		0	0
Gärrestelager	gasdicht	0	0
	nicht gasdicht	Gleichung 16	Gleichung 16

Gleichung 15: Berechnung der N_2O-Emissionen aus dem Vorlager für Mist und Geflügelkot

$$E_{\text{N2O-N, dig, ps}} = (N_{\text{excr, dig}} + N_{\text{straw, dig}}) \cdot EF_{\text{N2O-N, dig, ps}}$$

mit

- $E_{\text{N2O-N, dig, ps}}$ = N-Verlust durch N_2O-Emissionen aus dem Vorlager von Mist oder Geflügelkot (in kg N_2O-N a^{-1})
- $N_{\text{excr, dig}}$ = Menge der jährlichen N-Ausscheidung im Stall, die in die Vergärung geht (in kg a^{-1})
- $N_{\text{straw, dig}}$ = Menge des jährlichen N-Eintrags durch Einstreu, die in die Vergärung geht (in kg a^{-1})
- $EF_{\text{N2O-N, dig, ps}}$ = N_2O-N-Emissionsfaktor für die Vorlagerung von Mist oder Geflügelkot (in kg N_2O-N pro kg N)

Gleichung 16: Berechnung der N_2O-Emissionen aus dem nicht gasdichten Gärrestelager

$$E_{\text{N2O-N, dig, ngts}} = (1 - x_{\text{gts}}) \cdot N_{\text{tot, dig, ferm}} \cdot EF_{\text{N2O-N, dig, ngts}}$$

mit

- $E_{\text{N2O-N, dig, ngts}}$ = N-Verlust durch N_2O-Emissionen aus dem nicht gasdichten Gärrestelager (in kg N_2O-N a^{-1})
- x_{gts} = relativer Anteil der gasdichten Gärrestelagerung (in kg kg^{-1})
- $N_{\text{tot, dig, ferm}}$ = Gesamte Gärreste-N-Menge beim Verlassen des Fermenters (in kg a^{-1})
- $EF_{\text{N2O-N, dig, ngts}}$ = N_2O-N-Emissionsfaktor für das nicht gasdichte Gärrestelager (in kg N_2O-N pro kg N)

Die im Inventar verwendeten N_2O-Emissionsfaktoren gehen aus Tabelle 239 hervor. Zu ihrer Ableitung wird auf Kap. 2.6 in Vos et al. (2026) verwiesen.

Tabelle 239: N_2O-N-Emissionsfaktoren für Vorlager und Gärrestelager

	[kg kg^{-1}]	Mist	Geflügelkot
Vorlager	$EF_{\text{N2O-N, dig, ps}}$	0,001	0,0001
Gärrestelager, nicht gasdicht	$EF_{\text{N2O-N, dig, ngts}}$	0,005	0,005

Die N-Menge in den Gärresten zu Beginn der Lagerung ($N_{\text{tot, dig, ferm}}$) berechnet sich unter Berücksichtigung der N-Verluste aus dem Vorlager. Für den Fermenter wird davon ausgegangen, dass keine N-Verluste auftreten.

Die im Zusammenhang mit der Wirtschaftsdünger-Vergärung entstehenden NO-Emissionen werden analog zu den N_2O-Emissionen berechnet. Wie im deutschen Inventar im Bereich Wirtschaftsdünger-Management üblich, siehe Kap. 4.3.2.2 in Vos et al. (2026), wird angenommen, dass der NO-N-Emissionsfaktor ein Zehntel des N_2O-N-Emissionsfaktors beträgt.

Für die Berechnung der indirekten N_2O-Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Böden infolge der Deposition reaktiven Stickstoffs (siehe Kapitel 5.5.2.1.2) ist auch die Berechnung der NH_3-Emissionen erforderlich, die im Zusammenhang mit der Wirtschaftsdünger-Vergärung

entstehen. Für die Vorlagerung von Mist und Geflügelkot, das nicht gasdichte Gärrestelager und die Ausbringung der Gärreste werden NH_3-Emissionen berechnet. Dagegen wird für die Vorlagerung von Gülle, den Fermenter sowie die gasdichte Lagerung der Gärreste davon ausgegangen, dass keine NH_3-Emissionen entstehen oder dass sie vernachlässigbar sind. Zu Details der umfangreichen NH_3-Berechnungsmethodik wird auf Kap. 4.3.1.2 und 2.6 in Vos et al. (2026) verwiesen.

5.1.4 Vergärung von Energiepflanzen: Konzept und Aktivitätsdaten

5.1.4.1 Konzept und Berücksichtigung in den CR-Tabellen

Das Inventar berücksichtigt die in Deutschland mengenmäßig relevanten sechs Energiepflanzen-Kategorien Maissilage, Grassilage, Ganzpflanzensilage, Weizenkorn, Roggenkorn und Corn-Cob-Mix (CCM). Sie unterscheiden sich nur wenig in ihren wesentlichen Eigenschaften (N- und VS-Gehalt der Trockenmasse, maximales Methanausbeute-Potenzial B_0, siehe (Grebe et al., 2025). Dies erlaubt die Behandlung der Gesamttrockenmasse aller berücksichtigten Energiepflanzen als eine einzige Energiepflanzenkategorie. Die Emissionsberechnung erfolgt analog zur Vergärung von Mist (siehe Kapitel 5.1.3.6.5), allerdings ohne Vorlager.

Trotz der in der Praxis als Regelfall vorkommenden gemeinsamen Vergärung von Wirtschaftsdünger und Energiepflanzen werden die Emissionen, die im Zusammenhang mit der Vergärung dieser beiden Substratkategorien stehen, getrennt berechnet, um den Beitrag der Energiepflanzenvergärung zur Treibhausgasbilanz besser sichtbar werden zu lassen.

Zu weiteren Details der Emissionsberechnung im Zusammenhang mit der Vergärung von Energiepflanzen siehe Kap. 5.1 und 2.6 in Vos et al. (2026).

Berichtet werden folgende Emissionen, die sich als direkte oder indirekte Folge aus der Vergärung von Energiepflanzen sowie der Gärrestelagerung und -ausbringung ergeben:

- Fermenter (in 3.J)
  - CH_4 (durch Leckage)
- Lagerung (in 3.J)
  - CH_4 (durch Leckage)
  - direktes N_2O
  - indirektes N_2O als Folge der Deposition von NH_3 und NO aus der Lagerung
  - NO
- Ausbringung (in 3.D)
  - direktes N_2O
  - indirektes N_2O als Folge der Deposition von NH_3 und NO aus der Ausbringung
  - indirektes N_2O durch Auswaschung/Oberflächenabfluss des mit den Gärresten ausgebrachten Stickstoffs
  - NO

Die Emissionen aus Fermenter und Gärrestelager (CH_4, N_2O, indirektes N_2O aus der Deposition von NH_3 und NO aus der Lagerung) werden in Kapitel 5.9 beschrieben und unter 3.J in CR-

Tabelle 3 berichtet. Die direkten und indirekten N_2O-Emissionen als Folge der Gärreste-Ausbringung werden in Kapitel 5.5 beschrieben und unter 3.D berichtet (CRF 3. D1.b.iii, 3.D.2.a und 3.D.2.b). Die als Folge der Gärreste-Ausbringung entstehenden NO-Emissionen werden als NO_x-Emissionen ebenfalls unter 3.D berichtet.

5.1.4.2 Aktivitätsdaten und Parameter

Als Aktivitätsdaten für die Berechnung der Emissionen werden die der Vergärung zugeführten Trockenmasse-Gesamtmengen der Energiepflanzen verwendet, siehe Tabelle 240. Die zugrunde liegenden Substratmengen wurden im Zusammenhang mit der Wirtschaftsdünger-Vergärung abgeleitet und bereitgestellt (siehe Kapitel 5.1.3.6.5). Die Daten wurden gegenüber Submission 2025 ausschließlich für das Jahr 2023 durch (Grebe et al., 2024) aktualisiert. Mangels Daten für 2024 wurden die Werte von 2023 beibehalten. Das Jahr 2023 ist das einzige Jahr für das die Zahlen zusätzlich auf Ebene von NUTS-3-Regionen vorliegen.

Aus den B_0-Werten der sechs Energiepflanzen-Kategorien (siehe Kapitel 5.1.4.1) wurde, unter Berücksichtigung des IPCC-Defaultwertes für die Dichte von Methan (0,67 kg m^{-3}), ein gewichtet gemittelter B_0-Wert von 0,38 m^3 kg^{-1} abgeleitet. Als gewichtete Mittelwerte der VS- und N-Gehalte ergeben sich (bezogen auf die Trockenmasse): VS-Gehalt 0,947 kg kg^{-1}, N-Gehalt 0,0146 kg kg^{-1}.

Aus der Multiplikation der Trockenmasse mit dem mittleren VS-Gehalt ergibt sich die für die Berechnung der CH_4-Emissionen benötigte VS-Menge, siehe Tabelle 240.

Mithilfe des mittleren N-Gehaltes erhält man die für die Berechnung von N-Emissionen benötigten N-Mengen, siehe Tabelle 240.

Tabelle 240: Trockenmasse, VS-Menge und N-Menge der in Biogasanlagen eingesetzten Energiepflanzen, in Gg

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Trockenmasse	3,3	42,2	366,0	3.089	11.164	20.118	20.011	19.683	19.397	19.400	19.815	19.440	20.881	20.223	20.223
VS	3,1	40,0	346,6	2.925	10.572	19.052	18.950	18.640	18.369	18.372	18.765	18.410	19.775	19.151	19.151
N	0,05	0,62	5,3	45	163	294	292	287	283	283	289	284	305	295	295

Die Leckageraten für Fermenter und gasdichtes Gärrestelager werden nach (Grebe et al., 2025) wie bei der Vergärung von Wirtschaftsdünger angesetzt (siehe Kapitel 5.1.3.6.5).

Tabelle 241 zeigt den Anteil der gasdichten Lagerung von Energiepflanzen-Gärresten in Prozent der eingesetzten Frischmasse (Grebe et al., 2025). Da für 2024 keine Daten für die Häufigkeit einer gasdichten Abdeckung verfügbar waren, wurde der Wert von 2023 beibehalten. Der starke Anstieg in der Verbreitung der gasdichten Gärrestlagerung von 2011 zu 2012 wird auf das Energieeinspeisegesetz 2012 zurückgeführt, das für alle Gärrestlager von Biogasanlagen mit mindestens 75 kW installierter Leistung, die ab 1. Januar 2012 in Betrieb genommen wurden, eine gasdichte Abdeckung vorschreibt. Die Daten unterscheiden sich von denen bei der Lagerung von Wirtschaftsdünger-Gärresten (siehe Tabelle 236). Dies ist darauf zurück zu führen, dass der Gesamtanteil von Energiepflanzen am Substratmix von Wirtschaftsdünger und Energiepflanzen mit der Anlagengröße zunimmt, was auch für den Abdeckungsgrad der Gärrestelager gilt. Energiepflanzen-Gärreste werden mit einem Transportmodell über Grenzen von NUTS-3-Regionen hinweg verteilt, siehe Kapitel 5.1.2.5.

Tabelle 241: Anteil der Lagerung von Energiepflanzen-Gärresten in gasdichten und nicht gasdichten Lagern (in % der zur Vergärung eingesetzten Frischmasse)

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
gasdicht	0,0	4,7	9,4	15,8	42,2	65,2	67,1	69,1	71,0	74,9	78,7	82,6	82,0	85,8	85,8
nicht gasdicht	100,0	95,3	90,6	84,2	57,8	34,8	32,9	30,9	29,0	25,1	21,3	17,4	18,0	14,2	14,2

Die Ausbringung erfolgt mit verschiedenen Techniken und unterschiedlichen Einarbeitungszeiten auf Ackerland und Grünland, verbunden mit unterschiedlichen NH_3-Emissionsfaktoren. Für die Berechnung der direkten N_2O-Emissionen aus der Gärrestausbringung ist lediglich die zur Ausbringung kommende N-Menge relevant; die indirekten N_2O-Emissionen aus der ausbringungsbedingten Deposition reaktiven Stickstoffs hängen dagegen von der Gesamt-NH_3-Emission aus der Gärrestausbringung und damit von den relativen Häufigkeiten der Ausbringungstechniken und Einarbeitungszeiten ab. Diese relativen Häufigkeiten stammen aus Erhebungen des Statistischen Bundesamtes im Jahr 2011 (für das Jahr 2010), 2016 (für das Jahr 2015) und 2020 (für das Jahr 2019), siehe Anhang 7.3.1, Tabelle 512.

5.1.5 Konzept und Aktivitätsdaten für Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden und Kulturen

5.1.5.1 N_2O-Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden (3.D)

5.1.5.1.1 Konzept für die Berechnung direkter Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden

Es werden Tier-2-Emissionsfaktoren für direkte N_2O-Emissionen aus der Ausbringung von Mineraldüngern, Wirtschaftsdüngern, Klärschlämmen und sonstigen organischen Düngern sowie für N_2O-Emissionen aus Ernterückständen verwendet. Die Tier-2-Emissionsfaktoren sind auf NUTS-3 Ebene regional unterschiedlich und wurden abgeleitet von Mathivanan et al. (2021). Details zur Aufteilung der N-Mengen auf NUTS-3 Ebene sind in Kapitel 5.1.5.1.2 und im Kapitel zum Transportmodul 5.1.2.5 dargestellt. Für N_2O-Emissionen aus Mineralisierung von organischer Substanz in Mineralböden und Weidegang werden seit Submission 2025 die Tier-1-Emissionsfaktoren aus IPCC (2019) verwendet. Für Mineralisierung in organischen Böden werden die Tier-2 Emissionsfaktoren aus Tiemeyer et al. (2020) verwendet.

5.1.5.1.2 Den direkten N2O-Emissionen zugrunde liegende N-Mengen (3.D)

Da keine Daten zur Mineraldüngerausbringung erhoben werden, setzt das Inventar die N-Mengen der Mineraldüngerausbringung den offiziell erfassten N-Mengen des Mineraldüngerverkaufs gleich. Diese Erfassung erfolgt um ein halbes Jahr versetzt gegenüber dem Kalenderjahr. Für das Inventar wird zunächst die gesamte im zweiten Halbjahr des Jahres j-1 und im ersten Halbjahr des Jahres j verkaufte Mineraldüngermenge dem Jahr j zugeordnet. Um im Inventar Lagereffekte zu approximieren, erfolgt danach eine jahresübergreifende Mittelung der Mineraldüngerdaten (gleitendes zentriertes Dreijahresmittel für 1990 bis 2023; für 2024 gewichtetes Mittel aus 2023 mit Wichtung 1/3 und 2024 mit Wichtung 2/3). Dieses Vorgehen folgt dem Beispiel von Österreich (Mittelung über zwei Jahre) und Frankreich (Mittelung über drei Jahre) (UNFCCC, 2025).

Die N-Menge im ausgebrachten Wirtschaftsdünger wird mit Hilfe des N-Fluss-Konzepts (siehe Kapitel 4.2 in Vos et al. (2026)) berechnet, siehe Tabelle 242. Die ausgewaschenen N-Mengen beziehen sich auf Auswaschung im Rahmen der Feldrandlagerung von Festmist. Diese wird seit Submission 2023 berichtet, siehe Kapitel 5.1.5.1.5 (IPCC, 2019; LAWA, 2019).

Tabelle 242: Berechnung der N-Mengen im ausgebrachten Wirtschaftsdünger (einschließlich Wirtschaftsdünger-Gärreste) (3.D), in Gg

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
N-Ausscheidungen [a]	1448,8	1266,3	1224,9	1185,2	1163,3	1197,2	1189,8	1192,7	1171,0	1154,5	1129,6	1086,4	1052,4	1048,4	1038,6
+ Einstreu-N [b]	64,1	55,1	50,5	50,4	50,2	50,3	49,8	49,6	49,1	48,6	47,9	47,4	47,5	47,5	47,0
- (NH_3-N + NO-N) [c]	-245,5	-206,7	-202,6	-201,9	-194,3	-191,1	-188,0	-187,4	-182,0	-177,8	-173,2	-165,1	-157,1	-156,0	-155,0
- N_2O-N [d]	-7,7	-6,7	-6,4	-6,3	-6,1	-5,8	-5,7	-5,6	-5,5	-5,4	-5,2	-5,0	-4,9	-4,9	-4,8
- N_2 [e]	-23,2	-20,2	-19,1	-18,8	-18,2	-17,3	-17,0	-16,9	-16,4	-16,1	-15,6	-14,9	-14,6	-14,7	-14,5
- N ausgewaschen	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Ergebnis	**1236,4**	**1087,8**	**1047,3**	**1008,5**	**994,8**	**1033,3**	**1028,8**	**1032,3**	**1016,2**	**1003,9**	**983,4**	**948,7**	**923,3**	**920,4**	**911,2**

[a] Gesamt- N-Ausscheidungen nach Abzug der Ausscheidungen beim Weidegang, siehe Tabelle 219 im vorliegenden NID (SIEHE CR-Table 3.B(b))

[b] siehe Tabelle 227 im vorliegenden NID

[c] siehe Zelle S31 in CR-Table 3.B(b)

[d] siehe Tabelle 282 im vorliegenden NID (entspricht Zelle X34 in CR-Table 3.B(b), multipliziert mit Molgewichtsverhältnis 28/44)

[e] N_2-Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Mangement werden als das Dreifache der N_2O-N-Emissionen berechnet (siehe Vos et al. (2026), Kapitel 4.2.4)

Die N-Menge, die mit Energiepflanzen-Gärresten ausgebracht wird, ergibt sich aus der N-Menge in den zur Vergärung eingesetzten Energiepflanzen abzüglich der N-Verluste durch Emissionen aus dem Gärrestelager.

Die N-Mengen in Gärresten aus Abfall, Kompost aus Bioabfall und Kompost aus Grünabfall wurden aus der Abfallstatistik des statistischen Bundesamtes abgeleitet.

Der Import von Wirtschaftsdüngern wird ausschließlich aus den Niederlanden abgebildet, da diese Zahlen zum Export nach Deutschland veröffentlichen. Die N-Menge der Ausbringung importierter Wirtschaftsdünger wird aus einer Statistik des niederländischen CBS (Centraal Bureau voor de Statistiek) entnommen, siehe CBS (2025). Der Anteil des niederländischen Exports der nach Deutschland gelangt ist, sowie die Arten des importierten Wirtschaftsdüngers und ihr Anteil an der gesamt-importierten Menge, wird einer Statistik des niederländischen RVO (Rijksdienst voor Ondernemend Nederland) entnommen, siehe RVO (2025). Für die Jahre 1990-2009 lagen keine Daten zur Aufteilung der Importmenge in verschiedene Wirtschaftsdüngerarten vor, daher wurde die Verteilung von 2010 für diese Jahre übernommen.

Die N-Menge der Klärschlammausbringung wird für jedes Bundesland aus Aufstellungen des Umweltbundesamtes (Fachgebiet III 3.3) bzw. seit 2009 des Statistischen Bundesamtes (Referat G 202) berechnet. Da für 2024 keine Daten verfügbar waren, wurde der Wert von 2023 beibehalten. Der Rückgang der N Menge zwischen 2016 und 2017 ist laut dem Statistischen Bundesamt wahrscheinlich zurückzuführen auf die Novellierungen der Klärschlammverordnung 2017 und der Düngemittelverordnung 2015. Diese schränken die Ausbringungsmöglichkeiten von Klärschlamm auf landwirtschaftlichen Flächen ein.

Die Berechnung direkter N_2O-Emissionen infolge von N-Ausscheidungen beim Weidegang erfolgt proportional zu der auf der Weide ausgeschiedenen N-Menge (siehe Kapitel 5.1.3.4).

Die durch Ernterückstände im Boden verbleibenden N-Mengen ergeben sich aus den Anbauflächen, den Erträgen und den kulturspezifischen N-Gehalten. Daten zu Anbauflächen und Frischmasseerträgen berichtet das Statistische Bundesamt (Statistisches Bundesamt, FS 3, R 3). Die Umrechnung in Trockenmasseerträge erfolgt mithilfe von Trockenmassegehalten aus der

Düngeverordnung (DüV, 2017). Die Werte der in den Ernterückständen enthaltenen relativen N-Gehalte werden der Düngeverordnung (DüV, 2007, 2017) sowie einer Aufstellung des Instituts für Gemüse- und Zierpflanzenbau (Feller et al., 2011) entnommen. Die mit Stroh als Einstreu für die Tierhaltung von der Fläche entfernten N-Mengen werden abgezogen. Seit Submission 2025 werden in der Berechnungsmethodik auch Ernterückstände von Zwischenfrüchten berücksichtigt. Zu Eingangsdaten und Berechnungsmethodik siehe Kap. 2.8.6 und 5.3.1 in Vos et al. (2026).

Die Ermittlung der N-Mineralisierung in mineralischen Ackerböden ist im vorliegenden NID in Kapitel 6 beschrieben (siehe Kapitel 6.1.2.6, 6.4.2.7.3 und 6.5.2.3.2). Die N-Menge aus Mineralisierung wurde aus der Nettokohlenstoffmineralisierung abgeleitet, welche im LULUCF-Sektor auf einem 100 m x 100 m Grid durch ein Prozessmodell (RothC) modelliert wird und stark wetterabhängig ist, so dass die interannuelle Variabilität sehr hoch ist. Ausschließlich Kohlenstoffverluste auf Punkten des LULUCF-Grid werden berücksichtigt; für Punkte, die Kohlenstoff sequestrieren, wird unterstellt, dass kein Lachgas aus Mineralisierung emittiert wird.

Um die direkten N_2O-Emissionen aus Böden zu berechnen, werden N-Einträge für die NUTS-3-Regionen benötig. Die Verteilung der Wirtschaftsdünger und Gärreste wird im Inventarmodell aus Aktivitätsdaten auf NUTS-3-Ebene berechnet. Seit Submission 2026 wird nicht mehr davon ausgegangen, dass der Wirtschaftsdünger in der NUTS-3-Region ausgebracht wird, in der er anfällt. Stattdessen kommt jetzt ein Transportmodell zum Einsatz, siehe Kapitel 5.1.2.5. Die N-Menge in Klärschlämmen liegt für Bundesländer (NUTS-1-Regionen) vor und wird vom statistischen Bundesamt jährlich zur Verfügung gestellt. Sie wird den NUTS-3 Regionen entsprechend ihrer Bevölkerungszahl zugewiesen. Die N-Mengen in Gärresten aus Abfall, Kompost aus Bioabfall und Kompost aus Grünabfall liegen nur auf Deutschlandebene vor. In einem ersten Schritt wurden sie entsprechend der Bevölkerungszahl auf die Bundesländer verteilt und anschließend innerhalb der Bundesländer entprechend der landwirtschaftlichen Fläche auf die NUTS-3-Regionen verteilt. Die N-Mengen aus importierten Wirtschaftsdüngern liegen ebenfalls nur auf Deutschlandebene vor. Sie werden wie der einheimische Wirtschaftsdünger mit Hilfe des Transportmoduls auf die NUTS-3-Regionen verteilt.

Die ausgebrachte Mineraldüngermenge liegt nach der jahresübergreifenden Mittelung auf Bundesebene vor. Die Verteilungen der Menge muss dementsprechend für die NUTS-3 Regionen modelliert werden.

Seit Submission 2026 geschieht dies für alle Jahre der Zeitreihe auf Grundlage einer Methode aus dem AGRUM-DE-Projekt, das Stickstoffflächenbilanzen im Rahmen des Monitorings der Stickstoffbelastung von Gewässern (EU-Wasserrahmenrichtlinie) modelliert hat (Zinnbauer et al. (2023), Kapitel 4.1.4.3).

Hierzu wird in einem ersten Schritt für jedes Jahr und jede Region ein kulturarten- und standortabhängiger Stickstoffbedarf ermittelt, basierend auf linearen ertragsabhängigen Funktionen.

In einem zweiten Schritt wird der N-Bedarf um die Rücklieferung der Vorkultur vermindert. Da im Py-GAS-EM Modell Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Jahren der Zeitreihe vermieden werden sollten, wird davon ausgegangen, dass die Vorkulturen in einer NUTS-3 Region näherungsweise den im aktuellen Jahr angebauten Kulturen entsprechen und die Rücklieferung anhand des im aktuellen Jahr stattfindenden Anbaus berechnet.

Im dritten Schritt erfolgt die Berechnung des Bedarfes an N aus mineralischem Dünger, indem vom N-Bedarf die in der NUTS-3 Region zur Ausbringung vorhandenen pflanzenverfügbaren N-

Mengen aus Wirtschaftsdüngern, Gärresten, Klärschlämmen und Komposten sowie die N-Fixierung aus Leguminosen abgezogen werden. Die Restmenge entspricht dem Bedarf an mineralischem Dünger. Der Bedarf einer NUTS-3 Region wird durch die Summe der Bedarfe aller NUTS-3 Regionen in dem entsprechenden Jahr geteilt, um festzulegen, welcher Anteil der im Bundesgebiet für das Jahr ermittelten Mineraldüngermenge in der entsprechenden NUTS-3 Region ausgebracht wird.

Das detaillierte Vorgehen ist in AGRUM (2024) Kapitel 4.1.4.3 sowie in (Vos et al., 2026) Kapitel 2.8 beschrieben.

Bei vielen Eingangsdaten bzw. N-Mengen, die der Berechnung der direkten N_2O-Emissionen zugrunde liegen, ergaben sich Änderungen im Vergleich zur Submission 2025. Diese sind im Kapitel 5.1.7.3 beschrieben.

Tabelle 243 gibt die aus verschiedenen Quellen stammenden N-Mengen an, die der Berechnung der direkten N_2O-Emissionen (siehe Kapitel 5.5.2.1.1) zugrunde gelegt werden.

Tabelle 243: N-Mengen, die der Berechnung der direkten N_2O-Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden zugrunde liegen (3.D), in Gg

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Mineraldünger	2194,7	1722,9	1921,6	1796,6	1635,4	1736,2	1730,7	1622,0	1499,3	1403,7	1326,6	1244,8	1123,2	1047,7	1028,4
Wirtschaftsdünger incl. W.- Gärreste	1236,4	1087,8	1047,3	1008,7	996,0	1036,0	1031,9	1035,6	1019,6	1007,4	987,0	952,5	927,1	924,2	915,1
Energiepflanzen-Gärreste	0,0	0,6	5,1	43,4	158,7	289,1	287,8	283,3	279,5	280,0	286,5	281,6	302,4	293,3	293,3
Gärreste aus Abfall	0,0	0,0	1,6	5,0	10,5	15,1	14,0	13,8	14,0	13,8	13,4	15,1	15,6	17,5	18,2
Kompost aus Bioabfall	4,5	19,5	31,9	28,8	22,6	22,6	23,3	21,9	25,1	24,3	25,4	23,0	23,1	19,9	18,5
Kompost aus Grünabfall	1,1	4,9	7,7	9,5	11,3	13,7	14,3	14,9	14,9	15,9	16,7	15,9	15,9	14,6	13,8
Importierter Wirtschaftsdünger	5,2	19,3	15,6	21,5	28,2	28,8	30,3	27,5	22,2	21,3	18,1	15,3	14,2	16,6	16,5
Klärschlämme	27,4	35,3	33,0	27,4	26,3	18,9	18,8	14,0	13,3	16,1	13,9	12,0	12,1	10,4	10,4
Weidegang	239,4	194,6	173,2	155,3	146,5	142,7	140,9	140,1	137,7	135,6	133,1	130,5	130,5	131,7	129,8
Ernterückstände	678,2	660,6	718,2	746,6	760,0	841,0	842,1	880,5	739,7	814,9	838,1	865,2	847,6	856,0	848,4
Mineralisierung	299,2	324,6	362,8	265,2	217,8	219,5	274,5	347,6	188,5	289,5	253,2	306,2	245,5	489,8	119,3

Bemerkenswert ist in der Zeitreihe der N-Mengen aus Ernterückständen die signifikante Abnahme der N-Mengen bei Ernterückständen zwischen 2017 und 2018. Dies wird vor allem auf die erschwerten Anbaubedingungen und teilweise sehr geringen Erntemengen aufgrund der extrem heißen und trockenen Witterung im Jahr 2018 sowie die in einigen Regionen Deutschlands sehr nassen Bedingungen zur Saatzeit der Winterfrüchte Ende 2017 zurückgeführt. Die ausgebrachte Mineraldünger-N-Menge nimmt seit 2016 stetig ab. Es ist wahrscheinlich, dass dies neben der Trockenheit und Auswirkungen des Ukrainekriegs in der Hauptsache auf Verschärfungen der rechtlichen Regelungen, vor allem der Düngeverordnung DüV (2017) zurückzuführen ist. Der auffällige Peak in 2023 bei der N-Menge aus Mineralisierung ist darauf zurückzuführen, dass dies ein Jahr mit großflächig günstigen Mineralisierungsbedingungen war, das auf mehrere Jahre mit ungünstigen Mineralisierungsbedingungen folgte, in denen viel gut abbaubarer organischer Kohlenstoff in den Böden aufgebaut wurde.

5.1.5.1.3 Flächen bewirtschafteter organischer Böden (3.D)

Tabelle 244 zeigt die Flächen der bewirtschafteten organischen Böden, gegliedert nach Acker und Grünland im engeren Sinne. Die Daten wurden durch den LULUCF-Sektor bereitgestellt und entsprechen den im LULUCF-Sektor zugrunde gelegten Flächen (siehe Kapitel 6.1.2.2.2). Im LULUCF-Sektor umfasst die Summe der Grünlandfläche zusätzliche Kategorien ohne landwirtschaftliche Nutzung. Die Flächen von Grünland umfassen alle Teilflächen unabhängig vom Grundwasserflurabstand. Der Umstand, dass bei sehr geringem Grundwasserflurabstand kein N_2O emittiert wird, kommt in den effektiven Emissionsfaktoren (IEF) zum Ausdruck, siehe Kapitel 5.5.2.1.1.

Tabelle 244: Flächen der bewirtschafteten organischen Böden (3.D), in 1000 ha

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
insgesamt	1406,9	1401,6	1395,9	1389,4	1382,0	1374,1	1371,6	1369,1	1366,6	1364,1	1361,6	1358,1	1354,6	1351,1	1347,6
Acker	319,9	324,7	330,9	339,4	351,7	370,6	366,8	363,0	359,2	355,4	351,6	347,0	342,4	337,9	333,3
Grünland	1087,0	1076,9	1065,0	1050,0	1030,3	1003,5	1004,8	1006,1	1007,4	1008,7	1010,0	1011,1	1012,1	1013,2	1014,2

5.1.5.1.4 Deposition reaktiven Stickstoffs (3.B, 3.D, 3.J)

Die Deposition reaktiven Stickstoffs wird aus den im Inventar berechneten NH_3- und NO-Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft abgeleitet. Dies erfolgt getrennt für die NH_3- und NO-Quellbereiche „Stall & Lager“ (3.B), „Lagerung von Energiepflanzen-Gärresten“ (3.J) sowie „Böden“ (3.D). „Böden“ umfasst Emissionen aus der Ausbringung von Mineraldünger, Wirtschaftsdünger und Wirtschaftsdünger-Gärresten, Klärschlamm und sonstigen organischen Düngern (Energiepflanzen-Gärreste, Gärreste aus Abfall, Kompost aus Bioabfall, Kompost aus Grünabfall, importierter Wirtschaftsdünger), Emissionen aus Weidegang sowie die NH_3-Emissionen aus Ernterückständen.

Tabelle 245 zeigt für die Sektoren 3.B, 3.D und 3.J die Mengen an reaktivem Stickstoff, die der Berechnung von indirektem N_2O aus der N-Deposition zugrunde liegen.

Als Emissionsfaktoren werden seit Submission 2026 die klimadifferenzierten Default EF_4 aus IPCC (2019) verwendet: 0.014 kg kg^{-1} für „wet climate“ und 0,005 kg kg^{-1} für „dry climate“. Die Anteile der NUTS 3 Regionen, die auf die jeweilige Klimaklasse entfallen, werden jährlich hochauflösend aus Niederschlags- und Evapotranspirationsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) berechnet, siehe Kapitel 5.3.5.2.2.

Tabelle 245: Sektoren 3.B, 3.D und 3.J: Mengen an reaktivem Stickstoff aus der Deposition von NH_3 und NO, in Gg

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
3.B, Wirtschaftsdünger incl. W.- Gärreste	245,5	206,7	202,6	201,9	194,3	191,1	188,0	187,4	182,0	177,8	173,2	165,1	157,1	156,0	155,0
3.D, Böden	443,7	372,1	372,8	356,0	368,4	392,9	391,5	375,5	351,6	335,0	295,9	286,7	282,8	276,2	272,3
3.J, Energiepflanzen-Gärreste	0,0	0,0	0,1	1,0	2,4	2,6	2,5	2,3	2,1	1,8	1,6	1,3	1,4	1,1	1,1

5.1.5.1.5 Auswaschung und Oberflächenabfluss (3.D, 3.B)

Für die Berechnung der N_2O-Emissionen aus Auswaschung und Oberflächenabfluss für den Sektor 3.D wird ein Tier-3 Verfahren angewendet, das in Eysholdt et al. (2022) detailliert beschrieben ist: Die Methode basiert auf der Berechnung von N-Überschüssen, von denen ein bestimmter Anteil, der modelliert wurde und auf NUTS-2 Ebene variiert, als Nitrat in das

Grundwasser ausgewaschen wird oder über lateralen Abfluss in Vorfluter gelangt. Die N-Überschüsse werden berechnet, indem zunächst die Summe des zur Verfügung stehenden Stickstoffs gebildet wird (N in den ausgebrachten Mengen von Mineraldünger, Wirtschaftsdünger, Klärschlamm und sonstigen organischen Düngern sowie die durch Weidegang, Ernteresiduen und Mineralisierung zur Verfügung stehenden N-Mengen). Davon wird der Stickstoff in der Erntemenge der Feldfrüchte abgezogen, sowie die N Mengen in den NH_3 Emissionen bei der Ausbringung aller N-haltigen Quellen. Der Anteil des N-Überschusses, der ausgewaschen wird, wurde von Eysholdt et al. (2022) auf NUTS-2 Ebene modelliert. Zu Details siehe Kap. 5.3.2.1 in Vos et al. (2026). Als Emissionsfaktor wird der Default EF_5 aus IPCC (2019), 0.011 kg kg^{-1}, verwendet.

Für den Sektor 3.B wird die Berechnung der N_2O-Emissionen aus Auswaschung und Oberflächenabfluss ebenfalls durchgeführt, da aus der Landwirtschaftszählung 2020 (LZ2020) Daten zur Feldlagerung von Mist zur Verfügung stehen. Nur für diesen Anteil der Mistlagerung wird Auswaschung angenommen, da für alle anderen Arten der Lagerung eine Auswaschung durch die baurechtlichen Vorgaben verhindert wird. Laut der Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA, 2019) muss ein Feldrandlager nach spätestens vier Wochen eine wasserdichte Abdeckung erhalten. Eine Auswaschung von N tritt also nur in den ersten vier Wochen der Lagerung auf. Der ausgewaschene Anteil der gelagerten N-Menge ($Frac_{LEACHMS}$) wird mit Hilfe von (IPCC, 2019) berechnet, siehe Kap. 4.4.3 in Vos et al. (2026) und beträgt 0.00333 kg kg^{-1}. Der Emissionsfaktor ist der Default EF_5 aus IPCC (2019), 0.011 kg kg^{-1}. Die berechneten Mengen an ausgewaschenem Stickstoff sind in Tabelle 246 wiedergegeben.

Tabelle 246: Ausgewaschene N-Menge (incl. Oberflächenabfluss) 3.B und 3.D, in Gg

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
3.B	0.13	0.07	0.07	0.07	0.07	0.05	0.05	0.05	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03
3.D	522.1	394.9	420.0	362.2	342.1	393.6	403.5	389.3	412.4	368.9	332.4	297.1	294.6	311.9	223.6

5.1.5.2 CO_2-Emissionen aus Kalkung und Harnstoffanwendung (3.G-I)

Aufgrund des unterschiedlichen Carbonat-Kohlenstoffgehalts und den daraus resultierenden unterschiedlichen CO_2-Emissionsfaktoren wird in der Berichterstattung zwischen Dolomit und den übrigen Kalkdüngern unterschieden. Bei den übrigen Kalkdüngern wird die Ausbringung von Kalkammonsalpeter gesondert betrachtet. Die daraus resultierenden CO_2-Emissionen werden unter CRF 3.I („Andere kalkhaltige Dünger“) berichtet. Die CO_2-Emissionen aus der Ausbringung der anderen Kalkdünger und Dolomit werden unter CRF 3.G berichtet. Die berichteten CO_2-Emissionen umfassen entsprechend den IPCC-Anforderungen (IPCC (2006b Vol 4, Chapter 11.3) neben den Emissionen aus der Landwirtschaft auch die aus der Kalkung im Forstbereich (IPCC (2006b).

Daten zu ausgebrachten Düngekalkmengen sind nicht verfügbar. Daher wird die Ausbringung den im Inland verkauften und statistisch erfassten Produktmengen (Statistisches Bundesamt, FS 4, R 8.2) gleichgesetzt. Diese Erfassung erfolgt um ein halbes Jahr versetzt gegenüber dem Kalenderjahr. Für das Inventar wird zunächst angenommen, dass der gesamte im zweiten Halbjahr des Jahres j-1 und im ersten Halbjahr des Jahres j verkaufte Düngekalk im Jahr j ausgebracht wurde. Danach erfolgt analog zum Mineraldünger (siehe Kapitel 5.1.5.1.2) eine jahresübergreifende Mittelung.

Es werden kohlensaure, Misch-, Carbo- und Rückstandskalke sowie Kalkammonsalpeter berücksichtigt. Die in CaO- oder N-Einheiten berichteten Produktmengen werden für die

Emissionsberechnungen in Einheiten von $CaCO_3$ für Kalkstein und $CaMg(CO_3)_2$ für Dolomit umgerechnet.

Der Anteil von Dolomit an der Düngekalk-Gesamtmenge wird statistisch nicht erfasst. Er wird für das Inventar anhand eines Expertenurteils (Müller, 2016) berechnet, nach dem der im Forstbereich eingesetzte Düngekalk zu einem Drittel aus $MgCO_3$ besteht und die Anwendung von Dolomit in der Landwirtschaft vernachlässigt werden kann.

Tabelle 247 zeigt die den Emissionsberechnungen zugrunde liegenden Kalkdüngermengen für Landwirtschaft und Forst zusammen, siehe Kap. 2.8.1 in Vos et al. (2026). Die Abweichung der Daten für 2023 gegenüber Submission 2025 geht auf die Einbeziehung der Daten von 2024 in das übergreifende Mittel zurück.

Tabelle 247: Düngekalkmengen (3.G und 3.I), in Gg

	Kalkstein (in $CaCO_3$)	Dolomit (in $CaMg(CO_3)^2$)	Kalkammonsalpeter (in $CaCO_3$)
1990	4205,3	733,6	1160,1
1995	2436,0	436,1	885,2
2000	3468,8	354,8	833,2
2005	3021,5	205,8	698,9
2010	3325,0	180,4	584,6
2015	4156,4	161,5	524,3
2016	4126,2	139,0	513,0
2017	4269,1	124,2	484,2
2018	4528,3	115,3	460,7
2019	4525,0	100,3	441,4
2020	4455,0	104,0	421,5
2021	4397,7	99,9	399,0
2022	4415,5	108,7	357,9
2023	4309,8	88,9	335,9
2024	4244,9	81,3	329,0

Die Berechnung von CO_2-Emissionen aus der Harnstoffanwendung erfolgt proportional zu den in Tabelle 248 angegebenen Mengen an ausgebrachtem Harnstoff (einschließlich Ammoniumnitrat-Harnstoff-Lösung). Diese Mengen wurden auf stöchiometrischem Wege (Multiplikation mit dem Molgewichtsverhältnis 60/28) aus den in der Offizialstatistik berichteten Harnstoff-N-Mengen abgeleitet und ebenfalls der oben im Zusammenhang mit der Kalkung erwähnten gleitenden zeitlichen Mittelung unterzogen.

Tabelle 248: Ausgebrachte Harnstoffmengen einschließlich Ammoniumnitrat-Harnstoff-Lösung (3.H), in Gg

1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
654,5	625,3	808,8	874,2	969,2	1079,3	1111,6	981,2	825,3	678,7	590,8	541,8	500,5	473,9	450,3

5.1.5.3 NMVOC-Emissionen aus landwirtschaftlichen Kulturen

Tabelle 249 zeigt exemplarisch für erstes und letztes Zeitreihenjahr die Eingangsdaten, die für die NMVOC-Emissionsberechnung für landwirtschaftliche Kulturen nach EMEP (2023) -3D-21 und EMEP (2023)-3D-44 berechnet werden (siehe Kapitel 5.5.2.1.5). Daten zu Anbauflächen und Frischmasseerträgen berichtet (Statistisches Bundesamt, FS 3, R 3). Die Umrechnung in Trockenmasseerträge erfolgt über die Trockenmassegehalte aus der Düngeverordnung (DüV, 2007, 2017). Die relative Emissionsdauer wurde für Weizen, Roggen, Raps und Gras aus EMEP (2023) -3D-21 entnommen und sinngemäß auf die übrigen Kulturen übertragen.

Tabelle 249: Eingangsdaten für die Berechnung von NMVOC-Emissionen aus landwirtschaftlichen Kulturen (Übersicht)

Kultur	Anbaufläche [1000 ha]		Frischmasseertrag [Mg ha^{-1}]		Trockenmassegehalt [kg kg^{-1}]	Relative Emissionsdauer [a a^{-1}]
	1990	2024	1990	2024		
Weizen	2419,9	2566,9	6,3	7,1	0,86	0,3
Roggen	1067,1	535,5	3,8	4,8	0,86	0,3
Gerste	2612,5	1659,8	5,4	6,4	0,86	0,3
Hafer	533,5	164,7	4,5	4,5	0,86	0,3
Triticale	77,3	265,6	5,1	5,7	0,86	0,3
Getreide zur Ganzpflanzenernte	0,0	123,1	0,0	28,0	0,35	0,3
Körnermais	228,4	498,4	6,8	10,1	0,86	0,3
Silomais	1365,4	2048,6	40,4	44,4	0,28	0,3
Raps	557,5	1085,6	3,0	3,3	0,91	0,3
Hackfrüchte	1249,6	719,5	40,6	68,6	0,22	0,3
Kleegras, Alfalfa, Futtergras	856,6	688,0	34,0	39,1	0,20	0,5
Hülsenfrüchte	121,2	285,0	3,4	3,2	0,86	0,3
Wiesen und Mähweiden	5417,2	4452,5	31,1	31,9	0,20	0,5

5.1.6 Gesamtunsicherheit aller THG-Emissionen des Sektors 3

Ergänzend zu den Emissionsberechnungen wurde die Gesamtunsicherheit aller THG-Emissionen des Sektors 3 berechnet. Grundlage war das in IPCC (2006b Vol 1, Chapter 3) als “Approach 1” beschriebene Verfahren, das auf der Anwendung der Gaußschen Fehlerrechnung beruht. Dabei bleibt per Konvention unberücksichtigt, dass diese Fehlerrechnung Normalverteilung voraussetzt, eine Annahme, die von einigen der eingehenden Aktivitätsdaten und Emissionsfaktoren nicht erfüllt wird oder deren Einhaltung nicht geprüft werden kann. Für das vorliegende Treibhausgasinventar der Landwirtschaft wurde von der in IPCC (2006b Vol 1, Chapter 3) beschriebenen Standardversion des „Approach 1“ ausgegangen: Korrelation zwischen den Emissionsfaktoren der verschiedenen Zeitreihenjahre, aber von Jahr zu Jahr unkorrelierte Aktivitätsdaten. Für asymmetrische Verteilungen wurde, wie von IPCC (2006b Vol 1, Chapter 3), für das „Approach 1“-Verfahren gefordert, von den beiden Intervallen [2,5 %-Perzentil; Mittelwert] und [Mittelwert; 97,5 %-Perzentil] das größere verwendet. (Für die Unsicherheitsberechnung mit dem „Approach 2“-Verfahren für die gesamte

Treibhausgasberichterstattung durch das Umweltbundesamt wurden im ZSE für alle Unsicherheiten landwirtschaftlicher Größen die untere und die obere Schranke des 95 %-Konfidenzintervalles sowie der Typ der Verteilung bereitgestellt.) Weitere Details zur Unsicherheitenberechnung für das deutsche Inventar finden sich in Kap. 6 in Vos et al. (2026).

Tabelle 250 zeigt für das letzte Zeitreihenjahr die mit dem "Approach 1"-Verfahren berechnete Gesamtunsicherheit aller Emissionen des Sektors „Landwirtschaft" (Sektor 3). Die Unsicherheit des Gesamttrends seit 1990 ist ebenfalls aus Tabelle 250 zu entnehmen. Alle Emissionswerte sind in CO_2-Äquivalenten angegeben.

Der besseren Übersichtlichkeit wegen erfolgt die Darstellung in Tabelle 250 unter Verwendung der IPCC-Tiersammelkategorien „Übrige Rinder", „Schweine", „Schafe", „Pferde" und „Geflügel". Die für diese Sammelkategorien angegebenen Unsicherheiten von Aktivitätsdaten und Emissionsfaktoren wurden mittels Fehlerfortpflanzungsrechnung aus den Unsicherheiten der im Py-GAS-EM-Modell verwendeten Tierunterkategorien abgeleitet. Eine Darstellung ähnlich Tabelle 250, aber mit allen einzelnen Tierunterkategorien, findet sich in Kapitel 6.10 in Vos et al. (2026).

Auch die Unsicherheiten der Aktivitätsdaten und der Emissionsfaktoren der verschiedenen Mineraldüngerkategorien wurden mittels Fehlerfortpflanzungsrechnung aggregiert. Für die Ausbringung von Wirtschaftsdünger und Wirtschaftsdünger-Gärresten wurden die in Tabelle 250 angegebenen aggregierten Unsicherheiten unter Berücksichtigung der Unsicherheiten der Ausbringungsbeiträge der einzelnen Tierkategorien mithilfe der Fehlerfortpflanzungsrechnung aggregiert.

Deutlich zu erkennen ist, dass die Unsicherheiten der Emissionsfaktoren in der Regel deutlich über denen der Aktivitätsdaten liegen, so dass sie die kombinierte Unsicherheit in Spalte „Combined uncertainty as % of total national emissions" dominieren.

Die Gesamtunsicherheit der Emissionen des Quellsektors 3 (Tierhaltung, Nutzung landwirtschaftlicher Böden, Energiepflanzen-Vergärung) beträgt 14,9 % (gültig für das Jahr 2024). Die Unsicherheit des Trends 1990 –2024 liegt bei 5,6 %.

Tabelle 250: Gesamtunsicherheitsberechnung für die Emissionen des Sektors 3

Source category EntFer = Enteric Fermentation MM = Manure Management DEC = Digestion of Energy Crops	Gas	Base year emissions, in CO_2 equivalents (GWP_{CH4} = 28, GWP_{N2O} = 265)	Year 2023 emissions, in CO_2 equivalents	Activity data uncertainty (half the 95 % confidence interval)	Emission factor uncertainty (half the 95 % confidence interval)	Combined uncertainty (half the 95 % confidence interval)	Auxiliary calculations[A]	Type A sensitivity	Type B sensitivity	Uncertainty in trend in national emissions introduced by emission factor uncertainty	Uncertainty in trend in national emissions introduced by acticity data uncertainty	Square of "Uncertainty introduced into the trend in total national emissions"[B]
		kt a^{-1}	kt a^{-1}	%	%	%		%	%	%	%	
EntFer, dairy cows	CH_4	20.188,8	14.788,1	4	20	20,4	32,0	0,00	0,20	0,07	1,13	1,28
EntFer, other cattle	CH_4	15.273,6	9.267,3	2,2	10,7	10,9	3,6	0,02	0,13	0,25	0,39	0,21
EntFer, pigs	CH_4	757,3	588,7	3,0	15,3	15,6	0,0	0,00	0,01	0,01	0,03	0,00
EntFer, sheep	CH_4	651,2	364,7	10	30	31,6	0,0	0,00	0,00	0,04	0,07	0,01
EntFer, goats	CH_4	22,7	41,6	10	30	31,6	0,0	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00
EntFer, horses	CH_4	623,8	629,9	10	30	31,6	0,1	0,00	0,01	0,07	0,12	0,02
EntFer, deer	CH_4	87,2	162,8	200	30	202,2	0,4	0,00	0,00	0,04	0,62	0,39
EntFer, rabbits	CH_4	18,7	4,3	200	30	202,2	0,0	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00
EntFer, ostriches	CH_4	0,0	0,6	200	30	202,2	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
EntFer, fur animals	CH_4	0,5	0,0	200	30	202,2	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MM, dairy cows	CH_4	2.521,5	2.499,5	4	20	20,4	0,9	0,01	0,03	0,18	0,19	0,07
MM, other cattle	CH_4	2.683,8	1.468,8	2,2	11,1	11,3	0,1	0,01	0,02	0,07	0,06	0,01
MM, pigs	CH_4	3.045,2	1.945,3	3,0	16,1	16,4	0,4	0,00	0,03	0,05	0,11	0,01
MM, sheep	CH_4	25,2	14,1	10	30	31,6	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MM, goats	CH_4	0,6	1,0	10	30	31,6	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MM, horses	CH_4	119,4	153,9	10	30	31,6	0,0	0,00	0,00	0,03	0,03	0,00
MM, poultry	CH_4	83,3	141,1	6,3	10,1	11,9	0,0	0,00	0,00	0,01	0,02	0,00
MM, deer	CH_4	0,6	1,1	200	30	202,2	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MM, rabbits	CH_4	8,1	1,9	200	30	202,2	0,0	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
MM, ostriches	CH_4	0,0	0,1	200	30	202,2	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MM, fur animals	CH_4	0,9	0,0	200	30	202,2	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MM, direct N_2O, dairy cows	N_2O	1.313,2	643,8	4	100	100,1	1,5	0,00	0,01	0,41	0,05	0,17
MM, direct N_2O, other cattle	N_2O	1.068,0	680,5	2,2	52,0	52,1	0,4	0,00	0,01	0,06	0,03	0,00
MM, direct N_2O, pigs	N_2O	444,5	270,5	3,0	78,5	78,6	0,2	0,00	0,00	0,05	0,02	0,00
MM, direct N_2O, sheep	N_2O	50,7	28,3	10	100	100,5	0,0	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00
MM, direct N_2O, goats	N_2O	2,9	5,3	10	100	100,5	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MM, direct N_2O, horses	N_2O	293,7	343,7	10	100	100,5	0,4	0,00	0,00	0,18	0,07	0,04
MM, direct N_2O, poultry	N_2O	33,1	38,3	6,3	54,8	55,2	0,0	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00

Source category EntFer = Enteric Fermentation MM = Manure Management DEC = Digestion of Energy Crops	Gas	Base year emissions, in CO_2 equivalents (GWP_{CH4} = 28, GWP_{N2O} = 265)	Year 2023 emissions, in CO_2 equivalents	Activity data uncertainty (half the 95 % confidence interval)	Emission factor uncertainty (half the 95 % confidence interval)	Combined uncertainty (half the 95 % confidence interval)	Auxiliary calculations[A]	Type A sensitivity	Type B sensitivity	Uncertainty in trend in national emissions introduced by emission factor uncertainty	Uncertainty in trend in national emissions introduced by acticity data uncertainty	Square of "Uncertainty introduced into the trend in total national emissions"[B]
MM, direct N_2O, deer	N_2O	0,0	0,0	200	100	223,6	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MM, direct N_2O, rabbits	N_2O	6,3	1,4	200	100	223,6	0,0	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
MM, direct N_2O, ostriches	N_2O	0,0	0,0	200	100	223,6	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MM, direct N_2O, fur animals	N_2O	3,4	0,0	200	100	223,6	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MM, indirect N_2O, all animals (deposition)	N_2O	1.265,7	828,5	40	120	126,5	3,9	0,00	0,01	0,13	0,63	0,42
MM, indirect N_2O, all animals (leaching)	N_2O	0,6	0,2	200	100	223,6	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Soils, mineral fertilizers	N_2O	5.786,9	2.661,2	0,5	21,9	21,9	1,2	0,02	0,04	0,44	0,03	0,20
Soils, spreading of manure	N_2O	3.395,1	2.516,0	9,1	18,2	20,4	0,9	0,00	0,03	0,02	0,44	0,19
Soils, other organic fertilizers (spreading)	N_2O	28,4	958,5	8,2	32,7	33,7	0,4	0,01	0,01	0,41	0,15	0,19
Soils, sewage sludge	N_2O	71,8	23,5	10	40	41,2	0,0	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00
Soils, crop residues	N_2O	1.743,6	2.151,2	50	40	64,0	6,7	0,01	0,03	0,48	2,05	4,45
Soils, organic soils	N_2O	3.266,6	3.175,6	0,09	196	196,0	136,3	0,01	0,04	2,18	0,01	4,76
Soils, mineralization	N_2O	747,7	298,1	23,3	80	83,3	0,2	0,00	0,00	0,26	0,13	0,08
Soils, grazing	N_2O	512,3	256,4	20	300	300,7	2,1	0,00	0,00	0,45	0,10	0,22
Soils, indirect N_2O (deposition)	N_2O	2.349,0	1.407,9	50	120	130,0	11,8	0,00	0,02	0,46	1,34	2,02
Soils, indirect N_2O (leaching, run-off)	N_2O	2.391,4	1.024,5	200	100	223,6	18,5	0,01	0,01	0,94	3,91	16,18
DEC, digester and storage	CH_4	0,3	1.445,3	10	20	22,4	0,4	0,02	0,02	0,39	0,28	0,23
DEC, storage, direct N_2O	N_2O	0,1	87,1	10	100	100,5	0,0	0,00	0,00	0,12	0,02	0,01
DEC, storage, indirect N_2O (deposition)	N_2O	0,0	5,6	10	120	120,4	0,0	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
Liming, without Dolomite	CO_2	1.850,3	1.867,7	3	3	4,2	0,0	0,01	0,03	0,02	0,11	0,01
Liming, Dolomite	CO_2	349,7	38,8	100	3	100,0	0,0	0,00	0,00	0,01	0,07	0,01
Liming, Calcium Ammonium Nitrate	CO_2	510,4	144,8	3	3	4,2	0,0	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00
Application of urea	CO_2	480,0	330,2	1	1	1,4	0,0	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
Total		74.078,1	53.307,9									
					Percentage uncertainty in total inventory: 14,9				Trend uncertainty (percentage): 5,6			

A The data in this column describes auxiliary data needed to derive the percentage uncertainty in total inventory in the bottommost cell of this column. In order to calculate the data the calculation procedure provided by IPCC (2006a Vol 1, 3.31, Table 3.2, column H) , has been used. Note, however, that the head of column as prescribed by IPCC (2006a Vol 1, 3.31, Table 3.2, column H) („Contribution to Variance by Category ") does not correctly describe the data in column H. Hence the head of column had been modified.

B The head of this column as prescribed by IPCC (2006a Vol 1, 3.31, Table 3.2, column M)(„Uncertainty introduced into the trend in total national emissions"), has been modified in order to match the formula provided by IPCC (2006a Vol 1) and applied in the table above to calculate the data in this column.

5.1.7 Qualitätssicherung und -kontrolle

Eine allgemeine und für Kategorie 3. J zusätzlich auch eine kategoriespezifische Qualitätskontrolle sowie eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

5.1.7.1 Qualitätsmanagement Emissionsinventare des Thünen-Instituts

Das Qualitätsmanagement der Emissionsinventarerstellung am Thünen-Institut wurde konform zu den IPCC-Richtlinien und dem QSE (Kapitel 1.5.1) entwickelt. Rahmenbedingungen und Durchführung des Qualitätsmanagements sind im Konzept (BMELV, 2016) und in der Ausführungsbestimmung des Konzepts (Thünen-Institut (TI), 2016) ausführlich beschrieben. Für die Qualitätskontrolle wichtige Dokumente werden in der Inventarbeschreibung abgelegt, die von der Nationalen Koordinierungsstelle archiviert wird. Die Vorgaben und Abläufe der Ausführungsbestimmung wurden vollständig eingehalten. Die nachfolgenden Abschnitte gehen auf wichtige Aspekte der Qualitätskontrolle für diese Submission ein.

5.1.7.2 Eingangsdaten, Berechnungsverfahren und Emissionsergebnisse

Die Prüfung der Emissionsberechnungen und des NID umfasste die folgenden Elemente:

Im Rahmen der Inventarverbesserung wurden im Vorfeld der Emissionsberichterstattung 2026 folgende konzeptionelle Änderungen vorgenommen (für weitere Änderungen siehr Kapitel 5.1.7.3 und Kapitel 1.3 in Vos et al. (2026)):

- Berücksichtigung von Substrattransporten zu Biogasanlagen und Wirtschaftsdüngertransporten über Grenzen von NUTS-3-Regionen hinweg durch Einführung eines Transportmoduls in das PY-GAS-EM Modell
- Die räumliche Verteilung der synthetischen N-Düngermenge auf die NUTS-3-Regionen ist zeitlich nicht mehr statisch, sondern ändert sich in Abhängigkeit der angebauten Kulturen
- Bei den Emissionen aus Weidegang und den indirekten Emissionen aus Deposition werden erstmals die nach Klima differenzierte Emissionsfaktoren nach (IPCC, 2019) verwendet. Hierfür wurde aus flächendeckenden Niederschlags- und Evaporatranspirationsdaten für jede NUTS-3-Region und jedes Jahr ermittelt, wie hoch der Flächenanteil der landwirtschaftlichen Fläche mit trockenem bzw. feuchtem Klima gewesen ist.
- Die Tierkategorie Sauen wurde aufgeteilt in Jungsauen und Altsauen
- Die N-Ausscheidung der Milchkühe wird nun statt aus dem unterstellten Futter aus Milchharnstoffgehalt der Milch, Milchleistung und Proteingehalt der Milch abgeleitet

Die übrigen Berechnungsverfahren stimmen mit denen der Emissionsberichterstattung 2025 formal überein.

Die Aktivitätsdaten wurden auf Plausibilität und Konsistenz geprüft und gegebenenfalls anhand neuerer Daten aktualisiert.

Es wurde sichergestellt, dass die Flächen der organischen Böden unter Acker und Nutzgrünland konsistent zwischen LULUCF (Kapitel 4.B, 4.C) und Landwirtschaft (3.D) sind.

Jede einzelne Zeitreihe der Emissionsergebnisse für Submission 2026 wurde auf Konsistenz mit der entsprechenden Zeitreihe der Submission 2025 geprüft. Alle Abweichungen lassen sich durch Aktualisierungen von Eingangsdaten und/oder Berechnungsverfahren erklären.

Fluktuationen und Trends in den Zeitreihen sind erklärbar und die wichtigen sind im NID beschrieben.

Aktivitätsdaten und Emissionsergebnisse wurden mit entsprechenden Daten mitteleuropäischer Länder verglichen, die direkt benachbart oder in ihrer landwirtschaftlichen Praxis vergleichbar sind. Die deutschen Daten liegen dabei meist im mittleren Bereich oder auf dem Niveau eines oder mehrerer Vergleichsländer bzw. einem IPCC (2006b) oder IPCC (2019) Standardwert. Relevante Abweichungen von diesen Kriterien lassen sich in jedem Einzelfall begründen.

Eingangsdaten und Berechnungsergebnisse aller in der landwirtschaftlichen Emissionsberichterstattung relevanten Emissionsquellen sind als Hintergrund für die im NID 2026 und in den CR-Tabellen gezeigten Ergebnisse in einer EXCEL-Datei dokumentiert, die als Ergänzung zu Vos et al. (2026) erhältlich ist (siehe Kap. 1.3 in Vos et al. (2026)).

Die Daten im NID-Text wurden mit den Berechnungsergebnissen auf Konsistenz überprüft.

Die korrekte Übertragung der Aktivitätsdaten und der Emissionsfaktoren (IEF) in die ZSE-Datenbank (Zentrales System Emissionen), die den CR-Tabellen zugrunde liegt, wurde durch Vergleich der mit dem ZSE berechneten Emissionen mit den Ergebnissen des Inventarmodells Py-GAS-EM sicher gestellt.

5.1.7.3 Änderungen seit der letzten Submission

Im Rahmen der Inventarverbesserung oder aufgrund der Verfügbarkeit aktualisierter Eingangsdaten wurden gegenüber der Submission des Vorjahres zahlreiche Änderungen vorgenommen. Die bezüglich ihrer Auswirkungen relevanten Änderungen finden sich in der folgenden Übersicht. Insbesondere die Fälle bei denen gegenüber Submission 2025 vorläufige Daten für 2023 durch endgültige Daten ersetzt worden sind, sind hier nicht aufgeführt (für eine vollständige Liste der Änderungen siehe Kapitel 1.3 in Vos et al. (2026).

- Wirtschaftsdüngermanagement und Böden: Berücksichtigung von Substrattransporten zu Biogasanlagen und Wirtschaftsdüngertransporten über Grenzen von NUTS-3-Regionen hinweg durch Einführung eines Transportmoduls in das PY-GAS-EM Modell.
- Synthetische N-Dünger: Die räumliche Verteilung der Düngermenge auf die NUTS-3-Regionen ist zeitlich nicht mehr statisch, sondern ändert sich in Abhängigkeit der angebauten Kulturen und Erträge.
- Synthetischer N-Dünger: Der in Submission 2025 verwendete NH3-Emissionsfaktor für Einnährstoffdünger (0,084 kg NH3 pro kg N) wurde nach einer Korrektur in EMEP (2023) korrigiert (auf 0,024 kg NH3 pro kg N).
- Emissionen aus Weidegang und indirekte Emissionen aus Deposition: Aufgrund einer Reviewempfehlung werden erstmals die nach Klima differenzierten Emissionsfaktoren nach IPCC (2019) verwendet. Hierfür wurde aus flächendeckenden Niederschlags- und Evapotranspirationsdaten für jede NUTS-3-Region und jedes Jahr ermittelt, wie hoch der Flächenanteil der landwirtschaftlichen Fläche mit trockenem bzw. feuchtem Klima gewesen ist.
- Milchkühe: Die N-Ausscheidung wird statt aus dem modellierten Futter nun aus der Milchleistung, dem Milchharnstoffgehalt und dem Proteingehalt der Milch abgeleitet.
- Milchkühe: Die amtlich erhobenen endgültigen Milchleistungen des Jahre 2023 sind signifikant höher als die vorläufigen, die in der Submission 2025 verwendet wurden. Der Grund ist ein verbessertes Berechnungsverfahren, das auch in Zukunft angewendet werden

wird und nachträglich auch für das Jahr 2022 angewendet wurde. Für die Berichterstattung wurde ein Verfahren entwickelt mit dem die Milchleistungen vor 2022 nach oben korrigiert wurden.

- Schweine: Die Tierkategorie Sauen wurde aufgeteilt in Jungsauen und Altsauen mit unterschiedlichen Gewichten und damit unterschiedlichem Energiebedarf und Fütterung.
- Pferde: Aufgrund aktualisierter Futterempfehlungen für Großpferde wurden N- und VS-Ausscheidungen ab dem Jahr 2020 angepasst (erhöht). Bis 2010 werden die Werte aus Submission 2025 weiterverwendet, zwischen 2010 und 2020 wird linear interpoliert. Der Tier 1 Emissionsfaktor für Verdauung für Kleinpferde und Ponies wurde von 12,0 auf 11,4 für die gesamte Zeitreihe nach (IPCC, 2019), Fußnote 2 zu Tabelle 10.10 geändert.
- Gehegewild: Aufgrund neuer Daten für das Jahr 2023 verringert sich durch Interpolation die Anzahl der Tiere ab 2009 geringfügig.
- Wirtschaftsdüngerimporte: Wegen Korrektur der Niederländischen Exportdaten ändern sich die N-Mengen ab 2010 geringfügig.
- Ernterückstände: Die Anzahl der Grünlandschnitte wurde aufgrund eines neuen Verfahrens zur Ausreißer-Identifikation für die gesamte Zeitreihe aktualisiert
- Wirtschaftsdüngervergärung: Aufgrund der neu eingeführten Substrattransporte werden jetzt nicht mehr die prozentualen Anteile vergorenen Wirtschaftsdünger-N an der Gesamtproduktion an Wirtschaftsdünger als Eingangsgröße verwendet, sondern die absolute N-Menge, die in die Vergärung geht. Bis Submission 2025 wurden die Emissionen aus dem Stall bei der Berechnung der N-Mengen, die zur Vergärung kommen, nicht berücksichtigt. Dies wurde korrigiert und somit sind die Anteile an Wirtschaftsdünger, die in die Vergärung gehen jetzt höher.
- N-Mineralisierung in Mineralböden: Die Daten für die N-Mineralisierung stammen aus dem Tier-3-Berechnungsverfahren der Mineralisierungs- und Kohlenstoffbilanzierungsprozesse des LULUCF-Sektors. Die Daten weisen deutlich höhere interannuelle Schwankungen auf und sind in Submission 2026 im Mittel höher als in Submission 2025. Dies liegt vor allem daran, dass zusätzlich zu der Mineralisierung in Ackerland erstmals auch die Mineralisierung in Grünland in Übereinstimmung mit (IPCC, 2006a) mit ausgewiesen wird, die vorher unter LULUCF berichtet wurde. Die interanuellen Schwankungen sind auf die erstmalige Verwendung des Boden-Kohlenstoffmodells Roth-C unter Einbeziehung tatsächlicher Wetterdaten zurückzuführen (siehe Kapitel 6.1.2.7, 6.4.2.7.3 und 6.5.2.3.2).
- Bewirtschaftete organische Böden: Die Daten stammen aus den Berechnungsverfahren der Mineralisierungs- und Kohlenstoffbilanzierungsprozesse des LULUCF-Sektors. Sie werden jährlich aktualisiert. Die Gesamtfläche der bewirtschafteten organischen Böden ist am Anfang der Zeitreihe um etwa 2 % höher im Vergleich zu den entsprechenden Werten der Submission 2025. Der Unterschied verkleinert sich im Lauf der Jahre und dreht sich ab 2005 um. Am Ende der Zeitreihe ist die Gesamtfläche im Vergleich zu Submission 2025 um etwa 0,2 % kleiner.

5.1.7.4 Verifizierung

Die mit dem Inventarmodell Py-GAS-EM berechneten nationalen Emissionsergebnisse können nicht mit anderen Daten aus Deutschland verglichen werden, da solche Daten nicht vorliegen. Stattdessen wurde (siehe Kapitel 5.1.7.2) ein Vergleich von Eingangsdaten und Emissionsergebnissen mit entsprechenden Daten anderer Staaten sowie IPCC (2006b)-Standardwerten durchgeführt. Hierauf wird im vorliegenden NID in entsprechenden Unterkapiteln eingegangen.

Eine für den NIR 2014 im Rahmen eines Verifizierungsprojektes durchgeführte Verfizierung der deutschen Emissionsberechnungen durch einen externen Experten (Zsolt Lengyel, Verico SCE) erbrachte, dass die Eingangsdaten konsistent sind, und dass die durchgeführten Berechnungen konsistent und korrekt nach den methodischen Anforderungen der IPCC Guidelines durchgeführt wurden.

Zusätzlich wird das Py-GAS-EM-Modell im Rahmen der EAGER-Gruppe und durch Prüfung von Modulen durch das KTBL kontinuierlich validiert und verifiziert.

5.1.7.5 Reviews und Reports

Die ERT-Empfehlungen aus den Reviews bis einschließlich Submission 2020 wurden bis Submission 2023 umgesetzt und werden hier nicht näher aufgeführt.

Für die Submissionen 2021, 2023 und 2024 fand kein Review durch IPCC statt.

Das ERT des Submission-2022-Reviews empfahl eine Verbesserung der Transparenz im NID hinsichtlich Änderungen des Gewichtes und der N-Ausscheidungen von Milchkühen. Hierzu wurden in Submission 2024 ausführliche Informationen im Kapitel 5.1.3.3 hinzugefügt. Des Weiteren wurde eine Verbesserung der Transparenz bezüglich der Ableitung der seit Submission 2022 verwendeten Tier 2 Emissionsfaktoren für direkte N2O-Emissionen aus Böden angeregt. Hierzu wurden in Submission 2024 in Kapitel 5.5.2.1.1 weitere Informationen eingefügt. Als letzter Punkt des Reviews wurde eine verbesserte Transparenz hinsichtlich der Aktivitätsdaten zur Klärschlammausbringung empfohlen. Hierzu wurden die Aktivitätsdaten gemeinsam mit dem statistischen Bundesamt überprüft und korrigiert.

In den verschiedenen Überprüfungen der Submissionen seit 2019 gemäß ((EU, 2013b), Aritkel 19(2) der EU-Verordnung 525/2013) durch EU-Reviews waren keinerlei Änderungen an der Inventarmethodik oder an Eingangsdaten erforderlich (EEA, 2019, 2020, 2021, 2022).

In der Überprüfung der Submission 2025 gemäß Artikel 38/(1a) der (EU, 2018b) EU-Verordnung 2018/1999 und Artikel 4(3) der ((EU, 2018a), EU-Verordnung 2018/842) empfahl das TERT für die Ermittlung der indirekten Emissionen aus Atmosphärischer Deposition die Verwendung der nach Klima (feucht/trocken) disaggregierten default Emissionsfaktoren aus (IPCC, 2019), da ein Teil Deutschlands in trockenem Klima liegt. In Submission 2025 wurde nur der default (IPCC, 2019) für feuchtes Klima verwendet. Für die Jahre 2021 – 2023 der Submission 2025 wurde eine „technische Korrektur“durchgeführt unter der Annahme, dass 41 % der Fläche Deutschlands im trockenem Klima liegt. In der Submission 2026 wurde diese Empfehlung umgesetzt, unter Verwendung jährlicher räumlicher Daten zur Verteilung von feuchten und trockenen Klimabedingungen.

5.2 Fermentation bei der Verdauung (3.A)

5.2.1 Beschreibung der Kategorie (3.A)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
L/T	3 A, Enteric Fermentation	dairy cows	CH_4	20188,82	1,57	14788,07	2,09	-26,75
L/T	3 A, Enteric Fermentation	non-dairy cattle	CH_4	15273,58	1,19	9267,27	1,31	-39,32
L/-	3 A, Enteric Fermentation	other animals	CH_4	2161,42	0,17	1792,61	0,26	-17,06

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CH_4	Tier1/Tier2/Tier3	M/Q/AS/RS/NS	CS/D

Innerhalb der Kategorie „Fermentation bei der Verdauung“ ist die Kategorie „Milchkühe“ die wichtigste Emissionsquelle. Sie stellt für Methan nach der Emissionshöhe und dem Trend eine Hauptkategorie dar. Dies liegt an den hohen Tierzahlen und der hohen Leistung. Die Kategorie der übrigen Rinder ist ebenfalls eine Hauptkategorie, nach der Emissionshöhe und Trend. Die Kategorie andere Tiere ist Hauptkategorie nach dem Level.

CH_4 aus der Fermentation entsteht durch mikrobielle Umsetzungen im Verdauungstrakt. Die je Tier und Zeiteinheit abgegebenen Mengen sind von der Tierart, der individuellen Leistung der Tiere und der Nahrungszusammensetzung abhängig.

Der Trend der CH_4-Emissionen wird bestimmt durch abnehmende Tierzahlen, v. a. der Rinder im Gesamtzeitraum und aller Tierkategorien Anfang der 1990er Jahre, und durch bessere Verdaulichkeit des Futters, teilweise kompensiert durch steigende GE-Aufnahme infolge von Anstiegen bei Milchleistung und Tiergewichten.

Tabelle 251 zeigt die Veränderung der CH_4-Emissionen aus der Verdauung des Gesamttierbestandes seit 1990 sowie den prozentualen Anteil dieser Emissionen an den Gesamtemissionen der deutschen Landwirtschaft, getrennt nach CH_4 und Treibhausgasen (THG, in CO_2-Einheiten). Die prozentualen Anteile an der Gesamtemission unterscheiden sich, da die THG auch die N_2O- und CO_2-Emissionen umfassen.

Tabelle 251: CH_4-Emissionen aus der Verdauung (3.A): Veränderungen seit 1990 und Anteile an den Gesamtemissionen der Landwirtschaft (3.A)

[%]	Veränderung seit 1990	Anteil an landwirtschaftlicher Gesamtemission (CH_4 bzw. THG)	
		1990	2024
CH_4	-29,6	81,6	77,1
THG (CO_{2eq})		50,8	48,5

5.2.2 Methodische Aspekte (3.A)

5.2.2.1 Methodik (3.A)

Die CH_4–Emissionen aus der Verdauung der Milchkühe werden mit einem nationalen Verfahren berechnet (Tier 3). Für Mutterkühe wird ein an Milchkühe angelehntes Tier-2-Verfahren angewendet. Für sonstige Rinder und Schweine erfolgt die Berechnung mit einem dafür vorgesehenen Tier-2- Verfahren (IPCC, 2006b Vol 4, 10.24). Schafe, Ziegen, Pferde, Gehegewild,

Kaninchen, Straußen und Pelztiere werden mit dem Tier-1-Verfahren gerechnet, das Default-Emissionsfaktoren verwendet (siehe Kapitel 5.2.2.2).

Im nationalen Verfahren zur Berechnung der CH_4-Emissionen aus der Verdauung bei Milchkühen (Dämmgen, Rösemann, et al., 2012) wird der Emissionsfaktor nach Kirchgessner et al. (1994) als Funktion der Aufnahme von Rohfasern, N-freien Extrakten, Rohprotein und Fett berechnet:

Gleichung 17: Berechnung des CH_4-Emissionsfaktors für Milchkühe (nationales Verfahren)

$$EF_{\mathrm{CH4,\,ent}} = a \cdot M_{\mathrm{XFi}} + b \cdot M_{\mathrm{NFE}} + c \cdot M_{\mathrm{XP}} + d \cdot M_{\mathrm{XF}} + e$$

mit

- $EF_{CH4,\,ent}$ Emissionsfaktor für CH_4 aus der Verdauung (in kg Platz^{-1} a^{-1} CH_4)
- A = Koeffizient (a = 0,079 kg kg^{-1})
- M_{XFi} = Rohfaser-Aufnahme (in kg Platz^{-1} a^{-1})
- B = Koeffizient (b = 0,010 kg kg^{-1})
- M_{NFE} = Aufnahme von N-freien Extrakten (in kg Platz^{-1} a^{-1})
- C = Koeffizient (c = 0,026 kg kg^{-1})
- M_{XP} = Aufnahme an Rohprotein (in kg Platz^{-1} a^{-1})
- D = Koeffizient (d = - 0,212 kg kg^{-1})
- M_{XF} = Aufnahme an Fett (in kg Platz^{-1} a^{-1})
- E = Konstante (e = 365 · 0,063 kg Platz^{-1} a^{-1})

Die Aufnahme von Rohfaser, N-freien Extrakten, Rohprotein und Fett ergibt sich aus den Kennwerten der Futterzusammensetzung und der Menge des aufgenommenen Futters (siehe Kapitel 5.1.3.3).

Daraus wird mit Hilfe der Gesamtenergie-Aufnahme (siehe Kapitel 5.1.3.3) der Methanumwandlungsfaktor berechnet:

Gleichung 18: Berechnung des Methanumwandlungsfaktors…..

$$x_{\mathrm{CH4,GE}} = \frac{\eta_{\mathrm{CH4}} \cdot EF_{\mathrm{CH4,\,ent}}}{GE}$$

mit

- $x_{CH4,\,GE}$ = Methan-Umwandlungsfaktor für Milchkühe (in MJ MJ^{-1})
- η_{CH4} = Energiegehalt von Methan (η_{CH4} = 55.65 MJ (kg CH_4)$^{-1}$)
- $EF_{CH4,\,ent}$ = Emissionsfaktor für CH_4 aus der Verdauung (in kg Platz^{-1} a^{-1} CH_4)
- *GE* = Gesamtenergie-Aufnahme (in MJ Platz^{-1} a^{-1} GE)

Infolge zunehmender Milchleistung steigen die Futteraufnahme und damit die GE-Aufnahme der Milchkühe über die Jahre an, wobei der relative Anteil leichter verdaulichen Kraftfutters an der Ration auf Kosten des Grundfutters wächst, siehe Kap. 2.4.5 in (Vos et al., 2026). Letzteres führt dazu, dass die mithilfe von Gleichung 17 berechneten CH_4-Emissionen aus der Verdauung in geringerem Maße als die GE-Aufnahme ansteigen. Daraus resultiert wiederum ein mit der Milchleistung und damit mit den Jahren abnehmender Methanumwandlungsfaktor, siehe Tabelle 252 und Kapitel 5.2.2.3.

Tabelle 252: Milchkühe: Milchleistung, GE-Aufnahme, verdauungsbedingte CH_4-Emission und Methanumwandlungsfaktor (3.A)

	1990	2023
mittlere tägliche Milchleistung [kg Tierplatz$^{-1\ d\ -1}$]	13,4	25,1
jährliche GE-Aufnahme [GJ Tierplatz$^{-1\ a-1}$]	90,0	131,2
jährliche CH_4-Emission aus der Verdauung [kg Tierplatz$^{-1\ a-1}$]	113,5	154,3
Methanumwandlungsfaktor [MJ MJ^{-1}]	0,070	0,062

Für Mutterkühe ergeben sich mit einem an das Milchkuhmodell angelehnten Modell (siehe (Vos et al., 2026), Kapitel 3) variable Methanumwandlungsfaktoren zwischen 0,086 und 0,084 MJ MJ^{-1}.

Das für die übrigen Rinder und Schweine verwendete Tier-2-Verfahren berechnet den Emissionsfaktor aus der Gesamtenergie-Aufnahme (siehe Kapitel 5.1.3.3) und dem Methan-Umwandlungsfaktor nach folgender Formel:

Gleichung 19: Berechnung des CH_4- Emissionsfaktors (Tier-2-Verfahren, IPCC (2006b Vol 4, 10.31))

$$EF_{\mathrm{CH4,\ ent}} = GE \cdot \frac{x_{\mathrm{CH4,GE}}}{\eta_{\mathrm{CH4}}}$$

mit

- $EF_{CH4,\ ent}$ = Emissionsfaktor für CH_4 aus der Verdauung (in kg Platz^{-1} a^{-1} CH_4)
- GE = Gesamtenergie-Aufnahme (in MJ Platz^{-1} a^{-1} GE)
- $x_{CH4,\ GE}$ = Methan-Umwandlungsfaktor (in MJ MJ^{-1})
- η_{CH4} = Energiegehalt von Methan (η_{CH4} = 55.65 MJ (kg CH_4)$^{-1}$)

Die kategoriespezifischen Methanumwandlungsfaktoren für die verschiedenen Unterkategorien der übrigen Rinder sind in Tabelle 253 angegeben. Aufgrund wechselnder Zusammensetzung der Gesamtpopulation variiert der gewichtete Mittelwert für alle übrigen Rinder zusammen geringfügig mit den Jahren. Tabelle 253 zeigt die Mittelwerte aller übrigen Rinder für das erste und das letzte Zeitreihenjahr.

Tabelle 253: Methan-Umwandlungsfaktoren für übrige Rinder (3.A)

	MJ MJ-1	Quelle
Milch- und Schlachtfärsen, Mastbullen, Zuchtbullen	0,063	IPCC (2019), Vol.4, Tab. 10.12
Mutterkühe	0,086 - 0,084	Vos et al. (2026), Kapitel 3.1

	MJ MJ-1	Quelle
Kälber	0,041	Vos et al. (2026), Kapitel 3.2
Mittelwert aller übrigen Rinder 1990	0,0631	Berechnung
Mittelwert aller übrigen Rinder 2024	0,0650	Berechnung

Tabelle 254 zeigt die nationalen kategoriespezifischen Methanumwandlungsfaktoren für die verschiedenen Schweinekategorien (Dämmgen, Schulz, et al., 2012) sowie die gewichteten Mittelwerte für alle Schweine im ersten und letzten Jahr der Zeitreihe. Die Mittelwerte unterscheiden sich als Folge der sich ändernden Zusammensetzung der Schweine-Gesamtpopulation.

Tabelle 254: Methan-Umwandlungsfaktoren für Schweine (3.A)

	MJ MJ-1
Sauen	0,0071
Aufzuchtferkel	0,0044
Mastschweine	0,0046
Eber	0,0071
Mittelwert aller Schweine 1990	0,0051
Mittelwert aller Schweine 2024	0,0049

Zu den mit Gleichung 19 berechneten Emissionsfaktoren siehe Kapitel 5.2.2.2.

Eine allgemeine Beschreibung der Berechnung von CH_4-Emissionen aus der Verdauung erfolgt in Kap. 3 in Vos et al. (2026). Tierspezifische Details finden sich ebenfalls in Kapitel 3 in Vos et al. (2026).

5.2.2.2 Emissionsfaktoren (3.A)

Tabelle 255 zeigt die berechneten CH_4-Emissionsfaktoren pro Tierplatz für die Verdauung bei Milchkühen, übrigen Rindern und Schweinen.

Tabelle 255: Tierplatzbezogene CH_4-Emissionsfaktoren, Verdauung (3.A), in kg Platz^{-1} a^{-1}

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Milchkühe	113,5	122,3	128,7	133,4	133,9	135,6	136,7	136,8	138,8	140,9	142,6	142,9	142,1	145,3	147,1
übrige Rinder	41,5	44,1	45,8	45,7	46,2	46,1	46,1	46,3	46,5	46,9	47,3	47,6	47,5	47,9	48,2
Schweine	1,02	1,07	1,09	1,09	1,10	1,12	1,13	1,14	1,15	1,15	1,15	1,17	1,17	1,17	1,19

Tabelle 256 zeigt die im Inventar verwendeten Tier-1-Emissionsfaktoren für Schafe, Ziegen, Pferde, Gehegewild, Kaninchen, Straußen und Pelztiere; diese Werte wurden für die gesamte Zeitreihe verwendet. Die Emissionsfaktoren für Lämmer und Kleinpferde/Ponys wurden aus den Tier-1-Emissionsfaktoren erwachsener Schafe bzw. der Großpferde abgeleitet, siehe Kap. 3.3 in Vos et al. (2026). Der Emissionsfaktor für Kaninchen wurde aus dem Emissionsfaktor für Pferde abgeleitet, so wie in der Anmerkung 2 zu Tabelle 10.10 in IPCC (2019) dargestellt, Details siehe Vos et al. (2026) Kapitel 3.3. Als Folge der zeitlich nicht konstanten Populationszusammensetzung aus Groß- und Kleintieren variieren die in den CR-Tabellen berichteten

Emissionsfaktoren für Schafe insgesamt und Pferde insgesamt leicht von Jahr zu Jahr. Tabelle 256 zeigt den Mittelwert für das letzte Zeitreihenjahr.

Tabelle 256: Tier-1-Emissionsfaktoren für CH_4 aus der Verdauung (3.A), in kg Platz^{-1} a^{-1}

	EF	Mittelwert für 2024	Quelle
Erwachsene Schafe	9,0	7,1	Ableitung siehe Vos et al. (2026), Kap. 3.3
Lämmer	4,0		Ableitung siehe Vos et al. (2026), Kap. 3.3
Ziegen	9,0		IPCC (2006b Vol 4, Table 10.10) IPCC (2019), Table 10.10
Großpferde	18,0	16,4	IPCC (2019), Table 10.10
Kleinpferde/Ponys	11,4		Ableitung siehe Vos et al. (2026), Kap. 3.3
Gehegewild	20,0		IPCC (2019), Table 10.10
Kaninchen	0,36		Ableitung siehe Vos et al. (2026), Kap. 3.3
Straußen	5,0		IPCC (2019), Table 10.10
Pelztiere	0,10		Ableitung siehe Vos et al. (2026), Kap. 3.3

5.2.2.3 Emissionen (3.A)

Die berechneten CH_4-Emissionen aus der Verdauung für die gesamte deutsche Tierhaltung zeigt Tabelle 257.

Tabelle 257: CH_4-Emissionen aus der Verdauung (3.A), in Gg

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
insgesamt	1343,7	1186,5	1117,4	1041,4	1027,3	1032,9	1022,7	1014,8	999,6	988,4	973,6	955,1	945,5	943,9	923,1
in % von 1990	100,0	88,3	83,2	77,5	76,5	76,9	76,1	75,5	74,4	73,6	72,5	71,1	70,4	70,2	68,7
Milchkühe	721,0	639,7	588,1	565,3	560,1	581,2	576,5	574,3	569,1	565,4	559,1	547,9	541,3	539,6	528,1
übrige Rinder	545,5	469,8	456,4	402,1	398,8	385,2	380,1	373,9	364,7	357,6	349,0	342,9	341,7	341,1	331,0
Schweine	27,0	21,9	23,8	24,8	24,4	25,8	25,7	26,1	25,2	24,8	25,0	23,1	20,7	20,6	21,0
Schafe	23,3	21,2	19,7	19,0	16,0	13,3	13,2	13,3	13,2	12,9	12,7	12,8	12,9	13,2	13,0
übrige Tiere	26,9	33,8	29,4	30,1	28,0	27,3	27,1	27,3	27,5	27,7	27,8	28,4	28,9	29,4	30,0

Der Trend der Emissionen seit 1990 und insbesondere der Rückgang ab 2015 ist im Wesentlichen geprägt durch:

- den Trend der Tierzahlen (siehe Kapitel 5.1.3.2.3), insbesondere bei den für die Verdauungsemissionen relevanten Rindern (Milchkuhzahlen 2024 um rund 44 % niedriger als 1990; bei den übrigen Rindern sind es rund 48 % weniger Tiere als 1990);
- beständige Leistungszunahme (Milchleistung, Tiergewichte, Gewichtszunahmen), siehe Kapitel 5.1.3.3;
- den mit den Jahren deutlich abnehmenden Methanumwandlungsfaktor bei den Milchkühen (siehe Kapitel 5.2.2.1).

5.2.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (3.A)

Tabelle 250 in Kapitel 5.1.6 gibt die Unsicherheiten von Aktivitätsdaten und Emissionsfaktoren an, die für die Schätzung der Gesamt-Unsicherheit des deutschen THG-Inventars eingesetzt wurden.

Bei der Unsicherheit der Emissionsfaktoren für CH_4 aus der Verdauung handelt es sich um Default-Angaben aus IPCC (2006b Vol 4, 10.33). Zur Unsicherheit der Aktivitätsdaten (Tierzahlen) siehe Kap. 6.3 in (Vos et al., 2026).

Die Emissionszeitreihen sind konsistent, da sie für alle Jahre des Berichtszeitraumes jeweils mit der gleichen Methode berechnet wurden und die Eingangsdaten ebenfalls konsistent und vollständig sind.

5.2.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (3.A)

Zu Qualitätskontrolle und Qualitätssicherung wird auf Kapitel 5.1.7 verwiesen.

Im Rahmen der Verifizierung erfolgte für Milchkühe, übrige Rinder und Schweine eine Gegenüberstellung der Daten aus der deutschen Tierhaltung mit IPCC-Defaultwerten sowie mit Daten benachbarter Staaten inkl. des Britischen Königreiches, siehe Tabelle 258 und Tabelle 259. Zum Zeitpunkt der Erstellung der deutschen Emissionsberichterstattung 2026 waren die Ergebnisse der Emissionsberichterstattung 2026 der anderen Länder noch nicht bekannt. Daher wurde für diese Länder auf Daten der Berichterstattung 2025 zurückgegriffen, während die deutschen Daten der aktuellen Berichterstattung 2026 entstammen. Der internationale Vergleich wird für 2023 durchgeführt (letztes Zeitreihenjahr in Berichterstattung 2025).

Tabelle 258 zeigt für Milchkühe den nationalen Mittelwert des auf den Tierplatz bezogenen Emissionsfaktors (impliziter Emissionsfaktor, IEF), die Aufnahme von Bruttoenergie (GE) sowie für die Emissionshöhe die maßgeblich bestimmende Milchleistung. Ergänzend wird der CH_4-Umwandlungsfaktor aufgeführt. Mit seiner Hilfe wird berechnet, welcher Anteil von GE in Methanenergie umgewandelt wird, die mit dem emittierten Methan verloren geht (siehe Methodenbeschreibung in Kapitel 5.2.2.1).

Von den neun Vergleichsländern hat Dänemark den höchsten und das Vereinigte Königreich den niedrigsten IEF. Deutschland liegt mit seinem IEF leicht oberhalb des Medians. Dies gilt auch für GE-Aufnahme und Milchleistung. Im Hinblick auf die Methanumwandlungsfaktoren ist festzustellen, dass nur Polen den IPCC (2006)-Defaultwert von 6,5 % verwendet hat. Nur der Schweizer Wert ist höher als der IPCC (2006)-Defaultwert. Bei den restlichen Ländern liegt der Methanumwandlungsfaktor unter dem IPCC (2006)-Defaultwert, wobei der österreichische Wert dem IPCC (2019)-Defaultwert für „medium producing cows“ entspricht.

Tabelle 258: CH_4-Emissionen aus der Verdauung bei Milchkühen verschiedener Länder im Vergleich des impliziten Emissionsfaktors (IEF) für das Zeitreihenjahr 2023

	IEF_{CH4}	CH_4-Umwandlungsfaktor Y_m	GE-Aufnahme	Milchleistung
	[kg Platz^{-1} a^{-1}]	[MJ MJ^{-1}]	[MJ Platz^{-1} d^{-1}]	[kg Platz^{-1} d^{-1}]
Österreich	130,51	0,0630	315,8	19,96
Belgien	124,75	0,0610	312,3	23,57
Tschechische Republik	150,70	0,0615	373,6	26,34
Dänemark	161,87	0,0577	426,4	29,15
Frankreich	148,83	0,0631	359,6	22,39

	IEF_{CH4}	CH_4-Umwandlungsfaktor Y_m	GE-Aufnahme	Milchleistung
Deutschland	**145,33**	**0,0617**	**359,4**	**25,10**
Niederlande	139,78	0,0582	298,4	24,92
Polen	127,23	0,0650	298,4	18,91
Schweiz	139,61	0,0690	308,5	19,38
Vereinigtes Königreich	123,28	0,0645	291,4	22,52
IPCC (2006b Vol 4, 10.15 bis 10.31, 10.72)[a]	117	0,065	Gleichung 10.3-10.16	16,44

Quelle: Deutschland: Submission 2026; andere Länder: UNFCCC (2025)

NE, NA, n/a: keine Daten verfügbar

[a] berechnet aus der von IPCC (2006b Vol 4) angenommenen jährlichen Milchleistung von 6000 kg Platz^{-1} a^{-1}

Tabelle 259 zeigt für die Gruppe der übrigen Rinder sowie für alle Schweine zusammengefasst den IEF sowie die GE-Aufnahme.

Bei den übrigen Rindern reicht die Spanne der IEF-Werte von 35,32 kg Platz^{-1} a^{-1} (Niederlande) bis 70,08 kg Platz^{-1} a^{-1} (Tschechische Republik), wobei letzterer deutlich über dem IPCC-Defaultwert von 57 kg Platz^{-1} a^{-1} liegt. Beim IEF und der GE-Aufnahme liegt Deutschland etwas unterhalb des Medians.

Bei den Schweinen verwenden fünf der betrachteten Länder den IPCC-Defaultwert für den IEF. Die fünf Länder, die den IEF berechnen, kommen zu Ergebnissen, die niedriger sind als der IPCC-Defaultwert, was möglicherweise darauf hindeutet, dass der IPCC-Defaultwert für mitteleuropäische Verhältnisse zu hoch ist. Der französische IEF erscheint im internationalen Vergleich unrealistisch niedrig. Der deutsche IEF ist der höchste der Länder, die den IEF berechnen. Die GE-Aufnahme wird nur von Österreich, Dänemark, Deutschland und der Schweiz berichtet. Der deutsche Wert ist dabei der höchste Wert.

Tabelle 259: CH_4-Emissionen aus der Verdauung bei übrigen Rindern und Schweinen verschiedener Länder im Vergleich des impliziten Emissionsfaktors (IEF) für das Zeitreihenjahr 2023

	Übrige Rinder		Schweine	
	IEF_{CH4} [kg Platz^{-1} a^{-1}]	GE-Aufnahme [MJ Platz^{-1} d^{-1}]	IEF_{CH4} [kg Platz^{-1} a^{-1}]	GE-Aufnahme [MJ Platz^{-1} d^{-1}]
Österreich	56,35	147,30	0,97	30,12
Belgien	46,13	122,02	1,50	NE
Tschechische Republik	70,08	172,01	1,50	NA
Dänemark	40,51	137,36	1,03	26,09
Frankreich	53,09	125,29	0,74	NE
Deutschland	**47,88**	**112,13**	**1,17**	**36,53**
Niederlande[a]	35,32	90,19	1,50	NA
Polen	51,15	119,99	1,50	n/a
Schweiz[a]	45,93	119,15	1,06	25,77
Vereinigtes Königreich[b]	54,11	103,55	1,50	n/a
IPCC (2006b)	57	Equation 10.3-10.16	1,5	Gleichung 10.3-10.16

Quelle: Deutschland: Submission 2026; andere Länder: UNFCCC (2025)
NE, NA, n/a: keine Daten verfügbar
[a] Übrige Rinder: berechnet aus CRF-Daten
[b] Vereinigtes Königreich, übrige Rinder: Rinder ohne Milchkühe und ohne Milchkuh-Nachzucht (incl. Kälber)

5.2.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (3.A)

Tabelle 260 zeigt für Milchkühe, übrige Rinder und Schweine die Gesamtenergie-Aufnahme im Vergleich mit den entsprechenden Daten der Submission 2025. Die Differenzen bei den Milchkühen sind vor allem auf die gegenüber Submission 2025 über die gesamte Zeitreihe höhere Milchleistung zurückzuführen. Die Aufteilung der Sauen in Jungsauen und Altsauen führt zu einer gegenüber Submission 2025 geringeren Gesamtenergie-Aufnahme bei den Schweinen, siehe Kapitel 5.1.7.3 . Bei den übrigen Tieren geht die Gesamtenergie-Aufnahme nicht in die Emissionsberechnungen ein. Sie sind deshalb in Tabelle 260 nicht aufgeführt.

Tabelle 260: Vergleich der in Submission 2026 und 2025 berichteten mittleren täglichen Gesamtenergie-Aufnahme für Milchkühe, übrige Rinder und Schweine (3.A), in MJ/Tier

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Milchkühe 2026	246,7,	270,2,	289,7,	306,0,	315,0,	325,4,	329,0,	329,1,	336,2,	343,7,	349,6,	350,8,	347,8,	359,4
Milchkühe 2025	241,3,	264,0,	283,0,	298,8,	307,5,	318,9,	322,3,	322,5,	329,4,	336,7,	342,5,	343,7,	341,6,	350,1
übrige Rinder 2026	100,1,	104,0,	106,9,	106,6,	108,1,	108,2,	108,2,	108,6,	109,0,	110,0,	110,9,	111,7,	111,5,	112,1
übrige Rinder 2025	100,1,	104,0,	106,9,	106,6,	108,1,	108,2,	108,2,	108,6,	109,0,	110,0,	110,9,	111,7,	111,5,	112,1
Schweine 2026	30,4,	32,0,	32,8,	33,0,	33,5,	34,7,	35,0,	35,2,	35,5,	35,6,	35,9,	36,4,	36,3,	36,5
Schweine 2025	30,9,	32,5,	33,4,	33,5,	34,0,	35,2,	35,5,	35,7,	36,0,	36,1,	36,4,	36,9,	36,8,	37,0

Tabelle 261: Vergleich der in Submission 2026 und 2025 berichteten tierplatzbezogenen CH_4-Emissionsfaktoren (Verdauung) für Milchkühe, übrige Rinder und Schweine (3.A), in kg/Platz

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Milchkühe 2026	113,5	122,3	128,7	133,4	133,9	135,6	136,7	136,8	138,8	140,9	142,6	142,9	142,1	145,3
Milchkühe 2025	111,5	120,2	126,5	131,3	131,7	133,8	134,8	134,9	136,9	139,0	140,6	141,0	140,3	142,8
übrige Rinder 2026	41,5	44,1	45,8	45,7	46,2	46,1	46,1	46,3	46,5	46,9	47,3	47,6	47,5	47,9
übrige Rinder 2025	41,5	44,1	45,8	45,7	46,2	46,1	46,1	46,3	46,5	46,9	47,3	47,6	47,5	47,9
Schweine 2026	1,02	1,07	1,09	1,09	1,10	1,12	1,13	1,14	1,15	1,15	1,15	1,17	1,17	1,17
Schweine 2025	1,05	1,10	1,12	1,12	1,12	1,15	1,15	1,16	1,17	1,17	1,18	1,19	1,19	1,20

Die in Tabelle 261 (Emissionsfaktoren) und Tabelle 262 (Emissionen) zu erkennenden Abweichungen gegenüber Submission 2024 gehen ebenfalls auf die im Zusammenhang mit Tabelle 260 genannten Gründe zurück. Zusätzlich sind die Emissionen der Pferde geringfügig niedriger gegenüber Submission 2025, da der Emissionsfaktor der Kleinpferde und Ponies geändert wurde (siehe Kapitel 5.1.7.3). Die Gesamtemissionen für alle Tiere sind insgesamt höher gegenüber Submission 2025.

Tabelle 262: Vergleich der in Submission 2026 und 2025 berichteten CH_4-Emissionen (Verdauung) für alle Tiere, Milchkühe, übrige Rinder, Schweine, Schafe, Ziegen und Pferde (3.A), in Tg

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
alle Tiere 2026	1,344	1,186	1,117	1,041	1,027	1,033	1,023	1,015	1,000	0,988	0,974	0,955	0,945	0,944
alle Tiere 2025	1,332	1,176	1,108	1,033	1,019	1,026	1,016	1,008	0,993	0,981	0,967	0,948	0,939	0,935
Milchkühe 2026	0,721	0,640	0,588	0,565	0,560	0,581	0,577	0,574	0,569	0,565	0,559	0,548	0,541	0,540
Milchkühe 2025	0,709	0,628	0,578	0,556	0,551	0,573	0,569	0,566	0,561	0,558	0,551	0,540	0,535	0,530
übrige Rinder 2026	0,545	0,470	0,456	0,402	0,399	0,385	0,380	0,374	0,365	0,358	0,349	0,343	0,342	0,341
übrige Rinder 2025	0,545	0,470	0,456	0,402	0,399	0,385	0,380	0,374	0,365	0,358	0,349	0,343	0,342	0,341
Schweine 2026	0,027	0,022	0,024	0,025	0,024	0,026	0,026	0,026	0,025	0,025	0,025	0,023	0,021	0,021
Schweine 2025	0,028	0,022	0,024	0,025	0,025	0,026	0,026	0,027	0,026	0,025	0,025	0,024	0,021	0,021
Schafe 2026	0,023	0,021	0,020	0,019	0,016	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
Schafe 2025	0,023	0,021	0,020	0,019	0,016	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
Ziegen 2026	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Ziegen 2025	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Pferde 2026	0,022	0,028	0,023	0,023	0,021	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,021	0,021	0,022	0,022
Pferde 2025	0,023	0,029	0,023	0,023	0,021	0,020	0,020	0,020	0,020	0,021	0,021	0,021	0,022	0,022

5.2.6 Geplante Verbesserungen (3.A)

Derzeit sind keine neuen Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

5.3 Wirtschaftsdünger-Management (3.B)

5.3.1 Beschreibung der Kategorie (3.B)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
L/T	3 B, Manure Management	dairy cows	CH_4	2521,46	0,20	2499,53	0,36	-0,87
-/-	3 B, Manure Management	non-dairy cattle	CH_4	2683,78	0,21	1468,79	0,21	-45,27
L/-	3 B, Manure Management	swine	CH_4	3045,17	0,24	1945,35	0,28	-36,12
-/-	3 B, Manure Management	other animals	CH_4	238,01	0,02	313,14	0,05	31,56
-/-/2	3 B, Manure Management	dairy cows	N_2O	1313,24	0,11	643,84	0,10	-50,97
-/-/2	3 B, Manure Management	non-dairy cattle	N_2O	1068,01	0,09	680,49	0,10	-36,28
L/-	3 B, Manure Management	swine	N_2O	444,50	0,04	270,47	0,04	-39,15
-/-/2	3 B, Manure Management	other animals	N_2O	390,15	0,04	417,04	0,06	6,89
-/-/2	3 B, Manure Management	deposition and leaching	N_2O	1266,26	0,10	828,68	0,12	-34,56

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CH_4	Tier 2	M/Q/AS/RS/NS	CS/D
N_2O direct	Tier 2	M/Q/AS/RS/NS	CS/D
N_2O indirect	Tier 1	M/Q/AS/RS/NS	CS/D
NO_X	Tier 2	M/Q/AS/RS/NS	CS
NMVOC	Tier 2/Tier 1	RS/NS	D

Wirtschaftsdünger-Management ist für CH_4 der Schweine eine Hauptkategorie nach der Emissionshöhe. Die 3.B.-Kategorien Wirtschaftsdünger-Management der Milchkühe ist für CH_4 eine Hauptkategorie nach der Emissionshöhe und dem Trend sowie für Schweine nur nach der Emissionshöhe und für N_2O und CH_4 nach der Methode 2 Analyse. N_2O-Emissionen von Übrigen Rindern, Anderen Tieren, sowie indirektes N_2O aus Deposition ist ebenfalls zusätzlich nach der Approach-2-Analyse als Hauptkategorien identifiziert worden.

Deutschland berichtet im Sektor 3.B über CH_4, N_2O, NO und NMVOC aus dem Wirtschaftsdünger-Management.

CH_4 entsteht durch die Aktivität von methanogenen Bakterien bei der Zersetzung organischer Substanz in anaerober Umgebung. Direkte N_2O-Emissionen entstehen bei Nitrifikations- und Denitrifikationsprozessen während der Lagerung von Wirtschaftsdünger und Gärresten. NO entsteht durch Nitrifikation in den Oberflächenschichten im Lager. NMVOC-Emissionen werden aus Silage-Futter und Wirtschaftsdüngerlager freigesetzt.

In der Berichterstattung werden dem Wirtschaftsdünger-Management auch indirekte N_2O-Emissionen zugeordnet. Diese können bei Umsetzungsprozessen in Böden aus reaktivem Stickstoff, der aus der Deposition von NH_3 und NO aus dem Wirtschaftsdünger- und Gärreste-Management stammt, sowie infolge von Stickstoff-Auswaschung oder -Oberflächenabfluss aus dem Wirtschaftsdünger- und Gärreste-Management entstehen. Da allerdings Versickerung oder unkontrollierter oberirdischer Abfluss aus dem Wirtschaftsdünger- und Gärreste-Management aus Gründen des Gewässerschutzes zu vermeiden sind (Council of the European Union, 1991), resultieren indirekte N_2O-Emissionen aus Auswaschung/Oberflächenabfluss nur in sehr geringem Maße aus der Feldlagerung von Mist.

Die Berechnung der Emissionen erfolgt in Abhängigkeit von der Tierkategorie, den Ausscheidungen der Tiere (welche eine Funktion der Tierleistung und der Ernährung sind), den in bestimmten Aufenthaltsbereichen (Weide, Stall) verbrachten Zeiten, sowie von Stalltyp, Stickstoffeintrag durch Einstreu (Stroh) und Lagerungstyp.

Tabelle 263 zeigt die zeitlichen Veränderungen der Emissionen aus dem gesamten Wirtschafts-dünger-Management seit 1990 sowie für Anfangs- und Endjahr der Zeitreihe den Anteil dieser Emissionen an den jeweiligen Gesamtemissionen aus der deutschen Landwirtschaft. Zu den absoluten Emissionshöhen siehe Kapitel 5.3.2.2.3, 5.3.3.1.4 und 5.3.4.2.3. Die Abnahme der Emissionen seit 1990 ist im Wesentlichen auf Veränderungen in den Tierbeständen zurück zu führen. Bei CH_4 und N_2O wirken sich auch Emissionseinsparungen durch die Wirtschaftsdünger-Vergärung aus.

Tabelle 263: Prozentuale Veränderung der Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management (Index: MM) seit 1990 sowie prozentuale Anteile an den landwirtschaftlichen Gesamtemissionen von CH_4, N_2O, THG und NMVOC (3.B)

[%]	Veränderung seit 1990	Anteil an landwirtschaftlicher Gesamtemission (CH_4, N_2O, THG, NMVOC)	
		1990	2024
$CH_{4, MM}$	-26,6	18,4	18,6
N_2O_{MM}, direkt	-37,4	13,0	11,6
N_2O_{MM}, indirekt	-34,6	5,1	4,8
$CH_{4, MM}$ + N_2O_{MM} (als THG in CO_{2eq})	-30,1	17,5	17,0
$NMVOC_{MM}$	-30,3	98,2	97,1

5.3.2 Methan-Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management (3.B, CH_4)

5.3.2.1 Beschreibung der Kategorie (3.B, CH_4)

Siehe Kapitel 5.3.1.

5.3.2.2 Methodische Aspekte (3.B, CH_4)

5.3.2.2.1 Methodik (3.B, CH_4)

Die CH_4-Emissionen werden für alle Tierkategorien nach der Tier-2-Methode berechnet:

Gleichung 20: Berechnung der CH_4-Gesamtemission aus dem Wirtschaftsdünger-Management

$$E_{\mathrm{CH4,\,MM}} = \sum_{\mathrm{i},\,j} n_i \cdot EF_{\mathrm{i,\,j}} = \sum_{\mathrm{i},\,j} n_i \cdot \alpha \cdot \rho_{\mathrm{CH4}} \cdot VS_i \cdot B_{\mathrm{o,\,i}} \cdot MS_{\mathrm{i,\,j}} \cdot MCF_{\mathrm{i,\,j}}$$

mit

- $E_{CH4, MM}$ = Methan-Gesamtemission aus dem Wirtschaftsdünger-Management (in kg a^{-1} CH_4)
- n_i = Anzahl der Tierplätze in Tierkategorie i (in Platz)
- $EF_{i, j}$ = Methan-Emissionsfaktor für Tierkategorie i in Wirtschaftsdünger-Management-System j (in kg $Platz^{-1}$ a^{-1} CH_4)
- A = Faktor zur Umwandlung der Zeiteinheiten (α = 365 d a^{-1})
- ρ_{CH4} = Dichte von Methan (ρ_{CH4} = 0,67 kg m^{-3})
- VS_i = VS-Ausscheidung von Tierkategorie i (in kg $Platz^{-1}$ d^{-1})
- $B_{o, i}$ = Maximale Methanproduktionskapazität von Tierkategorie i (in m^3 kg^{-1} CH_4)
- $MS_{i, j}$ = relativer Anteil der Anzahl der Haltungsplätze von Tierkategorie i, deren Exkremente in Wirtschaftsdünger-Management-System j anfallen (in Platz $Platz^{-1}$)
- $MCF_{i, j}$ = Methan-Umwandlungsfaktor für Wirtschaftsdünger-Management-System j (in m^3 m^{-3}) [77]

[77] IPCC gibt den *MCF* in Prozent (von B_o) an; im deutschen Inventar wird die eindeutigere Einheit m^3 m^{-3} verwendet.

Für die Tierplatzzahlen n_i wird auf Kapitel 5.3.2.2.1 verwiesen. Die VS-Ausscheidungen werden in Kapitel 5.1.3.5 beschrieben. Zu den Häufigkeiten von Lagerverfahren für Festmist, Flüssigmist und Gärreste sowie der Weidedauer siehe Kapitel 5.1.3.6.1 und Anhang 7.3.1. Auf maximale Methan-Bildungsrate B_o und Methan-Umwandlungsfaktoren *MCF* gehen Kapitel 5.1.3.6.3 und 5.1.3.6.4 ein. Die Vergärung von Wirtschaftsdünger einschließlich Gärrestelagerung wird von IPCC als eigenständiger Lagertyp angesehen, zu dessen B_o und *MCF* auf Kapitel 5.1.3.6.5 verwiesen wird.

5.3.2.2.2 Emissionsfaktoren (3.B, CH_4)

Tabelle 264 zeigt die Zeitreihen der auf den Tierplatz bezogenen Emissionsfaktoren. Sie wurden nach Gleichung 20 in Kapitel 5.3.2.2.1 berechnet. Der Effekt der Emissionsminderung durch die Vergärung von Wirtschaftsdünger ist in den Emissionsfaktoren enthalten.

Tabelle 264: Tierplatzbezogene CH_4-Emissionsfaktoren, Wirtschaftsdünger-Management (3.B(a))

[kg Platz^{-1} a^{-1}]	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Milchkühe	14,2	19,1	21,0	22,1	21,1	21,5	22,0	22,3	23,0	23,9	23,9	23,5	23,5	24,7	24,9
übrige Rinder	7,3	7,5	7,7	7,4	6,8	7,0	7,1	7,2	7,4	7,5	7,5	7,5	7,5	7,6	7,6
Schweine	4,1	4,4	4,6	4,2	3,7	3,6	3,7	3,7	3,8	3,8	3,8	3,9	3,7	3,9	3,9
Schafe	0,28	0,27	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28	0,28
Ziegen	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
Pferde	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1	3,6	3,7	3,8	3,8	3,9	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Geflügel	0,026	0,025	0,025	0,027	0,027	0,030	0,030	0,030	0,031	0,031	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030
Gehegewild	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
Kaninchen	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
Strauße	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78
Pelztiere	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17

5.3.2.2.3 Emissionen (CRF 3.B, CH_4)

Tabelle 265 zeigt die berechneten CH_4-Gesamtemissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management in absoluten sowie relativen, auf 1990 bezogenen prozentualen Werten.

Tabelle 265: CH_4-Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management(3.B(a))

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Gg	303,2	279,9	281,8	264,4	238,2	244,1	245,5	247,5	246,1	246,7	243,6	230,8	219,0	224,5	222,4
% von 1990	100,0	92,3	93,0	87,2	78,6	80,5	81,0	81,6	81,2	81,4	80,4	76,1	72,2	74,1	73,4

Der zeitliche Verlauf ist im Wesentlichen eine Folge der Entwicklung der Tierzahlen (siehe Kapitel 5.1.3.2), modifiziert durch emissionssteigernden Leistungszuwachs (siehe Kapitel 5.1.3.3). Tabelle 266 zeigt die Emissionsbeiträge von Milchkühen, übrigen Rindern und Schweinen sowie den hohen prozentualen Anteil dieser drei Tierkategorien zusammen an der Gesamtemission aller Tiere.

Tabelle 266: CH_4 aus Wirtschaftsdünger-Management (Milchkühe, übrige Rinder, Schweine) in Gg, prozentuale Beiträge zu CH_4 insgesamt aus Wirtschaftsdünger-Management

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Milchkühe	90,1	99,8	96,2	93,4	88,1	92,0	92,9	93,6	94,5	95,7	93,8	89,9	89,5	91,5	89,3
übrige Rinder	95,8	80,4	76,5	65,1	58,7	58,2	58,5	58,2	57,7	57,4	55,7	53,9	53,7	54,4	52,5
Schweine	108,8	90,2	100,2	96,5	82,0	83,6	83,9	85,2	83,1	82,7	83,2	76,0	64,9	67,6	69,5
Summe	**294,7**	**270,4**	**272,9**	**255,0**	**228,8**	**233,8**	**235,2**	**237,0**	**235,3**	**235,8**	**232,7**	**219,9**	**208,0**	**213,5**	**211,2**
%-Anteil	97,2	96,6	96,8	96,5	96,1	95,8	95,8	95,8	95,6	95,6	95,5	95,3	95,0	95,1	95,0

Die durch Wirtschaftsdünger-Vergärung eingesparten CH_4-Emissionen gehen aus Tabelle 267 hervor. Ohne Vergärung wären sie zusätzlich zu den in Tabelle 265 angegeben Mengen emittiert worden. Die prozentualen Minderungen beziehen sich auf die Emissionen, die ohne Vergärung entstanden wären.

Tabelle 267: Durch Wirtschaftsdünger-Vergärung verursachte absolute und prozentuale Veränderung der CH_4-Emissionen gegenüber einer Situation ohne Vergärung und Gärrestelagerung (negatives Vorzeichen: Emissionsminderung)

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Gg	-0,009	-0,12	-1,0	-7,5	-31,4	-51,7	-10,9	-52,2	-50,8	-49,6	-50,9	-52,6	-52,7	-46,6	-46,6
%	-0,003	-0,04	-0,4	-2,8	-11,7	-17,5	-4,1	-17,4	-17,1	-16,7	-17,3	-18,6	-19,4	-17,2	-17,3

5.3.2.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (3.B, CH_4)

Tabelle 250 in Kapitel 5.1.6 gibt die Unsicherheiten von Aktivitätsdaten und Emissionsfaktoren an, die für die Schätzung der Gesamt-Unsicherheit des deutschen THG-Inventars eingesetzt wurden.

Bei der Unsicherheit der Emissionsfaktoren für CH_4 im Bereich Wirtschaftsdünger-Management handelt es sich um Default-Angaben aus IPCC (2006b Vol 4, Table 10.48). Zur Unsicherheit der Aktivitätsdaten (Tierzahlen), siehe Kap. 6.3 in Vos et al. (2026).

Die Emissionszeitreihen sind konsistent, da sie für alle Jahre des Berichtszeitraumes jeweils mit der gleichen Methode berechnet wurden und die Eingangsdaten ebenfalls konsistent und vollständig sind.

5.3.2.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (3.B, CH_4)

Zu Qualitätskontrolle und Qualitätssicherung wird auf Kapitel 5.1.7 verwiesen.

Im Rahmen der Verifizierung wurden analog zur Vorgehensweise in Kapitel 5.2.4 die für 2023 erhaltenen Ergebnisse und Eingangsdaten mit denen benachbarter Staaten sowie des Vereinigten Königreiches von 2023 (Submission 2025 für 2023, UNFCCC (2025)) verglichen.

Tabelle 268 zeigt für Milchkühe den IEF für CH_4 aus dem Wirtschaftsdünger-Management und wichtige Einflussgrößen. Entsprechend der CRF-Vorgabe beziehen sich die prozentualen Anteile von Flüssigmistsystemen und die entsprechenden MCF-Werte nur auf Flüssigmistsysteme, deren Gülle nicht in einer Biogasanlage vergoren wird.

Die IEF-Werte der verglichenen Länder zeigen eine relativ große Streuung. Der Median (24,2 kg Platz^{-1} a^{-1}) liegt wie der deutsche IEF leicht über der IPCC-Defaultwertspanne für den IEF. Die für

Deutschland berechnete tägliche VS-Ausscheidung liegt ungefähr gleichauf mit Belgien und der Schweiz und damit am unteren Ende der Skala bei 85 % des Medians der verglichenen Länder. Der deutsche MCF von Flüssigsystemen liegt ebenfalls bei 85 % des Medians der verglichenen Länder, während die Verbreitung von Flüssigmistsystemen in Deutschland bei 116 % des Medians liegt.

Tabelle 268: CH_4-Emissionen aus der Lagerung von Wirtschaftsdüngern bei Milchkühen verschiedener Länder im Vergleich des impliziten Emissionsfaktors (IEF) und wichtiger emissionsrelevanter Parameter für das Zeitreihenjahr 2023

	IEF_{CH4}	VS-Ausscheidungen	Flüssigmistsysteme (ohne Vergärung)	
			Häufigkeit	mittlerer MCF
	[kg Platz^{-1} a^{-1}]	[kg Platz^{-1} d^{-1}]	[%]	[%]
Österreich	21,51	5,05	53,45	8,49
Belgien	31,39	4,36	59,23	21,00
Tschechische Republik	12,19	6,33	10,70	17,00
Dänemark	64,01	7,49	48,48	NO
Frankreich	23,73	6,43	15,51	17,83
Deutschland	**24,65**	**4,30**	**60,80**	**14,46**
Niederlande	37,51	4,75	82,52	17,00
Polen	8,77	5,04	12,19	17,00
Schweiz	19,47	4,26	51,15	13,77
Vereinigtes Königreich	38,03	5,25	60,56	17,00
IPCC (2006b), Western Europe, cool region 10°C/11°C	21 bis 23	5,1	35,7	17 bis 19

Quelle: Deutschland: Submission 2026; andere Länder: UNFCCC (2025)

Tabelle 269 zeigt für die übrigen Rinder den IEF für CH_4 aus dem Wirtschaftsdünger-Management und wichtige Einflussgrößen. Der deutsche IEF liegt 12 % über dem Median der über einen weiten Bereich gestreuten Werte der betrachteten Länder. Die große Schwankungsbreite der IEF-Werte kann, außer auf unterschiedliche VS-Ausscheidungen und MCF-Werte, vor allem darauf zurückgeführt werden, dass es eine sehr unterschiedliche Verbreitung von Flüssigmist-Systemen gibt. Deutschland liegt hier beim dritten Quartil. Die deutsche VS-Ausscheidung liegt bei 76 % des Medians zwischen dem Wert der Niederlande und Belgiens.

Aus Tabelle 270 geht hervor, dass bei den Schweinen der deutsche IEF für CH_4 aus dem Wirtschaftsdünger-Management im mittleren Bereich liegt. Die VS-Ausscheidung liegt bei 116 % des Medians.

Tabelle 269: CH_4-Emissionen aus der Lagerung von Wirtschaftsdüngern bei übrigen Rindern verschiedener Länder im Vergleich des impliziten Emissionsfaktors (IEF) und wichtiger emissionsrelevanter Parameter für das Zeitreihenjahr 2023

	IEF_{CH4}	VS-Ausscheidungen	Flüssigmistsysteme (ohne Vergärung)	
			Häufigkeit	mittlerer MCF
	[kg Platz^{-1} a^{-1} CH_4]	[kg Platz^{-1} d^{-1}]	[%]	[%]
Österreich	9,34	2,43	29,63	8,04
Belgien	6,89	1,74	15,77	21,00
Tschechische Republik	3,64	3,33	6,80	17,00
Dänemark	27,07	2,67	40,71	NO
Frankreich	4,64	1,91	2,55	18,86
Deutschland	**7,64**	**1,46**	**30,97**	**14,67**
Niederlande [a]	7,84	1,18	67,52	17,00
Polen	1,70	1,81	6,19	17,00
Schweiz [a]	4,53	1,97	30,26	13,77
Vereinigtes Königreich[b]	6,77	1,94	NO	NO
IPCC (2006b): Vol. 4, 10.38, 10.77, Western Europe, cool region 10°C/11°C	6 bis 7	2,6	25,2	17 bis 19

Quelle: Deutschland: Submission 2026; andere Länder: UNFCCC (2025)

[a] berechnet aus CRF-Daten

[b] Vereinigtes Königreich: Rinder ohne Milchkühe und ohne Milchkuh-Nachzucht (incl. Kälber)

Tabelle 270: CH_4-Emissionen aus der Lagerung von Wirtschaftsdüngern bei Schweinen verschiedener Länder im Vergleich des impliziten Emissionsfaktors (IEF) und wichtiger emissionsrelevanter Parameter für das Jahr 2023

	IEF_{CH4}	VS-Ausscheidungen	Flüssigmistsysteme (ohne Vergärung)	
			Häufigkeit	mittlerer MCF
	[kg Platz^{-1} a^{-1} CH_4]	[kg Platz^{-1} d^{-1}]	[%]	[kg Platz^{-1} a^{-1} CH_4]
Österreich	1,78	0,32	67,04	3,39
Belgien	3,36	0,21	97,52	21,00
Tschechische Republik	1,76	0,31	17,90	17,00
Dänemark	4,83	0,08	87,86	10,14
Frankreich	6,60	0,19	87,86	21,28
Deutschland	**3,86**	**0,30**	**70,89**	**22,71**
Niederlande	5,21	0,22	38,17	36,00
Polen	2,29	NA	NA	NA
Schweiz	3,89	0,31	78,39	13,77
Vereinigtes Königreich	3,99	n/a	n/a	n/a
IPCC (2006b Vol 4, 10.80, 10.81), Western Europe, cool region 10°C/11°C	Sau, Eber: 9 bis 10 übrige: 6	Sau, Eber: 0,46 übrige: 0,30		17 bis 19

Quelle: Deutschland: Submission 2026; andere Länder: UNFCCC (2023c)

Tabelle 271 zeigt für Geflügel den mittleren IEF, die mittlere VS-Ausscheidung sowie das mittlere Tiergewicht als Indikator für Energiebedarf und damit Futteraufnahme und Ausscheidungen. Sieht man beim IEF vom vergleichsweisen sehr hohen tschechischen Wert ab, ergibt sich eine Spanne von 0,017 bis 0,030 kg Platz-1a-1. Der höchste IEF wird dabei von Deutschland berichtet, was daran liegt, dass die deutsche VS-Ausscheidung höher als bei den anderen Ländern ist (zumindest bei den acht Ländern, die die VS-Ausscheidung berichten). Die deutsche VS-Ausscheidung markiert zwar die Obergrenze der Skala, bildet aber mit dem Vereinigten Königreich, Frankreich, Belgien und den Niederlanden eine Gruppe, deren VS-Ausscheidungen in der Größenordnung von etwa Faktor 2 über der Untergrenze des IPCC-Defaultbereiches liegen. Mittlere Geflügelgewichte werden nur von Österreich, Belgien, Tschechien, Dänemark und Deutschland berichtet. Diese Werte liegen in einer vergleichbaren Größenordnung, wobei das mittlere deutsche Geflügelgewicht in der Mitte der berichteten Werte liegt.

Tabelle 271: CH_4-Emissionen aus der Lagerung von Wirtschaftsdüngern bei Geflügel verschiedener Länder im Vergleich des impliziten Emissionsfaktors (IEF) und wichtiger emissionsrelevanter Parameter für das Zeitreihenjahr 2023

	IEF_{CH4}	VS-Ausscheidungen	mittleres Tiergewicht
	[kg Platz^{-1}a^{-1}]	[kg Platz^{-1}d^{-1}]	[kg Tier^{-1}]
Österreich	0,020	0,015	1,62
Belgien	0,024	0,018	1,38
Tschechische Republik	0,097	NA	1,44
Dänemark	0,025	0,003	2,00
Frankreich	0,023	0,018	NE
Deutschland	**0,030**	**0,022**	**1,60**
Niederlande	0,033	0,020	NA
Polen	0,027	NA	NA
Schweiz	0,017	0,013	NA
Vereinigtes Königreich	0,018	0,019	NE
IPCC (2006b Vol4, 10.82), W-Europe, cool region, developed countries	0,02 bis 0,09 [a]	0,01 bis 0,07 [a]	0,9 bis 6,8 [a]

Quelle: Deutschland: Submission 2026; andere Länder: UNFCCC (2025)

[a] niedriger Wert: Legehennen; hoher Wert: Puten

5.3.2.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (3.B, CH_4)

Tabelle 272 bis Tabelle 274 zeigen für Milchkühe, übrige Rinder, Schweine und Geflügel einen Vergleich der VS-Ausscheidungen, Emissionsfaktoren und Emissionen zwischen der aktuellen Submission und der Submission des Vorjahres.

Bei den VS-Ausscheidungen der Milchkühe und der Schweine sind Unterschiede zwischen beiden Submissionen in allen Jahren erkennbar. Diese sind bei den Milchkühen im Wesentlichen eine Folge der höheren Milchleistung und bei den Schweinen eine Folge der Aufteilung der Sauen auf Jungsauen und Altsauen, siehe Kapitel 5.1.7.3. Bei den Emissionsfaktoren und Emissionen werden Unterschiede bei allen Tierkategorien sichtbar. Diese sind zusätzlich vor allem auf die Einführung von Transporten von Biogassubstraten zurückzuführen, siehe Kapitel 5.1.7.3.

Tabelle 272: Vergleich der in Submission 2026 und 2025 berichteten VS-Ausscheidungen (3.B(a)), in kg Platz^{-1} d^{-1}

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Milchkühe 2026	3,02	3,33	3,54	3,70	3,82	3,96	4,00	4,00	4,08	4,15	4,21	4,22	4,19	4,30
Milchkühe 2025	2,96	3,26	3,47	3,63	3,75	3,90	3,93	3,94	4,01	4,08	4,14	4,15	4,13	4,21
übrige Rinder 2026	1,27	1,33	1,38	1,37	1,39	1,40	1,40	1,40	1,41	1,42	1,44	1,45	1,45	1,46
übrige Rinder 2025	1,27	1,33	1,38	1,37	1,39	1,40	1,40	1,40	1,41	1,42	1,44	1,45	1,45	1,46
Schweine 2026	0,265	0,280	0,289	0,281	0,274	0,285	0,287	0,289	0,291	0,292	0,294	0,298	0,297	0,299
Schweine 2025	0,271	0,286	0,295	0,286	0,280	0,290	0,292	0,294	0,297	0,297	0,299	0,303	0,302	0,304
Geflügel 2026	0,0188	0,0180	0,0186	0,0196	0,0197	0,0224	0,0225	0,0226	0,0227	0,0227	0,0224	0,0222	0,0220	0,0220
Geflügel 2025	0,0188	0,0180	0,0186	0,0196	0,0197	0,0224	0,0225	0,0226	0,0227	0,0227	0,0224	0,0222	0,0220	0,0220

Tabelle 273: Vergleich der in Submission 2026 und 2025 berichteten tierplatzbezogenen CH_4-EF für das Wirtschaftsdünger-Management (3.B(a)), in [kg Platz^{-1} a^{-1}]

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Milchkühe 2026	14,17	19,09	21,04	22,05	21,07	21,47	22,02	22,29	23,04	23,86	23,93	23,46	23,50	24,65
Milchkühe 2025	13,88	18,69	20,61	21,65	20,90	21,47	21,99	22,20	22,92	23,76	24,00	23,75	23,74	24,23
übrige Rinder 2026	7,30	7,54	7,68	7,40	6,81	6,97	7,09	7,20	7,35	7,53	7,54	7,48	7,47	7,64
übrige Rinder 2025	7,30	7,54	7,68	7,43	6,98	7,23	7,33	7,43	7,58	7,75	7,79	7,78	7,74	7,76
Schweine 2026	4,104	4,424	4,603	4,242	3,685	3,637	3,685	3,719	3,775	3,823	3,846	3,854	3,666	3,856
Schweine 2025	4,169	4,503	4,689	4,356	3,891	3,946	3,993	4,035	4,086	4,131	4,156	4,202	4,063	4,096
Geflügel 2026	0,0261	0,0248	0,0254	0,0267	0,0265	0,0295	0,0296	0,0298	0,0309	0,0308	0,0305	0,0301	0,0299	0,0298
Geflügel 2025	0,0261	0,0248	0,0254	0,0267	0,0265	0,0295	0,0297	0,0299	0,0300	0,0299	0,0295	0,0292	0,0287	0,0287

Tabelle 274: Vergleich der in Submission 2026 und 2025 berichteten CH_4-Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management (3.B(a)), in [kt a^{-1}]

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
alle Tiere 2026	303,16	279,90	281,81	264,36	238,18	244,11	245,49	247,46	246,06	246,68	243,60	230,81	218,98	224,55
alle Tiere 2025	303,01	279,42	281,75	265,50	243,54	252,85	253,81	255,47	253,21	253,39	251,19	239,69	227,57	226,65
Milchkühe 2026	90,05	99,83	96,15	93,43	88,14	92,01	92,85	93,60	94,47	95,70	93,83	89,92	89,51	91,54
Milchkühe 2025	88,17	97,73	94,20	91,71	87,44	92,01	92,74	93,21	94,00	95,32	94,13	91,04	90,44	89,96
übrige Rinder 2026	95,85	80,35	76,53	65,10	58,73	58,24	58,47	58,17	57,71	57,42	55,65	53,92	53,65	54,42
übrige Rinder 2025	95,85	80,35	76,56	65,36	60,22	60,41	60,50	60,05	59,49	59,13	57,52	56,10	55,65	55,25
Schweine 2026	108,76	90,18	100,20	96,47	81,97	83,58	83,88	85,24	83,12	82,67	83,17	76,03	64,86	67,57
Schweine 2025	110,49	91,81	102,06	99,06	86,55	90,68	90,90	92,49	89,97	89,21	89,86	82,89	71,88	71,78
Geflügel 2026	2,97	2,97	3,54	3,97	4,50	5,17	5,16	5,18	5,19	5,17	5,11	4,99	4,85	
Geflügel 2025	3,56	3,49	4,08	4,47	5,01	5,81	5,82	5,85	5,88	5,88	5,83	5,85	5,90	

5.3.2.6 Geplante Verbesserungen (3.B, CH_4)

Derzeit sind keine neuen Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

5.3.3 NMVOC-Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management

5.3.3.1 Beschreibung der Kategorie (NMVOC)

Siehe Kapitel 5.3.1.

5.3.3.1.1 Methodische Aspekte (NMVOC)

5.3.3.1.2 Methodik (NMVOC)

IPCC (2006b) gibt keine Methode zur Berechnung von NMVOC-Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management an. EMEP/EEA (2023) stellt Methoden und die dazugehörigen Parameter bereit. Deutschland berechnet die NMVOC-Emissionen getrennt nach Tierkategorien, wobei für Milchkühe und übrige Rinder die Tier-2-Methodik und für die übrigen Tiere die Tier-1-Methodik verwendet wird. Bei der einfachen Tier-1-Methodik wird die Tierzahl mit einem tierplatzbezogenen Emissionsfaktor multipliziert. Die Stufe-2-Methodik berechnet die tierbezogenen NMVOC-Emissionen als Summe der Emissionen aus dem Silagelager, aus der Fütterung mit Silage, aus dem Stall, aus dem Wirtschaftsdünger-Management, aus der Ausbringung und aus dem Weidegang. Zur Ermittlung der Verhältnisse dieser Teil-Emissionen zueinander greift die Methodik auf die entsprechenden Verhältnisse der NH_3-Emissionen zurück. Diese NH_3-Emissionen werden im deutschen Inventarmodell Py-GAS-EM für die Berichterstattung unter der Genfer Luftreinhaltekonvention (UNECE, 1979) konsistent zu den Treibhausgasemissionen berechnet.

Zu weiteren Details der NMVOC-Emissionsberechnungen siehe Vos et al. (2026), Kapitel 4.3.3. Für den Gleichungssatz der Tier-2-Methode wird auf EMEP (2023) -3Bverwiesen.

5.3.3.1.3 Emissionsfaktoren (NMVOC)

Für die Tier-1-Methodik sind unterschiedliche Emissionsfaktoren für Fütterung mit und ohne Silage angegeben. Für Pferde werden davon im deutschen Inventar die Emissionsfaktoren für Silagefütterung angenommen, für die übrigen Tiere, für die eine Tier-1-Berechnung erfolgt, die Faktoren für eine Fütterung ohne Silage. Tabelle 275 zeigt die Liste der im Inventar verwendeten Emissionsfaktoren. Dazu wurde, wegen fehlender oder nicht den Inventar-Tierkategorien entsprechender Emissionsfaktoren, für Aufzuchtferkel, Eber, Schafe, Pferde und Junghennen Folgendes festgelegt (siehe Kapitel 4.3.3.1 in Vos et al. (2026)):

In konservativer Weise wird für Eber der Emissionsfaktor von Sauen und für Aufzuchtferkel der von Mastschweinen übernommen.

Der in EMEP (2023) angegebene Emissionsfaktor für Schafe wird als Emissionsfaktor für erwachsene Schafe interpretiert. Der Emissionsfaktor für Lämmer wird mit 40 % des Emissionsfaktors für erwachsene Schafe angesetzt.

Der in EMEP (2023) angegebene Emissionsfaktor für Pferde wird als Emissionsfaktor für Großpferde interpretiert. Für Kleinpferde und Ponys wird der in EMEP (2023) angegebene Emissionsfaktor für Esel und Maultiere verwendet.

Wegen der Ähnlichkeit des Haltungsverfahrens wird für Junghennen der Emissionsfaktor von Masthähnchen übernommen.

Da für Strauße in EMEP (2023) kein Emissionsfaktor angegeben ist, wurde der Emissionsfaktor für „other poultry“ angewendet.

Tabelle 275: NMVOC: Im Inventar verwendete Tier-1- Emissionsfaktoren nach EMEP (2023), in kg Platz^{-1} a^{-1}

	Tier-1-EF_{NMVOC}
Sauen, Eber	1,704
Mastschweine, Aufzuchtferkel	0,551
erwachsene Schafe	0,169
Lämmer	0,068
Ziegen	0,542
Großpferde	7,781
Kleinpferde und Ponys	3,018
Legehennen	0,165
Masthähnchen, Junghennen	0,108
Gänse, Enten und Puten	0,489
Gehegewild	0,045
Kaninchen	0,059
Strauße	0,489
Pelztiere	1,941

Tabelle 276 zeigt für ausgewählte Jahre die berechneten Tier-2-Gesamtemissionsfaktoren (IEF) der Milchkühe und der übrigen Rinder.

Tabelle 276: NMVOC: Im EMEP (2023) berechnete Tier-2- Emissionsfaktoren (IEF), in kg Platz^{-1} a^{-1}

	1990	2005	2024
Milchkühe	32,91	39,73	45,58
übrige Rinder	12,40	12,25	11,90

Der ansteigende Trend des IEF der Milchkühen seit 1990 ist eine direkte Folge des Leistungsanstiegs, der über die GE-Aufnahme Eingang in die Berechnung findet. Die zeitliche Entwicklung des IEF der übrigen Rinder unterliegt dem Einfluss der Leistungssteigerung bei den Masttieren und der zeitlich variierenden Zusammensetzung der Population, da der IEF der verschiedenen Unterkategorien der übrigen Rinder unterschiedlich hoch ist.

5.3.3.1.4 Emissionen (NMVOC)

Die unter CR-Table 3 zu berichtenden NMVOC-Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management gehen aus Tabelle 277 hervor.

Tabelle 277: NMVOC-Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management, in Gg

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
insgesamt	418,6	362,0	346,8	325,4	324,2	325,3	322,0	318,6	314,2	311,1	307,0	300,6	296,1	296,7	291,7
in % von 1990	100,0	86,5	82,8	77,7	77,4	77,7	76,9	76,1	75,0	74,3	73,3	71,8	70,7	70,9	69,7
Milchkühe	209,2	185,3	175,9	168,3	168,5	175,2	174,3	173,1	172,2	171,8	170,2	166,9	164,5	166,0	163,6

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
übrige Rinder	162,9	131,1	123,7	107,8	105,3	98,8	97,0	94,8	91,9	89,5	87,0	85,5	85,2	84,6	81,8
Schweine	18,4	14,2	15,0	15,5	14,9	15,0	14,8	14,9	14,3	14,0	13,9	12,7	11,4	11,3	11,4
Schafe	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Ziegen	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Pferde	8,9	11,3	9,2	9,3	8,4	8,2	8,1	8,1	8,2	8,3	8,3	8,5	8,7	8,9	9,1
Geflügel	18,3	19,2	22,1	23,6	26,3	27,7	27,4	27,3	27,3	27,2	27,2	26,6	26,0	25,4	25,5
Gehegewild	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Kaninchen	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Strauße	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Pelztiere	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabelle 278 verdeutlicht, dass die Emissionen zum weitaus größten Anteil auf die Rinderhaltung zurückgehen. Die Abnahme der NMVOC-Emissionen seit 1990 ist somit fast ausschließlich mit dem Rückgang der Rinderzahlen zu erklären (R^2 = 98,9 %). Der relative Emissionsbeitrag der Geflügelhaltung ist gegenüber 1990 aufgrund steigender Geflügelzahlen stark angestiegen und liegt am Ende der Zeitreihe deutlich über dem Gesamtbeitrag der übrigen Tiere.

Tabelle 278: Prozentuale Beiträge zu den NMVOC-Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Rinder	88,9	87,4	86,4	84,9	84,5	84,2	84,3	84,1	84,0	84,0	83,8	84,0	84,3	84,5	84,1
Geflügel	4,4	5,3	6,4	7,3	8,1	8,5	8,5	8,6	8,7	8,7	8,8	8,8	8,8	8,6	8,7
übrige Tiere	6,8	7,3	7,2	7,9	7,4	7,3	7,2	7,3	7,3	7,3	7,4	7,2	6,9	6,9	7,1

5.3.3.2 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (NMVOC)

EMEP (2023) betont die sehr große Unsicherheit der Emissionsfaktoren, macht aber keine quantitativen Angaben dazu. Das deutsche Inventar geht von einem 95 % - Konfidenzintervall von [-79 %, +200 %] aus, siehe dazu Kap. 6.7 in Vos et al. (2026). Zur Unsicherheit der Aktivitätsdaten (Tierzahlen) siehe Kap. 6.3 in Vos et al. (2026).

Die Emissionszeitreihen sind konsistent, da sie für alle Jahre des Berichtszeitraumes jeweils mit der gleichen Methode berechnet wurden und die Eingangsdaten ebenfalls konsistent und vollständig sind.

5.3.3.3 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (NMVOC)

Zu Qualitätskontrolle und Qualitätssicherung wird auf Kapitel 5.1.7 verwiesen.

5.3.3.4 Kategoriespezifische Rückrechnungen (NMVOC)

Tabelle 279 zeigt die in Submission 2026 und 2025 unterschiedlichen Emissionswerte; auf eine Darstellung der unterschiedlichen Emissionsfaktoren wird verzichtet, da die Emissionen direkt proportional zu den Emissionsfaktoren sind. Die Differenzen bei den Rindern gehen vor allem auf Änderungen der zu Grunde liegenden NH3-Emissionen zurück, die bei den Milchkühen vor

allem auf die höhere Milchleistung zurückgehen und ansonsten auf Effekte der Wirtschaftsdüngertransporte (siehe Kapitel 5.1.7.3).

Tabelle 279: Vergleich der NMVOC-Emissionen zwischen Submission 2026 und Submission 2025 für Milchkühe, übrige Rinder und Geflügel, in Gg

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Milchkühe 2026	209,2	185,3	175,9	168,3	168,5	175,2	174,3	173,1	172,2	171,8	170,2	166,9	164,5	166,0
Milchkühe 2025	205,8	180,7	171,4	163,9	164,4	172,0	170,8	169,6	168,8	168,3	166,6	163,3	161,3	161,2
übrige Rinder 2026	162,9	131,1	123,7	107,8	105,3	98,8	97,0	94,8	91,9	89,5	87,0	85,5	85,2	84,6
übrige Rinder 2025	162,8	131,1	123,7	107,8	105,6	99,4	97,5	95,2	92,3	89,9	87,4	85,9	85,5	84,9
Geflügel 2026	18,3	19,2	22,1	23,8	26,3	27,7	27,4	27,3	27,3	27,2	27,2	26,6	26,0	25,4
Geflügel 2025	18,3	19,2	22,1	23,8	26,3	27,7	27,4	27,3	27,3	27,2	27,2	26,6	26,0	25,4

5.3.3.5 Geplante Verbesserungen (NMVOC)

Derzeit sind keine neuen Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

5.3.4 Direkte N_2O- und NO-Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management (3.B, N_2O & NO)

5.3.4.1 Beschreibung der Kategorie (3.B, N_2O_{direkt} & NO)

Siehe Kapitel 5.3.1.

5.3.4.2 Methodische Aspekte (3.B, N_2O_{direkt} & NO)

5.3.4.2.1 Methodik (3.B, N2Odirekt & NO)

Die Berechnung der N_2O-Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management erfolgt für alle Tierkategorien getrennt unter Berücksichtigung der gegebenen Managementsysteme (einschließlich der Wirtschaftsdünger-Vergärung, siehe Kapitel 5.1.3.6.5) nach einer Tier-2-Methode:

Gleichung 21: Berechnung der N_2O-Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management

$$E_{\text{N2O-N}} = \sum_{\text{i,j}} [(N_{\text{excr, } i} + N_{\text{straw, i, } j}) \cdot MS_{\text{i, } j}] \cdot EF_{\text{N2O-N, } j}$$

mit:

- $E_{\text{N2O-N}}$ = Gesamte N_2O-N-Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management (kg a^{-1} N_2O-N)
- $N_{\text{excr, i}}$ = Gesamte N-Ausscheidung der Tierkategorie i (kg a^{-1} N)
- $N_{\text{straw, i, j}}$ = N-Eintrag durch Einstreu für Tierkategorie i und Wirtschaftsdünger-Managementsystem j (kg a^{-1} N)
- $MS_{\text{i, j}}$ = relativer Anteil des Wirtschaftsdünger-Managementsystems j in Tierkategorie i (Platz Platz^{-1})
- $EF_{\text{N2O-N, j}}$ = N_2O-N-Emissionsfaktor für Wirtschaftsdünger-Managementsystem j (kg kg^{-1} N_2O-N)

Zu Gesamt-N-Ausscheidungen und Gesamt-N-Einträgen durch Einstreu siehe Kapitel 5.1.3.4 und 5.1.3.6.2. Zu den relativen Häufigkeiten der Wirtschaftsdünger-Managementsysteme siehe Kapitel 5.1.3.6.1 und Anhang 7.3.1.

Die NO-Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management werden analog zu den N_2O-Emissionen berechnet.

N_2O- und NO-Emissionen infolge von Wirtschaftsdüngerausbringung und Weidegang werden unter 3.D berichtet.

5.3.4.2.2 Emissionsfaktoren (3.B, N2Odirekt & NO)

Für die Güllelagerung werden die in IPCC (2019) angegebenen Default-Emissionsfaktoren verwendet. Daher wird seit Submission 2025 für alle vorhandenen Lagerabdeckungen mit dem gleichen Emissionsfaktor 0,005 kg N_2O-N (kg N)$^{-1}$gerechnet.

Bei Festmistsystemen wird nach Anbindehaltung/Laufstall (mit Lagerung im Misthaufen) und Tiefstreu (ohne Lagerung im Misthaufen) differenziert. Bei der Tiefstreu-Haltung kennt die landwirtschaftliche Praxis in Deutschland keine aktive Durchmischung (Expertenurteil, Brigitte Eurich-Menden et al. siehe Kap. 4.4.2 in Vos et al. (2026)). Für Tiefstreu wird daher der IPCC (2019) Defaultwert von 0,010 kg N_2O-N (kg N)$^{-1}$ verwendet. Für die Lagerung von Festmist aus Anbindehaltung/Laufstall bzw. für Geflügelkot werden die IPCC (2019) Defaultwerte von 0,010 bzw. 0,001 kg N_2O-N (kg N)$^{-1}$ verwendet.

Die Vergärung von Wirtschaftsdünger einschließlich Gärrestelagerung wird von IPCC (2019) als eigenständiger Lagertyp angesehen, aus dem keine N_2O-Emissionen erfolgen (EF = 0 kg kg^{-1}). Dieser IPCC-Defaultansatz berücksichtigt u. a. nicht, dass aus offenen Gärrestlagern N_2O emittiert wird. Das deutsche Inventar berechnet daher N_2O-Emissionen aus der Vergärung von Wirtschaftsdünger, differenziert nach verschiedenen Wirtschaftsdünger- und Gärrestelagerarten, siehe Kapitel 5.1.3.6.5.

Tabelle 280 zeigt die verwendeten N_2O-N-Emissionsfaktoren.

Tabelle 280: Emissionsfaktoren für Emissionen von N_2O-N aus dem Wirtschaftsdünger-Management, ohne Vergärung (bezogen auf die Summe von ausgeschiedenem N und Einstreu-N) (3.B(b)), in [kg kg^{-1}]

Wirtschaftsdünger		Emissionsfaktor
Gülle	Außenlager ohne Abdeckung	0,000
	feste Abdeckung	0,005
	natürliche Schwimmdecke	0,005
	Schwimmdecke (Häcksel)	0,005
	Schwimmdecke (Folie)	0,005
	unterhalb Spaltenboden	0,002
Jauche	feste Abdeckung	0,005
Festmist		0,010
Tiefstreu		0,010
Geflügelfestmist bzw. –kot		0,001

Quelle: IPCC (2019)

Annahme: Vergleichbar mit Lagerung von Gülle unter fester Abdeckung

IPCC (2019) gibt keine Emissionsfaktoren für NO an. Die in EMEP (2023) angegebenen Tier-1-Emissionsfaktoren beziehen sich auf den Tierplatz. Sie können nicht im Inventarmodell Py-GAS-EM verwendet werden, da Py-GAS-EM im Rahmen des N-Fluss-Konzeptes (siehe Kapitel 5.1.2.4) Emissionsfaktoren benötigt, die sich auf die emissionsrelevante N-Menge beziehen. Vergleichsrechnungen haben aber gezeigt, dass die mit den Tier-1-Emissionsfaktoren berechneten deutschen NO-Gesamtemissionen des Sektors 3.B mit dem N-Fluss-Konzept von Py-GAS-EM reproduziert werden können, wenn der auf N bezogene NO-N-Emissionsfaktor um eine Größenordnung kleiner als der N_2O-N-Emissionsfaktor ist. Daher wurde im Inventar der NO-N-Emissionsfaktor mit 10 % des N_2O-N-Emissionsfaktors angesetzt. Dieser Ansatz führt zu NO-Emissionen, die zu den N_2O-Emissionen direkt proportional sind.

Emissionsfaktoren zu N_2 (im N-Fluss-Konzept ebenfalls zu berücksichtigen, siehe Kapitel 5.1.2.4) werden weder von IPCC noch von EMEP angegeben. Jarvis and Pain (1994) fanden für das Verhältnis von N_2-Emissionen zu N_2O-N–Emissionen einen Wert von 3:1. Daher wurde im Inventar angenommen, dass der N_2-Emissionsfaktor das Dreifache des N_2O-N-Emissionsfaktors beträgt.

Tabelle 281 zeigt die Zeitreihen der mittleren N_2O-N-Emissionsfaktoren für die vier berichterstattungsrelevanten übergreifenden Wirtschaftsdünger-Managementkategorien „gülle-basiert (ohne Vergärung)“, „strohbasiert (ohne Tiefstreu und ohne Vergärung)“, „Tiefstreu (ohne Vergärung)“ und „Vergärung (von Wirtschaftsdünger)“. Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit wird in Abweichung von der sonst für die Emissionsfaktoren üblichen Einheit (kg kg^{-1}, siehe Tabelle 280) die Einheit g kg^{-1} verwendet. Diese Emissionsfaktoren sind definiert als das Verhältnis der gesamten N_2O-N-Emissionen aus einer Managementkategorie zur Summe der tierischen N-Ausscheidungen in dieser Managementkategorie. Dabei umfassen die Gesamt-N_2O-Emissionen bei den Kategorien mit Einstreu auch Emissionsanteile, die auf Einstreu-N zurückgehen. Aus diesem Grund ist in Tabelle 281 der resultierende Emissionsfaktor für Tiefstreu höher als der in Tabelle 280 angegebene. Gleiches gilt prinzipiell auch für strohbasierte Systeme ohne Tiefstreu und Vergärung, wobei der Effekt nicht auffällt, weil in die entsprechenden Werte in Tabelle 281 auch der erheblich niedrigere Geflügel-Emissionsfaktor (siehe Tabelle 280) eingeht. Auffällig ist der negative Trend bei den N_2O-N-Emissionsfaktoren für strohbasierte Systeme und den Systemen mit Vergärung über die gesamte Zeitreihe. Bei den strohbasierten Systemen ist dies eine Folge der abnehmenden N_2O-Beiträge aus Festmistsystemen in der Rinder- und Schweinehaltung, was auf die veränderten Tierzahlen in den jeweiligen Haltungsverfahren zurückzuführen ist. Bei der Vergärung ist der Grund in erster Linie in der zunehmenden Verbreitung gasdichter Gärrestelagerung zu finden (siehe Kapitel 5.1.3.6.5).

Tabelle 281: Mittlere N_2O-N-Emissionsfaktoren nach Wirtschaftsdünger-Managementsystemen (3.B(b)), in g/kg

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
güllebasiert [a]	3,16	3,58	3,56	3,63	3,68	3,58	3,57	3,55	3,53	3,52	3,51	3,51	3,53	3,52	3,52
Strohbasiert [b]	8,88	8,75	8,34	8,20	8,15	8,02	7,95	7,89	7,81	7,75	7,80	7,81	7,99	8,00	7,97
Tiefstreu [a]	10,90	11,18	11,05	10,94	10,58	10,55	10,59	10,63	10,68	10,74	10,74	10,74	10,75	10,74	10,73
Vergärung	5,02	4,82	4,62	4,33	3,02	1,96	1,90	1,83	1,58	1,41	1,26	1,11	1,09	0,95	0,95

[a] ohne Vergärung

[b] ohne Tiefstreu und ohne Vergärung

5.3.4.2.3 Emissionen (3.B, N_2O_{direkt} & NO)

Tabelle 282 zeigt die direkten N_2O-Gesamtemissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management (einschließlich Lagerung der Wirtschaftsdünger-Gärreste) und ihre Aufschlüsselung nach Systemkategorien. Die starke Abnahme der Emissionen in der ersten Hälfte der 1990er Jahre ist im Wesentlichen eine Folge des Rückgangs der Tierbestände nach der deutschen Wiedervereinigung. Zusätzliche Einflussfaktoren sind die zeitliche Veränderung der Verteilung der Managementsysteme (siehe Kapitel 5.1.3.6.1 und Anhang 7.3.1) sowie die mit den Jahren zunehmende Emissionsminderung durch Vergärung von Wirtschaftsdünger (siehe Kapitel 5.1.3.6.5).

Tabelle 282: Direkte N_2O-Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management insgesamt und nach Systemkategorien (3.B(b)) , in Gg

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
insgesamt	12,14	10,57	9,98	9,86	9,55	9,04	8,93	8,87	8,61	8,42	8,18	7,81	7,64	7,69	7,59
in % von 1990	100,0	87,1	82,3	81,3	78,7	74,5	73,6	73,1	70,9	69,4	67,4	64,4	62,9	63,3	62,6
güllebasiert [a]	4,54	4,88	4,68	4,33	3,64	3,35	3,35	3,35	3,29	3,26	3,14	2,90	2,77	2,86	2,82
strohbasiert [b]	6,76	4,81	4,34	4,22	4,08	3,48	3,33	3,22	3,08	2,95	2,92	2,89	2,88	2,92	2,92
Tiefstreu [a]	0,83	0,88	0,93	1,06	1,14	1,49	1,56	1,62	1,67	1,73	1,68	1,62	1,60	1,60	1,55
Vergärung	0,00	0,00	0,04	0,25	0,69	0,72	0,70	0,68	0,56	0,49	0,44	0,40	0,39	0,31	0,30

[a] ohne Vergärung

[b] ohne Tiefstreu und ohne Vergärung

Die durch Wirtschaftsdünger-Vergärung erzielte absolute und prozentuale Einsparung von N_2O-Emissionen gegenüber einer Situation ohne Vergärung und Gärrestelagerung geht aus Tabelle 283 hervor. Positive Werte bedeuten eine Zunahme der Emissionen. Diese Zunahme ist im Wesentlichen darauf zurück zu führen, dass die Lagerung der Gärreste, wenn sie nicht gasdicht erfolgt, zu höheren N_2O-Emissionen als die herkömmliche Lagerung von Wirtschaftsdünger führt. Darüber hinaus erzeugt bei Geflügelkot die Gärrestelagerung generell höhere N_2O-Emissionen als die Lagerung unvergorenen Geflügelkots. Für die gesamte Wirtschaftsdünger-Vergärung führt erst der mit den Jahren ansteigende Anteil der gasdichten Lagerung (siehe Kapitel 5.1.3.6.5) ab 2006/2007 zur Einsparung von N_2O-Emissionen.

Tabelle 283: Durch Wirtschaftsdünger-Vergärung verursachte absolute und prozentuale Veränderung der direkten N_2O-Emissionen gegenüber einer Situation ohne Vergärung und Gärrestelagerung (negative Werte: Emissionsminderung)

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Gg	0,0001	0,0009	0,006	0,04	-0,17	-0,60	-0,61	-0,65	-0,71	-0,74	-0,81	-0,90	-0,89	-0,83	-0,83
[%]	0,001	0,009	0,00	0,0	-1,8	-6,3	-6,4	-6,8	-7,7	-8,1	-9,0	-10,3	-10,4	-9,7	-9,8

Tabelle 284 zeigt die NO-Gesamtemissionen der Kategorie 3.B. Wegen der Proportionalität der Emissionsfaktoren von NO und N_2O sind die zeitlichen Trends für NO identisch mit denen für N_2O.

Tabelle 284: NO-Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management, in Gg

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
insgesamt	1,655	1,442	1,361	1,345	1,302	1,233	1,218	1,209	1,174	1,149	1,115	1,065	1,041	1,048	1,035

5.3.4.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (3.B, N_2O_{direkt} & NO)

Tabelle 250 in Kapitel 5.1.6 gibt die Unsicherheiten von Aktivitätsdaten und Emissionsfaktoren an, die für die Schätzung der Gesamt-Unsicherheit des deutschen THG-Inventars eingesetzt wurden.

Die Schätzung der Unsicherheit der N_2O-Emissionsfaktoren (95 % - Konfidenzintervall) beruht auf Defaultangaben in IPCC (2006b Vol 4, Table 10.21). Siehe dazu auch Kap. 4.2.2.4 und 14.4.1 in Vos et al. (2026). Zur Unsicherheit der Aktivitätsdaten (Tierzahlen) siehe Kap. 6.3 in Vos et al. (2026).

Mangels Daten zur Unsicherheit des NO-Emissionsfaktors wird die Unsicherheit des N_2O-Emissionsfaktors übernommen.

Die Emissionszeitreihen sind konsistent, da sie für alle Jahre des Berichtszeitraumes jeweils mit der gleichen Methode berechnet wurden und die Eingangsdaten ebenfalls konsistent und vollständig sind.

5.3.4.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (3.B, N_2O_{direkt} & NO)

Zu Qualitätskontrolle und Qualitätssicherung wird auf Kapitel 5.1.7 verwiesen.

Im Rahmen der Verifizierung wurde analog zur Vorgehensweise in Kapitel 5.2.4 für 2023 ein Vergleich der N-Ausscheidungen und der N_2O-Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management in Deutschland und benachbarten Staaten inklusive des Vereinigten Königreiches durchgeführt, Tabelle 285 und Tabelle 286.

Bei den N-Ausscheidungen der Milchkühe liegt Deutschland rund 1 % über dem Median und in plausibler Nähe zu anderen Ländern. Bei der N-Ausscheidung der übrigen Rinder liegt der deutsche Wert rund 7 % unter dem Median. Die deutschen N-Ausscheidungen für die Schweine stellen den höchsten Wert dar. Es erhebt sich dabei die Frage nach der Definition des Mittelwertes für die gesamte Schweinepopulation: Deutschland berechnet den Mittelwert regelkonform für einen AAP-Platz, der 365 Tage im Jahr besetzt ist, siehe Kap. 1.1.2.2 in Vos et al. (2026), während sich die niedrigeren N-Ausscheidungen der übrigen Länder möglicherweise zum Teil durch eine nicht AAP-konsistente Berücksichtigung von Leerstandszeiten erklären lassen.

Beim Geflügel hat Deutschland ebenfalls die höchste mittlere N-Ausscheidung. Die Unkenntnis über die Zusammensetzung der Gesamtpopulation in den verschiedenen Ländern erschwert den direkten Vergleich, da die verschiedenen Geflügelarten sehr unterschiedliche Ausscheidungsniveaus aufweisen (siehe Spannbreite nach EMEP (2023)).

Tabelle 285: N-Ausscheidung pro Tierplatz für Milchkühe, übrige Rinder, Schweine und Geflügel verschiedener Länder für das Zeitreihenjahr 2023

	Milchkühe [kg Platz^{-1} a^{-1}]	Übrige Rinder [kg Platz^{-1} a^{-1}]	Schweine [kg Platz^{-1} a^{-1}]	Geflügel [kg Platz^{-1} a^{-1}]
Österreich	107,04	51,76	10,95	0,42
Belgien	115,35	50,42	7,17	0,49

	Milchkühe	Übrige Rinder	Schweine	Geflügel
Tschechische Republik	119,30	59,22	10,76	0,50
Dänemark	155,32	40,78	6,62	0,46
Frankreich	116,76	59,96	9,68	0,46
Deutschland	**118,58**	**44,19**	**12,19**	**0,66**
Niederlande [a]	77,20	37,86	7,59	0,60
Polen	122,42	51,60	11,15	0,61
Schweiz [a]	111,38	39,83	9,12	0,47
Vereinigtes Königreich [b]	117,55	43,81	n/a	0,48
IPCC (2006b Vol 4, 10.59, 10.72, 10.78, 10.80-10.82):	105,1[c]	50,6[c]	9,3 / 30,4[c,d]	0,53[c, e]
EMEP/EEA (2023-3B-31)	105	41	12,1 / 34,5[d]	0,36 bis 1,64

Quelle: Deutschland: Submission 2026; andere Länder: UNFCCC (2025)

[a] Niederlande und Schweiz, übrige Rinder: berechnet aus CRT-Daten

[b] Vereinigtes Königreich: Rinder-Daten unterscheiden zwischen Milchrindern (Milchkühe und Milchkuhnachzucht incl. Kälber) und den verbleibenden anderen Rindern

c IPCC-Gewichte: berechnet IPCC (2006b Vol 4) mit den IPCC-Standardwerten für Gewicht und N-Ausscheidung und im Falle von Geflügel mit den deutschen Tierzahlen der Geflügelunterkategorien (Submission 2022)

d IPCC (2006b Vol 4) Sauen und Eber: 30,4, andere: 9,3; EMEP/EEA (2023): Sauen: 34,5, Mastschweine: 12,1

e Geflügel: Annahmen für fehlende Werte: Gewicht Gänse = 1/2 Standardgewicht Puten IPCC (2006b Vol 4), N-Ausscheidung Gänse = Standard-N-Ausscheidung Puten (IPCC (2006b Vol 4)), Gewicht Junghennen = 1/2 Standardgewicht Legehennen IPCC (2006b Vol 4), N-Ausscheidung Junghennen = Standard-N-Ausscheidung Legehennen IPCC (2006b Vol 4)

Tabelle 286 zeigt eine Gegenüberstellung der IEFs der direkten N_2O-Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management für Milchkühe, übrige Rinder, Schweine und Geflügel. Die von den verschiedenen Ländern angegebenen Daten variieren jeweils über einen großen Bereich. Eine Erklärung für die Schwankungsbreite ist mit den vorliegenden Daten nicht möglich. Für Milchkühe trifft Deutschland den Median fast genau, für übrige Rinder liegt Deutschland 13 % über dem Median. Bei den Schweinen liegt der deutsche Wert 23 % oberhalb des Medians und beim Geflügel 6 % oberhalb des Medians. Tschechien und das Vereinigte Königreich weisen bei Geflügel IEFs auf, die nochmal um den Faktor 3 höher liegen.

Tabelle 286: Vergleich des impliziten Emissionsfaktors (IEF) für N2O-Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management für Milchkühe, übrige Rinder, Schweine und Geflügel verschiedener Länder für das **Zeitreihenjahr 2023**

	Milchkühe [kg Platz^{-1} a^{-1}]	Übrige Rinder [kg Platz^{-1} a^{-1}]	Schweine [kg Platz^{-1} a^{-1}]	Geflügel [kg Platz^{-1} a^{-1}]
Österreich	0,663	0,460	0,096	0,0006
Belgien	0,405	0,265	0,024	0,0008
Tschechische Republik	0,633	0,322	0,043	0,0037
Dänemark	0,860	0,398	0,050	0,0007
Frankreich	0,680	0,295	0,010	0,0007
Deutschland	**0,670**	**0,373**	**0,057**	**0,0009**
Niederlande [a]	0,395	0,209	0,026	0,0009

	Milchkühe	Übrige Rinder	Schweine	Geflügel
Polen	0,877	0,339	0,084	0,0010
Schweiz [a]	0,309	0,125	0,022	0,0007
Vereinigtes Königreich [b]	0,735	0,558	0,163	0,0038

Quelle: Deutschland: Submission 2026; andere Länder: UNFCCC (2025)

[a] Niederlande und Schweiz, übrige Rinder: berechnet aus CRT-Daten

[b] Vereinigtes Königreich: Rinder-Daten unterscheiden zwischen Milchrindern (Milchkühe und Milchkuhnachzucht incl. Kälber) und den verbleibenden anderen Rindern

5.3.4.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (3.B, N_2O_{direkt} & NO)

Tabelle 287 zeigt die direkten N_2O-Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management im Vergleich mit Ergebnissen der Submission 2025. Die zugrunde liegenden Daten der N-Ausscheidung gehen aus Tabelle 288 hervor.

Die N-Ausscheidungen sind in Submission 2026 bis zum Jahr 2019 höher, was vor allem auf die Neuberechnung der N-Ausscheidung der Milchkühe und deren höhere Milchleistung zurückzuführen ist. Ab dem Jahr 2020 wird der Effekt der höheren Milchleistung überkompensiert durch den Effekt der Neuberechnung der N-Ausscheidung und es ergeben sich insgesamt geringere N-Ausscheidungen. Nennenswerte Änderungen der N-Ausscheidung gab es ansonsten noch bei den Sauen (geringere N-Ausscheidung wegen der Aufteilung in Jung- und Altsauen) und Pferden (ab 2011 höhere N-Ausscheidungen wegen geänderter Fütterung), siehe Kapitel 5.1.7.3, deren Wirkung aber insgesamt deutlich von den Änderungen bei den Milchkühen übertroffen wird. Die direkten N2O-Emissionen erhöhen und vermindern sich prozentual in ähnlicher Weise wie die N-Ausscheidungen.

Tabelle 287: Vergleich der in Submission 2026 und 2025 berechneten direkten Gesamt-N_2O-Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management, in Gg

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
2026	12,136	10,573	9,983	9,860	9,551	9,043	8,929	8,869	8,609	8,425	8,176	7,812	7,636	7,688
2025	11,492	10,132	9,674	9,631	9,471	8,982	8,839	8,715	8,527	8,370	8,209	7,929	7,743	7,754

Tabelle 288: Vergleich der in Submission 2026 und 2025 berechneten Gesamt-N-Ausscheidungen (siehe Kapitel 5.1.3.4) , in Gg

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
2026	1688,2	1460,9	1398,0	1340,5	1309,8	1339,9	1330,7	1332,8	1308,7	1290,1	1262,7	1216,9	1182,9	1180,1
2025	1603,0	1398,1	1354,8	1309,3	1298,8	1330,3	1318,6	1310,6	1288,6	1276,2	1263,5	1230,0	1194,9	1195,2

Die NO-Emissionen haben sich wegen der direkten Proportionalität zu den N_2O-Emissionen (siehe Kapitel 5.3.4.2.2) in gleicher Weise wie die N_2O-Emissionen verändert, siehe Tabelle 289.

Tabelle 289: Vergleich der in Submission 2026 und 2025 berechneten Gesamt-NO-Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management, in Gg

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
2026	1,655	1,442	1,361	1,345	1,302	1,233	1,218	1,209	1,174	1,149	1,115	1,065	1,041	1,048
2025	1,567	1,382	1,319	1,313	1,291	1,225	1,205	1,188	1,163	1,141	1,119	1,081	1,056	1,057

5.3.4.6 Geplante Verbesserungen (3.B, N_2O_{direkt} & NO)

Derzeit sind keine neuen Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

5.3.5 Indirekte N_2O-Emissionen als Folge des Wirtschaftsdünger-Managements (3.B)

5.3.5.1 Beschreibung der Kategorie (3.B, $N_2O_{indirekt}$)

Siehe Kapitel 5.3.1.

5.3.5.2 Methodische Aspekte (3.B, $N_2O_{indirekt}$)

5.3.5.2.1 Methodik (3.B, $N_2O_{indirekt}$)

Die indirekten N_2O-Emissionen als Folge der Deposition von NH_3 und NO aus Wirtschaftsdünger-Management (incl. Lagerung der Wirtschaftsdünger-Gärreste; ohne Ausbringung) werden nach IPCC (2006b Vol 4, 11.21) proportional zur deponierten N-Menge berechnet:

Gleichung 22: indirekte N_2O-Emissionen als Folge des Wirtschaftsdünger-Managements (Deposition)

$$E_{\text{N2O indirect, MM, Dep}} = \frac{44}{28} \cdot (E_{\text{NH3-N, MM}} + E_{\text{NO-N, MM}}) \cdot EF_4$$

mit:

- $E_{\text{N2O, indirect,-MM, Dep}}$ = indirekte N_2O-Emissionen aus der Deposition von NH_3-N und NO-N aus dem Wirtschaftsdünger -Management (kg a^{-1})
- $E_{\text{NH3-N, MM}}$ = gesamte NH_3-N-Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger Management (kg a^{-1})
- $E_{\text{NO-N, MM}}$ = gesamte NO-N-Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger Management (kg a^{-1})
- EF_4 = N_2O-N-Emissionsfaktor, siehe Kapitel 5.3.5.2.2

Eine allgemeine Methodenbeschreibung zur Berechnung der NH_3- und NO-Emissionen aus Stall und Wirtschaftsdüngerlager findet sich, ebenso wie tierspezifische Details in Kap. 4.3.1 bzw. 4.3.2 in Vos et al. (2026).

Die indirekten N_2O-Emissionen aufgrund von Auswaschung aus dem Wirtschaftsdünger-Management werden proportional zur Menge des auf dem Feld mit Mist gelagertem N berichtet.

Auswaschung von Stickstoff wird ausschließlich bei der Feldrandlagerung von Festmist berichtet, da für alle anderen Arten der Lagerung eine Auswaschung durch die baurechtlichen Vorgaben verhindert wird. Laut der Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA, 2019) muss ein Feldrandlager nach spätestens vier Wochen eine wasserdichte Abdeckung erhalten. Es wird also in konservativer Weise davon ausgegangen, dass Auswaschung von N in den ersten vier Wochen der Lagerung auftritt. Der ausgewaschene Anteil der gelagerten N-Menge ($Frac_{LEACHMS}$) wird mit Hilfe von (IPCC, 2019) berechnet, siehe Kap. 4.4.3 in Vos et al. (2026) und beträgt 0.00333 kg kg^{-1}.

Die indirekten N_2O-Emissionen als Folge von Auswaschung werden nach dem Tier-1-Verfahren nach IPCC (2006b Vol 4, 11.21), als Produkt aus N_2O-N-Umrechnungsfaktor 44/28,

ausgewaschener N-Menge und Emissionsfaktor (0,011 kg N_2O-N (kg N)$^{-1}$, siehe IPCC (2006b Vol 4, 11.24, Table 11.3); (IPCC, 2019) berechnet:

Gleichung 23: Indirekte N_2O-Emissionen als Folge des Wirtschaftsdünger-Managements (Auswaschung)

$$E_{\text{N2O indirect, MM, Leach}} = \frac{44}{28} \cdot N_{\text{leaching, MM}} \cdot EF_5$$

mit:

- $E_{\text{N2O, indirect, MM, Leach}}$= indirekte N_2O-Emissionen aus der Auswaschung von N aus dem Wirtschaftsdünger -Management (kg a^{-1})
- $N_{\text{leaching, MM}}$ = N-Menge die während der Feldrandlagerung ausgewaschen wird (kg a^{-1})
- EF_5 = N_2O-N-Emissionsfaktor für Auswaschung, siehe Kapitel 5.3.5.2.2

Eine ausführliche Beschreibung der Berechnung der indirekten N_2O-Emissionen als Folge von Auswaschung und Oberflächenabfluss findet sich in Kap. 5.3.2.1 in Vos et al. (2026).

5.3.5.2.2 Emissionsfaktor (3.B und 3.D, $N_2O_{indirekt}$)

Der Emissionsfaktor EF_4 für indirekte N_2O-Emissionen als Folge der Deposition von NH_3 und NO aus dem Wirtschaftsdünger-Management und aus Böden wird seit Submission 2026 differenziert nach Klima. Für feuchte Klimate beträgt er 0,014 kg N_2O-N (kg N)$^{-1}$, für trockene Klimate beträgt er 0,005 kg N_2O-N (kg N)$^{-1}$, siehe IPCC (2019) Table 11.3. Für jedes Jahr wird in einem 1x1 km Raster der Quotient von Niederschlag und potentieller Evapotranspiration aus Daten des Deutschen Wetterdienstes ermittelt. Ist der Quotient > 1 wird an diesem Punkt laut (IPCC, 2019) der Faktor für feuchte Klimate verwendet, ansonsten der Faktor für trockene Klimate. Durch Verschneidung mit der landwirtschaftlichen Fläche der NUTS-3 Regionen wird für jede Region und jedes Jahr daraus ein mittlerer Emissionsfaktor berechnet.

Der Emissionsfaktor EF_5 für indirekte N_2O-Emissionen als Folge von Auswaschung aus dem Wirtschaftsdüngermanagement (nur für Lagerung von Mist auf dem Feld) beträgt 0,011 kg N_2O-N (kg N)$^{-1}$ (IPCC, 2019).

5.3.5.2.3 Emissionen (3.B, $N_2O_{indirekt}$)

Tabelle 290 zeigt die indirekten N_2O-Emissionen aufgrund der Deposition von reaktivem Stickstoff durch NH_3- und NO-Emissionen aus dem Wirtschaftsdünger-Management für die vorliegende Submission und im Vorgriff auf Kapitel 5.3.5.5 auch für die letztjährige Submission. Gegenüber der Submission 2025, in der ausschließlich mit dem EF für feuchtes Klima gerechnet wurde, sind die Emissionen für die gesamte Zeitreihe deutlich niedriger. In einzelnen, besonders trockenen Jahren wie 2018 oder 2022 halbieren sich dadurch die Emissionen gegenüber Submission 2025. Generell können sehr hohe interannuelle Schwankungen auftreten.

Tabelle 291 zeigt entsprechend die indirekten N_2O-Emissionen aufgrund von Auswaschung aus dem Wirtschaftsdünger-Management.

Die Emissionen als Folge von Auswaschung und Oberflächenabfluss haben sich im Vergleich zur Submission 2025 nur wenig geändert. Im wesentlichen folgen sie dem Verlauf der direkten N_2O-Emissionen, siehe Kapitel 5.3.4.2.3. Die Änderungen gegenüber Submission 2025 sind daher ganz überwiegend auf die Änderungen der N-Ausscheidung bei den Milchkühen zurückzuführen, siehe Kapitel 5.1.7.3..

Tabelle 290: Indirekte N_2O-Emissionen als Folge der Deposition von NH_3 und NO aus dem Wirtschaftsdünger-Management (Submission 2026 und 2025), in Gg

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
2026	4,776	4,316	4,197	4,175	4,268	3,223	3,369	3,867	1,744	2,652	2,411	3,363	1,818	3,131
2025	5,464	4,582	4,514	4,521	4,399	4,324	4,250	4,210	4,087	4,005	3,934	3,783	3,596	3,572

Tabelle 291: Indirekte N_2O-Emissionen als Folge von Auswaschung aus dem Wirtschaftsdünger-Management (Submission 2026 und 2025), in Gg

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
2026	0,0022	0,0012	0,0012	0,0012	0,0013	0,0009	0,0009	0,0008	0,0007	0,0007	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006
2025	0,0021	0,0012	0,0011	0,0012	0,0013	0,0009	0,0009	0,0008	0,0007	0,0007	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006

5.3.5.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (3.B, $N_2O_{indirekt}$)

Tabelle 250 in Kapitel 5.1.6 gibt die Unsicherheiten von Aktivitätsdaten und Emissionsfaktor an, die für die Schätzung der Gesamt-Unsicherheit des deutschen THG-Inventars eingesetzt wurden.

Es wurde die Emissionsfaktor-Unsicherheit (95 % - Konfidenzintervall) aus der Berechnung der indirekten N_2O-Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Böden (siehe Kap. 6.5 in Vos et al. (2026)) übernommen. Zur Schätzung der Unsicherheit der Aktivitätsdaten (verfügbare Menge an reaktivem Stickstoff) siehe Kap. 6.3 in Vos et al. (2026).

Die Emissionszeitreihen sind konsistent, da sie für alle Jahre des Berichtszeitraumes jeweils mit der gleichen Methode berechnet wurden und die Eingangsdaten ebenfalls konsistent und vollständig sind.

5.3.5.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (3.B, $N_2O_{indirekt}$)

Zu Qualitätskontrolle und Qualitätssicherung wird auf Kapitel 5.1.7 verwiesen.

5.3.5.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (3.B, $N_2O_{indirekt}$)

Zu den kategoriespezifischen Rückrechnungen siehe Kapitel 5.3.5.2.2.

5.3.5.6 Geplante Verbesserungen (3.B, $N_2O_{indirekt}$)

Derzeit sind keine neuen Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

5.4 Reisanbau (3.C)

In Deutschland wird kein Reis angebaut (not occuring, NO).

5.5 Landwirtschaftliche Böden (3.D)

5.5.1 Beschreibung der Kategorie (3.D)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
L/T	3 D, Agricultural Soils		N_2O	20292,80	1,57	14473,14	2,05	-28,68

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
N_2O	Tier 1/ Tier 2/Tier 3	M/AS/RS/NS	D, CS
NO_X	Tier 1	RS/NS	D
NMVOC	Tier 1	RS/NS	D

Die Kategorie „Landwirtschaftliche Böden“ ist hinsichtlich der N_2O-Emissionen eine Hauptkategorie nach der Emissionshöhe und dem Trend.

Mikrobielle Umsetzungen (Nitrifikation und Denitrifikation) von N-Verbindungen führen zu N_2O-Emissionen aus Böden. Es wird zwischen direkten und indirekten N_2O-Emissionen unterschieden. Die berichteten direkten Emissionen des Sektors 3.D umfassen die N_2O-Emissionen infolge von:

- Mineraldüngerausbringung
- Wirtschaftsdüngerausbringung (incl. Ausbringung von Wirtschaftsdünger-Gärresten)
- Klärschlammausbringung
- Ausbringung von sonstigen organischen Düngern (Gärreste aus Energiepflanzenvergärung und Abfallvergärung, Komposte aus Bio- und Grünabfall und importierten Wirtschaftsdüngern)
- Weidegang
- Ernterückständen
- Mineralisierung
- Bewirtschaftung organischer Böden

Die indirekten N_2O-Emissionen des Sektors 3.D ergeben sich als Folge der Deposition reaktiven Stickstoffs sowie von Auswaschung und Oberflächenfluss. Für die Berechnung der indirekten N_2O-Emissionen aus Auswaschung und Oberflächenabfluss wird eine Tier-3 Methodik verwendet.

Tabelle 292 zeigt die zeitlichen Veränderungen der Emissionen aus der Nutzung landwirtschaftlicher Böden seit 1990 sowie für Anfangs- und Endjahr der Zeitreihe die Anteile der Emissionen an den jeweiligen Gesamtemissionen aus der deutschen Landwirtschaft.

Tabelle 292: Prozentuale Veränderung der Emissionen aus der Nutzung landwirtschaftlicher Böden seit 1990 sowie prozentuale Anteile an den landwirtschaftlichen Gesamtemissionen von N_2O und THG

[%]	Veränderung seit 1990	Anteil an landwirtschaftlicher Gesamtemission (N_2O, THG)	
		1990	2024
N_2O_{soils}, direkt	-17,6	62,8	69,2
N_2O_{soils}, indirekt	-52,6	19,1	14,0
Summe von N_2O_{soils}	-25,8	81,9	83,1
dito, als THG (in CO_{2eq})	-25,8	27,4	27,2

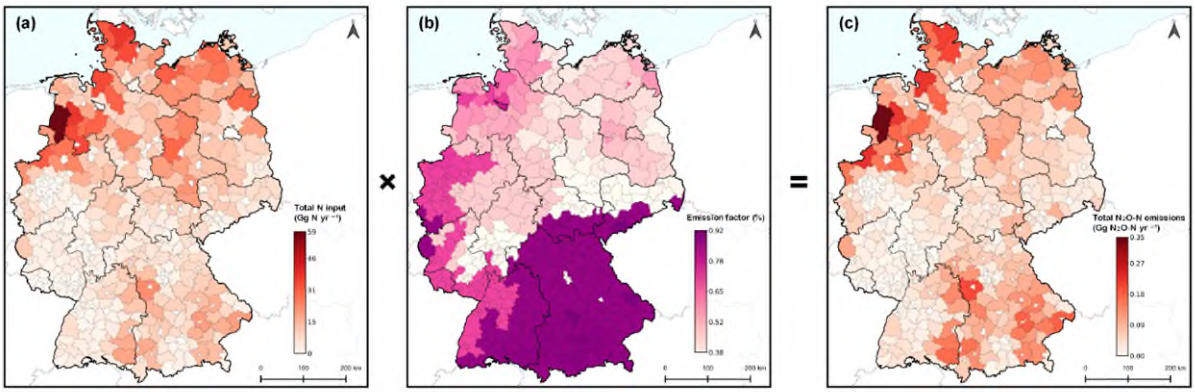
5.5.2 Methodische Aspekte und Emissionen(3.D)

5.5.2.1 Methodik und Emissionsfaktoren (3.D)

5.5.2.1.1 Direkte N_2O-Emissionen (3.D.a)

Direkte N_2O-Emissionen als Folge der Ausbringung von N-haltigen Substraten sowie aus Ernterückständen werden mit einem Tier-2-Verfahren auf NUTS-3 Ebene mittels der Emissionsfaktoren von Mathivanan et al. (2021) berechnet (siehe Kapitel 5.1.5.1.1). Die verwendeten Tier-2-Emissionsfaktoren wurden in einer Metaanalyse abgeleitet. Als Datengrundlage dienten 71 in Deutschland durchgeführte Studien, die 676 Feldmesswerte von N_2O-Emissionen an 43 Standorten in Deutschland über mindestens 150 Tage beinhalteten. Die Emissionsfaktoren wurden mit Hilfe von Bayes'schen generalisierten linearen gemischten Modellen abgeleitet. Die Emissionsfaktoren gelten nur für direkte N2O-Emissionen, die indirekten N2O-Emissionen als Folge von Ausbringung von Mineraldüngern, Wirtschaftsdüngern, Komposten (aus Bioabfall und Grünabfall), Klärschlämmen und Gärresten werden separat berechnet, siehe Kapitel 5.5.2.1.2 und 5.5.2.1.3.

Abbildung 50: Darstellung der Berechnung auf Basis der NUTS-3-Regionen von direkten N_2O-Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden



Darstellung: Figure 3 aus Mathivanan et al. (2021).

a) N-Einträge durch Mineraldünger, Wirtschaftsdünger, Gärreste, Klärschlamm und Ernterückstände in Gg N yr^{-1}.

b) N_2O-Emissionsfaktoren in % aus Basis von NUTS-3-Regionen.

c) jährliche direkte N_2O-Emissionen der NUTS-3-Regionen aus der Ausbringung von N-haltigen Substraten und aus Ernterückständen

Es wurden getrennte Emissionsfaktoren für organische und mineralische Böden ermittelt. Als Kriterium zur Einordnung als organischer Boden wurde die im deutschen LULUCF-Inventar verwendete Grenze von mindestens 90 g kg^{-1} SOC gewählt. Emissionsfaktoren für Mineralböden wurden für vier Regionen in Deutschland ermittelt, die aus den ökologischen Zonen nach Metzger et al. (2005) abgeleitet wurden. Für organische Böden konnte nur ein gesamtdeutscher Emissionsfaktor ermittelt werden.

Zur Ableitung von Emissionsfaktoren wurden die Lachgasemissionen als lineare Funktion der N-Düngung modelliert; die Emissionsfaktoren entsprechen dann den Steigungsparametern des Modells (Bouwman, 1996). Der typischen schiefen Verteilung von Lachgasemissionen wurde Rechnung getragen, indem ein generalisiertes lineares Modell mit einer Gamma-Verteilung und linearer Link-Funktion verwendet wurde. Korrelationen innerhalb von Standorten und Messjahren wurden als zufällige Effekte berücksichtigt. Die Optimierung des Modells erfolgte über einen Bayes'schen Ansatz, für den die Anfangsverteilung aus dem IPCC 2019 Refinement (IPCC, 2019) und vorangegangenen Metaanalysen aus Deutschland abgeleitet wurden.

Einzelheiten zu den verschiedenen angepassten Modellen sind in Mathivanan et al. (2021) dargestellt.

Die empirischen Modellierungen zeigen, dass die im IPCC Refinement ((IPCC, 2019),Table 11.1) vorgesehene Trennung in synthetische Düngemittel und andere Stickstoffeinträge für die deutschen Daten nicht signifikant ist, dagegen zeigen die Umweltzonen nach Metzger et al. (2005) einen starken Einfluss auf die N2O-Emissionen. Für vier aus diesen Umweltzonen abgeleitete Regionen in Deutschland wurden daher Emissionsfaktoren für Mineralböden ermittelt. Für organische Böden konnte aufgrund der begrenzten Datenbasis nur ein nationaler Emissionsfaktor ermittelt werden.

Zur Berechnung im Inventar wurden Emissionsfaktoren für alle deutschen NUTS-3-Regionen berechnet (siehe Abbildung 50), indem Emissionsfaktoren für mineralische und organische Böden nach den Anteilen an der landwirtschaftlichen Fläche in der jeweiligen NUTS-3-Region gewichtet gemittelt wurden. Hierzu wurden die Flächendaten des LULUCF-Inventars verwendet. Da sich die Flächendaten des LULUCF-Inventars für organische Böden ab Submission 2025 geändert haben (Siehe Kapitel 5.1.5.1.3), wurden die Emissionsfaktoren für Submission 2025 neu berechnet. Sie sind im Mittel wegen des höheren Anteils organischer Böden marginal höher als bis Submission 2024.

Die Emissionsfaktoren für N-Einträge auf Mineralböden sind in Tabelle 293 aufgelistet. Der mittlere Emissionsfaktor für alle Böden und alle N-Einträge (synthetische Düngemittel, Wirtschaftsdünger, Gärreste, Klärschlamm, Komposte, Ernterückstände) beträgt nach der Neuberechnung für Submission 2025 in Deutschland 0,0062 kg kg^{-1}, was 38 % niedriger ist als der IPCC-Tier-1-Emissionsfaktor; sein Konfidenzintervall von 0,43 % – 0,85 % liegt innerhalb des Konfidenzintervalls des IPCC-Tier-1-Emissionsfaktors ((IPCC, 2006a): 0,3 % – 3,0 %, (IPCC, 2019)0,1 % – 1,8 %). Da das von Mathivanan et al. (2021) verwendete Modell rein empirisch ist, ebenso wie die zur Ableitung der IPCC-Emissionsfaktoren verwendeten Modelle, ist es nicht möglich, die Ursache dafür zu ermitteln, dass der nationale implizite Emissionsfaktor unter dem vom IPCC angegebenen globalen erwarteten Mittelwert von 1 % liegt. Mögliche Ursachen sind beispielsweise pedologische und klimatische Verhältnisse und die spezifische landwirtschaftliche Praxis. Allerdings ist zu betonen, dass kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen dem Tier-1-Emissionsfaktor und dem deutschen Tier-2-Ansatz besteht, primär aufgrund der großen Unsicherheit des Tier-1-Emissionsfaktors.

Tabelle 293: N_2O-N Emissionsfaktoren für N-Einträge auf Böden, nach (Mathivanan et al., 2021), in kg kg^{-1}

Boden	Region	Emissionsfaktor	Konfidenzintervall
Mineralböden	Nordwestdeutschland	0,0049	0,0026 – 0,0078
	Nordostdeutschland	0,0039	0,0017 – 0,0066
	Südwestdeutschland	0,0072	0,0037 – 0,0108
	Südostdeutschland	0,0088	0,0038 – 0,0143
Organische Böden	Deutschland	0,0101	0,0039 – 0,0165

Die zusammengefassten Emissionsfaktoren der NUTS-3 Regionen (gewichtet gemittelt für mineralische und organische Böden) liegen zwischen 0,0039 und 0,0092 kg N_2O-N je kg ausgebrachtem Stickstoff. Die Emissionsfaktoren in NUTS-3 Regionen in Süddeutschland sind generell höher als die in Norddeutschland, was den unterschiedlichen klimatischen Gegebenheiten und den Bodeneigenschaften zugeschrieben wird (Dechow & Freibauer, 2011).

Bei der Menge der N-Einträge verhält es sich in etwa umgekehrt, weil im nördlichen Teil Deutschlands der Anteil der landwirtschaftlichen Fläche an den NUTS-3-Regionen im Allgemeinen höher ist und intensivere Landwirtschaft betrieben wird. Die resultierenden N_2O-Emissionen sind deutschlandweit sehr unterschiedlich und generell dort am höchsten, wo ein hoher Anteil an organischen Böden mit einer großen Menge ausgebrachtem Stickstoff kombiniert ist. Die niedrigsten N_2O-Emissionen ergeben sich für urbane Regionen im Westen Deutschlands, wo nur geringe N-Einträge auftreten.

Die Berechnung der Emissionen aus N-Ausscheidungen beim Weidegang erfolgt nach IPCC (2006b Vol 4, 11.7) proportional zur N-Menge, die auf der Weide ausgeschieden wurde (siehe Kapitel 5.1.5.1). Es werden seit Submission 2026 die IPCC (2019) Default-Emissionsfaktoren differenziert nach Klima verwendet: Für Rinder, Schweine und Geflügel 0,006 kg N_2O-N je kg ausgeschiedenen Stickstoff in feuchten Klimaten und 0,002 kg N_2O-N je kg ausgeschiedenen Stickstoff in trockenen Klimaten, für Schafe, Ziegen und Pferde 0,003 kg N_2O-N je kg ausgeschiedenen Stickstoff (hier sieht IPCC keine Differenzierung nach Klima vor), siehe IPCC (2019) Vol4, Table 11.1. Die Ableitung des mittleren Emissionsfaktors erfolgt äquivalent zu der Beschreibung in Kapitel 5.3.5.2.2. Für Schweine ist Freilandhaltung in Deutschland vernachlässigbar (IE, siehe Kapitel 5.1.3.6.4).

Direkte N_2O-Emissionen aus Mineralisierung von organischer Bodensubstanz in mineralischen landwirtschaftlichen Böden werden mit einem Tier-1-Verfahren nach IPCC (2006b Vol 4, 11.7) proportional zu den freigesetzten N-Mengen (siehe Kapitel 5.1.5.1) berechnet. Der Emissionsfaktor wird seit Submission 2025 nach IPCC (2019) mit 0,006 kg N_2O-N je kg freigesetzten Stickstoff angesetzt.

Direkte N_2O-Emissionen aus Mineralisierung von organischer Bodensubstanz auf bewirtschafteten organischen Böden werden durch Multiplikation der Fläche mit einem Emissionsfaktor berechnet, getrennt nach Ackerland und Grünland. Zu den Flächen siehe Kapitel 5.1.5.1.3. In einer deutschlandweiten Studie (Tiemeyer et al., 2020) wurden aktuelle N_2O-N-Emissionsfaktoren für Deutschland abgeleitet: 11,1 kg ha^{-1} a^{-1} für Ackerland und 4,6 kg ha^{-1} a^{-1} für Grünland. Die den bisherigen Emissionsfaktoren zugrunde liegenden Daten wurden von Tiemeyer et al. (2020) neu ausgewertet und durch neuere Daten ergänzt: Insgesamt basieren die aktualisierten Emissionsfaktoren für Ackerland und Grünland auf 206 ganzjährigen Messungen für 25 verschiedene Moorgebiete in Deutschland. Im LULUCF-Sektor wurden mit Hilfe der aktualisierten Emissionsfaktoren die N_2O-Gesamtemissionen für Ackerland und Grünland auf organischen Böden berechnet, wobei berücksichtigt wurde, dass Teilflächen mit einem Grundwasser-Flurabstand < 10 cm kein N_2O emittieren. Aus der Division dieser Emissionen durch die Gesamtflächen aus Kapitel 5.1.5.1.3 ergeben sich die effektiven Emissionsfaktoren (IEF): im Mittel rund 10,8 kg ha^{-1} a^{-1} für Ackerland und rund 4,1 kg ha^{-1} a^{-1} für Grünland. Tabelle 294 zeigt den daraus abgleiteten flächengewichteten Mittelwert, der vor allem wegen der in Submission 2025 eingeführten Abhängigkeit von der Wettergröße „Klimatische Wasserbilanz“ (siehe Kapitel 6.1.2.2.2) und nur untergeordnet wegen des nicht konstanten Verhältnisses von Acker- zu Grünlandflächen zeitlich variabel ist.

Tabelle 294: Mittlere N_2O-N-Emissionsfaktoren für landwirtschaftliche Böden, in kg kg^{-1}

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Mineraldünger	0,0063	0,0061	0,0062	0,0061	0,0061	0,0060	0,0061	0,0062	0,0063	0,0062	0,0062	0,0062	0,0061	0,0061	0,0062
Wirtschaftsdünger	0,0066	0,0067	0,0067	0,0067	0,0067	0,0066	0,0066	0,0066	0,0066	0,006	0,0066	0,0066	0,0066	0,0066	0,0066
Sonstige organische Dünger	0,0063	0,0063	0,0064	0,0065	0,0065	0,0064	0,0064	0,0064	0,0064	0,0064	0,0064	0,0064	0,0065	0,0064	0,0064
Klärschlamm	0,0063	0,0063	0,0062	0,0059	0,0056	0,0057	0,0057	0,0057	0,0056	0,0055	0,0055	0,0054	0,0056	0,0054	0,0054

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Ernterückstände	0,0062	0,0062	0,0062	0,0062	0,0061	0,0061	0,0061	0,0061	0,0062	0,0062	0,0061	0,0061	0,0061	0,0061	0,0061
Weidegang	0,0051	0,0052	0,0051	0,0051	0,0054	0,0042	0,0044	0,0051	0,0026	0,0038	0,0036	0,0048	0,0033	0,0048	0,0047
Mineralisierung	0,0060	0,0060	0,0060	0,0060	0,0060	0,0060	0,0060	0,0060	0,0060	0,0060	0,0060	0,0060	0,0060	0,0060	0,0060
bewirtschaftete organische Böden [kg ha^{-1}]	5,58	5,70	5,73	5,81	5,75	5,96	6,07	5,62	6,24	6,02	6,07	5,77	6,10	5,23	5,66

5.5.2.1.2 Indirekte N_2O-Emissionen als Folge der Deposition reaktiven Stickstoffs aus der Nutzung landwirtschaftlicher Böden (3.D)

Indirekte N_2O-Emissionen als Folge der Deposition reaktiven Stickstoffs werden nach IPCC (2006b Vol 4, 11.21) proportional zur deponierten N-Menge berechnet. Die Methodik entspricht sinngemäß der in Kapitel 5.3.5.2.1 beschriebenen Vorgehensweise; zum Emissionsfaktor siehe Kapitel 5.3.5.2.2 (0,014 kg N_2O-N (kg N)$^{-1}$ für feuchte Klimate und 0,005kg N_2O-N (kg N)$^{-1}$ für trockene Klimate). Die für die Berechnungen im Sektor 3.D relevante deponierte N-Gesamtmenge umfasst die N-Mengen der NH_3- und NO-Emissionen (siehe Kapitel 5.1.5.1.4) aus:

- Mineraldüngeranwendung,
- Ausbringung von Wirtschaftsdünger (inkl. Wirtschaftsdünger-Gärreste),
- Ausbringung von Klärschlämmen,
- Ausbringung von sonstigen organischen Düngern (Gärreste aus Energiepflanzenvergärung und Abfallvergärung, Komposte aus Bio- und Grünabfall und importiertem Wirtschaftsdünger),
- Weidegang,
- auf der Fläche verbleibenden Ernterückständen.

Eine Beschreibung der Berechnung der indirekten N_2O-Emissionen als Folge der Deposition von NH_3-N und NO-N findet sich in Kap. 5.3.2.2 in Vos et al. (2026) . Das deutsche Inventar verwendet nicht die IPCC-Defaultwerte für $Frac_{GASM}$ und $Frac_{GASF}$, sondern berechnet die NH_3– und NO-Emissionen, die zur Deposition von reaktivem Stickstoff führen, durch Multiplikation der ausgebrachten N-Menge bzw. der N-Ausscheidung auf der Weide mit den entsprechenden Emissionsfaktoren.

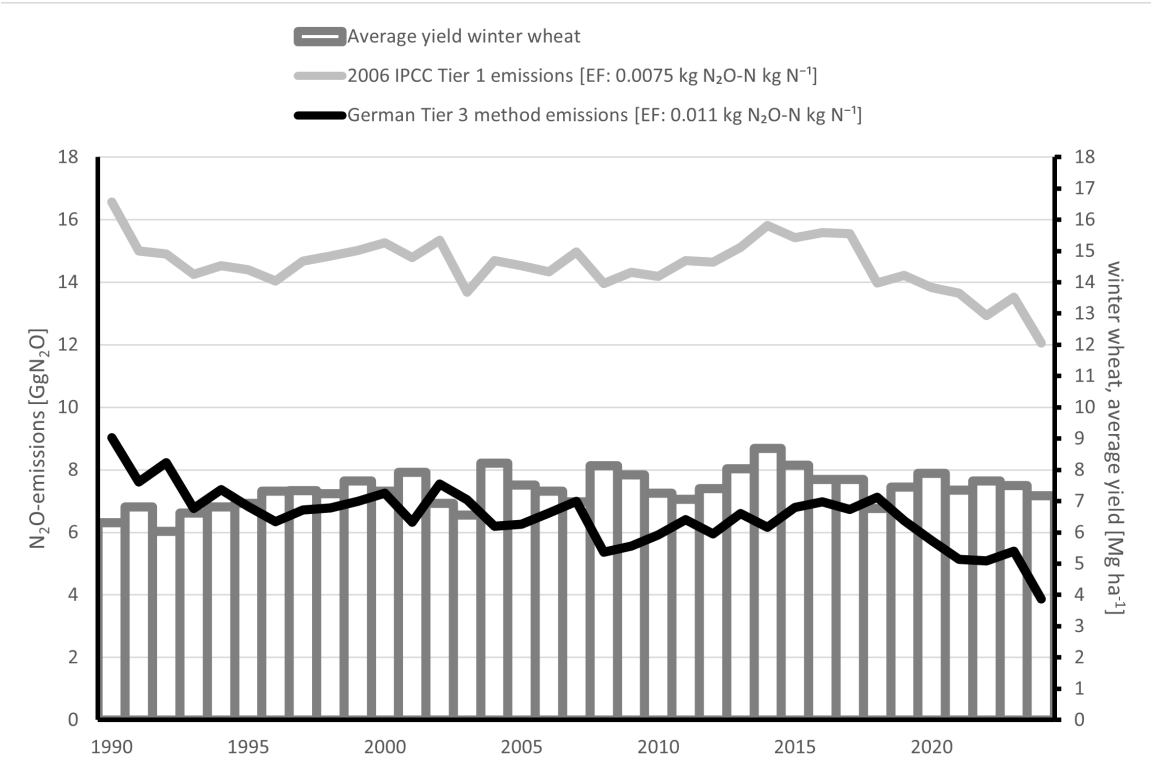
Für die Ausbringung der verschiedenen Mineraldüngerarten siehe Kapitel 5.2.1.2 und 5.2.2.2 in Vos et al. (2026). Weidegang ist in den Kapiteln 5.2.1.1 und 5.2.2.1 in Vos et al. (2026) beschrieben. Für die Berechnung der NH_3– und NO-Emissionen aus der Ausbringung von Wirtschaftsdünger (einschließlich der Gärreste aus Wirtschaftsdünger), die Ausbringung von Gärresten der Energiepflanzen-Vergärung, Gärresten der Abfall-Vergärung, Kompost aus Biobfall, Kompost aus Grünabfall, importiertem Wirtschaftsdünger und Klärschlämmen wird auf die Kapitel 5.1 bzw. 5.2.1.2 und 5.2.2.2 in Vos et al. (2026) verwiesen. Für die Berechnung der NH_3-Emissionen aus Ernterückständen wird auf Kapitel 5.2.1.3 in Vos et al. (2026) verwiesen. Zur Ausbringung von Harnstoffdüngern gelten seit dem Jahr 2020 rechtliche Einschränkungen: „Harnstoff als Düngemittel darf seit dem 1. Februar 2020 nur noch aufgebracht werden, soweit ihm ein Ureasehemmstoff zugegeben ist oder er unverzüglich, jedoch spätestens innerhalb von vier Stunden nach der Aufbringung eingearbeitet wird.“ (DüV, 2017 §6, Absatz 2). Ab dem Zeitreihenjahr 2020 wird daher ein um 70 % verminderter Emissionsfaktor für NH_3 aus Harnstoff angewendet (Bittman et al., 2014, Chapter 8, Table 15) falls er eingearbeitet wird und ein um 60 % verminderter Emissionsfaktor falls er mit einem Hemmstoff inhibiert ist (Schoof et al. (2025). Die indirekten N_2O Emissionen sinken daher ab diesem Jahr deutlich.

5.5.2.1.3 Indirekte N_2O-Emissionen als Folge von Auswaschung und Oberflächenabfluss (3.D)

Die indirekten N_2O-Emissionen als Folge von Auswaschung und Oberflächenabfluss werden seit Submission 2024 nach einem Tier-3-Verfahren berechnet. Die Methodik beruht auf der Berechnung der Stickstoffüberschüsse, von denen regionalspezifisch ein Anteil als Nitrat ausgewaschen oder lateral in Vorfluter verlagert wird. Die N-Überschüsse werden gebildet aus der Summe der N-Inputs (aus Mineraldüngern, Wirtschaftsdüngern, Ernteresten, Gärresten, Komposten, Klärschlämmen und Mineralisierung) abzüglich dem N-Entzug in der Ernte und abzüglich dem Stickstoff der bei der Ausbringung von mineralischen und organischen Düngemitteln als NH_3-emittiert wird. Eysholdt et al. (2022) haben modelliert, welcher Anteil des N-Überschusses auf NUTS-2 Ebene zur Auswaschung kommt oder oberflächlich abfließt. Dieser Anteil wird über die gesamte Zeitreihe als konstant angenommen. Die Methodik ist im Detail beschrieben in Eysholdt et al. (2022) und Vos et al. (2026), Kap. 5.3.2. Die indirekten N_2O-Emissionen werden berechnet indem die N-Menge, die zur Auswaschung kommt oder oberflächlich abfließt, mit dem N_2O-N Umrechnungsfaktor 44/28, sowie dem Emissionsfaktor (0,011 kg N_2O-N (kg N)$^{-1}$, siehe IPCC (2019)) multipliziert wird. Der bis Submission 2023 zur Berechnung der Emissionen verwendete IPCC (2006b) Default-Wert für $Frac_{LEACH}$ (0.3) wird nicht mehr verwendet, sondern es wird nachträglich ein implizierter nationaler $Frac_{LEACH}$ -Wert berechnet (siehe Kapitel 5.5.2.2).

Abbildung 51 zeigt, dass die aus der neuen Methode resultierenden Emissionen deutlich geringer sind als mit der bisherigen Tier 1 Methode mit konstantem $Frac_{LEACH}$.

Abbildung 51: Vergleich der jährlichen indirekten N2O-Emissionen aus Auswaschung und Oberflächenabfluss nach IPCC 2006 Tier 1 Methode und neuer Tier 3 Methode nach Eysholdt et al. (2022)



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

Auf der Sekundärachse ist der durchschnittliche Winterweizenertrag dargestellt, mit dem der nationale N-Überschuss im Pflanzenbau negativ korreliert ist. Ab 2020 wird diese Korrelation durch Verschärfungen des Düngerrechts und hohe Düngerpreise überlagert.

Gleichzeitig variieren die Emissionen mit der neuen Methode stärker von Jahr zu Jahr, da der N-Überschuss und damit die Auswaschung stärker von den Umweltbedingungen in den jeweiligen Jahren abhängen. So kommt es in Jahren mit schlechter Ernte und hohem N-Eintrag (z.B. 2018) zu vergleichsweise hohen Emissionen. Das nachträglich berechnete $Frac_{LEACH}$ erreicht Werte zwischen 0,07 und 0,11 und liegt damit innerhalb des Unsicherheitsbereichs der für das neue $Frac_{LEACH-(H)}$ (0.24) in IPCC (2019) angegeben wird (0.01 – 0.73). Der relative Unsicherheitsbereich, den Eysholdt et al. (2022) für $Frac_{LEACH}$ angeben (-100 %, +200%), ergibt deutlich geringere absolute Konfidenzintervalle als der des Tier 1-Ansatzes.

5.5.2.1.4 NO-Emissionen

Die Berechnung der NO-Emissionen erfolgt methodisch analog zur Berechnung der N_2O-Emissionen (siehe Kapitel 5.5.2.1.2). EMEP (2023) 3D Table 3.1 gibt für die Ausbringung von Mineraldünger und Wirtschaftsdünger sowie für tierische Ausscheidungen auf der Weide einen einheitlichen NO-Emissionsfaktor von 0,04 kg NO_2 pro kg ausgebrachten Stickstoff an (siehe dazu auch EMEP (2023) -3D-14. Dieser Emissionsfaktor ist ein auf zwei Dezimalstellen gerundeter Wert; er geht auf den Emissionsfaktor von Stehfest and Bouwman (2006) zurück, der in NO-N-Einheiten 0,012 kg kg^{-1} beträgt. Das Inventar verwendet den Original-Emissionsfaktor von Stehfest and Bouwman (2006) und setzt ihn im Sinne von EMEP/EEA (2023-3D, Table 3.1, p.13, Supplement A2.3) auch für N-Ausscheidungen bei Weidegang, die Ausbringung von Klärschlämmen und sonstigen organischen Düngern ein.

5.5.2.1.5 NMVOC-Emissionen

IPCC (2006b) gibt keine Methode zur Berechnung der NMVOC-Emissionen aus landwirtschaftlichen Kulturen an. Deutschland berechnet die NMVOC-Emissionen mit einer Tier-2-Methodik nach EMEP (2023)-3D-21f, getrennt nach Kulturen:

Gleichung 24: Berechnung der jährlichen NMVOC-Emissionen aus landwirtschaftlichen Kulturen nach EMEP (2023)

$$E_{\text{NMVOC, cult, i}} = A_i \cdot m_{\text{FM,i}} \cdot x_{\text{DM,i}} \cdot t_i \cdot EF_{\text{NMVOC, cult, i}}$$

mit

- $E_{\text{NMVOC, cult, i}}$ = NMVOC-Emissionen aus der landwirtschaftlichen Kultur i (in kg a^{-1})
- A_i = Anbaufläche der Kultur i (in ha)
- $m_{\text{FM, i}}$ = mittlerer Frischmasseertrag von Kultur i (in kg ha^{-1} a^{-1})
- $x_{\text{DM, i}}$ = Trockenmassegehalt von Kultur i (in kg kg^{-1})
- t_i = Anteil des Jahres, während dessen Kultur i NMVOCs emittiert (in a a^{-1})
- $EF_{\text{NMVOC, cult, i}}$ = NMVOC-Emissionsfaktor für Kultur i (in kg kg^{-1})

Zu Anbauflächen, Frischmasseerträgen, Trockenmassegehalten und relativen Emissionsdauern siehe Kapitel 5.1.5.3. Die Emissionsfaktoren wurden für Weizen, Roggen, Raps und Gras aus EMEP (2023) 3D Table 3.4 entnommen, siehe Tabelle 295. Für die Kulturkategorien „Kleegras, Luzerne, Futtergras“ sowie „Wiesen und Mähweiden“ wurde der EMEP-Emissionsfaktor von

Gras übernommen. Für die übrigen Kulturen wurde der EMEP-Emissionsfaktor von Weizen übernommen.

Tabelle 295: NMVOC-Emissionsfaktoren für landwirtschaftliche Kulturen, in kg kg^{-1} h^{-1}

Kultur	Emissionsfaktor
Weizen	2,60·10-8
Roggen	1,41·10-7
Raps	2,02·10-7
Gras (15 °C)	1,03·10-8

5.5.2.2 Die Frac-Größen (3.D)

Deutschland berichtet über $Frac_{leach}$, $Frac_{GASF}$ und $Frac_{GASM}$.

$Frac_{LEACH}$ beschreibt den Anteil der ausgewaschenen N-Menge an der ausgebrachten bzw. durch Ernterückstände vorhandenen N-Menge (siehe IPCC (2006b Vol 4, 11.21)). Seit Submission 2024 ist $Frac_{LEACH}$ wegen der Verwendung einer neuen Tier-3 Methode im deutschen Inventar keine Eingabegröße mehr. Der Wert wird für die Emissionsberichterstattung nachträglich als Quotient aus verfügbarer N-Menge und Emission gebildet. $Frac_{LEACH}$ ist keine Konstante, da der Wert von den jährlich schwankenden N-Überschüssen abhängig ist, siehe Tabelle 296.

Ebenso werden die Größen $Frac_{GASF}$ und $Frac_{GASM}$ für die Berichterstattung nachträglich aus Ein- und Ausgabedaten der abgeschlossenen Emissionsberechnung ermittelt.

$Frac_{GASF}$ ist nach IPCC (2006b Vol 4, 11.21, eq.11.9) der Anteil der mit Mineraldüngern ausgebrachten N-Menge, der als NH_3-N und NO-N emittiert wird, siehe Tabelle 296. Dabei dominiert der Einfluss von NH_3. Wegen der unterschiedlichen NH_3-Emissionsfaktoren der verschiedenen Mineraldüngerarten hängt der $Frac_{GASF}$-Wert vom Mineraldüngermix des jeweiligen Jahres ab. Dabei ergibt sich wegen des vergleichsweise hohen Emissionsfaktors von Harnstoff (EMEP, 2023) bis zum Jahr 2019 eine sehr gute Korrelation von $Frac_{GASF}$ mit dem relativen Verhältnis von Harnstoff-N zu Gesamtmineraldünger-N (Vos et al., 2026). Ab dem Jahr 2020 ist der $Frac_{GASF}$-Wert deutlich niedriger als in den Vorjahren, da mit einem um 60 bzw. 70 % verminderten NH_3-Emissionsfaktor für Harnstoff gerechnet wird, abhängig davon, ob der Harnstoff mit Ureaseinhibitor versetzt war oder eingearbeitet wurde (siehe Kapitel 5.5.2.1.2).

$Frac_{GASM}$ ist nach IPCC (2006b Vol 4, 11.21, eq.11.9) der Anteil der mit Wirtschaftsdünger (incl. Wirtschaftsdünger-Gärresten), Klärschlämmen, sonstigen organischen Düngern, beim Weidegang ausgebrachten oder als oberirdischer Ernterest auf der Fläche verbleibenden N-Menge, der als NH_3-N und NO-N emittiert wird, siehe Tabelle 296.

Tabelle 296: Frac-Zeitreihen und Mittelwerte über die gesamten Zeitreihen (3.D), in kg kg^{-1}

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	Mittelwert
FracLEACH	0,111	0,097	0,097	0,088	0,085	0,090	0,092	0,088	0,104	0,092	0,085	0,077	0,081	0,082	0,066	0,091
FracGASF	0,058	0,059	0,063	0,066	0,073	0,075	0,076	0,074	0,070	0,066	0,046	0,046	0,047	0,047	0,046	0,064
FracGASM	0,168	0,155	0,145	0,137	0,138	0,132	0,131	0,128	0,132	0,127	0,124	0,122	0,124	0,123	0,122	0,181

5.5.2.3 Emissionen (3.D)

Tabelle 297 zeigt eine Übersicht über die Beiträge der einzelnen Teilquellen zu den N_2O-Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Böden.

Tabelle 297: Übersicht N_2O-Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Böden (3.D), in Gg

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
Gesamtemissionen	76,6	67,0	69,9	66,4	65,6	67,6	69,6	69,5	62,7	63,3	60,7	60,8	56,8	59,1	54,6
Summe direkte Emissionen	58,7	52,5	55,0	52,9	51,7	54,7	56,0	55,2	52,0	52,2	51,0	50,0	48,3	48,3	45,4
Summe indirekte Emissionen	17,9	14,5	14,9	13,4	13,9	12,8	13,6	14,3	10,7	11,2	9,8	10,8	8,5	10,7	9,2
Mineraldünger	21,8	16,5	18,6	17,3	15,6	16,3	16,7	15,7	14,8	13,7	12,8	12,1	10,8	10,1	10,0
Wirtschaftsdünger	12,8	11,5	11,1	10,7	10,4	10,7	10,7	10,7	10,5	10,4	10,2	9,8	9,6	9,6	9,5
Sonstige organische Dünger	0,1	0,4	0,6	1,1	2,4	3,7	3,7	3,6	3,6	3,6	3,6	3,5	3,8	3,6	3,6
Klärschlamm	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Weidegang	1,9	1,6	1,4	1,2	1,3	0,9	1,0	1,1	0,6	0,8	0,8	1,0	0,7	1,0	1,0
Ernterückstände	6,6	6,4	7,0	7,2	7,3	8,0	8,1	8,5	7,2	7,9	8,1	8,3	8,1	8,2	8,1
Mineralisierung	2,8	3,1	3,4	2,5	2,1	2,1	2,6	3,3	1,8	2,7	2,4	2,9	2,3	4,6	1,1
Organische Böden	12,3	12,6	12,6	12,7	12,5	12,9	13,1	12,1	13,4	12,9	13,0	12,3	13,0	11,1	12,0
Indirekt, Deposition	8,9	7,6	7,6	7,2	8,0	6,0	6,7	7,5	3,5	4,8	4,0	5,7	3,4	5,3	5,3
Indirekt, Auswaschung	9,0	6,8	7,3	6,3	5,9	6,8	7,0	6,7	7,1	6,4	5,7	5,1	5,1	5,4	3,9

Die Gesamt-N_2O-Emissionen haben in der ersten Hälfte der 1990er Jahre abgenommen. In den anschließenden Jahren bis etwa 2016 ist kein klarer Trend festzustellen. Die in diesem Zeitraum niedrigsten Emissionen werden für das Jahr 2003 ermittelt, die höchsten in 2014. Ab 2016 nimmt die Emission deutlich ab; im Jahr 2024 ist sie um ca 21,5 % niedriger als 2016.

Hauptursache für jährliche Schwankungen der Gesamtemission ist die indirekte Emission aus Deposition (aufgrund der Klimaabhängigkeit des Emissionsfaktors). Diese Schwankungen vermögen es allerdings nicht den seit etwa 2016 beobachteten Trend zu sinkenden Emissionen zu überdecken. Die Emissionen aus organischen Böden, aus Mineralisierung, aus Ernterückständen sowie die indirekten Emissionen aus der Auswaschung sind weitere Beispiele für Teilkategorien deren Emissionsschwankungen in hohem Maße meteorologische Ursachen haben. Die in den Jahren ab 2016 zu beobachtende Abnahme der Gesamtemissionen ist vorrangig auf die Abnahme der Mineraldüngerausbringung zurück zu führen. Von 2017 zu 2018 wirkt sich überdies das Dürrejahr 2018 mit außergewöhnlich geringen indirekten Emissionen aus Deposition und sehr geringen Emissionen aus Ernterückständen aus (siehe Kapitel 5.1.5.1.2). Dies wird nur zum Teil durch höhere indirekte Emissionen aus der Auswaschung kompensiert. Abnahmen von Tierzahlen in den letzten Jahren wurden in ihrer emissionssenkenden Wirkung teilweise durch emissionserhöhende Effekte von Leistungssteigerungen kompensiert. Seit 2005 wirkt sich auch die Ausbringung zunehmender Mengen von Wirtschaftsdünger-Gärresten und Energiepflanzen-Gärresten aus.

Die Ergebnisse der NO-Emissionsberechnungen sind in Tabelle 298 dargestellt. Zu den Quellen siehe Kapitel 5.5.2.1.2. Der zeitliche Verlauf der Gesamtemissionen folgt weitgehend dem Verlauf der direkten N_2O-Emissionen. (Für die Berichterstattung in CR–Table 3 werden die NO-Emissionen durch Multiplikation mit dem Molgewichtsverhältnis 46/30 in NO_2 umgerechnet).

Tabelle 298: NO-Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Böden, in Gg

1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
95,4	79,3	83,2	79,6	78,1	84,9	84,7	81,6	77,8	75,0	72,5	69,2	65,9	63,7	62,8

Tabelle 299 zeigt den zeitlichen Verlauf der NMVOC-Emissionen. Die jährlichen Veränderungen und damit auch der bis 2014 ansteigende Trend sind im Wesentlichen eine Folge variierender Ernteerträge. 2014 wurden die bislang höchsten Ernteerträge beobachtet.

Tabelle 299: NMVOC-Emissionen aus landwirtschaftlichen Kulturen, in Gg

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
	7,69	8,19	8,79	9,17	9,53	9,91	9,69	9,74	7,82	8,56	9,16	9,44	8,91	9,23	8,87
in % von 1990	100,0	106,5	114,2	119,2	123,9	128,9	126,0	126,7	101,7	111,3	119,0	122,7	115,9	120,0	115,3

5.5.3 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (3.D)

Zu Qualitätskontrolle und Qualitätssicherung wird auf Kapitel 5.1.7 verwiesen.

Zum Zweck der Verifizierung stellen Tabelle 300 und Tabelle 301 analog zur Vorgehensweise in Kapitel 5.2.4 die N_2O-N-Emissionsfaktoren und Frac-Größen $Frac_{GASF}$, $Frac_{GASM}$ und $Frac_{LEACH}$ des deutschen Inventars den entsprechenden Daten solcher Staaten gegenüber, die benachbart sind oder deren landwirtschaftliche Praxis mit der deutschen vergleichbar ist. Das Vergleichsjahr ist aus den in Kapitel 5.2.4 genannten Gründen das Zeitreihenjahr 2023.

Tabelle 300: N_2O-Emissionen aus Böden verschiedener Länder im Vergleich des impliziten N_2O-N-Emissionsfaktors für das Zeitreihenjahr 2023

N_2O-N	Mineral-dünger	Wirtschafts-dünger	Ernterück-stände	Mineralisierung	organische Böden	Weidegang	Deposition	Auswaschung
	[kg kg^{-1}]	[kg kg^{-1}]	[kg kg^{-1}]	[kg kg^{-1}]	[kg ha^{-1}]	[kg kg^{-1}]	[kg kg^{-1}]	[kg kg^{-1}]
Österreich	0,0100	0,0100	0,0100	0,0100	5,1242	0,0038	0,0102	0,0110
Belgien	0,0160	0,0060	0,0060	0,0060	8,0000	0,0058	0,0140	0,0110
Tschechische Republik	0,0103	0,0055	0,0055	NA	NO	0,0039	0,0094	0,0110
Dänemark	0,0100	0,0100	0,0100	0,0100	6,7439	0,0037	0,0140	0,0088
Frankreich	0,0103	0,0057	0,0055	NO	4,6128	0,0045	0,0100	0,0110
Deutschland	**0,0061**	**0,0066**	**0,0061**	**0,0060**	**5,2275**	**0,0048**	**0,0123**	**0,0110**
Niederlande	0,0104	0,0085	0,0105	0,0100	4,4441	0,0308	0,0100	0,0075
Polen	0,0100	0,0100	0,0100	0,0100	8,0000	0,0195	0,0100	0,0075
Schweiz	0,0098	0,0100	0,0100	0,0100	10,6275	0,0056	0,0264	0,0110
Vereinigtes Königreich	0,0064	0,0061	0,0100	0,0100	11,9452	0,0033	0,0140	0,0075
IPCC (2006b Vol 4, 11.11, 11.24), IPCC et al. (2014) [a]	0,0100	0,0100	0,0100	0,0100	8,00 (13 / 4,3 / 8,2 / 1,6)[a]	0,02 (Rinder, Schweine, Geflügel); 0,01 (andere Tiere)	0,0100	0,0075
(IPCC, 2019),Vol.4, Tables 11.1 und 11.3), wet climates / dry climates	0,0160 / 0,005	0,0060	0,0060 / 0,005	0,0060 / 0,005		0,003 (Rinder, Schweine, Geflügel); 0,003 (andere Tiere)	0,014/0,005	0,011/0,011

Quelle: Deutschland: Submission 2026; andere Länder: UNFCCC (2025)

[a] IPCC et al. (2014) Wetlands Supplement, Tabelle 2.5 (Ackerland, drainiert / Grünland, drainiert, nährstoffarm / Grünland, tief-drainiert, nährstoffreich / Grünland, flach-drainiert, nährstoffreich)

Für die Ausbringung von Mineraldünger, Wirtschaftsdünger, sonstigen organischen Düngern, Klärschlamm sowie für Ernterückstände verwendet Deutschland seit der Submission 2022 von (Mathivanan et al., 2021) abgeleitete regionalisierte Emissionsfaktoren, die deutlich unterhalb des (IPCC, 2006a) Default-Emissionsfaktors von 0.01 kg kg^{-1} liegen aber in etwa auf dem Niveau

des (IPCC, 2019) Default-Emissionsfaktors für N-Einträge in feuchten Klimaten (außer Mineraldünger).

Für Ausbringung von Mineraldüngern liegt der mittlere deutsche Emissionsfaktor unterhalb der Werte der Schweiz, Tschechiens, der Niederlande, des Vereinigten Königreichs und Frankreichs, die ebenfalls nicht den (IPCC, 2006a) Default-Emissionsfaktor verwenden. Belgien ist unter den aufgeführten Ländern das einzige, welches in Submission 2025 auf den (IPCC, 2019) Default-Emissionsfaktor für feuchte Klimate zurückgreift.

Für Ausbringung von Wirtschaftsdüngern liegt der mittlere deutsche Wert niedriger als der niederländische und etwas höher als der des vereinigten Königreichs, Frankreichs, Tschechiens und Belgiens..

Außer Deutschland, den Niederlanden, Frankreich, Tschechien und Belgien verwenden die anderen verglichenen Länder für Emissionen aus Ernterückständen den Default (IPCC, 2006a)-Emissionsfaktor von 0.01 kg kg^{-1}. Auch hier ist der niederländische Emissionsfaktor deutlich höher als der deutsche Wert, während die Werte der anderen Länder leicht unter dem deutschen Wert liegen.

Bei der Mineralisierung verwenden insgesamt sechs Länder den Default IPCC (2006)-Emissionsfaktor von 0.01 kg kg^{-1}, Frankreich und Tschechien berichten keine Emissionen aus Mineralisierung und Belgien verwendet den Default IPCC (2019)-Emissionsfaktor für feuchte Klimate.

Für N_2O-N aus organischen Böden verwenden Belgien und Polen den IPCC (2006b) Default-Emissionsfaktor von 8 kg ha-1. Zwei Länder liegen über diesem Default-Wert, fünf Länder (darunter Deutschland) unterhalb, davon zwei (Niederlande und Frankreich) deutlich. Der deutsche Wert, der auf nationalen Emissionsfaktoren für Ackerland und Grünland beruht (siehe Kapitel 5.5.2.1.1), liegt etwa auf dem Niveau des Wertes von Österreich.

Die meisten Emissionsfaktoren für N_2O-N als Folge von Weidegang basieren wahrscheinlich auf einer Kombination von IPCC-Default-Werten wobei sie, mit Ausnahme von Polen und den Niederlanden, offenbar wie Deutschland die IPCC (2019) Default-Emissionsfaktoren zu Grunde legen.

Bei den indirekten N_2O-N-Emissionen infolge der Deposition reaktiven Stickstoffs verwendet neben Deutschland auch Tschechien und evtl. Österreich die nach Klima differenzierten IPCC (2019) Default-Emissionsfaktoren. Drei weitere Länder (Belgien, Dänemark und das Vereinigte Königreich) verwenden offenbar nur den IPCC (2019) Default-Emissionsfaktor für feuchtes Klima und drei weitere (Frankreich, die Niederlande und Polen) den IPCC (2006) Default-Emissionsfaktor. Der von der Schweiz verwendete Emissionsfaktor ist im Vergleich zu den von den anderen Ländern verwendeten Faktoren um den Faktor 2 größer.

Bei den indirekten N_2O-N-Emissionen infolge Auswaschung und Oberflächenabfluss verwenden sechs Länder (inklusive Deutschland) IPCC (2019) Default-Emissionsfaktor. Drei weitere Länder (die Niederlande, Polen und das vereinigte Königreich) verwenden noch den IPCC (2006b) Defaultwert, während Dänemark einen Emissionsfaktor verwendet, der zwischen diesen beiden Defaultwerten liegt.

Tabelle 301: Vergleich der Frac-Größen verschiedener Länder für das Zeitreihenjahr 2023

	$Frac_{GASF}$ [kg kg^{-1}]	$Frac_{GASM}$ [kg kg^{-1}]	$Frac_{LEACH}$ [kg kg^{-1}]
Österreich	0,078	0,19	0,15
Belgien	0,075	0,18	0,24
Tschechische Republik	0,110	0,21	0,24
Dänemark	0,060	0,09	0,24
Frankreich	0,095	0,11	0,14
Deutschland	**0,047**	**0,12**	**0,08**
Niederlande	0,049	0,10	0,13
Polen	0,100	0,20	0,30
Schweiz	0,074	0,22	0,18
Vereinigtes Königreich	0,043	0,09	0,19
IPCC (2006b Vol 4, 11.24)	0,100	0,20	0,30
IPCC (2019)	0,110	0,21	0,24

Quelle: Deutschland: Submission 2026; andere Länder: UNFCCC (2025)

Bei den Frac-Größen verwenden offenbar nur Tschechien und Polen durchgängig IPCC-Defaultwerte, wobei Tschechien die Werte aus (IPCC, 2019) und Polen die aus (IPCC, 2006a) verwendet. Die Streuung bei $Frac_{GASF}$ wird auf die zwischen den Nachbarländern variierenden relativen Anteile verschiedener Düngerarten (mit ihren unterschiedlichen NH3-Emissionsfaktoren) zurückgeführt. Der deutsche Wert liegt rund 30 % unterhalb des Medians in der gleichen Größenordnung wie der niederländische Wert. Der deutsche Wert für $Frac_{GASM}$ liegt rund 20 % unterhalb des Medians. Der deutsche $Frac_{LEACH}$-Wert ist der niedrigste aller verglichenen Länder. Dies ist zurückzuführen auf die seit Submission 2024 verwendete Tier-3 Methodik für indirekte N2O-Emissionen infolge Auswaschung und Oberflächenabfluss. Der $Frac_{LEACH}$ Wert ist zeitlich und räumlich variabel und geht nicht in die Berechnung ein, sondern wird, wie auch $Frac_{GASF}$ und $Frac_{GASM}$, im Nachhinein berechnet, siehe Kapitel 5.5.2.2. Die Werte am Ende der deutschen Zeitreihe sind niedriger als am Anfang, was die Verbesserung der Stickstoffnutzungseffizienz im Pflanzenbau widerspiegelt. Im Mittel der Zeitreihe beträgt der Wert 0,09 kg kg-1, am Anfang 0,11 kg kg-1, was nur etwas niedriger ist als der niederländische Wert.

5.5.4 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (3.D)

Die für die Schätzung der Gesamt-Unsicherheit des deutschen THG-Inventars eingesetzten Unsicherheiten von Aktivitätsdaten und Emissionsfaktoren für die direkten und indirekten N_2O-Emissionen sind Tabelle 250 in Kapitel 5.1.6 zu entnehmen.

Bei den Unsicherheiten der Emissionsfaktoren für direktes N_2O aus Mineraldünger, organischen Dünger (Wirtschaftsdünger, Gärreste, Kompost, Klärschlamm) und Ernterückständen handelt es sich um von (Mathivanan et al., 2021) berechnete Unsicherheiten zu den jeweiligen Emissionsfaktoren. Bei den Emissionsfaktoren zum Weidegang handelt es sich dabei um Default-Angaben aus IPCC (2019) Table 11.1. Zur Unsicherheit der Aktivitätsdaten (N-Mengen und $Frac_{LEACH}$) siehe Kapitel 6.3 in Vos et al. (2026).

Die Unsicherheiten von Aktivitätsdaten und Emissionsfaktor für die direkten N_2O-Emissionen aus drainierten organischen Böden wurden aus nationalen Daten abgeleitet, siehe Kap. 6.3 und 6.5 in Vos et al. (2026). Gleiches gilt für die Mineralisierung organischer Bodensubstanz, siehe Kap. 6.3 und 6.5 in Vos et al. (2026).

Für NO aus der Ausbringung von Mineraldünger, Wirtschaftsdünger, Klärschlamm und sonstigen organischen Düngern sowie aus den N-Ausscheidungen auf der Weide geht das deutsche Inventar für die Unsicherheit des Emissionsfaktors von einem 95 %-Konfidenzintervall von -95 % bis +400 % aus, siehe Vos et al. (2026) , Kap. 6.5. Zu den Unsicherheiten der Aktivitätsdaten (N-Mengen) siehe oben bei den N_2O-Emissionen.

Zu den Unsicherheiten im Zusammenhang mit den indirekten N_2O-Emissionen siehe Kapitel 6.5 in Vos et al. (2026) .

EMEP (2023) macht für die Tier-2-NMVOC-Emissionsfaktoren keine Angaben zur Unsicherheit. Geht man für den Tier-1-Emissionsfaktor von der in EMEP (2023) Table 3.1 angegebenen oberen Wertebereichsgrenze aus und passt eine Lognormal-Verteilung an, so ergibt sich ein 95 %-Konfidenzintervall von -89 % bis +300 %, siehe Kap. 6.7 in Vos et al. (2026). Für die Unsicherheit der Aktivitätsdaten wird die Unsicherheit der Aktivitätsdaten für Ernterückstände aus den Unsicherheitsangaben für N_2O übernommen. Die Emissionszeitreihen sind konsistent, da sie für alle Jahre des Berichtszeitraumes jeweils mit der gleichen Methode berechnet wurden und die Eingangsdaten ebenfalls konsistent und vollständig sind.

5.5.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (3.D)

Tabelle 302 vergleicht die N_2O-Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Böden zwischen der vorliegenden Submission und der letztjährigen Submission.

Tabelle 302: Vergleich der in Submission 2026 und 2025 berechneten N_2O-Emissionen aus der Nutzung landwirtschaftlicher Böden(3.D), in Gg

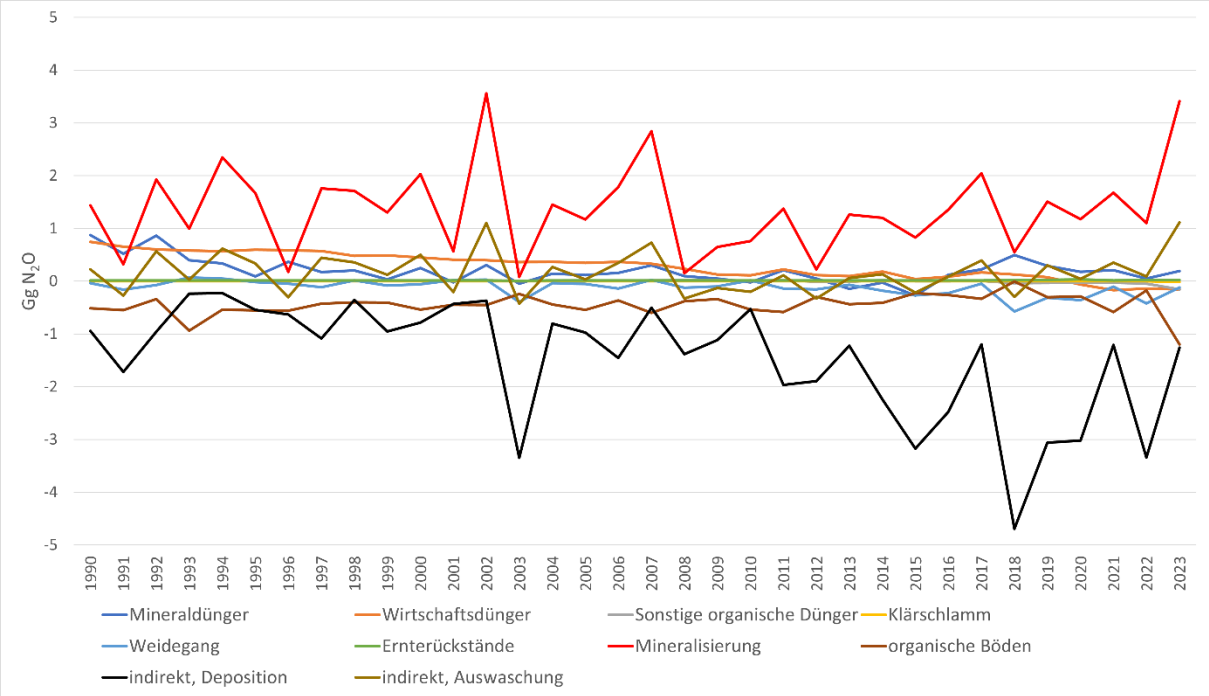
	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
2026	75,6	65,5	67,9	65,6	65,5	67,1	68,3	67,3	62,4	61,9	59,7	59,3	55,7	55,6
2025	74,8	65,4	68,0	66,2	66,0	70,8	70,9	68,2	67,1	64,8	63,1	60,7	59,7	57,2

Aus Tabelle 303 und Abbildung 52 gehen die Änderungen der N_2O-Emissionen gegenüber der letztjährigen Submission hervor.

Tabelle 303: Veränderung von Submission 2025 zu Submission 2026 für dieN_2O-Emissionen aus der Nutzung landwirtschaftlicher Böden (negative Werte: Abnahme), in Gg

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
insgesamt	**1,794,**	**1,589,**	**1,856,**	**0,118,**	**-0,395,**	**-3,286,**	**-1,311,**	**1,265,**	**-4,416,**	**-1,510,**	**-2,333,**	**0,153,**	**-2,858,**	**1,826**
Mineraldünger	0,873,	0,090,	0,247,	0,113,	-0,022,	-0,275,	0,123,	0,224,	0,497,	0,292,	0,178,	0,205,	0,049,	0,191
Wirtschaftsdünger	0,748	0,596	0,447	0,344	0,111	0,040	0,086	0,169	0,126	0,076	-0,065	-0,171	-0,139	-0,156
sonstige organische Dünger	0,002	0,006	0,005	0,012	0,006	-0,001	-0,003	0,004	-0,039	-0,032	-0,028	-0,025	-0,049	-0,157
Klärschlamm	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,017
Weidegang	-0,038	-0,017	-0,060	-0,052	0,011	-0,269	-0,225	-0,047	-0,576	-0,314	-0,362	-0,107	-0,422	-0,118
Ernterückstände	0,013	0,012	0,012	0,012	0,012	0,011	0,013	0,013	0,018	0,021	0,035	0,016	0,023	0,022
Mineralisierung	1,435	1,670	2,026	1,169	0,759	0,826	1,351	2,045	0,552	1,509	1,173	1,673	1,103	3,408
Organische Böden	-0,515	-0,557	-0,541	-0,544	-0,541	-0,229	-0,261	-0,335	-0,005	-0,304	-0,288	-0,584	-0,173	-1,197
Indirekt, Deposition	-0,945	-0,545	-0,782	-0,972	-0,527	-3,173	-2,480	-1,201	-4,689	-3,060	-3,021	-1,207	-3,341	-1,262
Indirekt, Auswaschung	0,221	0,333	0,501	0,036	-0,203	-0,217	0,084	0,391	-0,299	0,301	0,046	0,352	0,091	1,111

Abbildung 52: Veränderungen der N_2O-Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden zwischen Submission 2025 und Submission 2026



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

Die Gesamtemission der Submission 2026 liegt in der Hälfte aller Jahre oberhalb und in der anderen Hälfte unterhalb der entsprechenden Werte der Submission 2025. Dabei überwiegen bis 2006 die Jahre mit höheren Emissionen und danach die Jahre mit geringeren Emissionen. Die Extremwerte der Unterschiede entfallen auf die Jahre 2002 (+ 4,6 Gg N_2O-N gegenüber Submission 2025) und 2018 (-4,4 Gg N_2O-N gegenüber Submission). 2002 ist dabei das nasseste Jahr in der Zeitreihe und 2018 das trockenste.

Die betragsmäßig größten Änderungen entfallen dabei auf die Teilkategorien „Mineralisierung“ und „indirekte Emission, Deposition“. Die Emission aus „Mineralisierung“ ist durchweg höher als in Submission 2025, da hier zusätzlich zu der Mineralisierung in Ackerland erstmals auch die Mineralisierung in Grünland mit ausgewiesen wird. Die starke interannuelle Schwankung der Änderung ist letztlich auf den höheren Einfluss des Wetters durch die erstmalige Verwendung des Boden-Kohlenstoffmodells Roth-C zurückzuführen. Die deutlich geringeren Emissionen aus der Teilkategorie „indirekte Emission, Deposition“ sind ebenfalls wetterbedingt, durch die erstmalige Verwendung der nach Klima differenzierten Emissionsfaktoren nach (IPCC, 2019).

Die Wettereffekte der „Mineralisierung“ wirken sich auch auf die indirekte Emission durch Auswaschung aus. Auch beim Weidegang sind die Änderungen in der Hauptsache wetterbedingt.

Die Einführung des Transportmoduls und die im Zusammenhang damit eingeführte Änderung der zuvor statischen Verteilung der Mineraldüngermenge auf die NUTS-3 Regionen (siehe Kapitel 5.1.2.5 und Kapitel 5.1.7.3) zeigt demgegenüber nur vergleichbar geringe Änderungen. Die gegenüber Submission 2025 meist höhere Emission aus der Mineraldüngerausbringung weist darauf hin, dass dieser im Modell jetzt stärker in Regionen mit höherem Emissionsfaktor ausgebracht wird. Die zu Beginn der Zeitreihe höheren Emissionen aus der Wirtschaftsdüngerausbringung ist in der Hauptsache auf die Neuberechnung der N-Ausscheidung der Milchkühe zurückzuführen. Zu den Änderungen siehe auch Kapitel 5.1.7.3. Tabelle 304 stellt die NO-Gesamtemissionen den entsprechenden Daten aus der letztjährigen

Submission gegenüber. Die Differenzen zwischen den beiden Submissionen werden in Tabelle 305 nach Teilquellen aufgeschlüsselt. Die von Null verschiedenen Differenzen spiegeln, da die NO-Emissionen generell proportional zur verfügbaren N-Menge berechnet werden, die in Kapitel 5.1.7.3 beschriebenen, die N-Mengen betreffenden, Änderungen wider. Die Änderungen 2023 beim Mineraldünger bzw. Klärschlamm beruhen auf der Verwendung des jahresübergreifenden gleitenden Mittelwertes bzw. auf der Verwendung erstmals für das Jahr vorliegender Daten.

Tabelle 304: Vergleich der in Submission 2026 und 2025 berechneten NO-Emissionen aus der Nutzung landwirtschaftlicher Böden, in Gg

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
2026	95.4	79.3	83.2	79.6	78.1	84.9	84.7	81.6	77.8	75.0	72.5	69.2	65.9	63.7
2025	93.1	77.7	82.1	78.7	77.6	84.4	84.1	80.8	77.1	74.5	72.3	69.2	66.0	63.8

Tabelle 305: Veränderung von Submission 2025 zu Submission 2025 für die NO-Emissionen aus der Nutzung landwirtschaftlicher Böden (negative Werte: Abnahme), in Gg

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
insgesamt	**2,220**	**1,627**	**1,158**	**0,884**	**0,472**	**0,484**	**0,517**	**0,764**	**0,696**	**0,566**	**0,229**	**-0,047**	**-0,060**	**-0,115**
Mineraldünger	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,270
Wirtschaftsdünger	1,831	1,438	1,046	0,802	0,416	0,405	0,461	0,667	0,613	0,484	0,169	-0,083	-0,064	-0,140
sonstige organ. Dünger	0,000	0,000	0,000	0,000	0,019	0,031	0,000	0,015	0,000	0,012	0,010	0,009	-0,019	-0,220
Klärschlamm	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,043
Weidegang	0,388	0,189	0,112	0,082	0,037	0,048	0,055	0,083	0,082	0,070	0,049	0,026	0,023	0,018

Bei den NMVOC-Emissionen gibt es gegenüber der letztjährigen Submission keine Veränderungen (siehe Tabelle 306).

Tabelle 306: Vergleich der in Submission 2026 und 2025 berechneten NMVOC-Emissionen aus der Nutzung landwirtschaftlicher Böden, in Gg

[kt a^{-1}]	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
2026	7,692	8,190	8,788	9,171	9,530	9,913	9,694	9,744	7,820	8,559	9,156	9,436	8,913	9,232
2025	7,692	8,190	8,788	9,171	9,530	9,913	9,694	9,744	7,820	8,559	9,156	9,436	8,913	9,232

5.5.6 Geplante Verbesserungen (3.D)

Derzeit sind keine neuen Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

5.6 Brandrodung (3.E)

Brandrodung wird in Deutschland nicht praktiziert (NO).

5.7 Verbrennen von Ernterückständen auf der Fläche (3.F)

Schon zu Beginn des Emissionsberichtszeitraums ab 1990 ist das flächendeckende Verbrennen von landwirtschaftlichen Rückständen in Deutschland untersagt. Nur im besonderen Ausnahmefall (z.B. bei Insektenbefall) kann eine Genehmigung auf kommunaler Ebene erteilt werden. Da hierüber keine offiziellen Daten vorliegen, berichtet Deutschland unter 3.F keine Emissionen (NO). Zu Details siehe Kap. 2.8.9 in Vos et al. (2026).

5.8 CO_2 aus Kalkung und Harnstoffanwendung (3.G-I)

5.8.1 Beschreibung der Kategorie (3.G-I)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
L/T	3 G, Liming		CO_2	2200,01	0,18	1906,50	0,27	-13,34
-/-	3 H, Urea Application		CO_2	480,00	0,04	330,20	0,05	-31,21
-/-	3 I, Other Carbon-containing Fertilizers		CO_2	510,45	0,04	144,75	0,03	-71,64

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2	Tier 1	NS	D

Die Kategorie „CO_2 aus Kalkung“ ist für CO_2-Emissionen eine Hauptkategorie nach der Emissionshöhe und dem Trend.

Kalkdüngung, d. h. die Zuführung von Carbonaten, verringert den Säuregehalt des Bodens und verbessert das Pflanzenwachstum, wobei CO_2 frei gesetzt wird. Die Kalkdünger umfassen alle Carbonate von Calcium und Magnesium als reine Stoffe oder als Beimengungen. Aufgrund des unterschiedlichen Carbonat-Kohlenstoffgehalts und den daraus resultierenden unterschiedlichen CO_2-Emissionsfaktoren wird in der Berichterstattung zwischen Dolomit und den übrigen Kalkdüngern unterschieden. Bei Letzteren wird die Ausbringung von Kalkammonsalpeter gesondert betrachtet; die daraus resultierenden CO_2-Emissionen werden unter CRF 3.I („Andere kalkhaltige Dünger“) berichtet, während die CO_2-Emissionen aus der Ausbringung der anderen Kalkdünger und Dolomit unter CRF 3.G berichtet werden. Die berichteten CO_2-Emissionen umfassen entsprechend den Anforderungen in IPCC (2006b Vol 4, 11.3 & CRF Table 3.G-I) neben den Emissionen aus der Landwirtschaft auch die aus der Kalkung im Forstbereich.

Bei der Stickstoffdüngung mit Harnstoff entsteht unter Einwirkung von Urease und Wasser CO_2. Deutschland berichtet diese CO_2-Emissionen im Sektor 3.H ohne Abzug von CO_2, das bei der industriellen Herstellung von Harnstoffdünger gebunden wurde.

Die in diesem Kapitel berichteten CO_2-Emissionen aus Kalkung und Harnstoffausbringung repräsentieren 100 % der CO_2-Emissionen des landwirtschaftlichen Sektors. Tabelle 307 zeigt als Ergänzung zur Tabelle oben die zeitliche Veränderung der Summe dieser CO_2-Emissionen seit 1990 sowie für Anfangs- und Endjahr der Zeitreihe die prozentualen Anteile an den gesamten THG-Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft.

Tabelle 307: Prozentuale Veränderung der Summe der CO_2-Emissionen aus Kalkung und Harnstoffanwendung seit 1990 sowie prozentuale Anteile an den THG-Gesamtemissionen der deutschen Landwirtschaft

[%]	Veränderung seit 1990	Anteil an landwirtschaftlicher THG-Gesamtemission	
		1990	2024
Summe von CO_2 aus Kalkung und Harnstoffanwendung	-25,4	4,3	4,5

5.8.2 Methodik und Emissionen (3.G-I)

Der in IPCC (2006b Vol 4, 11.27) angegebene Tier-2-Ansatz beruht auf Anwendung der Tier-1-Gleichung (Gleichung 11.12 in IPCC (2006b Vol 4, 11.27)) nach der die Düngermenge mit dem Emissionsfaktor zu multiplizieren ist. Zu den Düngermengen siehe Kapitel 5.1.5.2. Für Dolomit und Kalkstein sind keine spezifischen deutschen Emissionsfaktoren verfügbar; daher werden die in IPCC (2006b Vol 4, 11.27) angegebenen Default-Emissionsfaktoren angewendet: 0,13 kg CO_2-C pro kg Dolomit ($CaMg(CO_3)_2$) und 0,12 kg CO_2-C pro kg Kalkstein ($CaCO_3$). Bei Kalkammonsalpeter entsteht CO_2 aus dem $CaCO_3$-Anteil, wofür der Kalkstein-Emissionsfaktor 0,12 kg CO_2-C pro kg $CaCO_3$ verwendet wurde. Davon ausgehend lässt sich ein auf die Kalkammonsalpeter-Gesamtmasse bezogener Emissionsfaktor von 0,02748 kg CO_2-C pro kg ableiten, siehe Kap. 5.3.3 in Vos et al. (2026).

Die so berechneten CO_2-C-Emissionen werden für die Eintragung in die CR-Tabellen durch Multiplikation mit dem Molgewichtsverhältnis 44/12 (IPCC (2006b Vol 4, 11.27) in CO_2-Einheiten umgerechnet. Diese CO_2-Emissionen stellen die höchstmöglichen Emissionen dar, da die o. g. Emissionsfaktoren auf der konservativen Annahme beruhen, dass der gesamte in den Düngern enthaltene Kohlenstoff in CO_2 umgewandelt wird.

Tabelle 308 zeigt den zeitlichen Verlauf der CO_2-Emissionen aus der Düngekalkung insgesamt sowie für die drei getrennt zu berichtenden Kalkdüngerkategorien.

Tabelle 308: CO_2-Emissionen aus der Düngekalkung (3.G, 3.I), in Gg

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
insgesamt	2710,5	1669,2	2062,0	1735,0	1806,2	2136,5	2107,5	2150,7	2250,1	2233,1	2195,2	2158,2	2152,1	2086,5	2051,3
in % von 1990	100,0	61,6	76,1	64,0	66,6	78,8	77,8	79,3	83,0	82,4	81,0	79,6	79,4	77,0	75,7
Kalkstein	1850,3	1071,8	1526,3	1329,4	1463,0	1828,8	1815,5	1878,4	1992,5	1991,0	1960,2	1935,0	1942,8	1896,3	1867,7
Dolomit	349,7	207,9	169,1	98,1	86,0	77,0	66,3	59,2	55,0	47,8	49,6	47,6	51,8	42,4	38,8
Kalkammon-salpeter	510,4	389,5	366,6	307,5	257,2	230,7	225,7	213,0	202,7	194,2	185,5	175,5	157,5	147,8	144,8

Die Tier-1-Methodik für CO_2-C-Emissionen aus Harnstoffanwendung (IPCC, 2006b Vol 4, 11.32) berechnet die Emissionen proportional zur Harnstoffmenge (siehe Kapitel 5.1.5.2). Als Proportionalitätsfaktor dient der CO_2-C-Emissionsfaktor, der stöchiometrisch abzuleiten ist und mit 0,2 kg CO_2-C pro kg Harnstoff angegeben wird (IPCC, 2006b Vol 4, 11.32). Die für die CR-Tabellen erforderliche Umrechnung in CO_2-Einheiten erfolgt analog zu CO_2 aus Kalkung, siehe oben. Tabelle 309 zeigt die resultierende Zeitreihe.

Tabelle 309: CO_2-Emissionen aus der Harnstoffanwendung (3.H) in Gg

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
insgesamt	480,0	458,5	593,1	641,1	710,8	791,5	815,1	719,6	605,3	497,7	433,3	397,3	367,0	347,5	330,2
in % von 1990	100,0	95,5	123,6	133,6	148,1	164,9	169,8	149,9	126,1	103,7	90,3	82,8	76,5	72,4	68,8

5.8.3 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (3.G-I)

Zu Qualitätskontrolle und Qualitätssicherung wird auf Kapitel 5.1.7 verwiesen.

Im Rahmen der Verifizierung wurde analog zur Vorgehensweise in Kapitel 5.2.4 für 2022 ein Vergleich der CO_2-Emissionen aus Kalkung und Harnstoffanwendung in Deutschland (aktuelle Submission 2026) und benachbarten Staaten inklusive des Vereinigten Königreiches (Submission 2025) durchgeführt, siehe Tabelle 310.

Tabelle 310: Vergleich der deutschen CO_2 -IEF-Werte mit denen benachbarter Staaten für das Zeitreihenjahr 2022

	Kalkstein [kg CO_2-C per kg of fertilizer]	Dolomit [kg CO_2-C per kg of fertilizer]	andere kalkhaltige Dünger [kg CO_2-C per kg of fertilizer]	Harnstoffanwendung [kg CO_2-C per kg of fertilizer]
Österreich	0,12	0,13	0,12500	0,20
Belgien	0,12	0,13	NO	0,20
Tschechische Republik	0,12	0,13	NO	0,20
Dänemark	0,12	IE	0,02600	0,20
Frankreich	0,12	0,13	0,12500	0,20
Deutschland	**0,12**	**0,13**	**0,02748**	**0,20**
Niederlande	0,12	0,13	NO	0,43
Polen	0,12	0,13	0,12000	0,20
Schweiz	0,12	0,13	NO	0,20
Vereinigtes Königreich	0,12	0,13	NO	0,20
IPCC (2006b): Vol. 4, 11.27	0,12	0,13		0,20

Quelle: Deutschland: Submission 2026; andere Länder: UNFCCC (2025)
IE, NO, n/a: Keine Daten verfügbar

Es zeigt sich, dass alle betrachteten Länder als Emissionsfaktoren die IPCC (2006b) Vol. 4-Defaultwerte für die Berechnung von Emissionen aus Kalkstein, Dolomit und Harnstoff verwenden (der Emissionsfaktor für Harnstoff der Niederlande ist mit Sicherheit ein Fehler in der CR-Tabelle). Die Anwendung anderer kalkhaltiger Dünger wird nur von einigen Ländern berichtet; der deutsche IEF liegt in der Nähe des dänischen Werts.

5.8.4 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (3.G-I)

Tabelle 250 in Kapitel 5.1.6 gibt die Unsicherheiten von Aktivitätsdaten und Emissionsfaktoren für CO_2 aus Düngekalkung und Harnstoffanwendung an, die für die Schätzung der Gesamt-Unsicherheit des deutschen THG-Inventars eingesetzt wurden. Zur Herleitung der Unsicherheiten siehe Kap. 6.3 und 6.9 in (Vos et al., 2026).

Die Unsicherheit der Aktivitätsdaten umfasst dabei nicht die Unsicherheit, die daraus resultiert, dass i. d. R. nicht der gesamte ausgebrachte Kohlenstoff in CO_2 umgewandelt wird und die Umwandlungsrate nicht quantifizierbar ist. Die berechneten Emissionen stellen daher im Rahmen der in Tabelle 250 in Kapitel 5.1.6 angeführten Unsicherheiten maximal mögliche Emissionen dar.

Die Emissionszeitreihen sind konsistent, da sie für alle Jahre des Berichtszeitraumes jeweils mit der gleichen Methode berechnet wurden und die Eingangsdaten ebenfalls konsistent und vollständig sind.

5.8.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (3.G-I)

Die Emissionen unterscheiden sich von denen der Submission 2025 nur im letzten Zeitreihenjahr 2023. Dies ist eine direkte Folge der jahresübergreifenden Mittelung der Aktivitätsdaten, siehe Kapitel 5.1.5.2.

Tabelle 311: CO_2-Emissionen aus Kalkung und Harnstoffanwendung (3.G-I), in [kt a^{-1}]

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Submission 2026	2710,5	1669,2	2062,0	1735,0	1806,2	2136,5	2107,5	2150,7	2250,1	2233,1	2195,2	2158,2	2152,1	2086,5
Submission 2025	2710,5	1669,2	2062,0	1735,0	1806,2	2136,5	2107,5	2150,7	2250,1	2233,1	2195,2	2158,2	2152,1	2103,8
Änderung absolut	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-17,3
Änderung relativ	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	-0,8%

5.8.6 Geplante Verbesserungen (3.G-I)

Derzeit sind keine neuen Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

5.9 CH_4 und N_2O aus der Vergärung von Energiepflanzen (Fermenter und Gärrestelager) (3.J)

5.9.1 Beschreibung der Kategorie (3.J)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
-/T	3 J, Other		CH_4	0,31	0,01	1445,31	0,21	460915,75
-/-	3 J, Other		N_2O	0,11	0,01	92,70	0,02	87107,90

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CH_4	Tier 2	Q/RS/NS	CS/D
N_2O direct	Tier 2	Q/RS/NS	CS/D
N_2O indirect	Tier 1	Q/RS/NS	D
NO_X	Tier 2	Q/RS/NS	CS

Die Kategorie „CH_4 und N_2O aus der Vergärung von Energiepflanzen (Fermenter und Gärrestelager“) ist eine Hauptkategorie für CH_4-Emissionen nach dem Trend.

Die Vergärung von Energiepflanzen dient vorrangig der Energiegewinnung. Die bei der Vergärung selbst (Fermenter) und der Lagerung der Gärreste entstehenden Emissionen (CH_4, N_2O und NO, siehe Kapitel 5.1.4.1) werden als separate Kategorie berichtet (CRF 3/J). Die Emissionen aus der Nutzung der Gärreste als Dünger werden zusammen mit den Emissionen aus der Ausbringung anderer Dünger unter 3.D.1.b.iii berichtet.

Analog zum Wirtschaftsdünger werden auch für die Lagerung von Energiepflanzen-Gärresten indirekte N_2O-Emissionen als Folge der Deposition von reaktivem Stickstoff berechnet. Es treten keine indirekten N_2O-Emissionen aufgrund von Auswaschung/Oberflächenabfluss aus dem Lager auf.

Als Ergänzung zur Tabelle oben zeigt Tabelle 312 für das erste und das letzte Jahr der Zeitreihe die prozentualen Anteile der Emissionen von CH_4, N_2O und THG aus der Vergärung von Energiepflanzen (Fermenter und Gärrestlager) an den landwirtschaftlichen Gesamtemissionen von CH_4, N_2O und THG. Tabelle 312 verzichtet auf die Angabe der prozentualen Veränderungen der Emissionen seit 1990; solche Angaben sind wegen der geringen Verbreitung der Energiepflanzenvergärung im Jahr 1990 nur begrenzt aussagekräftig, wie die Tabelle oben zeigt. Die zeitliche Zunahme der Emissionen ist eine direkte Folge der wachsenden Substratmengen.

Tabelle 312: Prozentuale Anteile der Emissionen aus der Energiepflanzenvergärung (Fermenter + Gärrestlager) an den landwirtschaftlichen Gesamtemissionen von CH_4, N_2O und THG

[%]	Anteil an landwirtschaftlicher Gesamtemission (CH_4, N_2O, THG)	
	1990	2024
$CH_{4,\,EC}$	0,0	4,3
N_2O_{EC}	0,0	0,5
$CH_{4,\,EC}$ + N_2O_{EC} als THG (in CO_{2eq})	0,0	2,9

5.9.2 Methodische Aspekte (3.J)

Die Berechnung der CH_4-Emissionen und der direkten N_2O-Emissionen erfolgt analog zur Emissionsberechnung bei der Vergärung von Mist (siehe Kapitel 5.1.3.6.5), allerdings ohne Vorlager.

Wie beim Wirtschaftsdünger (siehe Kapitel 5.3.5) werden auch für die Lagerung von Energiepflanzen-Gärresten indirekte N_2O-Emissionen als Folge der Deposition von reaktivem Stickstoff berechnet, der im Falle der Energiepflanzen aus NH_3- und NO-Emissionen aus dem Energiepflanzen-Gärrestelager stammt. Die NO-Emissionen aus dem Gärrestelager werden wie bei Wirtschaftsdünger analog zu den N_2O-Emissionen berechnet (siehe Kapitel 5.3.4.2). Zur Berechnung der NH_3-Emissionen aus dem Energiepflanzen-Gärrestelager wird auf Kap. 5.1 in (Vos et al., 2026) verwiesen.

5.9.3 CH_4-Emissionsfaktor und -Emissionen (3.J, CH_4)

Tabelle 313 zeigt den zeitlichen Verlauf des CH_4-Emissionsfaktors für die Vergärung von Energiepflanzen (Fermenter und Gärrestelager), bezogen auf die Trockenmasse-Mengen, die mit den Energiepflanzen in den Vergärungsprozess eingebracht wurden (siehe Kapitel 5.1.4.2). Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit wird in Abweichung von der sonst für die Emissionsfaktoren üblichen Einheit (kg kg^{-1}) die Einheit g kg^{-1} verwendet. Die Abnahme des Emissionsfaktors mit der Zeit beruht auf der zunehmenden Verbreitung der gasdichten Lagerung der Gärreste (siehe

Kapitel 5.1.4.2), für die anstelle des höheren Emissionsfaktors der offenen Lagerung nur die CH_4-Leckagerate zu berücksichtigen ist.

Tabelle 313: CH_4-Emissionsfaktor für die Vergärung von Energiepflanzen (Fermenter und Gärrestelager), bezogen auf die mit den Energiepflanzen eingebrachte Trockenmasse, in g kg^{-1}

1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
3,41	3,36	3,32	3,25	2,99	2,76	2,74	2,72	2,70	2,66	2,62	2,58	2,59	2,55	2,55

Die CH_4-Emissionen aus der Vergärung von Energiepflanzen (Fermenter und Gärrestelager) gehen aus Tabelle 314 hervor. Der ansteigende Trend ist eine Folge der starken Zunahme der vergorenen Energiepflanzen-Menge insbesondere seit 2005; er wird durch die zunehmende Verbreitung gasdichter Gärrestelagerung abgeschwächt. Zu Details siehe Kapitel 5.1.4.2.

Tabelle 314: CH_4-Emissionen aus der Vergärung von Energiepflanzen (Fermenter und Gärrestelager), in Gg

1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
0,01	0,14	1,21	10,04	33,36	55,45	54,77	53,52	52,37	51,64	52,00	50,25	54,09	51,66	51,62

5.9.4 N_2O-Emissionsfaktoren und -Emissionen (3.J, N_2O)

Die Emissionsfaktoren für direkte N_2O-Emissionen aus der Vergärung von Energiepflanzen (Gärrestelager) sind in Tabelle 315 dargestellt. Diese Daten repräsentieren den Mittelwert für gasdichte und offene Lagerung und spiegeln in ihrem abnehmenden Trend die mit den Jahren zunehmende Verbreitung der gasdichten Lagerung, die kein N_2O emittiert. Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit wird in Abweichung von der sonst für die Emissionsfaktoren üblichen Einheit (kg kg^{-1}) die Einheit g kg-1 verwendet. Die Emissionsfaktoren in Tabelle 315 sind auf die N-Mengen anzuwenden, die mit den Energiepflanzen in den Vergärungsprozess eingebracht wurden (siehe Kapitel 5.1.4.2).

Tabelle 315: N_2O-N-Emissionsfaktor für direkte N_2O-Emissionen aus der Vergärung von Energiepflanzen (Gärrestelager), bezogen auf die mit den Energiepflanzen eingebrachte N-Menge, in g kg^{-1}

1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
5,00	4,77	4,53	4,21	2,89	1,73	1,63	1,54	1,45	1,26	1,07	0,87	0,90	0,71	0,71

Als Emissionsfaktor für indirekte N2O-Emissionen infolge der Deposition von NH3 und NO aus der Lagerung der Energiepflanzen-Gärreste wird wie beim Wirtschaftsdünger der nach Klima differenzierte IPCC (2019) Emissionsfaktor angewendet. Für feuchte Klimate beträgt er 0,014 kg N2O-N (kg N)-1, für trockene Klimate beträgt er 0,005 kg N2O-N (kg N)-1, siehe IPCC (2019) Table 11.3.

Die berechneten direkten und indirekten N_2O-Emissionen zeigt Tabelle 316. Der zeitliche Verlauf spiegelt den starken Anstieg der vergorenen Energiepflanzen-Mengen (siehe Kapitel 5.1.4) insbesondere seit 2005 wider. Die deutliche Abnahme der Emissionen von 2011 zu 2012 ist die Folge einer überdurchschnittlichen Zunahme der Verbreitung der gasdichten Lagerung, siehe Kapitel 5.1.4.2.

Tabelle 316: N_2O-Emissionen aus der Lagerung von Energiepflanzen-Gärresten, in Gg

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
gesamt	0,000	0,005	0,041	0,319	0,794	0,838	0,791	0,743	0,664	0,586	0,507	0,414	0,446	0,350	0,350
N_2O direkt	0,000	0,005	0,038	0,298	0,741	0,798	0,749	0,697	0,644	0,559	0,485	0,388	0,430	0,329	0,329
N_2O indirekt	0,000	0,000	0,003	0,020	0,053	0,040	0,042	0,047	0,020	0,026	0,022	0,025	0,016	0,021	0,021

5.9.5 NO-Emissionsfaktoren und -Emissionen (3.J, NO)

Wie beim Wirtschaftsdünger (siehe Kapitel 5.3.4.2.2) werden die NO-Emissionen proportional zu den direkten N_2O-Emissionen berechnet, indem der auf die eingebrachte N-Menge anzuwendende NO-N-Emissionsfaktor mit 10 % des N_2O-N-Emissionsfaktors angesetzt wird.

Tabelle 317 zeigt den zeitlichen Verlauf der NO-Emissionen aus der Vergärung von Energiepflanzen (Gärrestelager).

Tabelle 317: NO-Emissionen aus der Lagerung von Energiepflanzen-Gärresten, in Gg

1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
0,000	0,001	0,005	0,041	0,101	0,109	0,102	0,095	0,088	0,076	0,066	0,053	0,059	0,045	0,045

5.9.6 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (3.J)

Zu Qualitätskontrolle und Qualitätssicherung wird auf Kapitel 5.1.7 verwiesen.

Eine Verifizierung kann mangels anderer deutscher Datenquellen nicht durchgeführt werden. Ein internationaler Vergleich als Ersatz scheidet ebenfalls aus, da andere Länder keine vergleichbare Verbreitung der Vergärung von Energiepflanzen aufweisen.

5.9.7 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (3.J)

Tabelle 250 in Kapitel 5.1.6 gibt die Unsicherheiten von Aktivitätsdaten und Emissionsfaktoren im Zusammhang mit der Vergärung von Energiepflanzen an, die für die Schätzung der Gesamt-Unsicherheit des deutschen THG-Inventars eingesetzt wurden. Zur Herleitung der Unsicherheiten siehe Kap. 6.3 und in (Vos et al., 2026).

Die Emissionszeitreihen sind konsistent, da sie für alle Jahre des Berichtszeitraumes jeweils mit der gleichen Methode berechnet wurden und die Eingangsdaten ebenfalls konsistent und vollständig sind.

5.9.8 Kategoriespezifische Rückrechnungen (3.J)

Tabelle 318 vergleicht die Ergebnisse der vorliegenden Submission mit denen der letztjährigen Submission. Die Abweichungen für die gesamte Zeitreihe sind in der Hauptsache auf die erstmalige Verwendung von nach Klima differenzierten (IPCC, 2019) - Emissionsfaktoren bei der Berechnung der indirekten Emission aus Deposition zurückzuführen (siehe Kapitel 5.1.7.3) und nachrangig auf die Einführung des Transportmoduls (siehe Kapitel 5.1.2.5).

Tabelle 318: Vergleich der THG-Emissionen aus der Vergärung von Energiepflanzen (Fermenter und Gärrestelager) zwischen Submission 2026 und 2025, in Gg CO_{2eq}

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
2026	0,4	5,3	44,7	365,7	1144,5	1774,7	1743,0	1695,6	1642,3	1601,1	1590,3	1516,5	1632,7	1538,0
2025	0,4	5,3	44,8	366,0	1144,5	1779,2	1746,3	1696,4	1649,2	1604,9	1593,8	1517,2	1636,6	1636,6
Änderung absolut	0,0	0,0	-0,1	-0,3	0,0	-4,5	-3,3	-0,9	-6,8	-3,7	-3,5	-0,7	-3,9	-98,7
Änderung relativ	-0,2%	-0,1%	-0,1%	-0,1%	0,0%	-0,3%	-0,2%	-0,1%	-0,4%	-0,2%	-0,2%	0,0%	-0,2%	-6,0%

5.9.9 Geplante Verbesserungen (3.J)

Derzeit sind keine neuen Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

6 Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (CRF-Sektor 4)

6.1 Übersicht (CRF Sektor 4)

6.1.1 Kategorien und Gesamtemissionen und -senken 1990 - 2024

Im LULUCF-Sektor (Common Reporting Table 4) wird in Deutschland über positive (Quelle) und negative (Senke) CO_2-Emissionen der Pools[78]

- ober- und unterirdische Biomasse
- Totholz, Streu (Tote organische Substanz)
- organische und mineralische Böden
- künstliche Gewässer
- Holzprodukte (4.G)

für die Landnutzungskategorien

- Wald (4.A.1)
- Acker (4.B.1)
- Grünland (4.C.1)
- Feuchtgebiete (4.D.1)
- Siedlungen (4.E.1)

sowie die jeweiligen Landnutzungsänderungen zwischen diesen Nutzungskategorien (CRF 4.A.2 - 4.E.2) berichtet. In der Kategorie *Sonstiges Land* (4.F) treten keine anthropogen bedingten Emissionen auf, da die Flächen nicht genutzt werden. Landnutzungsänderungen zu *Sonstigem Land* finden nicht statt, da einmal genutztes Land per Definition nicht wieder in ungenutztes überführt werden kann.

Des Weiteren werden inventarisiert:

- CO_2-Emissionen aus
  - dem industriellen Torfabbau (4.D.1)
  - Moorbrand (4.(IV))
- N_2O-Emissionen aus
  - organischen Böden der Landnutzungskategorien 4.A, 4.C (nur Gehölze und Hecken), 4.D, 4.E - (Emissionen aus den Kategorien 4.B Ackerland und 4.C Grünland im engeren Sinn (i.e.S) werden unter Landwirtschaft CRF 3.D.1.f berichtet)
  - direkte (CRF 4.(III)) und indirekte (CRF 4.(III)) Emissionen aus der Humusmineralisation in Mineralböden infolge Landnutzungsänderung bzw.

[78] CO_2-Emissionen aus Waldbränden werden über die Kohlenstoffänderung im Wald implizit berücksichtigt.

Landbewirtschaftung (Emissionen aus 4.B.1 und 4.C.1 Grünland im engeren Sinne (i.e.S) werden unter CRF 3.D.1.e berichtet)

- dem industriellen Torfabbau (4.(II))
- Waldbrand (4.(IV))

- CH_4-Emissionen aus
  - organischen Böden (4.(II))
  - Entwässerungsgräben in Gebieten mit organischen Böden (4.(II))
  - Entwässerungsgräben in Gebieten mit mineralischen Böden (4.(II))
  - Stehende künstliche Gewässer (Stauseen, Teiche) (4.(II))
  - Künstliche Gewässer zur Schifffahrt (Schifffahrtskanäle, Hafenbecken)
  - dem industriellen Torfabbau (4.(II))
  - Waldbrand (4.(IV))
  - Moorbrand (4.(IV))

Bei der Berichterstattung über die Freisetzung/Einbindung der Treibhausgase in jeder Landnutzungskategorie wird unterschieden zwischen Flächen, die in der Berichtsperiode

- keiner Landnutzungsänderung unterliegen, somit unverändert in der Landnutzungskategorie verbleiben (Verbleibkategorie 4.A.1 - 4.F.1)
- eine Umnutzung erfahren: Diese werden vom Zeitpunkt der Umnutzung in der Kategorie berichtet, deren Nutzung sie zugeführt wurden. Die Änderungsflächen werden in diesen neuen Landnutzungskategorien für 20 Jahre in Übergangskategorien (4.A.2 - 4.F.2) berichtet. Nach 20 Jahren in einer Übergangskategorie werden diese Flächen dann in die Verbleibkategorie übernommen. Kommt es vor Ablauf der Übergangsfrist von 20 Jahren erneut zu Landnutzungsänderungen, werden die betroffenen Flächen vom Zeitpunkt der Nutzungsänderung an sofort der neuen Übergangskategorie zugeschlagen. Die Frist von 20 Jahren beginnt dann erneut (effektive Übergangszeit).

Tabelle 319 zeigt eine Übersicht über das deutsche LULUCF-Berichtssystem, in der alle Landnutzungskategorien, Subkategorien und Pools sowie mögliche Übergangskategorien und THG-Emissionen tabellarisch zusammengefasst sind.

Tabelle 319: Übersicht über das Deutsche LULUCF-Berichtsystem: Landnutzungskategorien, Subkategorien und Pools, Übergangsmöglichkeiten und damit verbundene Emissionen an Treibhausgasen

Kategorie[1)]	Landnutzung/-änderung (Flächen)[2)]			Pools (Emissionen)[2)]					
	Verbleib	von	zu	Biomasse	Boden		Gewässer	Wildfeuer	DOM
					mineralisch	organisch			
forl	x			CO_2 [$EF_{Biomasse_forest_management}$]	CO_2, N_2O_{dir}, N_2O_{indir} [EF_{BZE} + Modell Yasso]	CO_2+DOC, N_2O, $CH_{4_org_soil}$+$CH_{4_ditch\ org_soil}$ [EF_{org_soil}IPCC default values_Wald]	/	CH_4, N_2O [$AD_{Offizialstatistik}$, $EF_{Waldbrand}$]	CO_2 [$EF_{DOM_forest_management}$]
forl		zu crox, cros, crot, gra3, wett, set1		CO_2 [$EF_{Biomasse_deforestation}$]	CO_2, N_2O_{dir}, N_2O_{indir} [EF+Yasso]	CO_2+DOC, N_2O, $CH_{4_org_soil}$+$CH_{4_ditch\ org_soil}$, [3)]	/	/	CO_2 [$EF_{DOM_deforestation}$]
forl			von crot, gra2, gra3, wett, set1 (nur Halde, Tagebau, Deponie zu Wald sind möglich), othl	CO_2 [$EF_{Biomasse_afforestation}$]	CO_2, N_2O_{dir}, N_2O_{indir} [EF+Yasso]	CO_2+DOC, N_2O, $CH_{4_org_soil}$+$CH_{4_ditch\ org_soil}$ [EF_{org_soil}IPCC default values_Wald]	/	/	CO_2 [$EF_{DOM_afforestation}$]
cro1	x			/	/	CO_2+DOC, $CH_{4_org_soil}$+$CH_{4_ditch\ org_soil}$[5)]	/	/	/
cro1		zu allen LUC, außer forl, wetl, wetr, wetb, wetd, wets, set2, set3, othl		CO_2 [EF $cropland_{annuell}$]	CO_2, N_2O [8)]	CO_2+DOC, $CH_{4_org_soil}$+$CH_{4_ditch\ org_soil}$ N_2O [3)]	/	/	CO_2, nur zu forl
cro1			von allen LUC, außer forl, wetl, wetr, wetb, wetd, wets, set2, set3	CO_2 [EF $cropland_{annuell}$]	CO_2, N_2O [4)]	CO_2+DOC, $CH_{4_org_soil}$+$CH_{4_ditch\ org_soil}$[5)]	/	/	CO_2, nur von forl
croh	x			/	/	CO_2+DOC, $CH_{4_org_soil}$+$CH_{4_ditch\ org_soil}$[5)]	/	/	/
croh		zu allen LUC, außer forl, wetl, wetr, wetb, wetd, wets, set2, set3, othl		CO_2 [EF croh]	CO_2, N_2O [8)]	CO_2+DOC, $CH_{4_org_soil}$+$CH_{4_ditch\ org_soil}$, N_2O[3)]	/	/	CO_2, nur zu forl
croh			von allen LUC, außer forl, wetl, wetr, wetb, wetd, wets, set2, set3	CO_2 [EF croh]	CO_2, N_2O [4)]	CO_2+DOC, $CH_{4_org_soil}$+$CH_{4_ditch\ org_soil}$[5)]	/	/	CO_2, nur von forl
croo	x			CO_2 [Modell Obst]	/	CO_2+DOC, $CH_{4_org_soil}$+ $CH_{4_ditch\ org_soil}$[5)]	/	/	/
croo		zu allen LUC, außer wetl, wetr, wetb, wetd, wets, set2, set3, othl		CO_2 [Modell Obst]	CO_2, N_2O [8)]	CO_2+DOC, $CH_{4_org_soil}$+ $CH_{4_ditch\ org_soil}$, N_2O[3)]	/	/	CO_2, nur zu forl
croo			von allen LUC, außer forl, wetl, wetr, wetb, wetd, wets, set2, set3,	CO_2 [Modell Obst]	CO_2, N_2O [4)]	CO_2+DOC, $CH_{4_org_soil}$+ $CH_{4_ditch\ org_soil}$[5)]	/	/	CO_2, nur von forl
cros	x			CO_2 [Modell KUP]	/	CO_2+DOC, $CH_{4_org_soil}$+ $CH_{4_ditch\ org_soil}$[5)]	/	/	/

Kategorie[1]	Landnutzung/-änderung (Flächen)[2]			Pools (Emissionen)[2]					
	Verbleib	von	zu	Biomasse	Boden		Gewässer	Wildfeuer	DOM
					mineralisch	organisch			
cros		zu allen LUC, außer wetl, wetr, wetb, wetd, wets, set2, set3, othl		CO_2 [Modell KUP]	CO_2, N_2O [8]	CO_2+DOC, $CH_{4_org_soil}$+ $CH_{4_ditch\ org_soil}$, N_2O[3]	/	/	CO_2, nur zu forl
cros			von allen LUC, außer forl, wetl, wetr, wetb, wetd, wets, set2, set3,	CO_2 [Modell KUP]	CO_2, N_2O [4]	CO_2+DOC, $CH_{4_org_soil}$+ $CH_{4_ditch\ org_soil}$[5]	/	/	CO_2, nur von forl
crot	x			CO_2 [Modell Baumschule]	/	CO_2+DOC, $CH_{4_org_soil}$+ $CH_{4_ditch\ org_soil}$[5]	/	/	/
crot		zu allen LUC, außer forl, wetl, wetr, wetb, wetd, wets, othl		CO_2 [Modell Baumschule]	CO_2, N_2O [8]	CO_2+DOC, $CH_{4_org_soil}$+ $CH_{4_ditch\ org_soil}$, N_2O[3]	/	/	CO_2, nur zu forl
crot			von allen LUC, außer forl, wetl, wetr, wetb, wetd, wets, set2	CO_2 [Modell Baumschule]	CO_2, N_2O [4]	CO_2+DOC, $CH_{4_org_soil}$+ $CH_{4_ditch\ org_soil}$[5]	/	/	CO_2, nur von forl
crow	x			CO_2 [Modell Wein]	/	CO_2+DOC, $CH_{4_org_soil}$+ $CH_{4_ditch\ org_soil}$[5]	/	/	/
crow		zu allen LUC, außer forl, wetl, wetr, wetb, wetd, wets, set2, set3, othl		CO_2 [Modell Wein]	CO_2, N_2O [8]	CO_2+DOC, $CH_{4_org_soil}$+ $CH_{4_ditch\ org_soil}$, N_2O[3]	/	/	zu forl, CO2
crow			von allen LUC, außer forl, wetl, wetr, wetb, wetd, wets, set2, set3,	CO_2 [Modell Wein]	CO_2, N_2O [4]	CO_2+DOC, $CH_{4_org_soil}$+ $CH_{4_ditch\ org_soil}$[5]	/	/	von forl, CO2
crox	x			CO_2 [Modell Weihnachtsbaum]	/	CO_2+DOC, $CH_{4_org_soil}$+ $CH_{4_ditch\ org_soil}$[5]	/	/	/
crox		zu allen LUC, außer forl, wetl, wetr, wetb, wetd, wets, set2, set3, othl		CO_2 [Modell Weihnachtsbaum]	CO_2, N_2O [8]	CO_2+DOC, $CH_{4_org_soil}$+ $CH_{4_ditch\ org_soil}$, N_2O[3]	/	/	CO_2, nur zu forl
crox			von allen LUC, außer forl, wetl, wetr, wetb, wetd, wets, set2, set3,	CO_2 [Modell Weihnachtsbaum]	CO_2, N_2O [4]	CO_2+DOC, $CH_{4_org_soil}$+ $CH_{4_ditch\ org_soil}$[5]	/	/	CO_2, nur von forl
gra1	x			/	/	CO_2+DOC, $CH_{4_org_soil}$+ $CH_{4_ditch\ org_soil}$[5]	/	/	/
gra1		zu allen LUC, außer forl, wetl, wetr, wetb, wetd, wets, set2, set3, othl		CO_2 [EF $grassland_{annuell}$]	CO_2, N_2O_{dir}, $N2O_{indir}$	CO_2+DOC, $CH_{4_org_soil}$+ $CH_{4_ditch\ org_soil}$, N_2O [3]	/	/	CO_2, nur zu forl
gra1			von allen LUC, außer forl, wetl, wetr, wetb, wetd, wets, set2, set3,	CO_2 [EF $grassland_{annuell}$]	CO_2, N_2O_{dir}, $N2O_{indir}$	CO_2+DOC, $CH_{4_org_soil}$+ $CH_{4_ditch\ org_soil}$[5]	/	/	CO_2, nur von forl
gra2	x			CO_2 [Modell Hecke/Feldgehölz]	/	CO_2+DOC, $CH_{4_org_soil}$+$CH_{4_ditch\ org_soil}$, N_2O [EF_{org_soil}IPCC default values]	/	/	/
gra2		zu allen LUC, außer forl, wetl, wetr, wetb, wetd, wets, set2, set3, othl		CO_2 [Modell Hecke/Feldgehölz] [6]	CO_2, N_2O_{dir}, N_2O_{indir}	CO_2+DOC, $CH_{4_org_soil}$+ $CH_{4_ditch\ org_soil}$, N_2O [3]	/	/	CO_2, nur zu forl

Kategorie[1]	Landnutzung/-änderung (Flächen)[2]			Pools (Emissionen)[2]					
	Verbleib	von	zu	Biomasse	Boden		Gewässer	Wildfeuer	DOM
					mineralisch	organisch			
gra2			von allen LUC, außer forl, wetl, wetr, wetb, wetd, wets, set2, set3,	CO_2 [Modell Hecke/Feldgehölz]	CO_2, N_2O_{dir}, N_2O_{indir}	CO_2+DOC, $CH_{4_org_soil}$+ $CH_{4_ditch\ org_soil}$, N_2O [EF_{org_soil}IPCC default values_Wald]	/	/	CO_2, nur von forl
gra3	x			CO_2 [Modell Hecke/Feldgehölz]	/	CO_2+DOC, $CH_{4_org_soil}$+ $CH_{4_ditch\ org_soil}$, N_2O	/	/	/
gra3		zu allen LUC, außer wetl, wetr, wetb, wetd, wets, set2, set3, othl		CO_2 [Modell Hecke/Feldgehölz] [6]	CO_2, N_2O_{dir}, N_2O_{indir}	CO_2+DOC, $CH_{4_org_soil}$+ $CH_{4_ditch\ org_soil}$, N_2O[3]	/	/	CO_2, nur zu forl
gra3			von allen LUC, außer forl, wetl, wetr, wetb, wetd, wets, set2, set3,	CO_2 [Modell Hecke/Feldgehölz]	CO_2, N_2O_{dir}, N_2O_{indir}	CO_2+DOC, $CH_{4_org_soil}$+ $CH_{4_ditch\ org_soil}$, N_2O	/	/	CO_2, nur von forl
wett	x			CO_2 [Modell Terrestrische Feuchtgebiete]	/	CO_2+DOC, $CH_{4_org_soil}$+ $CH_{4_ditch\ org_soil}$, N_2O	/	/	/
wett		zu allen LUC, außer wetl, wetr, wetb, wetd, wets, set2, set3, othl		CO_2 [Modell Terrestrische Feuchtgebiete]	CO_2, N_2O_{dir}, N_2O_{indir}	CO_2+DOC, $CH_{4_org_soil}$+ $CH_{4_ditch\ org_soil}$, N_2O [3]	/	/	CO_2, nur zu forl
wett			von allen LUC, außer forl, wetl, wetr, wetb, wetd, wets, set2, set3,	CO_2 [Modell Terrestrische Feuchtgebiete]	CO_2, N_2O_{dir}, N_2O_{indir}	CO_2+DOC, $CH_{4_org_soil}$+ $CH_{4_ditch\ org_soil}$, N_2O	/	/	CO_2, nur von forl
wetl/wetr	x			/	/	/	/	/	/
wetp	x	zu allen LUC, außer wetl, wetr, wetb, wetd, wets, set2, set3, othl		/	/	CO_2+DOC, $CH_{4_org_soil}$+ $CH_{4_ditch\ org_soil}$, N_2O [on-site emissions]	/	/	/
wetp			von allen LUC, außer wetl, wetr, wetb, wetd, wets, set2, set3,	CO_2 [$EF_{peat_extraction}$]	/	CO_2+DOC, $CH_{4_org_soil}$+ $CH_{4_ditch\ org_soil}$, N_2O [3]	CH_4 [EF $wetb_{org_soil}$] [7]	/	CO_2, nur zu forl
wetp		/	/	CO_2 [$EF_{peat_extraction}$]	/	CO_2, CH_4, N_2O [on-site emissions]	/	/	CO_2, nur von forl
wetp				/	/	CO_2 [off-site emissions]	/	/	/
wetb	x	zu allen LUC, außer wetl, wetr, wetd, wets, set2, set3, othl		/	/	/	CH_4 [EF $wetb_{org_soil}$] + CH_4 [EF $wetb_{min_soil}$]	/	/
wetb			von allen LUC, außer wetl, wetr, wetd, wets, set2, set3,	/	/	/	/	/	/
wetb				/	/	/	CH_4 [EF $wetb_{org_soil}$]	/	/
wetd	x	/	/	/	/	/	CH_4 [EF wetd]	/	/
wets	x	/	/	/	/	/	CH_4 [EF wetd]	/	/

Kategorie[1)]	Landnutzung/-änderung (Flächen)[2)]			Pools (Emissionen)[2)]					
	Verbleib	von	zu	Biomasse	Boden		Gewässer	Wildfeuer	DOM
					mineralisch	organisch			
set1	x			CO_2 [Modell Siedlung]	/	CO_2+DOC, $CH_{4_org_soil}$+ $CH_{4_ditch\ org_soil}$, N_2O	/	CH_4, N_2O [Moorbrand]	/
set1		zu allen LUC, außer wetl, wetr, wetb, wetd, wets, set2, set3, othl		CO_2 [Modell Siedlung]	CO_2, N_2O_{dir}, N_2O_{indir}	CO_2+DOC, $CH_{4_org_soil}$+ $CH_{4_ditch\ org_soil}$, N_2O 3)	/	/	zu forl, CO_2
set1			von allen LUC, außer wetl, wetr, wetb, wetd, wets, set2, set3,	CO_2 [Modell Siedlung]	CO_2, N_2O_{dir}, N_2O_{indir}	CO_2+DOC, $CH_{4_org_soil}$+ $CH_{4_ditch\ org_soil}$, N_2O	/	/	von forl, CO_2
set2	x	/	/	/	/	/	/	/	/
set3	x	/	/	/	/	/	/	/	/
setp	x								
setp		zu allen LUC außer forl, wetl, wetr, wetb, wetd, wets, set2, set3		CO_2 [EF grassland$_{annuell}$]	CO_2, N_2O_{dir}, N_2O_{indir}	CO_2+DOC, $CH_{4_org_soil}$+ $CH_{4_ditch\ org_soil}$, N_2O	/	/	/
setp			von allen LUC, außer forl, wetl, wetr, wetb, wetd, wets, set2, set3,	CO_2 [EF grassland$_{annuell}$]	CO_2, N_2O_{dir}, N_2O_{indir}	CO_2+DOC, $CH_{4_org_soil}$+ $CH_{4_ditch\ org_soil}$, N_2O	/	/	/
othl	x			/	/	/	/	/	/
othl		zu allen LUC, außer wetl, wetr, wetb, wetd, wets, set2, set3		/	CO_2, N_2O_{dir}, N_2O_{indir}	CO_2+DOC, $CH_{4_org_soil}$+ $CH_{4_ditch\ org_soil}$, N_2O 3)	/	/	CO_2, nur zu forl
othl			/	/	/	/	/	/	/

1) Begriffsbestimmung s. Tabelle 335 Kapitel 6.1.2

2) Die Ausweisung von Flächen und die Berechnung der Emissionen erfolgen für alle Pools und Landnutzungskategorien auf Bundeslandebene

3) N_2O, CRF 3.D.1.f, bei LUC zu gra1und anderen Ackerlandkategorien (cro*)

4) N_2O, CRF 3.D.1.e, bei LUC von anderen Ackerlandkategorien (cro*)

5) N_2O, CRF 3.D.1.f

6) bei LUC zu forl, nur 50 % Verlust der Biomasse

7) nur bei LUC zu wet4

8) N_2O, CRF 3.D.1.e bei LUC zu anderen Ackerlandkategorien (cro*)

9) Ausnahmen: Halde, Tagebau, Deponie zu Wald sind möglich

Abbildung 54, Abbildung 55 und Abbildung 56 geben für die vorliegende Submission 2026 eine Übersicht über die zeitliche Entwicklung der Treibhausgasemissionen (Summe aus CO_2, CH_4 und N_2O als CO_2-Äquivalente) aus den Bereichen 4.A-4.E, aufgeteilt nach Unterkategorien, Pools und Treibhausgasen. Auf der X-Achse ist die Jahresleiste im Berichtszeitraum und auf der Y-Achse die Emissions- (positive Werte) und die Senkenwirkung (negative Werte) in Kilotonnen CO_2-Äquivalenten (kt CO2-Äq.) dargestellt.

Die deutlichen Änderungen der Emissionen in den Jahren 1990, 2002, 2008 und insbesondere 2018 sind auf stark veränderte Emissionsfaktoren für die Forstbiomasse durch die Holznutzung zurückzuführen. Diese hat in der Inventurperiode 1991 bis 2001 gegenüber 1990 stark abgenommen (1990 verstärkte Aufarbeitung von Sturmschäden), zwischen 2002 - 2008 war eine Zunahme, 2008 eine leichte Abnahme zu verzeichnen (siehe Kapitel 6.4.2.2.1). Die dramatische Abnahme der Forstbiomasse im Jahr 2018 und den Folgejahren ist auf die Waldschäden infolge der großen Trockenheit in diesem und den folgenden Berichtsjahren zurückzuführen. Diese erheblichen Änderungen in der Waldbiomasse wurden während der jüngsten Bundeswaldinventur (2022) erfasst und durch die quantifizierte Auswertung der Erhebung verifiziert. Infolge dieser Kalamitäten stellte der LULUCF-Sektor mit einer Nettoemission von ca. 57,8 Mio. t CO2-Äq. im Jahr 2024 nun eine veritable Quelle für Treibhausgase dar. Im Zusammenspiel mit den Emissionen aus den mineralischen Waldböden führt dies, im Vergleich mit den Vorjahressubmissionen, zu deutlich ausgeprägteren Amplituden im Kurvenverlauf der Nettosektorensumme. Über den gesamten Berichtszeitraum betrachtet fungierte der LULUCF-Sektor überwiegend als Quelle für Treibhausgase, mit, insbesondere in den letzten Jahren, deutlich zunehmenden Trend (siehe Abbildung 54 und Abbildung 54).

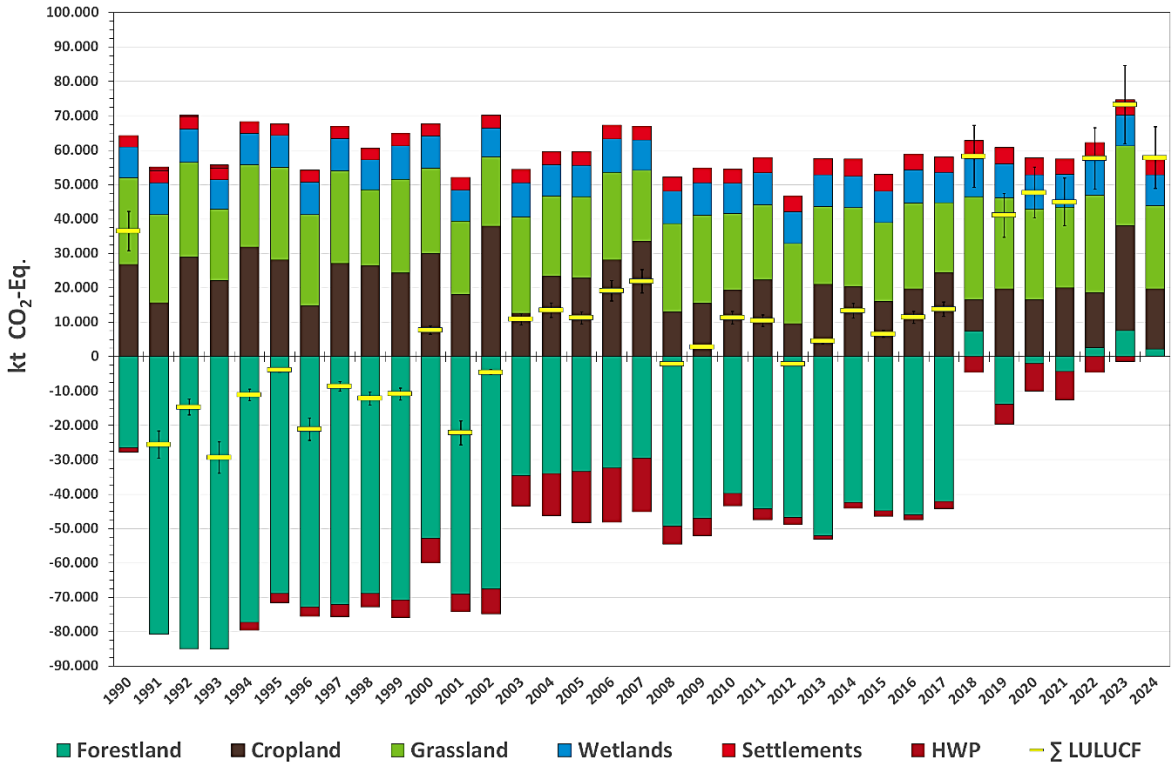
Die Zeitreihen spiegeln neben den Veränderungen bei der Forstbiomasse die Trends der Landnutzungsänderungen wider (siehe Kapitel 6.3.1.5). Für die Erfassung von Landnutzungsänderungen wurden Datensätze der Stichjahre 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 und 2024 verwendet (vergl. Kapitel 6.3.1). Die Landnutzungsänderungen wurden zwischen den Stichjahren linear interpoliert, so dass sich zwischen den Stichjahren jeweils konstante mittlere Landnutzungsänderungen ergeben (siehe Tabelle 347). Die Landnutzung vor dem Jahr 2010 wurde durch Extrapolation mithilfe stochastischer Methoden ermittelt (Kapitel 6.3.1.2.2).

Der Verlauf der Nettoemissionen von 1990 bis 2024 zeigt, dass der LULUCF-Sektor in den meisten Jahren als Nettoquelle für Treibhausgase fungierte. Hauptquellen sind die Emissionen aus den landwirtschaftlich genutzten Flächen der Landnutzungskategorien Acker- und Grünland. Diese beiden Kategorien weisen über die Jahre anhaltend hohe Emissionen aus entwässerten organischen Böden auf, sowie netto, zu einem geringeren Teil, aus den Mineralböden. Die Landnutzungskategorie Feuchtgebiete trägt hauptsächlich durch den industriellen Torfabbau und die Methanemissionen aus künstlichen Gewässern nicht unerheblich zur Gesamtsumme der THG-Emissionen bei. Die C-Pools des Waldes spielen eine ambivalente Rolle im Zeitverlauf. Mit ihren meist deutlich negativen Emissionen wirken die Pools tote organische Substanz (Totholz und Streu), genau wie die Holzprodukte, durch Zunahme dieser Kohlenstoffspeicher der Quellfunktion des Pools Biomasse entgegen. Der Verlauf der LULUCF-Emissionskurve wird im Wesentlichen durch den Pool Biomasse und die Emissionen aus den Mineralböden geprägt, insbesondere aus den Landnutzungskategorien Wald und Ackerland (Abbildung 54 und Abbildung 55).

Dominierendes Treibhausgas ist auch in der Nettobetrachtung meist das Kohlenstoffdioxid (CO_2), dessen Emissionen aus der Biogeosphäre Deutschlands, durch den Rückhalt in derselben, im Zeitverlauf häufig überkompensiert wurde, wodurch der LULUCF-Sektor für dieses Treibhausgas in der Nettobetrachtung oft als Senke wirkte. Mit den Waldschäden in jüngster Zeit verkehrte sich dieser Umstand dramatisch (Abbildung 55). Der Anteil der Freisetzung von

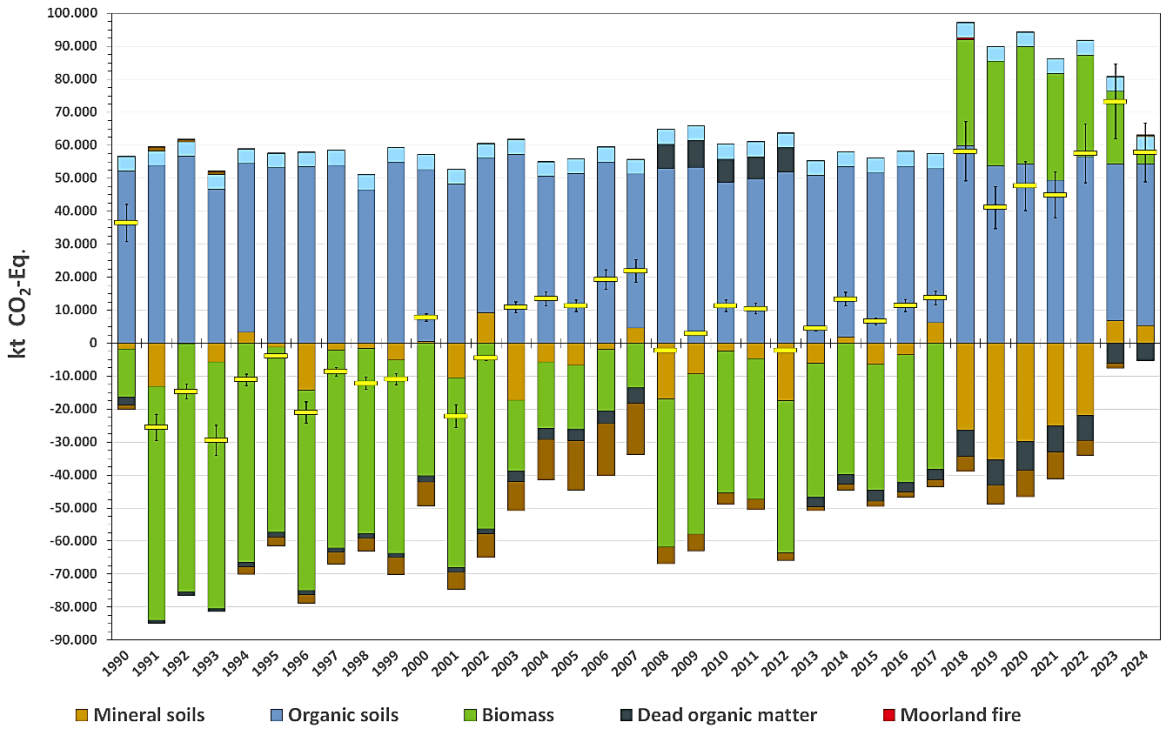
Methan (CH_4) und Lachgas (N_2O) an der THG-Summe ist nur in der Nettobetrachtung erheblich, wobei die klimawirksame Methanfreisetzung die des Lachgases deutlich übertrifft. Ursache hierfür sind die anhaltend hohen Methanemissionen aus künstlichen Gewässern. Detaillierte Beschreibungen der Emissionen und deren Zeitreihen finden sich in den jeweiligen Kapiteln der Landnutzungskategorien (Kapitel 6.4.1, Kapitel 6.5.1, Kapitel 6.6.1, Kapitel 6.7.1, Kapitel 6.8.1 und Kapitel 6.10.1).

Abbildung 53: Zeitreihen der Treibhausgasemissionen und – senken (Summe aus CO_2, CH_4 und N_2O) [kt CO_2-Äquivalente] im LULUCF-Sektor seit 1990, unterschieden nach Unterkategorien



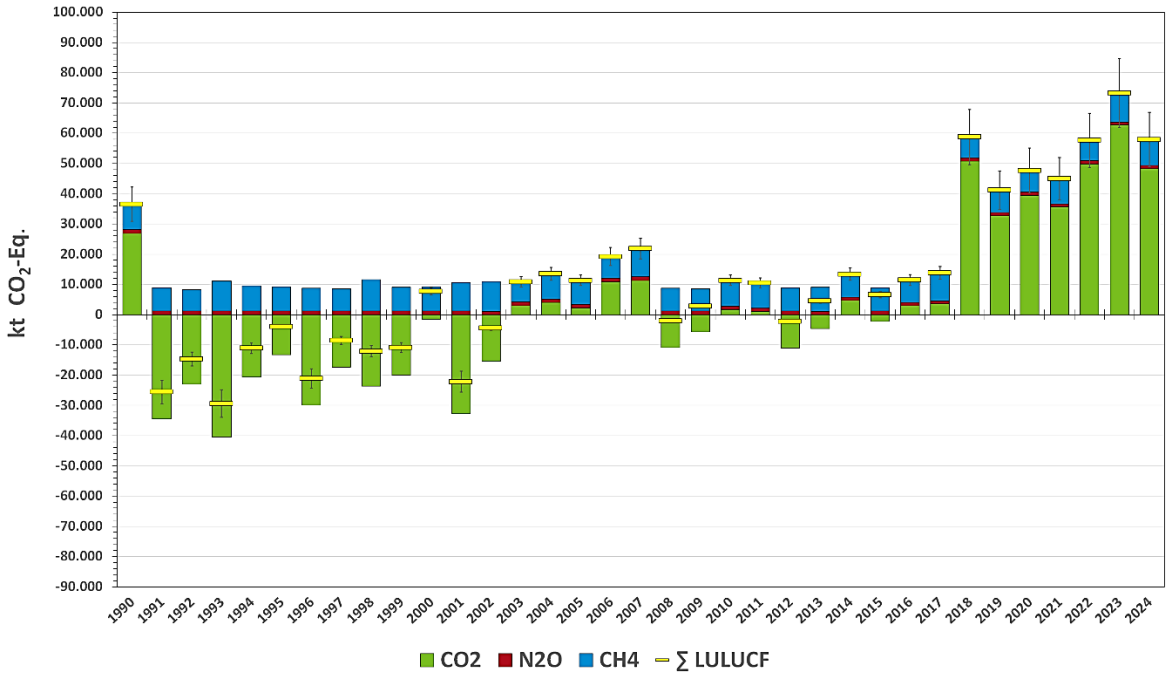
Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

Abbildung 54: Zeitreihen der Treibhausgasemissionen und –senken (Summe aus CO_2, CH_4 und N_2O) [kt CO_2-Äquivalente] im LULUCF-Sektor seit 1990, unterschieden nach Pools



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

Abbildung 55: Zeitreihen der Treibhausgasemissionen und – senken (Summe aus CO_2, CH_4 und N_2O) [kt CO_2-Äquivalente] im LULUCF-Sektor seit 1990, unterschieden nach Treibhausgasen (GHG)



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

Die Gesamtunsicherheit des deutschen LULUCF-Inventars (ohne Holzprodukte) beträgt 11,2 %. Ausführungen hierzu finden sich in den entsprechenden Kapiteln der einzelnen Landnutzungskategorien sowie im Kapitel 6.1.2.10.

6.1.2 Methodische Grundlagen

Das für den CRF-Sektor 4 in den 2006 IPCC Guidelines geforderte System der Landnutzungssysteme wurde von Deutschland übernommen; die Umsetzung ist in Tabelle 320 dargestellt, weitere Erläuterungen finden sich in Kapitel 6.2 (vergl. auch Kapitel 6.3).

Tabelle 320: Zuordnung der deutschen Berichtskategorien zu den IPCC-Landnutzungskategorien

IPCC-Kategorie	Deutsche Landnutzungskategorie bzw. Subkategorie		
	Kürzel	Volltext	Beschreibung
4.A Forest Land	forl	Wald	Laub-, Nadel- und Mischwaldflächen
4.B Cropland	Ackerland	Summe aus Ackerlandannuell, Hopfenanbauflächen, Weinanbauflächen, Obstanbauflächen, Baumschulen, Weihnachstbaum-kulturen, Kurzumtriebsplantagen	
	cro1	Ackerlandannuell	Flächen zum Anbau von Feldfrüchten und Gemüse
	croh	Hopfenanbauflächen	Mit speziellen Vorrichtungen ausgestattete Agrarfläche für den Anbau von Hopfen
	crow	Weinanbauflächen	Weingärten sind mit speziellen Vorrichtungen ausgestattete Agrarflächen, auf denen Weinstöcke angepflanzt sind
	croo	Obstanbauflächen	Obstplantagen sind Flächen, die vorwiegend dem Intensiv-obstanbau dienen und mit Obstbäumen und Obststräuchern bestanden sind. Im Unterschied zu Streuobst handelt es sich hierbei um gleichmäßige und dichte angelegte Monokulturen.
	crot	Baumschulen	Baumschulen sind Flächen, auf denen Holzgewächse aus Samen, Ablegern oder Stecklingen unter mehrmaligem Umpflanzen (Verschulen) gezogen werden.
	crox	Weihnachtsbaumkulturen	Weihnachtsbaumkultur bezeichnet eine landwirtschaftliche Fläche, die vorrangig mit Weihnachtsbäumen bepflanzt ist
	cros	Kurzumtriebsplantagen	Kurzumtriebsplantagen sind Flächen, auf denen Baumarten mit dem Ziel baldiger Holzentnahme angepflanzt werden und deren Bestände eine Umtriebszeit von nicht länger als 20 Jahren haben.
4.C Grassland	Grünland	Summe aus Grünland i.e.S., Gehölzen und Hecken	
	gra1	Grünland im engeren Sinne	Grünland im engeren Sinn (Wiesen, Weiden, Mähweiden, Nassgrünland, Hutungen....)
	gra2	Gehölze	Flächen, die mit einzelnen Bäumen, Baumgruppen, Büschen und Sträuchern bestockt sind und nicht unter die Wald-, Grünland i.e.S-Definition fallen
	gra3	Hecken	Hecken bestehen aus ein- oder mehrreihig, linear dicht beieinanderstehenden Sträucher (vereinzelt auch Bäume)
4.D Wetlands	Feuchtgebiete	Summe aus Terrestrischen Feuchtgebieten, Natürlichen Gewässern, Torfabbau, Stehenden und Fließenden künstlichen Gewässern sowie Schifffahrtsgewässern	
	wett	Terrestrische Feuchtgebiete	Terrestrische Feuchtgebiete, die nicht unter eine der anderen Landnutzungskategorien fallen (z.B. naturnahe Moore)
	Wetl, wtr	Natürliche Gewässer	Natürliche Wasserflächen (wetl) und Wasserläufe (wetr)
	wetp	Torfabbau	Flächen auf organischen Böden zur Torfgewinnung
	wetb	Stehende künstliche Gewässer	Künstliche stehende Gewässer (Wasserflächen), wie Stauseen, Wasserreservoirs, Bagger- und Tagebauseen sowie Teiche, Speicher, künstliche Süßwasserbecken aller Art (Ausnahme: Abwasser-behandlungsanlagen)
	wetd	Fließende künstliche Gewässer	Künstliche, fließende Gewässer (Wasserläufe), wie Entwässerungsgräben der Wasserwirtschaft (Ausnahme: Entwässerungsgräben auf organischen Böden),
	wets	Künstliche Schifffahrtsgewässer	Hafenbecken an Binnengewässern und Kanäle für die Schifffahrt
4.E Settlements	Siedlungen	Summe aus Siedlungen und Straßen	
	set1	Gebäude und Freiflächen	Flächen zu Wohn-, Produktions- und Verkehrszwecken sowie innerstädtische Grünflächen und Flächen zur Freizeitgestaltung und Erholung
	set2	Straßen	Verkehrswege für die Nutzung von Straßenfahrzeugen und Fußgängern
	set3	Bahnkörper	Flächen, die für den Schienenverkehr erforderlich sind
	setp	Freiflächenphotovoltaikanlagen	Flächen auf denen Photovoltaik errichtet wurde
4.F Other Land	othl	Sonstiges Land	Vegetationslose, nicht bewirtschaftete Flächen

Grundlegende Elemente und Schritte bei der Erstellung des LULUCF-Inventars

1. Landnutzungsmatrix jährlich [$Area_{_ann}$]: Jährliche Berechnung der Gesamtfläche für die Unterkategorien „verbleibende Landnutzung“ und „Landnutzungsänderung“ für die Kategorien *Wald, Ackerland$_{annuell}$, Hopfen, Wein, Obst, Baumschulen, Weihnachtsbaum-kulturen, Kurzumtriebsplantagen, Grünland im engeren Sinn, Gehölze, Hecken, terrestrische Feuchtgebiete, natürliche Gewässer, fließende künstliche Gewässer, stehende künstliche Gewässer, Künstliche Schifffahrtsgewässer, Torfabbau, Gebäude und Freiflächen, Straßen, Bahnkörper, Freiflächenphotovoltaikanlagen* und *sonstiges Land*, für alle Zeitreihen unterteilt nach mineralischen und organischen Böden. Die Landnutzung und deren Flächenausweisung wurden explizit bestimmt für die Jahre 2010, 2015, 2020 und 2024. Für die Zeiträume zwischen diesen Jahren wurden die ermittelten Flächen den IPCC-Guidelines folgend (2006 IPCC Guidelines IPCC (2006a), Vol. 4 Ch. 3 Fig. 3.1) linear interpoliert (siehe Kapitel 6.3.1)**.** Für die Jahre vor 2010 wird mit Hilfe der Informationen von 2010 und 2015 zurück bis 1970 extrapoliert. Dazu werden zunächst für jede Landnutzungsänderung die Übergangswahrscheinlichkeiten ermittelt und mit diesen dann, in Fünfjahresschritten, im Inventarmodell stochastisch Punkte ausgewählt, denen dann die entsprechende Landnutzungsänderung unterstellt wird (Kapitel 6.3.1.2.2).

2. Emissionsfaktoren für Kohlenstoffvorräte, Lachgas- und Methanemissionen im Jahr der Landnutzungsänderung [$EF_{_ann}$]: Die Emissionsfaktoren für die verschiedenen Pools werden differenziert nach Landnutzungskategorie für jeden Erhebungspunkt individuell berechnet (Kapitel 6.1.2 ff). Die Kohlenstoffvorräte, Lachgas- und Methanemissionen pro Flächeneinheit sind über die Zeit nicht konstant.

3. Kohlenstoffvorratsänderungen für die jährlichen Landnutzungsänderungen [E_{ann}] werden nach der Formel

Gleichung 25:

$$E_{ann}\ [z.B.\ t\ C] = EF_{ann}\ [z.B.\ t\ C/ha] * Area_{ann}\ [ha]$$

berechnet, unter der Annahme, dass die gesamte Kohlenstoffvorratsänderung im Jahr der Landnutzungsänderung auftritt.

4. Einführung einer maximal zwanzigjährigen Übergangszeit [$Area_{20y}$] (effektive Übergangszeit): Die Berechnung der Landnutzungsmatrix beginnt 1970, um die Landnutzungsänderungsflächen vor dem eigentlichen Berichtszeitraum zu ermitteln (siehe Kapitel 6.3.1). Ermittelte Übergangsflächen werden der jeweiligen Landnutzungsänderungskategorie im Jahr des Übergangs zugeschlagen und verbleiben für maximal 20 Jahre in dieser Kategorie. Nach 20 Jahren werden die Flächen in die Verbleibkategorie der Zielnutzung überführt. Folgerichtig sind ab dem zweiten Berichtsjahr die Flächen in den Verbleibkategorien kleiner, in den Übergangskategorien größer, als in einer jährlichen Landnutzungsmatrix. Die Flächen sind in den CR-Tabellen und in Tabelle 338 and Tabelle 339 dargestellt. Sind Flächen innerhalb der 20 Jahre Übergangszeit erneut von Landnutzungsänderungen betroffen, werden diese unmittelbar zum Zeitpunkt der Umnutzung in die neue Übergangskategorie überführt und die Frist von 20 Jahren beginnt erneut.

5. Emissionsfaktoren [EF] und implizite Emissionsfaktoren [IEF] für die zwanzigjährige Übergangszeit [IEF_{20y}]: Diese Faktoren sind in den CR-Tabellen dargestellt. Es werden

jährliche Emissionsfaktoren in Emissionsfaktoren bzw. impliziete Emissionsfaktoren umgerechnet, die zu den Flächen der Landnutzungsmatrix mit zwanzigjähriger Übergangszeit passen. Die Konversion von EF_{ann} zu IEF_{20y} führt nach der Verrechnung mit den mineralischen und organischen Bodenflächen für die Emissionen aus Pools zu angepassten, also impliziten, IEFs. Auch wenn die absoluten Emissionen unverändert bleiben, werden die IEF beeinflusst von den jährlichen Nettoänderungen der Flächen und den unterschiedlichen IEF_{20y} der Mineralböden in den Übergangskategorien infolge von erneuten Landnutzungsänderungen innerhalb der 20-jährigen Übergangszeit. Dabei kommen folgende Formeln zur Anwendung:

a. Mineralböden: Die gesamte Kohlenstoffvorratsänderung infolge Landnutzungsänderung wird nach der Formel

Gleichung 26:

$$IEF_{20y} = EF_{ann} / 20$$

linear auf 20 Jahre Übergangszeit aufgeteilt; d.h. nur ein Zwanzigstel der Gesamtemission wird jährlich veranschlagt. Aufgrund der Einführung der effektiven Übergangszeit, muss der Kohlenstoffvorrat in den Mineralböden an jedem Aufnahmepunkt nachverfolgt und archiviert werden, da dieser, bei erneuter Landnutzungsänderung innerhalb der 20 Jahre Übergangsfrist, verrechnet mit dem neuen Zielwert, die Grundlage zur Berechnung des neuen EF_{ann} bildet (s. Kapitel 6.1.2.1.1).

b. Organische Böden I: In der Landnutzungskategorie Wald wird jedes Jahr die gleiche Menge CO_2, CH_4 und N_2O emittiert, in den Übergangskategorien genauso wie in der Verbleibkategorie der neuen Landnutzung. Dies gilt auch für die N_2O-Emissionen aller anderen Landnutzungskategorien; $IEF_{20y} = EF_{ann}$.

c. Organische Böden II: Für Flächen auf organischen Böden unter Ackerland (inkl. aller Subkategorien), Grünland (inkl. aller Subkategorien), Feuchtgebieten (inkl. aller Subkategorien) und Siedlungen werden die CO_2- und CH_4-Emissionen jährlich berechnet, mittels Responsefunktionen in Abhängigkeit vom Grundwasserspiegel (siehe Kapitel 6.1.2.2 ff).

d. Netto-Kohlenstoffvorratsänderung, Kohlenstoffzu- und -abnahme in der Biomasse annueller, krautiger Pflanzen und toter organischer Substanz ($Ackerland_{annuell}$, Hopfenanbau, Grünland i.e.S., Gewässer, Torfabbau): Alle Emissionen werden vollständig im Jahr der Landnutzungsänderung veranschlagt, nach der Formel:

Gleichung 27:

$$IEF_{20y} = E_{ann} / [Area_{20y}]$$

e. Netto-Kohlenstoffvorratsänderung, Kohlenstoffzunahme in Biomasse und toter organischer Substanz bei Landnutzungsänderung zu Wald, Wein- und Obstanbau, Weihnachtsbaumkulturen, Baumschulen, Kurzumtriebsplantagen, Gehölze, Feuchtgebiete und Siedlungen: Die gesamte Kohlenstoffvorratsänderung infolge Landnutzungsänderung wird nach der Formel $IEF_{20y} = EF_{ann}$ berechnet; d.h. jedes Jahr wird auf der gesamten Landnutzungsänderungsfläche die Kohlenstoffsenke veranschlagt.

f. N_2O aus dem Verlust von organischer Substanz in Mineralböden infolge von Landnutzungsänderung zu Acker: Es wird dieselbe Methode wie bei Kohlenstoffvorratsverlusten in Mineralböden verwendet. Die gesamte Kohlenstoffvorratsänderung infolge Landnutzungsänderung wird linear auf die 20 Jahre Übergangszeit aufgeteilt, nach der Formel

Gleichung 28:

$$IEF_{20y} = E_{ann} / Area_{20y}$$

D.h. nur ein Zwanzigstel der Gesamtemission wird jährlich veranschlagt. In Bezug auf erneute Landnutzungsänderung innerhalb der 20-Jahresfrist gilt ebenfalls dasselbe.

6. Gesamte Kohlenstoffvorratsänderungen für Flächen mit zwanzigjähriger Übergangszeit, werden gemäß nachfolgender Formel berechnet:

Gleichung 29:

$$E_{20y}\ [kt\ C] = IEF_{20y}\ [t\ C/ha] * Area_{20y}\ [kha]$$

7. Berechnung der CO_2-Emissionen aus den Kohlenstoffwerten durch Multiplikation der Kohlenstoffvorratsänderungen mit dem Faktor -44/12.

8. Berechnung der N_2O-Emissionen aus Stickstoffwerten durch Multiplikation der Stickstoffvorratsänderungen mit dem Faktor -44/28; die Umrechnung der N_2O-Werte in CO_2-Äquivalente erfolgt mit dem Faktor 265 (GWP 100 des IPCC AR5).

9. Umrechnung von CH_4-Emissionen in CO_2-Äquivalente erfolgt mit dem Faktor 28 (GWP 100 des IPCC AR5.

Die Submission 2024 wurde nach den Regelwerken

- 2006 IPCC Guidelines (IPCC, 2006a)
- 2013 Revised Supplementary Methods and Good Practice Guidance Arising from the Kyoto Protocol (IPCC, 2014)
- 2013 Supplement to the IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands (IPCC et al., 2014)
- 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (IPCC, 2019)

zusammengestellt. Maßgebliche Maßnahmen zur Inventarverbesserung, die in dieser Submission zur Anwendung kamen und zu Neuberechnungen führten sind in Kapitel 6.1.3.4.2 Tabelle 21 aufgeführt.

Abgesehen von diesen Änderungen kamen die Methoden, Datenquellen und Emissionsfaktoren des Vorjahres zur Anwendung.

Implementierung des Inventarmodells

Die Berechnungen zur Ermittlung aller Emissionen und inventarrelevanten Größen für den LULUCF-Sektor Deutschlands werden mittels eines digitalen Programmsystems gekoppelt mit einem kombinierten Geoinformations-/Datenbanksystem vollständig automatisiert umgesetzt.

Das Inventarmodell LULUCFmod (Version 1.4.0) ist als Package in R (The R Core Team, 2025) implementiert und nutzt stark die R-Packages data.table (Barrett et al., 2025) und Rcpp (Eddelbuettel & François, 2011), um eine ausreichende Performance zu gewährleisten. Als Interface für die LULUCF-Datenbank dienen die R-Packages DBI[79] (Wickham, Müller, et al., 2025) und RPostgres (Wickham, Ooms, et al., 2025). Die Software wird in einer internen Versionskontrollumgebung[80] verwaltet und fortlaufend gemäß den Anforderungen aus Reviews und dem Inventarplan weiterentwickelt.

6.1.2.1 Kohlenstoffemissionen aus Mineralböden (4.A bis 4.F)

6.1.2.1.1 Übersicht Methodik

Die Fläche der Mineralböden wurde als Differenz der Gesamtflächen und der Flächen organischer Böden berechnet (Kapitel 6.1.2.1.9).

Mineralbodenkohlenstoffvorratsänderungen infolge von Landnutzungsänderungen

Die Veränderungen der Kohlenstoff- bzw. Stickstoffvorräte in Mineralböden werden, gemäß Gleichung 2.25 in den 2006 IPCC Guidelines (IPCC, 2006a), als Differenz zwischen den jeweiligen Vorräten vor und nach den entsprechenden Landnutzungsänderungen berechnet. Die Emissionsfaktoren sind landesspezifisch. Für die Landnutzungskategorien „Wald, $\text{Ackerland}_{\text{annuell}}$„ und „Grünland“ wurden sie aus Karten der Kohlenstoff- und Stickstoffvorräte von Mineralböden Deutschlands entnommen. Die Karten basieren auf den Ergebnissen der Bodenzustandserhebungen für Wald und Landwirtschaft, die mittels unterschiedlicher rechnergestützter Methoden, in Abhängigkeit von zahlreichen Standortsfaktoren (z.B. Klima, Topographie, Geologie, Pedologie, Nutzung) flächendeckend, georeferenziert regionalisiert wurden (siehe Kapitel 6.4.2.5.3 sowie Kapitel 6.1.2.1.4 und 6.1.2.1.5).

Für die Landnutzungskategorie „Sonstiges Land“ und „Terrestrische Feuchtgebiete„ wurden die Kohlenstoffvorräte von Mineralböden bis 30 cm Bodentiefe aus den Daten der landwirtschaftlichen Bodeninventur ermittelt (siehe Kapitel 6.1.2.1.7). Für die Subkategorie „Gebäude und Freiflächen“ der Kategorie „Siedlungen“ wurden landesspezifische Kohlenstoffvorräte basierend auf den Ergebnissen der Bodenzustandserhebungen Wald und Landwirtschaft, in Abhängigkeit von der Richtung der Landnutzungsänderung, der Vornutzung und dem Versiegelungsgrad der Flächen, abgeleitet. Die Berichterstattung für Mineralböden folgt somit einem Tier 2 bzw. 3-Ansatz.

In der Kategorie „Feuchtgebiete“ (4.D) kommen Mineralböden in den Subkategorien „terrestrische Feuchtgebiete“ und „Gewässer“ vor. Bei Landnutzungsänderungen zu *Gewässern* werden keine Kohlenstoffvorratsänderungen angesetzt. Bei Landnutzungsänderungen von Gewässern zu anderen Landnutzungsformen wird, wenn bekannt, die Differenz zwischen Vorgewässer- und Zielnutzung veranschlagt, andernfalls keine Änderungen unterstellt.

Die Kohlenstoffvorratsänderungen in Mineralböden infolge von Landnutzungsänderungen werden für jede Übergangskategorie als Differenz des Kohlenstoffvorrates der Zielnutzungskategorie und des Kohlenstoffvorrates der Ursprungskategorie berechnet. Für „Wald, $\text{Ackerland}_{\text{annuell}}$„ und „Grünland“ werden die Zielwerte den jeweiligen Karten entnommen, die jährlich aktualisiert werden. Die Gesamtänderung wird gemäß IPCC-Default (IPCC, 2006a) auf einen Zeitraum von 20 Jahren linear verteilt. Die Summe der Kohlenstoffvorratsänderungen infolge von Landnutzungsänderungen in den Mineralböden Deutschlands errechnet sich für 20 Jahre dann wie folgt:

[79] DBI https://dbi.r-dbi.org/

[80] GitLab https://about.gitlab.com/

Gleichung 30:

$$\Delta C = C_{final} - C_{initial}$$

- ΔC: Veränderung des Kohlenstoffvorrates infolge Landnutzungsänderung in Mineralböden einer Übergangskategorie [t C (20*a)$^{-1}$]
- C_{final}: Mineralbodenkohlenstoffvorrat [t C] der Zielkategorie
- $C_{initial}$: Mineralbodenkohlenstoffvorrat [t C] der Ausgangskategorie

Ausnahme hiervon bilden Landnutzungsänderungen hin zu Siedlungen. In diesem Fall werden einmalig, nur im Jahr der Nutzungsänderung, 11 % des Kohlenstoffvorrates des Mineralbodens der Vornutzung als Emission veranschlagt (Kapitel 6.1.2.1.6).

Für die Berücksichtigung der 20-jährigen Übergangszeit wird die für die jeweilige Übergangskategorie ermittelte gesamte Vorratsänderung (EF_ann) durch 20 dividiert. So erhält man die impliziten Emissionsfaktoren für die Übergangskategorien für Landnutzungsänderungen aus einer Verbleibkategorie heraus (IEF_20y).

Gleichung 31:

$$\Delta C_i = \frac{(C_{final,i} - C_{initial,i})}{20}, i = 0$$

- ΔC_i: Veränderung des Kohlenstoffvorrates von Mineralböden im Jahr i nach einer Landnutzungsänderung [t C a^{-1}]
- $C_{final,\,i}$: Finaler Bodenkohlenstoffvorrat der Zielkategorie im Jahr i nach Landnutzungsänderung [t C]
- $C_{initial,\,i}$: Aktueller Bodenkohlenstoffvorrat der Ausgangskategorie [t C] im Jahr i nach Landnutzungsänderung
- i: Jahr nach Landnutzungsänderung (0 - 19)

Der jeweils neue aktuelle Bodenkohlenstoffvorrat ergibt sich dann aus der Summe des aktuellen Kohlenstoffvorrats im Boden der Ausgangsnutzung und der berechneten Vorratsänderung (ΔC_i + $C_{initial,\,i}$).

Von Landnutzungsänderungen betroffene Flächen verbleiben längstens 20 Jahre in einer Übergangskategorie. Dann haben sie den Kohlenstoffvorrat der Zielkategorie erreicht und werden in die entsprechende Verbleibkategorie überführt. Die Einführung der effektiven Übergangszeit bedingt, dass eine von Landnutzungsänderung betroffene Fläche unmittelbar zum Zeitpunkt der jeweiligen Nutzungsänderung in die neue, entsprechende Übergangskategorie überführt wird. Die ist unabhängig davon, wie lange sie schon in einer Übergangskategorie geführt wurde. Da die Kohlenstoffvorratsänderung nach o.a. Gleichung vom Ausgangs- und Zielvorrat abhängig ist, muss der Kohlenstoffvorrat von Mineralböden an allen Punkten zu jeder Zeit bekannt sein. Während der Zielvorrat (C_{final}) durch die entsprechende Bodenkarte vorgegeben wird, ist der Ausgangsvorrat variabel und stellt den Wert dar, der bis zur erneuten Landnutzungsänderung in der vorhergehenden Übergangskategorie erreicht wurde. Die Berechnung der Kohlenstoffvorratsänderung erfolgt auch für vorzeitig aus Übergangskategorien scheidenden Flächen nach den o.a. Algorithmen, wobei $C_{initial}$ dann der aktuelle, bis zur erneuten Landnutzungsänderung in der vorhergehenden Übergangskategorie

erreichte Kohlenstoffvorrat im Mineralboden am Detektionspunkt ist. Die so berechnete Kohlenstoffvorratsänderung wird wiederum auf 20 Jahre verteilt: ΔC/20 ergibt somit die jährliche Änderungsrate, die dem aktuellen initialen Bodenkohlenstoffvorrat dann bis zu einer erneuten Landnutzungsänderung bzw. dem Übergang in die Verbleibkategorie zugeschlagen wird. Die impliziten Emissionsfaktoren sind letztlich das Mittel aller IEF_20y einer Übergangskategorie in einem Berichtsjahr.

Mineralbodenkohlenstoffvorratsänderungen infolge von Landnutzung

In den Verbleibkategorien der Landnutzungskategorien *Wald*, *Ackerland* und *Grünland* werden die Kohlenstoff- und Stickstoffvorratsänderungen im Oberboden (0-30 cm) von Mineralböden mit Prozessmodellen berechnet,

- im Wald ab dem Jahr 2009, auf jährlicher Basis, mit dem Modell Yasso. Die daraus resultierenden Bodeneigenschaftskarten werden jährlich flächendeckend aktualisiert (Kapitel 6.4.2.5 ff).
- im *Ackerland* und *Grünland* mit dem Modell RothC (Coleman & Jenkinson, 1999); Beschreibung des Modells und der Methodik s.u.); die Berechnungen erfolgen für die gesamte Zeitreihe, inklusive fortlaufender Anpassung der Bodenkohlenstoffvorratskarten.

Bei Mineralböden der Landnutzungskategorien 4.D, 4.E und 4.F wird bei gleichbleibender Nutzung unterstellt, dass die Kohlenstoffein- und -austräge in die Böden gleich groß, die Systeme somit im Gleichgewicht sind. Bezüglich der Subkategorie *Terrestrische Feuchtgebiete* begründet sich dies in dem Umstand, dass diese Flächen zu Produktionszwecken nicht bewirtschaftet werden, Flächen der Landnutzungskategorie *Sonstiges Land* per definitionem nicht bewirtschaftet sind. Bezüglich Siedlungsflächen findet sich die Begründung in Kapitel 6.1.2.1.6. In den CRF sind die entsprechenden Felder mit NA gekennzeichnet (gemäß Forderung des ERT 2021).

Berechnung der Kohlenstoffvorratsänderungen in Mineralböden unter Acker- und Grünland mit dem Prozessmodell RothC

Für die Berechnung der Bodenkohlenstoffvorratsänderungen im Oberboden (0-30 cm) deutscher Acker- und Grünlandflächen in Abhängigkeit von Landnutzung/Bewirtschaftung, Bodeneigenschaften und Klimabedingungen wurde das Modell RothC (Coleman & Jenkinson, 1999) mit kalibrierten Partitionierungskoeffizienten nach (Dechow et al., 2019) verwendet. Letztere beschreiben die Aufteilung der Kohlenstoffeinträge in die Pools DPM („decomposable plant material“), RPM („resistant plant material“) und HUM („humified organic material“), wodurch die Auswirkungen von Kohlenstoffeinträgen aus ober- und unterirdischen Ernterückständen und verschiedenen Arten von organischen Düngern gezielt berücksichtigt und die Abbaubarkeit der Kohlenstoffeinträge differenziert erfasst werden können. Das Modell ist im R-Paket sorcering (Scherstjanoi & Dechow, 2025) innerhalb der R-Softwareumgebung (v.4.5.1, R Core Team 2025) implementiert. Das Modell wurde an Langzeitexperimenten und Bodendauerbeobachtungsflächen evaluiert (Dechow et al., 2019),(Riggers et al., 2019).

Grundlage der Modellierung ist die Bodenkarte der organischen Kohlenstoffvorräte deutscher Acker- und Grünlandflächen (Sakhaee et al., 2022) unter Verwendung der Daten der ersten deutschen landwirtschaftlichen Bodeninventur ((Jacobs et al., 2018); (Poeplau et al., 2020); siehe Kapitel 6.1.2.1.4 und Kapitel 6.1.2.1.5). Die Zuordnung der Böden und der Landnutzung erfolgte für den Zeitraum von 1990 bis 2024 auf dem 100 x 100 m Raster der Landnutzungsmatrix für die Emissionsberichterstattung; ebenso die punktuelle Modellierung der Veränderungen des Bodenkohlenstoffs der Dauerkulturböden.

Ausgehend von der originalen Bodenkarte, die die SOC-Bestände der Acker- (Kapitel 6.1.2.1.4; Abbildung 66 und Grünlandböden (Kapitel 6.1.2.1.5;Abbildung 67) im Jahr 2014 repräsentiert, wurde, durch inverse Modellierung mit RothC, für jeden Punkt ein anfänglicher C-Vorrat für das Jahr 1970 abgeleitet. Die inverse Ableitung der anfänglichen Bodenkohlenstoffbestände erfolgte in Abhängigkeit von Wetterbedingungen, Texturinformationen, Kohlenstoffeinträgen aus Ernterückständen und organischer Düngung sowie der Annahme, dass sich die konzeptionellen Pools von RothC 1970 im Gleichgewicht befanden. Auf Grundlage der für das Jahr 1970 ermittelten SOC-Vorräte wurden die jährlichen Werte für den Zeitraum 1990 bis 2024 durch Anwendung des Modells im Vorwärtsmodus berechnet.

Als Input benötigt das Modell RothC

1. Wetterdaten: Niederschlag, Lufttemperatur und potentielle Evapotranspiration

    a. Diese Daten wurden in monatlicher Auflösung aus Rasterkarten des Deutschen Wetterdienstes (DWD Climate Data Center, 2020a, 2020b, 2020c, 2020d) für die BZE-LW I - Standorte extrahiert.

2. Bodendaten: Initiale Bodenkohlenstoffvorräte, Tongehalte und inerter Bodenkohlenstoffpool

    a. Diese entstammen der ersten Bodenzustandserhebung Landwirtschaft (BZE-LW I) (Poeplau et al., 2020). Der inerte Bodenkohlenstoffpool wurde nach (Falloon & Smith, 2000) berechnet.

3. Managementdaten: Fruchtfolgen, Zwischenfrüchte, C-Inputs aus Ernteresiduen und organischer Düngung

    a. Fruchtfolgen von Hauptkulturen wurden auf der Grundlage von InVekos-Daten, Fernerkundungsdaten (Schwieder et al., 2024);(Tetteh et al., 2024) und Agrarstatistiken (Statistisches Bundesamt, FS 3, R 3) unter Verwendung eines Bayesschen-Ansatzes abgeleitet. Wobei den Agrarstatistiken auf Kreisebene die jährlichen Anteile der Kulturarten entnommen und aus InVekos- und Fernerkundungsprodukten (Schwieder et al., 2024); (Tetteh et al., 2024) Wahrscheinlichkeiten abgeleitet wurden, die die Verteilung der Kulturarten festlegten, während Daten aus InVekos- und Fernerkundungsprodukten (Tetteh et al., 2024); (Schwieder et al., 2024) der Definition von jahres- und punktspezifischen Eintrittswahrscheinlichkeiten spezifischer Fruchtarten dienten.

    b. Die fruchtartenspezifischen Anteile von Verbleib oder Abfuhr von Ernteresiduen wurde bundeslandspezifisch aus den erhobenen Managementdaten der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft zum Ernteresiduenmanagement bestimmt. Gemäß dieser Anteile wurden Abfuhr bzw. Einarbeitung der Ernteresiduen zufällig pro Landkreis verteilt.

    c. Die Definition fruchtartenspzifischer Wachstumszeiträume landwirtschaftlicher Kulturen basiert auf Beobachtungen des Deutschen Wetterdienstes im gesamten Bundesgebiet (Referenzphänologie), in monatlicher Auflösung (DWD, 2024b).

    d. Die C-Inputs aus Ernteresiduen wurden auf Basis allometrischer Funktionen (Franko et al., 2011) quantifiziert, die durch einen Ansatz zur Unterscheidung zwischen ober- und unterirdischen Einträgen (Dechow et al., 2019) mit Ernteerträgen als Input erweitert wurden.

e. Die Quantifizierung des Anteils an Zwischenfruchtkategorien auf Kreisebene erfolgte mittels Agrarstatistiken. Abhängig von den abgeleiteten Hauptkulturfruchtfolgen wurden die Zwischenfrüchte zufällig auf Standorte mit geeigneten Zeitfenstern für deren Anbau verteilt. Die in den beiden Bodenzustandserhebungen gemeldeten Zwischenfruchtarten wurden den Zwischenfruchtkategorien der Agrarstatistik zugeordnet. Kulturartenspezifische Informationen über die Rückstandsbewirtschaftung von Zwischenfruchtarten aus der deutschen Bodeninventur wurden verwendet, um die Verteilung der Rückstandsbewirtschaftungspraktiken zu definieren. Der Kohlenstoffeintrag aus den Rückständen von Zwischenfrüchten wurde auf der Grundlage der nationalen Durchschnittswerte der ober- und unterirdischen Biomassen von Zwischenfruchtarten (Entrup et al., 2018) quantifiziert.

f. Die auf Kreisebene mit dem Modell Py-GASEM (Vos et al., 2026) ermittelten Mengen an organischem Dünger wurden anhand der von (Vos et al., 2026) ermittelten Daten zur Düngerausbringung auf Gemeindeebene auf die landwirtschaftlichen Flächen verteilt. Die Verteilung der organischen Düngemittelausbringungsmengen auf Ackerland und Grünland wurde auf der Grundlage der gemeldeten Düngemittelausbringungsmengen in BZE 1 und 2 angepasst.

g. Da für die Zeiträume 1970 - 1990 und 2024 - 2055 keine Bewirtschaftungsdaten zur Verfügung standen, wurden die jährlichen C-Inputs geschätzt, indem die durchschnittlichen Kohlenstoffeinträge von 1990 - 2024 bzw. 2020 - 2024 unterstellt wurden.

h. Bei Grünlandflächen erfolgte die Berechnung der C Inputs aus Ernteresiduen auf Basis der Grünlandkategorie (Wiesen, Weiden, Mähweiden), der Anzahl der Schnitte sowie Zeitraum und Intensität der Beweidung (Jacobs et al., 2020).

Abschätzung der Kohlenstoffvorratsänderung in Mineralböden unter Ackerland

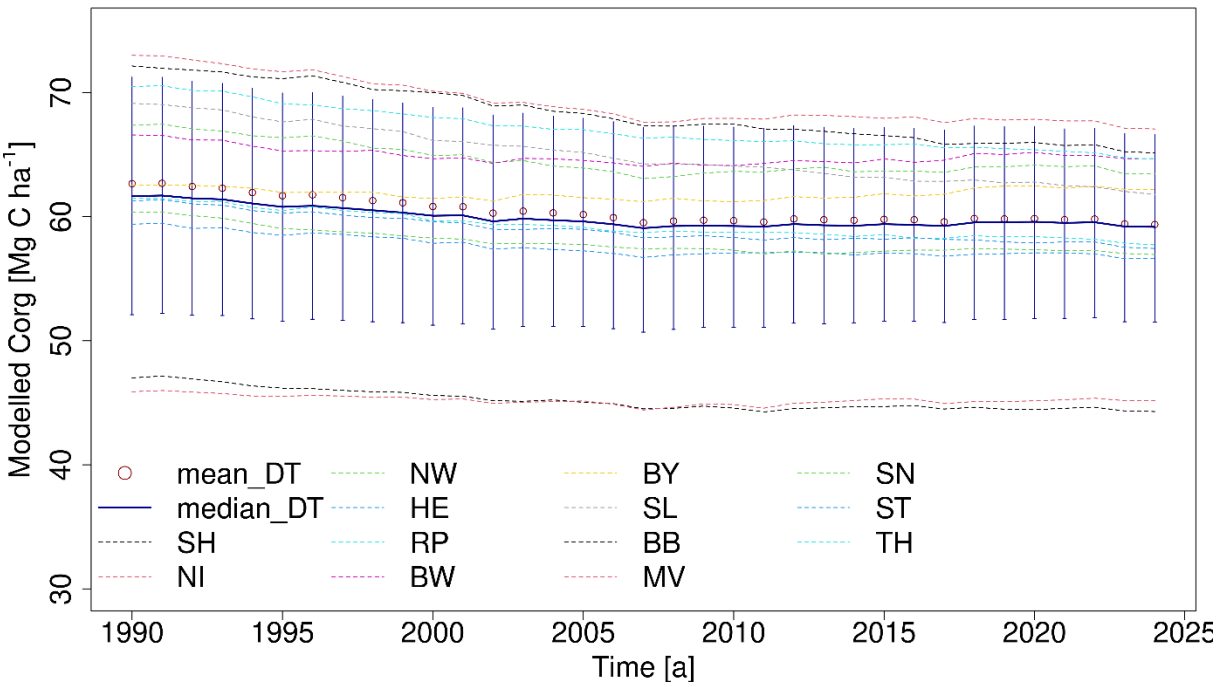
Gemäß der Simulation mit RothC nehmen die C_{org}-Vorräte zwischen 1990 und 2024 unter dauerhafter Ackernutzung mit einer durchschnittlichen Rate von 0,1 Mg C ha^{-1} a^{-1} ab (Tabelle 321). Die Zeitreihen der modellierten C_{org}-Vorräte zeigen höhere Verluste zu Beginn des Simulationszeitraums (Abbildung 56); diese schwächen sich zwischen 2005 und 2010 ab, um dann durchschnittlich auf einem in etwa gleichbleibenden Niveau zu verlaufen (Tabelle 321; Abbildung 56). Der Trend ist dabei nicht einheitlich und variiert zwischen einzelnen Bundesländern z.T. stark.

Tabelle 321 Durchschnittliche Kohlenstoffvorräte von Mineralböden unter Ackerland [t C ha^{-1}] und deren Veränderung in der Zeit sowie die daraus resultierenden Änderungsraten [t C ha^{-1} a^{-1}] sowie die Anzahl der der Berechnung zugrunde liegenden Punkte unter Ackerland

	Durchschnittlicher Bodenkohlenstoffvorrat [t C ha^{-1}]			N ≙ ∑Fläche [ha]	Durchschnittliche Kohlenstoffvorratsänderungsrate (ΔC t^{-1}) [t C ha^{-1} a^{-1}]		
	1990	2015	2024		1990 - 2024	1990 - 2015	2015 - 2024
SH	72,71	66,68	65,24	566.593	-0,22	-0,25	-0,16
NI	73,48	68,07	67,14	1.648.589	-0,19	-0,23	-0,1
NW	67,74	63,62	63,45	986.336	-0,13	-0,17	-0,02

	Durchschnittlicher Bodenkohlenstoffvorrat			N ≙ ∑Fläche	Durchschnittliche Kohlenstoffvorratsänderungsrate ($\Delta C\ t^{-1}$)		
HE	59,54	56,92	56,62	464.115	-0,09	-0,11	-0,03
RP	61,7	58,41	57,86	338.271	-0,11	-0,14	-0,06
BW	66,87	64,34	64,68	780.518	-0,06	-0,11	0,04
BY	62,64	61,56	62,21	1.768.074	-0,01	-0,04	0,07
SL	69,47	63,17	62,04	27.427	-0,22	-0,26	-0,13
BB	47,14	44,68	44,35	922.081	-0,08	-0,1	-0,04
MV	46,05	45,18	45,17	928.535	-0,03	-0,04	0
SN	60,39	57,11	57,03	612.092	-0,1	-0,14	-0,01
ST	61,42	58,26	57,53	940.414	-0,11	-0,13	-0,08
TH	70,65	65,8	64,74	577.116	-0,17	-0,2	-0,12
DT	**62,9**	**59,71**	**59,42**	**10.560.161**	**-0,1**	**-0,13**	**-0,03**

Abbildung 56: Zeitreihen der modellierten C_{org}-Vorräte [t C ha^{-1}] für Deutschland [DT] und die einzelnen Bundesländer

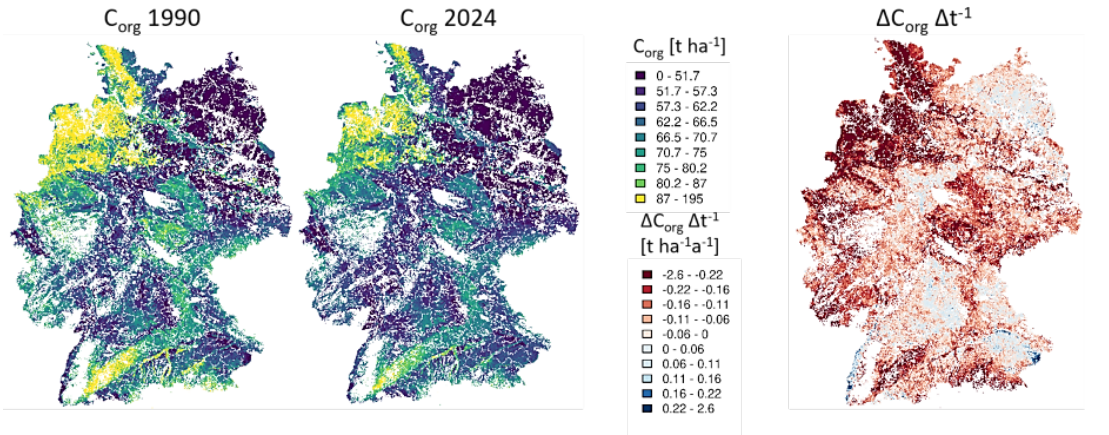


Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

Der Kurvenverlauf hat mehrere Ursachen:

- Ungleichgewicht zwischen den SOC-Vorräten der grundlegenden SOC-Karte für Ackerflächen (Sakhaee et al., 2022) und den quantifizierten Kohlenstoffeinträgen. Durch die inverse Modellierung wird daher für die meisten Standorte ein höherer, ursprünglicher SOC-Vorrat für das Jahr 1970 geschätzt, der den allgemeinen C_{org}-Verlust zwischen 1990 und 2014 nach sich zieht. Da die modellierten C_{org}-Veränderungen mit den regionalisierten C_{org}-Werten der Karte für das Jahr 2014 korrelieren, weisen Gebiete mit vergleichbar hohen bzw. niedrigen C_{org}-Vorräten ähnliche Verlust- bzw. Zugewinnraten auf (Abbildung 57).

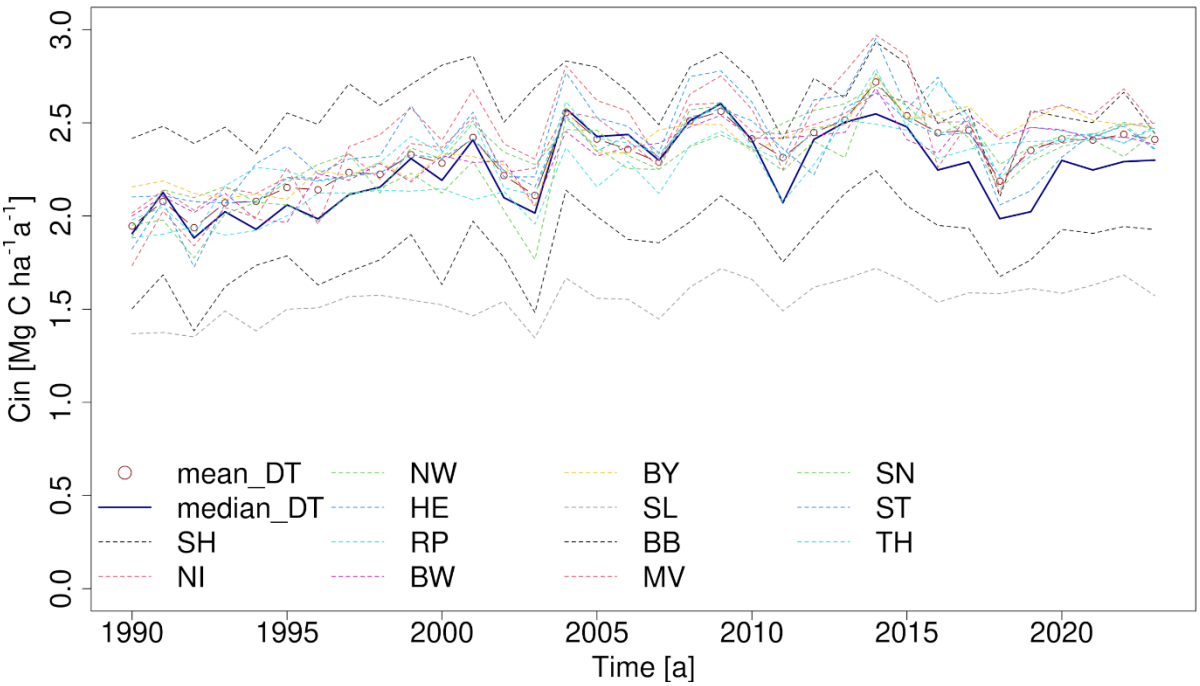
Abbildung 57: Modellierter C_{org}-Vorrat für 1990 und 2024 [t C ha^{-1}] sowie die Änderungsraten zwischen diesen Jahren [t C ha^{-1} a^{-1}]



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

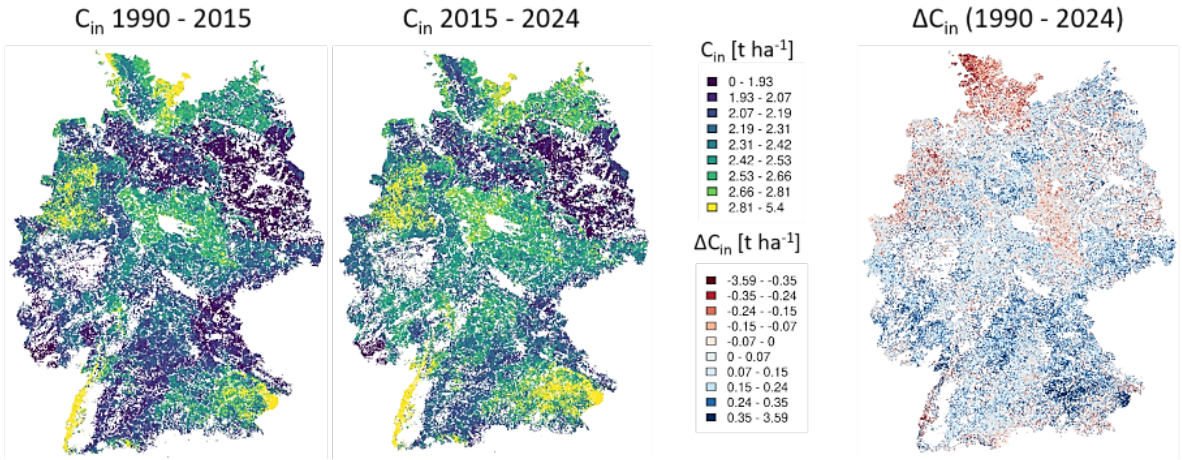
- Kohlenstoffeinträge aus Ernterückständen der Hauptkulturen nehmen von 1990 – 2005 zu, um dann stark variierend auf in etwa gleichbleibendem Niveau zu verlaufen (Abbildung 58;Abbildung 59).

Abbildung 58: Geschätzter Kohlenstoffeintrag durch Hauptfrüchte [Mg C ha^{-1} a^{-1}] für Deutschland (DT) und die Bundesländer



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

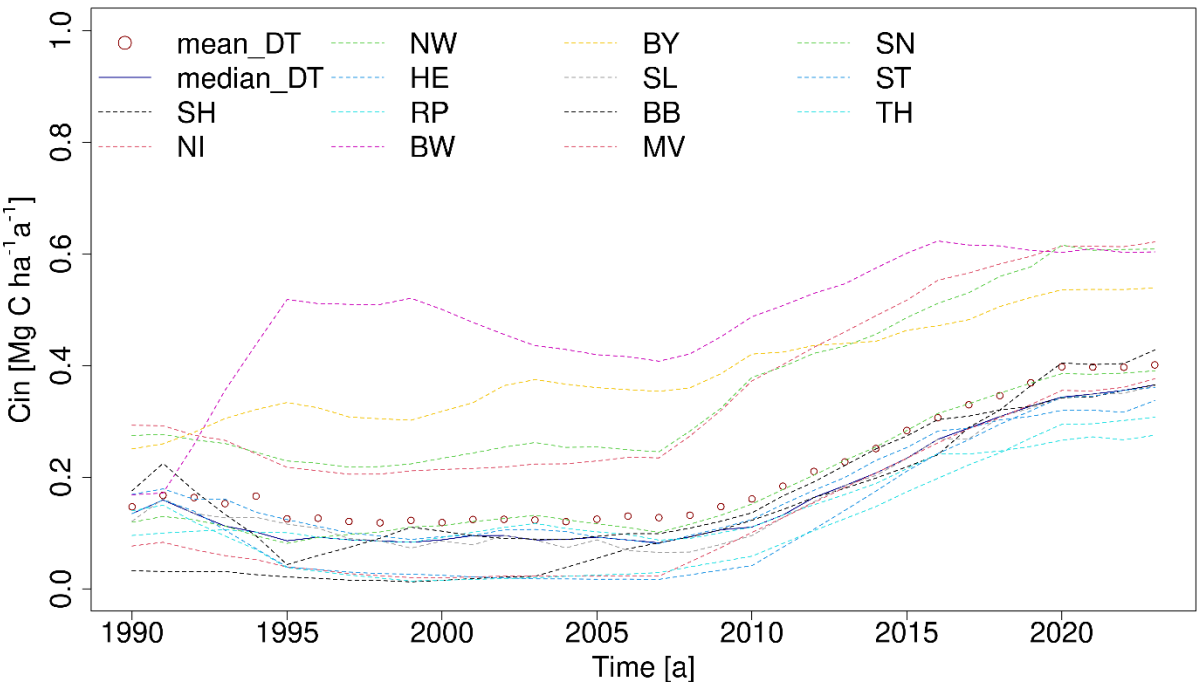
Abbildung 59: Geschätzter durchschnittlicher Kohlenstoffeintrag durch Hauptfrüchte [t C ha^{-1} a-1] vor und nach 2014



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

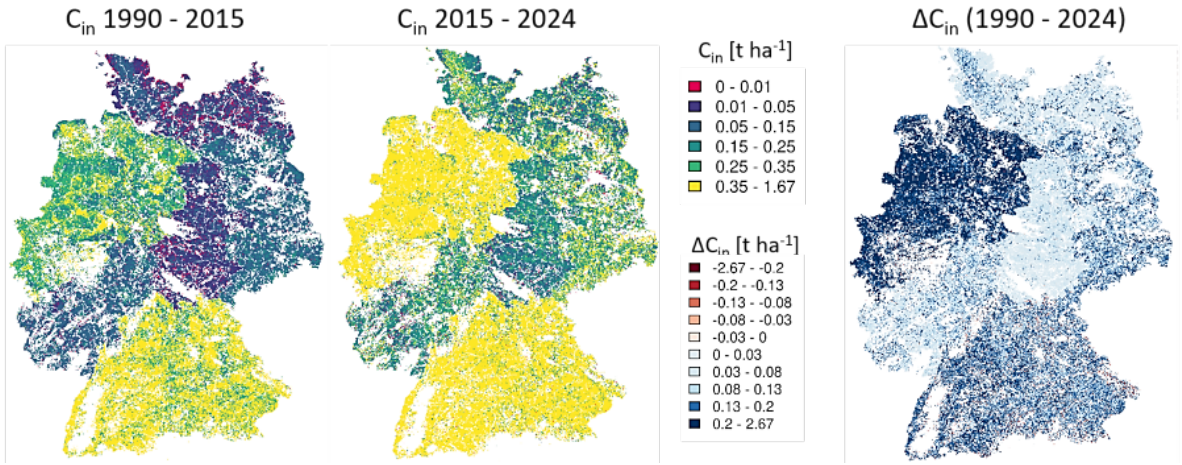
- Deutliche Zunahme der Kohlenstoffeinträge aus dem Zwischenfruchtanbau seit 2007, nach anfänglich (1990 – 2007) in etwa konstanten Werten (Abbildung 60; Abbildung 61). In RothC wirkt sich die Zunahme des Zwischenfruchtanbaus zusätzlich auf die Bodenkohlenstoffmineralisierungsrate aus, da durch die Zwischenfrucht der Zeitraum der Bodenbedeckung verlängert wird. Aus diesen Gründen zeigen die modellierten Zeitreihen der organischen Kohlenstoffvorräte im Boden einiger Bundesländer von 2007 an einen sprunghaften Anstieg (Abb. 1). Auch ist dies die Hauptursache für die Entwicklung der Bodenkohlenstoffvorräte in der Zeit (Abbildung 56).

Abbildung 60: Geschätzter durchschnittlicher Kohlenstoffeintrag durch Zwischenfruchtanbau [Mg C ha^{-1} a^{-1}] für Deutschland (DT) und die Bundesländer



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

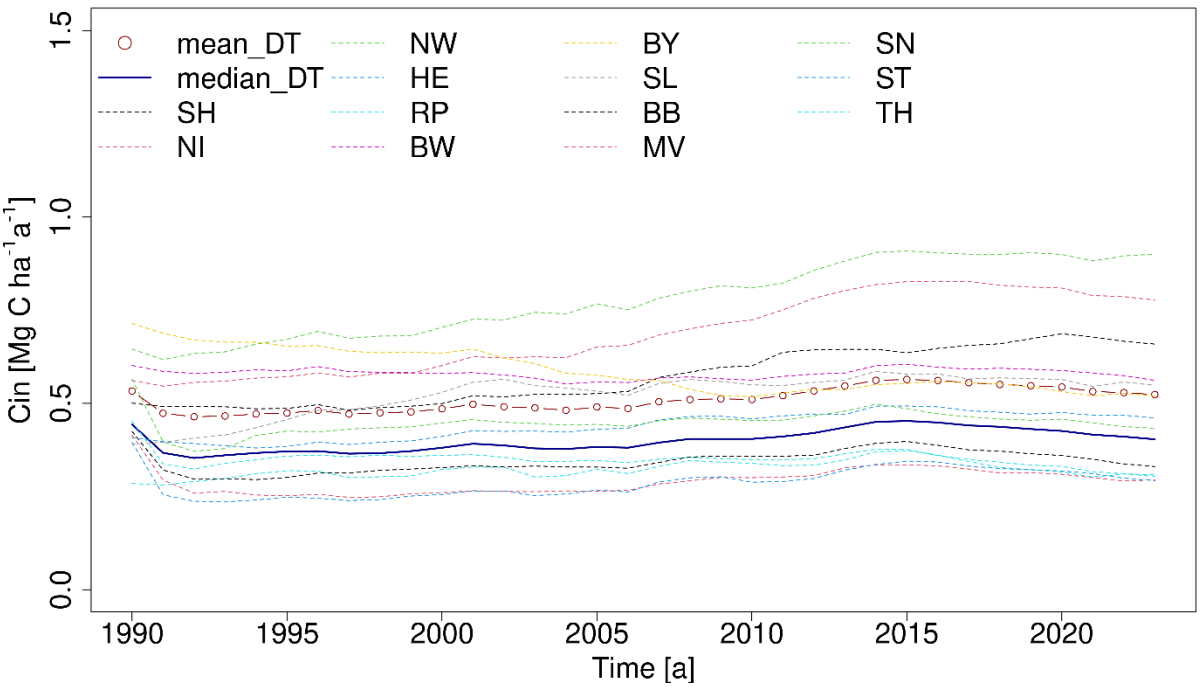
Abbildung 61: Geschätzter Kohlenstoffeintrag durch Zwischenfruchtanbau [t C ha^{-1}]



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

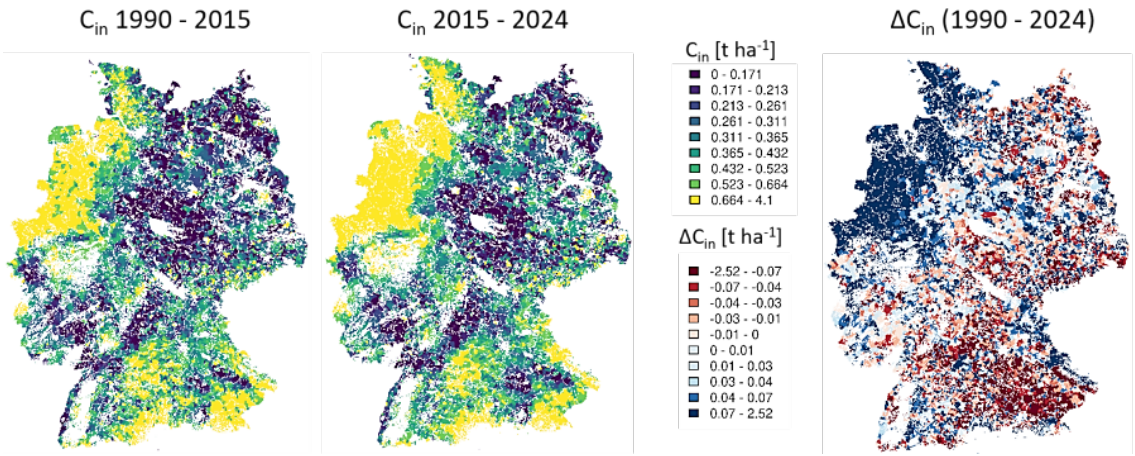
- Kohlenstoffeinträge aus organischer Düngung zeigen nach einem kurzfristigen Abfall zu Beginn des Berichtszeitraums (Zusammenbruch der Tierhaltung in den ostdeutschen Gebieten nach der Wiedervereinigung) in der Folge im Durchschnitt eine sanfte Zunahme s(zunehmende Mengen an ausgebrachten Gärresten aus Biogasanlagen) (Abbildung 62;Abbildung 63)

Abbildung 62: Zeitreihen des durchschnittlichen Kohlenstoffeintrags [Mg C ha^{-1}] durch organische Düngung in mineralische Ackerböden Deutschlands (DT) und seiner Bundesländer



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

Abbildung 63: Geschätzter durchschnittlicher Kohlenstoffeintrag durch organische Düngung [t C ha^{-1}]



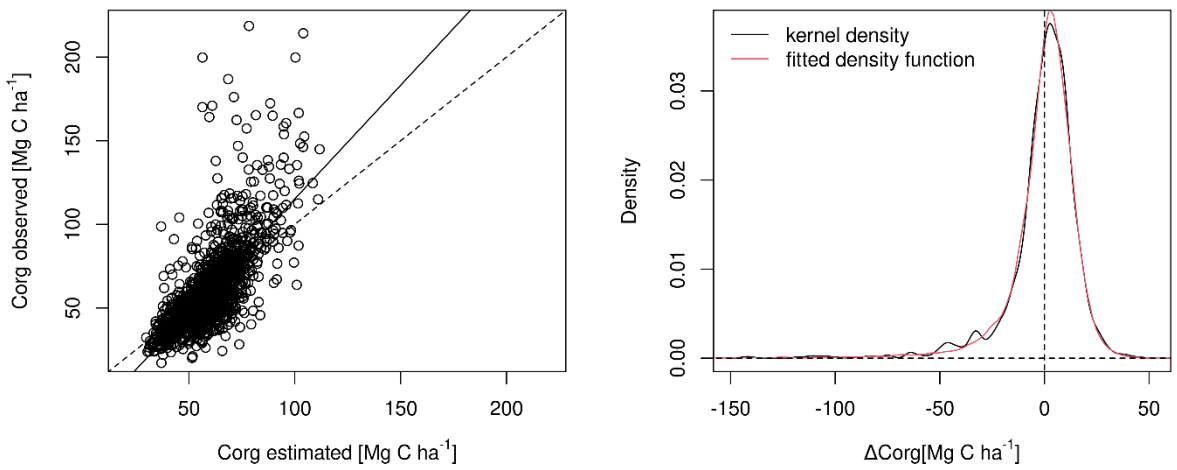
Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

Bewertung der Datengrundlagen, des verwendeten Modells und Quantifizierung der Unsicherheit

Unsicherheit Bodenkohlenstoffvorrat der Mineralböden unter Ackernutzung

Die regionalisierte Karte der C_{org}-Bestände von Böden unter Ackerland, die im Rahmen der Modellierung als Grundlage für das Jahr 2014 diente, wurde mit den beobachteten C_{org}-Vorräten von nahegelegenen BZE-Punkten unter Ackerlandnutzung verglichen. Die regionalisierten SOC-Vorräte und die Beobachtungen zeigen eine gute Übereinstimmung. Es besteht jedoch die Tendenz, niedrige SOC-Vorräte zu überschätzen und hohe SOC-Vorräte zu unterschätzen (siehe Abbildung 64). Dies führt zu einer verzerrten Dichteverteilung der Regionalisierungsfehler. Die Simulation hat gezeigt, dass insbesondere Böden mit hohen C_{org}-Vorräten dazu neigen, C_{org} zu verlieren.

Abbildung 64: Links: Regionalisierte C_{org}-Vorräte [Mg C ha^{-1}] im Vergleich mit den beobachteten C_{org}-Vorräten [Mg C ha^{-1}] von BZE-Beprobungspunkten. Rechts: Kernel-Dichte und angepasste Dichtefunktion der Unterschiede zwischen beobachteten und geschätzten C_{org}-Vorräten [Mg C ha^{-1}]

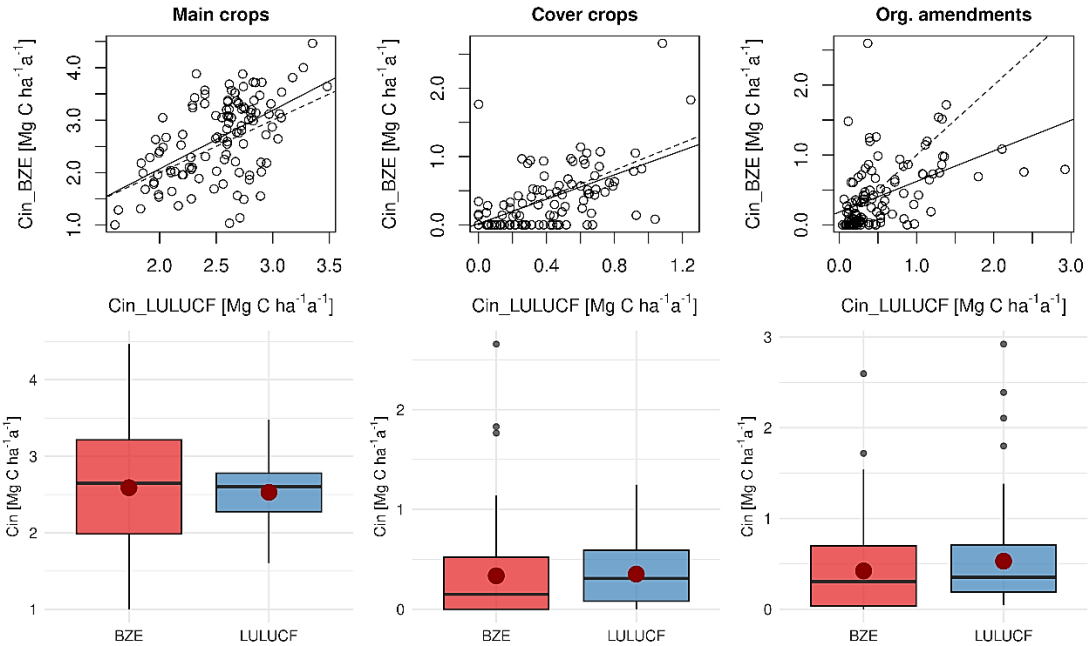


Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

Unsicherheit der Modelleingangsdaten

Die mittels der o.a. Methoden quantifizierten Kohlenstoffeinträge wurden mit Kohlenstoffeinträgen aus einem Datensatz von 124 Ackerlandstandorten der Bodeninventur Landwirtschaft verglichen. Diese 124 Standorte waren bereits zweimal beprobt worden (Intervall mind. 10 Jahre); außerdem war für jeden Standort ein vollständiger Satz von Bewirtschaftungsdaten verfügbar (die Bewirtschaftungsdaten wurden mittels Fragebögen erhoben und umfassten Anbaufolgen, Ernteerträge, Informationen zum Ernteresiduenmanagement und Informationen über Zeitpunkt, Art und Menge der organischen Düngung, über den gesamten Beprobungszeitraum, beginnend mindestens sechs Jahre vor der ersten Beprobung). Die abgeleiteten Kohlenstoffeinträge korrelieren mit denen der Bodeninventur; auch die Durchschnittswerte der Proben stimmen überein (Abbildung 65). Allerdings weisen die abgeleiteten, auf die Standorte heruntergebrochenen Kohlenstoffeinträge eine geringere Variabilität auf, als die für die Standorte der Bodeninventur ermittelten.

Abbildung 65: Vergleich der durch Downscaling (LULUCF) abgeleiteten Kohlenstoffeinträge und der Kohlenstoffeinträge, die an BZE-Standorten aus standortspezifischen Managementinformationen abgeleitet wurden



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

Unsicherheit des Modells bzw. der Bodenkohlenstoffvorratsänderung

Zur Quantifizierung der Gesamtunsicherheit der mittels des Modells geschätzten Bodenkohlenstoffvorratsänderungen wurden Unsicherheiten der Modellsteuerdaten und Unsicherheiten des Modellansatzes im Rahmen einer Monte-Carlo-Analyse berücksichtigt. Dies umfasste folgende Schritte:

1. Die Unsicherheit des Modellansatzes, bestehend aus dem RothC-Modell, kalibrierten Verteilungskoeffizienten (Dechow et al., 2019) und allometrischen Funktionen (Franko et al., 2011), wurde über ein Modellensemble mit Parameterunsicherheiten beschrieben. Dies ist im Grunde ein Ensemble, dessen Ensemblemitglieder sich lediglich durch die gewählten Parameter für das gleiche Modell unterscheiden. Derartige Ansätze wurden bereits zur

Schätzung der Vorhersageunsicherheiten von Klimamodellen (Murphy et al., 2007) und Erntemodellen (Tao et al., 2018) verwendet. Der für die Unsicherheitsbeschreibung gewählte Parameter moduliert die Dekompositionsrate des Modells RothC. Dessen Unsicherheitsverteilung wurde an einem Datensatz schwedischer Langzeitexperimente (7 Standorte und 32 Varianten pro Standort s. (Dechow et al., 2019)) so ermittelt, dass die beobachteten Trends der Bodenkohlenstoffentwicklung in 95 % der Fälle von den Intervallen der modellierten Trends des Ensembles abgedeckt wurden.

2. Die Unsicherheit der Modellsteuergrößen Bodenkohlenstoffvorrat im Jahr 2014, Bodenkohlenstoffeintrag und Modifikatoren der Dekompositionsraten wurden über Wahrscheinlichkeitsfunktionen beschrieben, die über die Differenz regionalisierter Daten und in der Bodenzustandserhebung erhobener Daten erstellt wurden. Die Quantifizierung der Simulationsunsicherheit basierte auf Monte-Carlo-Simulationen für eine Teilmenge von 0,5 % der über Deutschland verteilten Dauerkulturflächen. In diesen Monte-Carlo-Durchläufen wurden die Auswirkungen der Unsicherheit der Modelleingangsdaten und die Unsicherheit des verwendeten Modells berücksichtigt.

Diese Untersuchungen zur Modellunsicherheit ergaben ein 95 %-Konfidenzintervall für die Bodenkohlenstoffveränderung zwischen -0,46 t C ha^{-1} a^{-1} und 0,14 Mg C ha^{-1} a^{-1}, bei einer durchschnittlichen Veränderungsrate von -0,1 t C ha^{-1} a^{-1} (s. Tabelle 321). Die Ergebnisse zeigen, dass die Wahl des Modells einen stärkeren Effekt auf die modellierten C_{org}-Bestände und -Veränderungen hat als der Fehler der räumlich aggregierten Modelleingangsdaten; der Effekt von Fehlern in den Modelleingangsdaten auf den räumlich aggregierten Modelloutput ist auf Landesebene marginal. Dies stimmt mit den Erkenntnissen von (Grosz et al., 2017) überein, die in einer Modellvergleichsstudie für das Bundesland Nordrhein-Westfalen zu gleichen Ergebnissen kamen (Unsicherheiten der Bodenkohlenstoffvorräte bzw. der Bodenkarte s. Kapitel 6.1.2.1.4; Tabelle 322).

Abschätzung der Kohlenstoffvorratsänderung in Mineralböden unter Grünland

Während die Kohlenstoffvorratsänderungen von Mineralböden unter Ackerland für jeden einzelnen Standort individuell berechnet und ausgewiesen werden, ist dies aufgrund der deutlich schlechteren Datenlage für Mineralböden unter Grünland derzeit noch nicht möglich. Deshalb wurde für Grünlandböden nur ein landnutzungsspezifischer Trend bezüglich der Kohlenstoffvorratsänderung in Mineralböden infolge Grünlandnutzung/-bewirtschaftung berechnet. Hierfür wurden nur Standorte der BZE_LW I berücksichtigt, für die adäquate Managementdaten für einen Zeitraum von mindestens 6 Jahren vorlagen. Daher konnte das Modell RothC nur auf 387 Grünlandstandorte der 724 Standorte der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft (BZE_LW I) (Poeplau et al., 2020) angewendet werden. Der landnutzungsspezifische Trend der Kohlenstoffvorratsänderungen in 0 – 30 cm Bodentiefe der Mineralböden ergibt sich dann für alle Standorte einer Landnutzungskategorie aus dem Mittelwert der Differenzen der modellierten Bodenkohlenstoffvorräte, abzüglich der im Rahmen der BZE_LW I gemessenen, über einen Zeitraum von 10 Jahren (s. Gleichung 32).

Gleichung 32

$$\Delta C_{LUC} = \frac{\left(\frac{\sum_{i_{LUC}=1}^{i_{LUC}x} (C_{iLUC}t2 - C_{iLUC}t1)}{10}\right)}{n_{iLUC}}$$

- ΔC_{LUC} : Mittelwert der jährlichen Kohlenstoffvorratsänderung [t C $ha^{-1}a^{-1}$] in 0 – 30 cm Bodentiefe aller Mineralbodenstandorte einer spezifischen Landnutzung der BZE_LW I

- i_{LUC} : Standort unter spezifischer spezifischer Landnutzung (Ackerland oder Grünland)
- $C_{iLUC}t1$: Kohlenstoffvorrat [t C ha^{-1}], gemessen im Mineralboden, zum Zeitpunkt (t1) der Beprobung im Rahmen der BZE_LW1
- $C_{iLUC}t2$: Kohlenstoffvorrat [t C ha^{-1}], im Mineralboden eines Standortes unter spezifischer Landnutzung, modelliert für den Zeitpunkt t1 + 10 a
- n_{iLUC} : Anzahl der Standorte einer spezifischen Landnutzung

Basierend auf den BZE Stichproben ergab sich auf Basis der Modellierung für Mineralböden unter Grünland ein mittlerer Trend von -0.02 (-0.28 bis -0.25) t C ha^{-1} a^{-1} der für die gesamte Zeitreihe übernommen wurde.

6.1.2.1.2 Datengrundlage

Grundlage zur Ermittlung der flächendeckend repräsentativen durchschnittlichen Kohlenstoffvorräte in Mineralböden, in Abhängigkeit von der Landnutzung, bilden folgende Datenquellen:

- Ergebnisse der Bodenzustandserhebungen im Wald (BZE-Wald I und BZE-Wald II; Wellbrock et al. (2016))
- Ergebnisse der Bodenzustandserhebung auf landwirtschaftlichen Böden in Deutschland (BZE-LW; Jacobs et al. (2018); (Poeplau et al., 2020)
- Karten der C-und N-Vorräte sowie der C/N-Verhältnisse der Mineralböden Deutschlands unter landwirtschaftlicher Nutzung (Sakhaee et al., 2022).
- Bodenübersichtskarte im Maßstab 1:1.000.000 (BÜK 1000; BGR 1995 & 1997, Düwel et al. (2007))
- Aktualisierte Kulisse der organischen Böden Deutschlands (Wittnebel et al., 2023)
- Karten aus dem LUCAS – Programm
  - Stickstoff, pH (Ballabio et al., 2016)
  - Tongehalt, verfügbare Wasserkapazität (Ballabio et al., 2016)
- Geomorphografische Karte Deutschlands (BGR, 2007)
- Hydrogeologische Karte Deutschlands (BGR & SDG, 2019)
- Karte der Netto-Bodenerosion und der Ablagerungsraten in Europa (Borrelli et al., 2018)
- Digitales Höhenmodell Europas (EU-DEM; European Union Copernicus Land Monitoring Service and EEA, 2016)
- Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD, div. Jahre)
- Datensätze des Basis-Digitalen Landschaftsmodells (B-DLM) des Amtlichen Topographisch-Kartographischen InformationsSystems (ATKIS®) der Jahre 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 und 2022 (AdV 2000; 2005; 2010; 2015; 2020; 2022)
- Corine Land Cover

- INSPIRE-Standardgitter mit einer Auflösung von 100 m neu abgetastet[81]
- IPCC-Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 4, Agriculture, Forestry and Other Land Use (IPCC, 2006a)

Aufgrund der unterschiedlichen Datenlage für die einzelnen Landnutzungskategorien wurden standortspezifische Mineralbodenkohlenstoff- und -stickstoffvorräte für unterschiedliche Landnutzungskategorien getrennt bestimmt. Die Werte für den *Wald*, *Ackerland*$_{annuell}$ und die Grünland-Kategorien entstammen Karten von Kohlenstoff- und Stickstoffvorräten der Mineralböden Deutschlands, die basierend auf den Ergebnissen der Bodenzustandserhebungen im Wald (BZE-Wald I und BZE-Wald II; (Wellbrock et al., 2016)) und der Landwirtschaft (JACOBS et al. 2018) entwickelt wurden und mit dieser Submission erstmalig zur Anwendung kommen. Diese Landnutzungskategorien umfassen derzeit ca. 85 % der Fläche Deutschlands und stellen somit die Hauptnutzungen dar. Die unterschiedlichen Modelle zur Kartenerstellung sind für den Wald in Kapitel 6.1.2.1.3, für *Ackerland*$_{annuell}$ und *Grünland* in Kapitel 6.1.2.1.4 und Kapitel 6.1.2.1.5 beschrieben.

Für die perennierenden Ackerlandsubkategorien *Hopfen, Obstanbau, Weinanbau, Weihnachtsbaumkulturen, Baumschulen* und *Kurzumtriebsplantagen* (Kapitel 6.1.2.1.4) sowie *Terrestrische Feuchtgebiete* und *Sonstiges Land* (Kapitel 6.1.2.1.7) wurden flächengewichtete, nutzungs- und bodenspezifische, durchschnittliche Kohlenstoff- und Stickstoffvorräte für Mineralböden mittels der Daten der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft ermittelt. Die Mineralbodenkohlenstoffvorräte für Siedlungsböden wurden aus den Ergebnissen dieser Bodenzustandserhebungen abgeleitet (s. Kapitel 6.1.2.1.6).

6.1.2.1.3 Wald

Die Berichterstattung bezüglich THG-Emissionen aus Mineralböden im Wald erfolgt methodisch unterschiedlich für zwei Zeiträume.

- Für den Zeitraum 1990 - 2008 erfolgt die Ermittlung der Kohlenstoff- und Stickstoffvorratsunterschiede in Mineralböden nach der „stock-difference-methode“ (Kapitel 6.4.2.5.3).
- Für den Zeitraum ab 2008 basieren die Ergebnisse auf dem mathematischen Modell Yasso15 (Järvenpää et al., 2018; Tuomi et al., 2009). Die Zweiteilung wurde notwendig, da erst seit dem Jahr 2008 ausreichend Input-Datensätze vorliegen, die eine korrekte Berechnung der organischen Kohlenstoffvorräte in Mineralböden mit Yasso15 ermöglichen.
- Die beiden Ansätze wurden mittels der Überlappungsmethode (overlap method) zusammengeführt).(IPCC, 2006a). Das methodische Vorgehen wird ausführlich in Kapitel 6.4.2.5.3und Kapitel 6.4.2.5.4 beschrieben.

Die Ergebnisse der Bodenzustandserhebungen (Grueneberg et al. (2014 bezüglich des Kohlenstoff- und Stickstoffvorrats von Mineralböden im Wald wurden regionalisiert.

Anhand der Ergebnisse der Bodenzustandserhebung Wald, der Legendeneinheiten der BÜK 1000 sowie mittels Yasso15 wurden Regionen gleicher Kohlenstoff- und Stickstoffvorräte im Wald ausgewiesen, in Abhängigkeit von pedologischen, geologischen und klimatischen Gegebenheiten. Die Ergebnisse werden jährlich, in Form zeitlich dynamischer, georeferenzierter Karten dargestellt (siehe Kapitel 6.4.2.5.3). Die in den Karten ausgewiesenen Kohlenstoff- und

[81] Eurostat Grid Generation Tool for ArcGIS, https://www.efgs.info/information-base/best-practices/tools/eurostat -grid-generation-tool-arcgis/, letzter Zugriff: 10. Dezember 2020

Stickstoffvorräte sind Grundlage aller Berechnungen im Zusammenhang mit mineralischen Waldböden.

6.1.2.1.4 Ackerland

Die Kohlenstoffvorräte von Mineralböden für Ackerflächen mit annuellen Kulturen, für Hopfen-, Wein- und Obstanbauflächen sowie für Baumschulen, Weihnachtsbaumkulturen und Kurzumtriebsplantagen, wurden aus den Ergebnissen der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft abgeleitet (Jacobs et al., 2018); (Poeplau et al., 2020). Die Bodenzustandserhebung Landwirtschaft (BZE-LW) ist eine Stichprobeninventur mit systematischer Stichprobenverteilung. Flächendeckend wurden in einem Raster von 8 x 8 km systematisch alle landwirtschaftlich genutzten Böden Deutschlands bis 1 m Bodentiefe beschrieben, beprobt und analysiert. Die Ergebnisse der BZE-LW sind repräsentativ sowohl für die Verteilung bodenkundlicher Charakteristika und Kennwerte, als auch für die aktuelle landwirtschaftliche Landnutzung Deutschlands.

Ackerland mit annuellen Kulturen

Für die Landnutzungskategorie $Ackerland_{annuell}$ wurden durch Regionalisierung der Ergebnisse der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft flächendeckende Rasterkarten der Bodenkohlenstoffvorräte und C/N-Verhältnisse für die Mineralbodenflächen Deutschlands auf einem Raster von 100 x 100 m erstellt. Sie wurden mittels Verfahren des Ensemble Learnings ermittelt. Dies erfolgt durch die Anwendung von Algorithmen aus dem Maschinenlernen auf Basis von Entscheidungsbaum-Ensembles, die mit unabhängigen Teildatensätzen erzeugt werden. Grundlage waren die Daten der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft sowie eine Vielzahl an Kovariaten aus den Bereichen

- Boden, Geologie, Geomorphologie, Hydrologie
- Klima
- Organische Kenngrößen, Vegetationsindices
- Topographie, Relief

Um die Multikollinearität des Modells zu verringern, wurden stark miteinander korrelierende Kovariaten (R > 0,9) aus dem Ensemble entfernt; letztlich fanden 34 Parameter Eingang in die Modellrechnungen. Nähere Erklärungen zum Verfahren und den Kovariaten finden sich bei (Sakhaee et al., 2022) und (Gebauer et al., 2022).

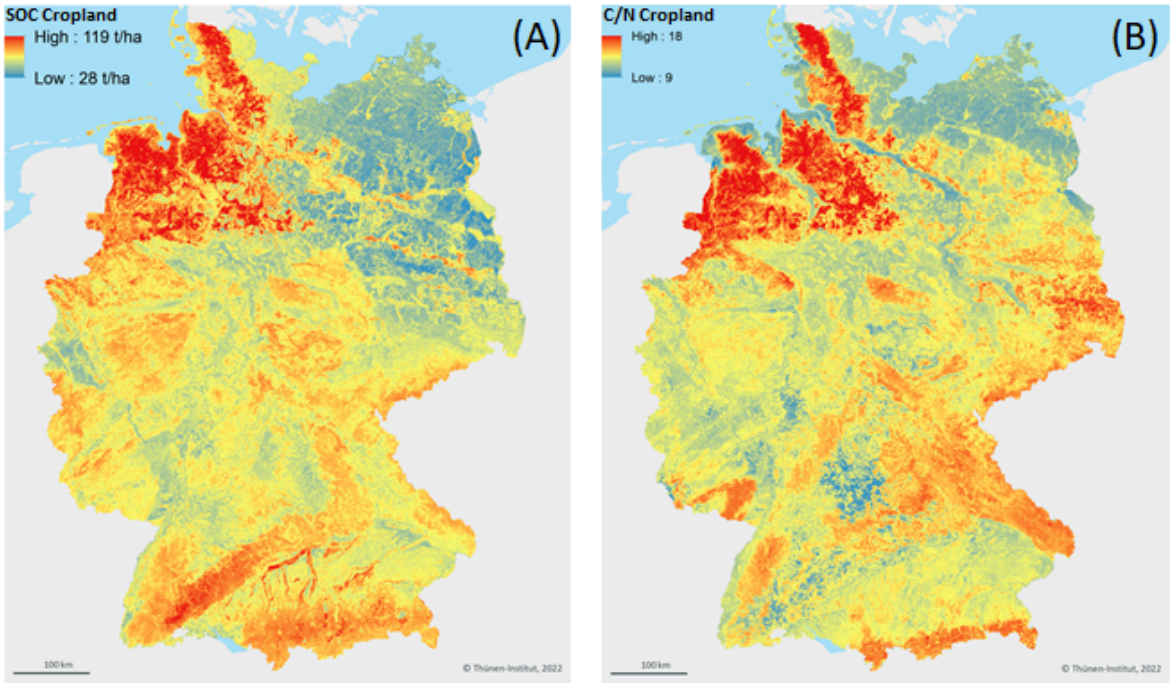
Beim C/N-Modell wurden die Algorithmen *Random Forest* und *Support Vector Machine for Regression* als Basislerner verwendet. Die Vorhersagen der Basislerner wurden dann gemittelt, um die endgültige Vorhersage zu liefern. In den meisten Fällen des Ensemblelernens wird die Abstimmung jedes Basislerners unabhängig durchgeführt. Die Hyperparameter-Abstimmung des vorliegenden Ensemble-Ansatzes war jedoch Teil des Trainings-/Lernprogramms (Shahhosseini et al., 2022).

Das SOC-Modell wurde mit einer neuartigen Methode, *Regressor Chaining* (Spyromitros-Xioufis et al., 2016), erstellt. Diese Methode kann die Vorhersage von Bodeneigenschaften verbessern, indem sie interkorrelierte Parameter nutzt (Santana et al., 2021). So wurde zuerst ein *Regressor Chaining*-Modell entwickelt, welches C/N-Verhältnisse unter Verwendung von *Random Forest* vorhersagte. Die vorhergesagten C/N-Verhältnisse werden dann in einem Ensemble-Ansatz (*Random Forest* und *Support Vector Machine for Regression*) für die SOC-Vorhersage verwendet. Ähnlich wie beim Ensemble-Ansatz, der zum Erstellen des C/N-Modells verwendet wurde, war auch das Hyperparameter-Tuning des *Regressor Chaining*-Ansatzes ein Teil des

Trainings/Lernens. Weitere Details und Erläuterungen zur *Regressor Chaining*-Methode finden sich bei Spyromitros-Xioufis et al. (2016). Die Hyperparameter-Abstimmung aller Modelle erfolgte mit dem *Differential Evolution (DE)-Algorithmus* (Sakhaee et al., 2022).

Zur Überprüfung der Robustheit der Modelle bei der Kombination von Hyperparameter-Tuning und Modellbewertung wurde ein stratifizierter, hierarchischer/verschachtelter („nested") Ansatz der Kreuzvalidierung umgesetzt (Sakhaee et al., 2022).

Abbildung 66: Karte der (A) SOC-Vorräte [t C ha^{-1} 30 cm^{-1}] und (B) C/N-Verhältnisse in den Mineralböden Deutschlands, bewirtschaftet als Ackerland mit annuellen Kulturen (*Ackerland$_{annuell}$*)



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

Abbildung 66 zeigt die so ermittelten Rasterkarten. Die gemessenen (Ergebnisse der BZE-LW, Jacobs et al. (2018)) und vorhergesagten Mittelwerte und Mediane der C/N-Verhältnisse und Bodenkohlenstoffvorräte (siehe Abbildung 66) sowie die zur Einschätzung des Modells notwendigen statistischen Kennwerte sind in Tabelle 322 dargestellt. Die originale Rasterkarte gibt die Größen der Bodenparameter im Jahr 2014 wieder. Die Rasterkarten werden jährlich auf Basis der mit RothC modellierten Trends für Ackerland aktualisiert (Kapitel 6.1.2.1.1).

Tabelle 322: Mittelwerte und Mediane der gemessenen und vorhergesagten C/N-Verhältnisse und Bodenkohlenstoffvorräte [t C ha^{-1} 30 cm^{-1}] in Mineralböden unter annuellem Ackerland (*Ackerland$_{annuell}$*)

Ackerland$_{annuell}$		Mittel	Median	Statistische Kennwerte Modellgüte				
				RMSE	MAE	MAPE [%]	Bias [%]	Anzahl
C/N	gemessen	11,10	10,43	1,5	0,98	8,39	-0,02	2204
	vorhergesagt	11,12	10,57					
SOC [t C ha^{-1} 30 cm^{-1}]	gemessen	61,18	55,58	20,92	13,84	23,24	-0,05	2204
	vorhergesagt	59,04	57,11					

Zu den Unsicherheiten der Karten siehe auch Kapitel 6.1.2.1.1.

Ackerland mit perennierenden Kulturen

Die im Rahmen der BZE-LW untersuchte Anzahl an Bodenprofilen auf Standorten mit Sonderkulturen bzw. perennierender Biomasse (Obst, Wein, Hopfen, Baumschulen, Weihnachtsbaumkulturen und Kurzumtriebsplantagen) war sehr gering. Daher war eine Regionalisierung der Ergebnisse im Hinblick auf eine Karte nicht möglich.

Für die Subkategorien Hopfen, Baumschulen, Weihnachtsbaumkulturen und Kurzumtriebsplantagen war die Standortanzahl sogar zu gering, um für diese Kulturen spezifische mittlere Mineralbodenkohlenstoffvorräte ableiten zu können, da folglich keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen diesen Subkategorien nachgewiesen bzw. berechnet werden konnten. Daher wird für diese Flächen das Mittel aller Sonderkulturflächen Deutschlands als Wert unterstellt. Nichtsdestotrotz werden die Hopfenanbau-, Baumschul-, Weihnachtsbaumkultur- und Kurzumtriebplantagenflächen extra ausgewiesen.

Für die Wein- und Obstanbauflächen konnten, aufgrund der größeren Häufigkeit gegenüber den anderen Sonderkulturen, spezifische Mineralbodenkohlenstoffvorräte ausgewiesen werden, die sich signifikant von allen anderen Sonderkulturen und untereinander unterscheiden. Die Weinanbaugebiete Deutschlands liegen im Wesentlichen in der gleichen Klimazone, weshalb sich eine weitere Stratifizierung der Böden hinsichtlich des Klimaeinflusses erübrigt. Dagegen liegen die beiden Hauptobstanbaugebiete Deutschlands, im Norden (Altes Land) und im äußersten Süden (Bodenseeregion), in unterschiedlichen Klimazonen. Ein Vergleich der Kohlenstoffvorräte der Mineralböden von Obstanbaugebieten des Nordens mit denen des Südens zeigt bezüglich des mittleren Bodenkohlenstoffvorrats zwar deutliche Unterschiede (80 t C/ha gegenüber 66 t C/ha), aber diese sind aufgrund der absoluten Anzahl der Stichproben als auch aufgrund der sehr großen Spannweite (93 t C/ha im Norden, im Süden 60 t C/ha) nicht statistisch signifikant. Aus diesem Grunde kommt bundesweit ein einheitlicher Wert für Obstbau zur Anwendung.

Die Werte der mittleren Kohlenstoffvorräte für Mineralböden der einzelnen Ackerlandsubkategorien sind in Tabelle 323 dargestellt. Die Kohlenstoffvorräte werden jährlich auf Basis des mit RothC modellierten Trends für Grünland aktualisiert (Kapitel 6.1.2.1.1). Dies begründet sich in dem Umstand, dass die Flächen mit Sonderkulturen größtenteils mit krautigen Pflanzen, i.d.R. Gräsern, bedeckt sind.

Tabelle 323: Mittlerer flächenbezogener Mineralbodenkohlenstoffvorrat bis 30 cm Bodentiefe [t C ha^{-1} $30cm^{-1}$] und dessen Unsicherheiten [%] für Ackerflächen mit annuellen und perennierenden Kulturen

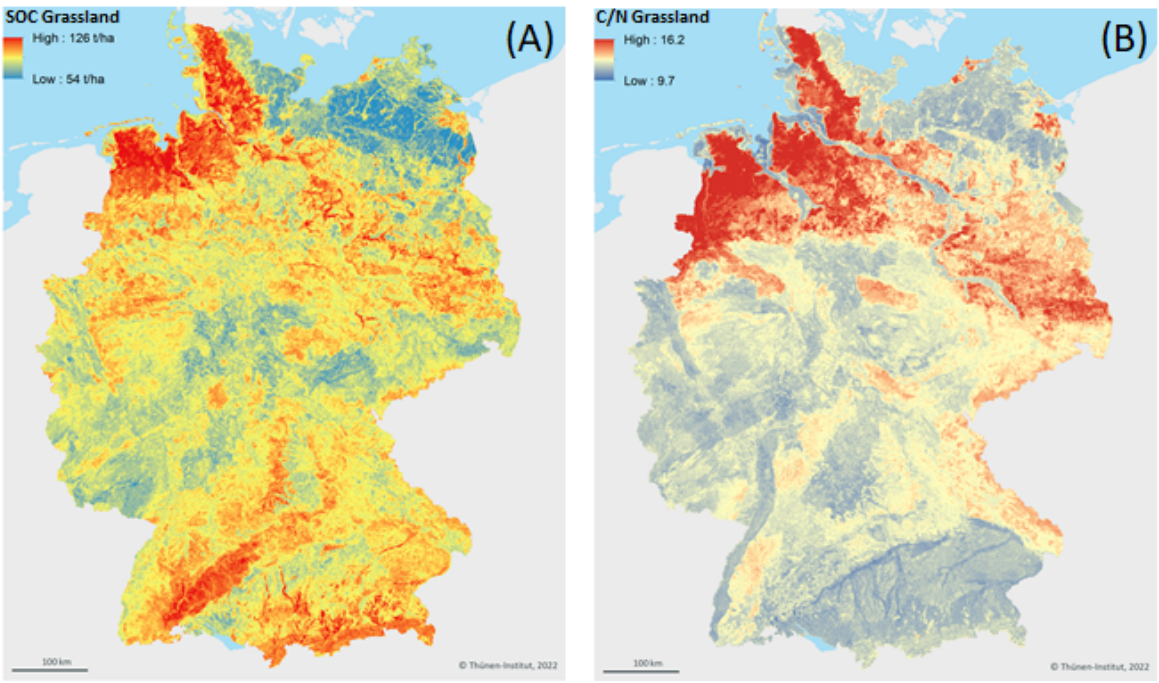
Mineralboden	Kohlenstoffvorrat [t C ha^{-1}]	Unsicherheit [%]
Hopfenanbauflächen	62,89	7,84
Weinanbauflächen	49,30	11,36
Obstanbauflächen	71,69	8,87
Baumschulen	62,89	7,84
Weihnachtsbaumkulturen	62,89	7,84
Kurzumtriebsplantagen	62,89	7,84

6.1.2.1.5 Grünland

Die Landnutzungskategorie *Grünland* setzt sich aus den Subkategorien *Grünland im engeren Sinne, Gehölze* und *Hecken* zusammen (vergl. Kap. 6.2.3). Bezüglich der Ausprägung der Eigenschaften der Mineralböden dieser Subkategorien wird unterstellt, dass diese sich lagebedingt hinsichtlich der Kohlenstoff- und Stickstffvorräte nicht signifikant unterscheiden. Vergleichende Untersuchungen von Böden unter *Grünland im engeren Sinne* und *Hecken* haben diese Annahme bestätigt (Drexler et al., 2021). Daher wurden die Kohlenstoff- und Stickstoffvorräte der Mineralböden für alle drei Subkategorien einheitlich aus den Ergebnissen für Grünland der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft abgeleitet (Jacobs et al., 2018).

Analog zum $Ackerland_{annuell}$ wurde eine flächendeckende Karte der C-Vorräte und der C/N-Verhältnisse der Grünlandböden Deutschlands erstellt, basierend auf den Ergebnissen der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft und zahlreicher Kovariaten. Eine Kurzbeschreibung des methodischen Vorgehens ist in Kapitel 6.1.2.1.4 aufgeführt. Eine ausführliche Beschreibung der grundlegenden Methodik findet sich bei (Sakhaee et al.). Die Rasterkarten sind in Abbildung 67, die gemessenen und geschätzten Lagemaße sowie einige statistische Kennwerte zur Beurteilung der Güte des Vorhersagemodells in Tabelle 324 dargestellt. Die Rasterkarten werden jährlich auf Basis des mit RothC modellierten Trends für Grünland angepasst (Kapitel 6.1.2.1.1).

Abbildung 67: Karte der (A) SOC-Vorräte [t C ha^{-1} 30 cm^{-1}] und (B) C/N- Verhältnisse in den Mineralböden Deutschlands unter Grünland



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

Tabelle 324: Mittelwerte und Mediane der gemessenen und vorhergesagten C/N-Verhältnisse und Bodenkohlenstoffvorräte [t C ha^{-1} 30 cm^{-1}] in Mineralböden unter *Grünland*

Ackerland$_{annuell}$		Mittel	Median	Statistische Kennwerte Modellgüte RMSE	MAE	MAPE [%]	Bias [%]	Anzahl
C/N	gemessen	11,13	10,52	1,75	1,08	8,97	-0,01	740
	vorhergesagt	11,09	10,68					
SOC [t C ha^{-1} 30 cm^{-1}]	gemessen	88,09	83,21	30,48	21,42	27,57	-0,1	740
	vorhergesagt	86,45	84,84					

6.1.2.1.6 Siedlungen

Die Ausführungen im Folgenden beziehen sich nur auf die Landnutzungssubkategorien „Gebäude- und Freiflächen sowie Flächen mit Photovoltaikanlagen“, da die Einführung der Subkategorien „Straßen“ und „Bahnkörper“ zunächst nur statisch erfolgten (siehe Kapitel 6.1.1).

Emissionen infolge aktiver Baumaßnahmen

Im Falle einer Landnutzungsänderung hin zu Siedlungen, wird der zu berichtender humoser Oberboden (30 cm Bodentiefe) auf der betroffenen Fläche vollständig abgetragen. Nach der deutschen Gesetzgebung ist der Mutterboden jedoch besonders zu schützen (§ 202 Bundesanzeiger Verlag (2015)) und muss im Falle von Baumaßnahmen unvermischt, geschützt und konservierend gelagert, im Falle einer Versiegelung lateral, unkontaminiert und unvermischt verbracht werden (BMJ & BfJ, 1998a; KrWG, 2012); sowie 16 Landesbauordnungen). So wird der Bodenanteil der versiegelten Fläche i.d.R. auf den unversiegelten Flächen aufgetragen (nach Möglichkeit auf dem Baugrundstück oder Nachbarflächen), so dass kein oder nur wenig Kohlenstoff verloren geht. Es findet lediglich eine laterale Translokation statt. Die Gesamtbilanz bezüglich des Kohlenstoffs bleibt nahezu gleich. Die IPCC Guidelines 2006 sehen diesen Fall ausdrücklich vor: Es ist gute Praxis, die potentiellen Kohlenstoffverluste um den Anteil des lateral verbrachten Bodens zu reduzieren (IPCC (2006a), Kapitel 8.3.3.1). Nichtsdestotrotz wird der Boden auf den betreffenden Flächen gestört (ausgebaggert, transportiert, wieder ausgebracht; u.U. mehrere Monate sachgerecht auf Halde gelagert), wodurch die Struktur gestört und der Boden verstärkt belüftet wird; zumindest kurzfristig. Dadurch wird i.d.R. eine verstärkte Umsetzung organischer Bodensubstanzen durch Mikroorganismen initialisiert. Die so freigesetzten Mengen an CO_2 müssen erfasst und in der Bilanz veranschlagt werden. Die Quantifizierung dieser Kohlenstoffverluste erfolgt auf Basis nachstehender Annahmen und Unterstellungen:

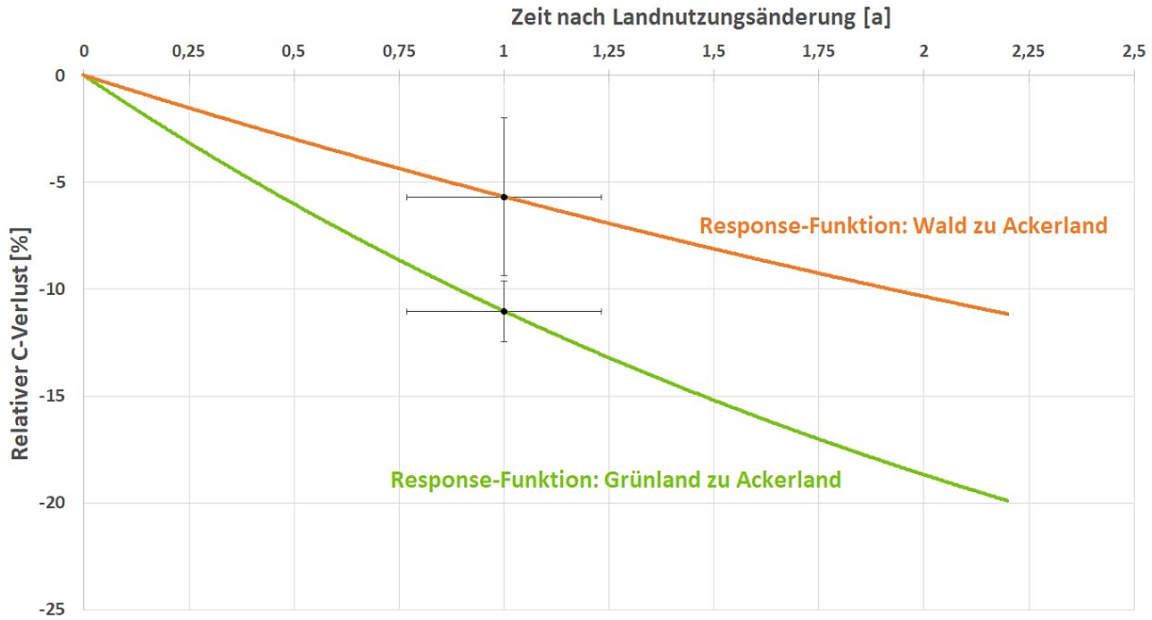
- Es liegen keine spezifisch erhobenen wissenschaftlichen Daten über infolge von Baumaßnahmen verursachte Kohlenstoffverluste der organischen Substanz von Oberböden vor und müssen daher geschätzt werden. Für die Schätzung dieses Anteils werden Response-Funktionen herangezogen, die die Kohlenstoffverluste der organischen Substanz von Mineralböden durch Umnutzung von Grünland bzw. Wald zu Ackerland beschreiben (Poeplau et al., 2011) (s. Abbildung 68). Infolge derartiger Landnutzungsänderungen kommt es ebenfalls zu massiven, anhaltenden Störungen des Oberbodens und einer verstärkten Belüftung desselben.
- Grünland zu Ackerland: ΔC_{SOC}_Ini_prev = 36,11*[1-exp(-t/2,74)]
- Wald zu Ackerland: ΔC_{SOC}_Ini_prev = 32,19*[1-exp(-t/5,15)]
- ΔC_{SOC} _Ini_prev: Relative Kohlenstoffvorratsänderung [%]

- t: Zeit nach Störung [a]
- Die Bauzeiten in Deutschland betragen i.d.R., je nach Vorhaben, 6 – 25 Monate (Schulz, 2012). Mittels statistischer Daten – Mittelwerte der Zeitreihen der Anzahl entsprechender vollzogener Baufertigstellungen seit 2010 (Statistisches Bundesamt, 2020) – konnte für Deutschland ein gewichtetes Mittel für Bauzeiten errechnet werden. Dieser Wert beträgt 11,9 Monate. Konservativ werden 12 Monate angesetzt (t = 1 in den Response-Funktionen).

Setzt man die so berechnete mittlere Bauzeit in die Response-Funktionen ein, ergeben sich gegenüber dem Initialvorrat relative Kohlenstoffverluste von

- Funktion Grünland zu Ackerland: -11,0 %
- Funktion Wald zu Ackerland: -5,7 %

Abbildung 68: Relativer Kohlenstoffverlust ([%]; Unsicherheiten: 95 % - Konfidenzintervall [%]) humoser Oberbodenhorizonte infolge baubedingter Störungen, abgeleitet aus Response-Funktionen für Grünland bzw. Wald zu Ackerland (Poeplau et al., 2011) bei einer durchschnittlichen Bauzeit von 12 Monaten



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

Da Landnutzungsänderungen von „Grünland zu Siedlung“ vier- bis fünfmal häufiger vorgenommen werden, als Nutzungsänderungen von „Wald“ zu „Siedlung“, wird, in einem konservativen Ansatz, die Response - Funktion „Grünland zu Ackerland“ herangezogen, um die Kohlenstoffverluste aus humosen Oberbodenhorizonten infolge baubedingter Störungen abzuschätzen. Für eine mittlere Bauzeit von 12 Monaten errechnen sich so Kohlenstoffverluste von -11 ± 1,4 % C (Unsicherheit$_{relativ}$: 12,7 %) (s. Abbildung 68) vom aktuellen Mineralbodenkohlenstoffvorrat der betreffenden Fläche zum Zeitpunkt der Landnutzungsänderung. Die so ermittelten Kohlenstoffverluste werden im Inventar einmalig, nur im Jahr der Landnutzungsänderung, verbucht.

Kohlenstoffvorräte in Siedlungsböden

Fakten und Annahmen

Innerstädtische, unversiegelte Böden zeigen mitunter vergleichbare Kohlenstoffvorräte, wie Wald- und Grünlandböden außerhalb des Siedlungsraumes (Klingenfuß et al. (2020); Cambou et al. (2018); Edelmann (2013); Raciti et al. (2012); Pouyat et al. (2009)). Insbesondere in Hausgärten, Park- und Grünanlagen, Kleingartenkolonien und sonstigen mit Bäumen und Sträuchern bestandenen Flächen weisen Oberböden aber meist Kohlenstoffvorräte auf, die deutlich über denen von Vergleichsböden außerhalb des Siedlungsbereichs liegen, unabhängig von der Nutzung (Klingenfuß et al. (2020); Cambou et al. (2018); Edmondson et al. (2012); Edelmann (2013); Pouyat et al. (2009)). Zurückzuführen ist dieser Umstand auf den Auftrag zusätzlichen humosen Bodens, die schleichende Degradation landwirtschaftlich genutzter Böden (Edmondson et al., 2014) sowie die intensive Bewirtschaftung der innerstädtischen Grünflächen (Input, Bewässerung) (Edmondson et al., 2014); Pouyat et al. (2009)). Vasenev et al. (2013) wiesen diesen Umstand in Stadtböden der Großregion Moskau für Kohlenstoffkonzentrationen in Oberböden, besonders aber auch in Unterbodenhorizonten nach. Sie bezeichnen diese Horizonte als „cultural layers“, da diese insbesondere durch das menschliche Wirtschaften überprägt sind. Diese Kohlenstoffvorratsunterschiede zwischen innerstädtischen und angrenzenden außerstädtischen Böden wurden in allen o.a. Studien quantifiziert. Nichtsdestotrotz können aus diesen Daten keine allgemein gültigen, relativen Veränderungsraten abgeleitet werden, die eine Abschätzung des Kohlenstoffvorrates von unversiegelten Siedlungsböden (nach Landnutzungsänderung), ausgehend von den Bodenkohlenstoffvorräten der Vornutzungen, ermöglichen, da

- die Spannweite der Vorratsunterschiede extrem groß ist, in Abhängigkeit von Standortseigenschaften, Landnutzung und Bewirtschaftung: Edmondson et al. (2014) ermittelten für Böden innerstädtischer Grünflächen der Stadt Leicester (England) 21 – 89 % höhere Kohlenstoffvorräte als im angrenzenden landwirtschaftlich genutzten Grünland (86 t ha^{-1} 21 cm^{-1}; Ackerland: 73 t ha^{-1} 21 cm^{-1}). Cambou et al. (2018) zeigen für Paris, dass die Kohlenstoffvorratsunterschiede innerstädtischer Böden, nutzungsabhängig (Parkanlagen > Gärten ≥ Gehölzflächen) gegenüber Vergleichsböden der Region (Wald > Landwirtschaftsflächen) 30 – 110 % betragen.
- der Trend bezüglich der Nutzungsformen nicht einheitlich ist (Klingenfuß et al., 2020)

Aus diesen Gründen wird in einem konservativen Ansatz unterstellt, dass unversiegelte, innerstädtische Böden Kohlenstoffvorräte aufweisen, die in etwa den Böden entsprechen, aus denen sie sich nach einer Landnutzungsänderung entwickeln, abzüglich der 11 % Verlust durch die baubedingte Störung.

Bisher wurde unterstellt, dass der Bereich, der von Gebäuden bestanden ist, beim Bau tiefgründig ausgekoffert wurde und somit keinen Kohlenstoff bzw. in absolut zu vernachlässigenden Mengen enthält. Der humose Oberboden dieser Flächen wird, gemäß der Gesetzeslage, lateral auf dem Baugrundstück und Nachbarflächen verbracht. Somit wurde der Kohlenstoffvorrat auf der betroffenen Fläche um einen Versiegelungsfaktor korrigiert. Dies führt dazu, dass Verluste an Bodenkohlenstoff infolge baubedingter Störungen des Oberbodens auf den unversiegelten Flächen nahezu vollständig ausgeglichen werden, was sich aber nicht in Kohlenstoffvorratsänderungen niederschlug, da nur bis 30 cm Bodentiefe berichtet wird. Diese unausgewogene Massenbilanz auf der betroffenen Änderungsfläche wurde beim ESD-Review 2025 vom TERT kritisiert, da dieser Umstand, bei erneuter Umnutzung einer solchen Fläche, zu einer Überschätzung der Senkenfunktion führt. Daher wird dieser SOC-Vorrat des Mineralbodens, abzüglich der 11 % Verlust durch die baubedingte Störung, künftig nicht mehr zusätzlich um einen Versiegelungsfaktor korrigiert. Er verbleibt virtuell auf der gesamten Landnutzungsänderungsfläche, zur Aufrechterhaltung der Massenbilanz. Aufgrund all dieser

Umstände wird daher auch unterstellt, dass die Mineralböden in den Übergangs- und Verbleibkategorien der „Gebäude- und Freiraumflächen“ im Gleichgewicht sind, folglich keine Emissionen berichtet werden. Dieses Vorgehen wurde vom TERT akzeptiert ((EEA, 2025); Reference: No 3502/B2025/EEA.60384).

Abschätzung der Emissionen aus Mineralböden bei Landnutzungsänderungen zu Siedlung

Das Vorgehen erfolgt gemäß den Annahmen und Ausführungen in den o.a. Abschnitten des Kapitels. Vom Ausgangsvorrat des Bodenkohlenstoffs der Vornutzung (SOC_{Ini_prev}) werden pauschal 11 % des Kohlenstoffvorrates abgezogen und einmalig im Jahr der Landnutzungsänderung als Emission ausgewiesen:

Gleichung 33:

$$Emission_{\mathrm{LUC_{Set}}} = SOC_{Ini_{prev}} * A_{set1} * -0{,}11$$

- SOC_{Ini_prev} = Kohlenstoffvorrat der Fläche unter der Vornutzung [t C ha^{-1} 30 cm^{-1} a^{-1}]
- A_{set1} = Von der Landnutzungsänderung betroffene Fläche [ha]
- -0,11 = Relativer Verlust (11 %) an Bodenkohlenstoff infolge von Baumaßnahmen

Der so ermittelte Vorrat wird allen weiteren Berechnungen mit Stadtböden an diesem Punkte zugrunde gelegt. Er wird im Jahr der Landnutzungsänderung, ohne Übergangszeit, direkt dem Punkt zugewiesen. Abgesehen von den durch die Baustörung hervorgerufenen Emissionen fallen keine weiteren Verluste aus Mineralböden an (s.o).

Für alle Siedlungsflächen, deren Vornutzung nicht bekannt ist (das sind alle Flächen, die vor und seit dem Jahr 1990 in der Verbleibkategorie geführt werden), wird für die Mineralböden ein auf Bundeslandebene regionalisierter, mittlerer flächen- und vornutzungsgewichteter Kohlenstoffvorrat zugrunde gelegt. Dafür wurde für jede Übergangskategorie der Mittelwert des Anteils an der gesamten Landnutzungsänderung zu Siedlung für den Zeitraum von 1990 – 2024 ermittelt. Dieser Anteil wurde mit dem für die entsprechende Landnutzungskategorie der Vornutzung typischen Bodenkohlenstoffvorrat von 1971 multipliziert. Die Summe dieser Werte, abzüglich der 11 % Bauverlust, ergibt dann den SOC_{Ini_prev} für Mineralböden auf Siedlungsflächen der Verbleibkategorie der jeweiligen Bundesländer. Die Unsicherheit der Abschätzung der Flächenzuteilung wird mit 10 % angenommen. So ergeben sich für die Gebäude und Freilandflächen, deren Vornutzung nicht bekannt ist, die in Tabelle 325 aufgeführten Kohlenstoff- und Stickstoffvorräte für Mineralböden in den einzelnen Bundesländern. Die so ermittelten Vorräte werden allen weiteren Berechnungen mit Stadtböden an diesen Punkten zugrunde gelegt.

Tabelle 325: Mittlere Kohlenstoff- [t C ha^{-1} 30 cm^{-1}] und Stickstoffvorräte [t N ha^{-1} 30 cm^{-1}] in Mineralböden auf Siedlungsflächen (Subkategorie „Gebäude und Freiflächen“) und deren Unsicherheiten [%]

Mineralboden	Kohlenstoffvorrat [t C ha^{-1} 30 cm^{-1}]	Unsicherheit C [%]	Stickstoffvorrat [t N ha^{-1} 30 cm^{-1}]	Unsicherheit N [%]
Brandenburg	55,4	18,6	4,4	19,7
Berlin	53,3	20,6	4,4	21,5
Baden-Württemberg	72,7	19,3	6,9	20,3

Mineralboden	Kohlenstoffvorrat	Unsicherheit C	Stickstoffvorrat	Unsicherheit N
Bayern	69,4	20,5	6,6	21,6
Bremen	74,3	22,2	5,6	22
Hessen	62,6	19,6	6	20,7
Hamburg	75,5	19,6	5,4	20
Mecklenburg-Vorpommern	52,1	20,8	4,7	21,9
Niedersachsen	73,7	20,2	5,8	21
Nordrhein-Westfalen	70,4	19,9	6,1	20,8
Rheinland-Pfalz	66,2	20,2	6,6	21,5
Schleswig-Holstein	75,3	19,9	5,9	20,5
Saarland	68,1	19,3	6,4	20,4
Sachsen	65,2	20,5	5,6	21,5
Sachsen-Anhalt	71,4	23,2	6,1	24,1
Thüringen	67,4	21,5	6,4	22,8

Abschätzung der Emissionen aus Mineralböden bei Landnutzungsänderungen von Siedlung

Das Vorgehen im Falle von Landnutzungsänderungen von Siedlungsflächen zu anderen Landnutzungskategorien folgt der allgemeinen Methodik (Kapitel 6.1.2.1). Ausgangspunkt der Berechnung ist der jeweils für den betroffenen Punkt aktuell dokumentierte SOC-Vorrat. Es gilt die effektive, maximal 20-jährige Übergangszeit.

6.1.2.1.7 Terrestrische Feuchtgebiete und Sonstiges Land

Terrestrische Feuchtgebiete

Die Ableitung der mittleren Kohlenstoffgehalte für Mineralböden in Terrestrischen Feuchtgebieten (für Gewässerflächen werden keine Bodenkohlenstoffvorräte ausgewiesen; Torfabbauflächen finden sich ausschließlich auf organischen Böden) erfolgte auf Grundlage des Basis-Digitalen Landschaftsmodells (B-DLM; ATKIS®), der Bodenübersichtskarte im Maßstab 1:1.000.000 (BÜK 1000; BGR (1995 & 1997);BGR (1997)) sowie der Ergebnisse der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft (BZE-LW; Jacobs et al. (2018)). Hierfür wurden die im B-DLM ausgewiesenen nassen Flächen (Grundwasserflurabstand < 10 cm), die keine organischen Böden enthalten, mit den Leitbodenassoziationen der BÜK 1000 (vergl. Kapitel 6.1.2.1.2) verschnitten. Den so für die einzelnen Leitbodenassoziationen ermittelten Flächenanteilen an nassen Böden wurden dann die für diese Flächen in der BZE-LW erhobenen Kohlenstoffvorräte für Grünlandböden zugeordnet, deren Grundwasserstufe ≤ 3 ist; also Böden, die bei Grundwasserhochstand gelegentlich (72%), oft (25 %) oder andauernd (3 %) überflutet sind. So konnte für jede betroffene Leitbodenassoziation ein spezifischer Kohlenstoffvorrat für nasse Mineralböden abgeleitet werden. Die Leitbodenassoziationen der BÜK 1000 wurden mit einer Karte der Bundesländer verschnitten und mittels der dadurch erhaltenen Polygone für jedes Bundesland ein flächengewichteter mittlerer Bodenkohlenstoffvorrat für Mineralböden in Terrestrischen Feuchtgebieten berechnet Tabelle 326.

Tabelle 326: Mittlerer flächenbezogener Kohlenstoffvorrat [t C ha^{-1}] und dessen Unsicherheiten (%) in Mineralböden von Terrestrischen Feuchtgebieten bis 30 cm Bodentiefe

Mineralboden	Kohlenstoffvorrat [t C ha^{-1}]	Unsicherheit C [%]	Stickstoffvorrat [t N ha^{-1} 30 cm^{-1}]	Unsicherheit N [%]
Brandenburg	104,2	29,4	8,4	27,7
Berlin	104,2	29,4	8,4	27,7
Baden-Württemberg	103,9	11,8	9,7	11,2
Bayern	101,2	15,7	9,9	15,6
Bremen	123,1	19,7	13,2	17,2
Hessen	105,8	38,7	10,6	28,0
Hamburg	105,7	117,0	7,6	17,6
Mecklenburg-Vorpommern	85,9	116,8	6,7	22,3
Niedersachsen	104,1	25,9	8,7	14,3
Nordrhein-Westfalen	84,5	11,9	7,5	17,7
Rheinland-Pfalz	81,5	30,6	8,9	15,7
Schleswig-Holstein	119,8	40,8	10,6	11,6
Saarland	101,8	12,3	10,4	30,6
Sachsen	87,6	20,1	6,8	32,9
Sachsen-Anhalt	111,0	16,0	8,6	15,8
Thüringen	116,2	100,0	9,7	25,6

Sonstiges Land

Die der BÜK 1000 (BGR) zugrunde liegende Datenbank weist nahezu keine Leitprofile für Böden auf „Sonstigem Land“ aus, lediglich für Wald-, Acker- und Grünlandstandorte. Aus den, für diese Landnutzungskategorien, in der Legende hinterlegten Bodeneigenschaften, wurden bisher die Kohlenstoffvorräte für Mineralböden abgeleitet. Diese waren mit 56 t C/ha sehr hoch und beruhten ausschließlich auf Schätzwerten. Daher musste zur Verbesserung des Inventars eine Methode zur Ableitung des Kohlenstoffvorrats für Mineralböden unter „Sonstigem Land“ entwickelt werden, die auf vorhandenen, gemessenen Daten basiert und regionale Standortfaktoren berücksichtigt. Deshalb wurde zur Abschätzung der Datensatz der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft (Jacobs et al., 2018) zugrunde gelegt. Da es sich bei „Sonstigem Land“ i.d.R. meist um vegetationslose Flächen handelt, die überwiegend sehr geringe Gehalte an organischer Bodensubstanz aufweisen aber durchaus auch deutlich mit organischer Substanz angereichert sein können (z.B. im Einzugsbereich von Gewässern), wurde der jeweils geringste in der BZE-LW aufgenommene Wert eines Bundeslandes für die Abschätzung des mittleren Kohlenstoff- bzw. Stickstoffvorrats für Mineralböden verwendet. Weiter wurde unterstellt, dass dieser Wert die obere Schranke der Bodenkohlenstoff- bzw. -stickstoffvorräte der Landnutzungskategorie „Sonstiges Land“ für das jeweilige Bundesland repräsentiert. Der Mittelwert wurde dann anhand der Standardabweichung der C- und N-Vorräte aller der jeweiligen Bestimmung zugrunde liegender Mineralbodenstandorte bestimmt. Die so auf regionaler Ebene der Bundesländer ermittelten Werte für die Kohlenstoff- und Stickstoffvorräte von Mineralböden werden, beginnend mit dieser Submission, für alle Emissionsberechnungen im Zusammenhang mit der Landnutzungskategorie „Sonstiges Land“ genutzt. Die mittleren Kohlenstoff- und Stickstoffvorräte sind in Tabelle 327 aufgeführt.

Tabelle 327: Mittlere Kohlenstoff- und Stickstoffvorräte [t C ha^{-1}] und deren Unsicherheit (Standardabweichung [%]) in Mineralböden auf „Sonstigem Land“ bis 30 cm Bodentiefe auf Bundeslandebene

Mineralboden	Kohlenstoffvorrat [t C ha^{-1} 30 cm^{-1}]	Unsicherheit C [%]	Stickstoffvorrat [t N ha^{-1} 30 cm^{-1}	Unsicherheit N [%]
Brandenburg	10,3	44,0	0,9	40,5
Berlin	29,1	30,1	2,5	14,4
Baden-Württemberg	10,0	21,1	1,0	22,1
Bayern	10,0	24,6	0,9	24,8
Bremen	23,1	37,1	2,0	37,1
Hessen	21,5	19,2	2,0	19,8
Hamburg	21,1	50,2	2,2	40,2
Mecklenburg-Vorpommern	13,4	35,2	1,7	29,0
Niedersachsen	19,3	35,6	1,1	26,3
Nordrhein-Westfalen	16,8	26,1	2,2	20,8
Rheinland-Pfalz	7,6	18,3	1,1	19,1
Schleswig-Holstein	17,9	36,2	1,7	26,8
Saarland	32,8	19,9	1,8	25,3
Sachsen	22,1	25,9	1,9	23,3
Sachsen-Anhalt	17,8	28,2	1,6	28,7
Thüringen	15,1	29,2	1,6	29,0

6.1.2.1.8 Unsicherheiten

Falls nicht explizit ausgewiesen, wird immer die Hälfte des 95 %-Konfidenzintervalls als Unsicherheit angegeben und bei nicht normalverteilten Stichproben mit oberer und unterer Schranke. Die Unsicherheiten für die Kohlenstoffvorräte der Mineralböden in Wäldern sowie deren Veränderungen in der Zeit, wurden mittels statistischer Methoden aus den Messwerten der Bodenzustandserhebung Wald (Wellbrock et al. (2016); siehe Kapitel 6.4.3.3) sowie den Modellunsicherheiten hergeleitet. Für die Landnutzungskategorien „Hopfen, Wein , Obst, Baumschulen, Weihnachtsbaumkulturen“ und „Kurzumtriebsplantagen, Terrestrische Feuchtgebiete, Siedlungen“ und „Sonstigem Land“ wurden die Unsicherheiten anhand der Messwerte der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft bestimmt (Jacobs et al. (2018)). Die Unsicherheiten für „$Ackerland_{annuell}$“ und „Grünland“ wurden im Rahmen der Fehlerfortpflanzungsrechnung aus den von dem Modell zur Kartenerstellung berechneten statistischen Kennwerten (Kapitel 6.1.2.1.4; Kapitel 6.1.2.1.5) sowie den Unsicherheiten des genutzten Prozessmodells berechnet (Kapitel 6.1.2.1.1 ff.

6.1.2.1.9 Geplante Verbesserungen

Geplante Verbesserungen sind in den nächsten Jahren:

1. Verbesserung der modellgestützten Berechnung der Kohlenstoffvorratsänderungen auf Ackerland. Verbesserung der Datenlage bezüglich Bewirtschaftung/Dateninput.
2. Einführung der modellgestützten Berechnung der Kohlenstoff- bzw. Stickstoffvorratsänderungen in Mineralböden der Landnutzungskategorie Grünland für jeden Einzelpunkt des Beprobungsrasters (100 x 100 m).

3. Methodenentwicklung zur Bestimmung der Entwicklung von Kohlenstoffvorratsänderungen in mineralischen Siedlungsböden
   a. der Verbleibkategorie Gebäude- und Freiflächen
   b. Einführung von Versiegelungs- und Emissionsfaktoren für Mineralböden der Subkategorien „Straßen“ und „Bahnkörper“

6.1.2.2 Emissionen aus organischen Böden (3.D; 4.A bis 4.F; 4(II))

Über die CO_2-, N_2O- und CH_4-Emissionen aus organischen Böden wird in den Landnutzungskategorien „Wald, Ackerland, Grünland i.e.S., Gehölze, terrestrische Feuchtgebiete, industrieller Torfabbau und Siedlungen“ (Subkategorien „Gebäude- und Freiflächen“ und „Flächen mit Photovoltaikanlagen“) berichtet (N_2O aus drainierten organischen Böden unter Acker- und Grünland in CRF-Sektor 3.D.1.f). Außerdem werden die Methanemissionen aus Entwässerungsgräben erfasst sowie die Kohlenstoffverluste mit der gelösten organischen Substanz (DOC). In Deutschland wird der Großteil der organischen Böden entwässert.

Die Emissionsberechnung erfolgt durch Multiplikation der Moorflächen pro Subkategorie mit einem nutzungsspezifischen Emissionsfaktor.

Gleichung Bei Landnutzungsänderungen wird sofort der Emissionsfaktor der Zielkategorie verwendet:

$$E_{orgsoil} = \sum_{i=1}^{n}(A_i * EF_i)$$

- $E_{orgsoil}$ = CO_2-, N_2O- und CH_4-Emissionen aus organischen Böden einer Landnutzungskategorie [kt C]
- A_i = Moorfläche unter bestimmter Landnutzung [kha]
- EF_i = Landnutzungsspezifischer Emissionsfaktor [t C ha^{-1} a^{-1}]
- I = Übergangs- bzw. Verbleibkategorien
- N = Anzahl der Übergangs- bzw. Verbleibkategorien

Dem vorliegenden Inventar liegt eine neue, sehr detaillierte Karte zur Lage und Drainage der organischen Böden zugrunde ((Wittnebel et al., 2023); Kapitel 6.1.2.2.1). Ebenso wurden sehr umfangreiche Messdatensätze von Treibhausgasemissionen aus organischen Böden in Deutschland verwendet, die in verschiedenen Forschungsprojekten, insbesondere dem Verbundprojekt „Organische Böden“ des Thünen-Instituts[82] mit standardisierten Messprotokollen erhoben bzw. in geringerem Umfang der nationalen Literatur entnommen wurden.

Die Berechnungen der CO_2- und CH_4-Emissionen aus organischen Böden erfolgen alle in Abhängigkeit vom Grundwasserflurabstand für jeden einzelnen der 1.945.718 Detektionspunkte auf organischen Böden. Der Grundwasserflurabstand entstammt einer digitalen, dynamischen Grundwasserkarte, die jährlich aktualisiert wird (s. Kapitel 6.1.2.2.2). Für die CO_2- und CH_4-Emissionen erfolgt die Berechnung der Emissionen anhand von Responsefunktionen in Abhängigkeit vom Grundwasserflurabstand individuell für jeden einzelnen Erhebungspunkt (s. Kapitel 6.1.2.2.2). Die Responsefunktionen kommen für alle Landnutzungskategorien außer Wald und Gehölze zur Anwendung. Die Datenbasis und Ableitung der Aktivitätsdaten und

[82] www.organische-boeden.de

Emissionsfaktoren entspricht einem IPCC Tier-3-Ansatz. Um Transparenz und Konsistenz mit anderen Aktivitätsdaten, der Abschätzung der N_2O-Emissionen und anderer Pools (DOC, Grabenentwässerung) zu wahren, wurde daraus eine nationale Tier-2-Methodik für das Inventar entwickelt (Tiemeyer et al., 2020).

Mit der Implementierung dieser Systeme wurde die Empfehlung der EU-Komission umgesetzt, für die Emissionen aus organischen Böden in Deutschland Systeme zu entwickeln, mit denen künftig Veränderungen der Kohlenstoffvorräte von Böden infolge von Bewirtschaftungsmaßnahmen zur Verringerung der Emissionen bzw. Kohlenstoffsequestrierung in den Verbleibkategorien 4.B und 4.C bzw. Acker- (CM) und Weidelandbewirtschaftung (GM) erfasst und berichtet werden können ("Member State recommendations on reporting systems for cropland & grazing land management emissions & removals" (Ecofys & Environment Agency Austria, 2017), gemäß der EU-Verordnung (EU) 2018/841. Zudem ermöglicht das System die in der EU-Verordnung ab 2026 verbindliche Berichterstattung über Emissionen aus "bewirtschafteten Feuchtgebieten".

6.1.2.2.1 Aktivitätsdaten

Die in Submissionen vor 2024 verwendete Karte der organischen Böden in Deutschland (Parametrisierter Flächendatensatz (Maßstab: ~1:10.000 – 1:200.000; Rasterweite 25 m), der die IPCC-Definition organischer Böden vollständig abbildet (Roßkopf et al., 2015), wurde durch eine Harmonisierung der neuesten Bodendaten der Bundesländer aktualisiert (Wittnebel et al., 2023). Zudem wurden vor der Datenextraktion in das LULUCF-Berichtsraster topologische Ungenauigkeiten, die eine sinnvolle Parametrisierung erschweren, beseitigt. Die modifizierte Karte der organischen Böden umfasst nunmehr 1.945.718 ha und weist damit primär durch die bessere kleinräumige Erfassung organischer Böden 6,7 % mehr Fläche auf als die in den vorhergehenden Submissionen verwendete Karte (1.822.109 ha). Die aktuelle Karte der organischen Böden beinhaltet im Gegensatz zu der bisher verwendeten Karte auch mit mineralischen Sedimenten überdeckte Torfböden (3,4 % der Kartenfläche) (Wittnebel et al., 2023).

Das landesweite digitale Höhenmodell, das die Grundlage für drei der im Upscaling-Ansatz verwendeten Vorhersagevariablen bildet, wurde auf die neueste Version von 2020 aktualisiert und mit einer Rasterauflösung von 5 m erfasst (bei Submission vor 2024: 25-m-Raster).

Durch die sehr viel genauere Lagezuordnung in der neuen Karte organischer Böden können nun kleinräumige Strukturen erfasst und eine sehr genaue Zeitreihe der Landnutzungen und Landnutzungsänderungen auf organischen Böden berichtet werden. Die Flächenanteile der Landnutzungskategorien gegenüber der vorherigen Submission haben sich absolut und prozentual nur geringfügig verändert (Tabelle 328). Grünland im engen Sinne dominiert die Nutzung bei weitem. Tabelle 328 zeigt die Flächen organischer Böden nach Landnutzungskategorien.

Die regionale Verteilung der Wasserstände in organischen Böden, die Grundlage zur Berechnung der Emissionen ist, wird abgeleitet nach (Bechtold et al., 2014) und beruht u.a. auf der Karte organischer Böden (Roßkopf et al., 2015) und langjährigen Messreihen von Wasserpegeln in organischen Böden (s. Kapitel 6.1.2.2.2).

Die im Landwirtschaftssektor (CRF 3.D.1.f) berichtete Fläche für organische Böden unter landwirtschaftlicher Nutzung unterscheidet sich nicht von der im LULUCF-Sektor. Die Anbauflächen für Ackerböden sind in den beiden berichtspflichtigen Sektoren identisch. Im LULUCF-Sektor werden die Gebiete der Unterkategorien „Grünland i.e.S." und „Gehölze" unter Grünland subsumiert. Gehölzflächen sind kein Agrarland im engeren Sinn, daher werden sie unter 3.D.1.f

nicht aufgeführt; im LULUCF-Sektor müssen sie für die konsistente Darstellung der gesamten deutschen Fläche jedoch einbezogen werden.

Zur Erfassung der CH_4-Emissionen aus Entwässerungsgräben musste deren Fläche und die angrenzende Landnutzung ermittelt werden. Zu diesem Zwecke wurde um die linearen Elemente des ATKIS-Basis-DLM, die Entwässerungsgräben darstellen, Pufferzonen gebildet, in Abhängigkeit von den Legendenangaben. Unter Bezugnahme auf die aktualisierte Kulisse organischer Böden (Wittnebel et al., 2023) und das ATKIS-Basis-DLM konnte so die gesamte Fläche der Gräben zur Entwässerung von organischen Böden für alle Landnutzungskategorien ermittelt werden (Tabelle 328).

Tabelle 328: Flächen organischer Böden und der Entwässerungsgräben nach Landnutzungskategorien für das Jahr 2024, in Hektar [ha]

	Fläche organischer Böden	Flächenanteil	Fläche Entwässerungsgräben
Wald	283.067	14,65	816
Ackerland	332.402	17,21	925
Grünland i.e.S.	1.008.254	52,19	5.983
Gehölze	46.819	2,42	756
Terrestrische Feuchtgebiete	138.033	7,14	526
Gewässer	23.936	1,24	4.299
Torfabbau	10.034	0,52	42
Siedlungen	89.337	4,62	453
Sonstiges Land	36	0	0
∑	1.931.918	100	13.800

6.1.2.2.2 Emissionsberechnung

Die Emissionsfaktoren wurden entsprechend den Richtlinien im 2013 IPCC Wetlands Supplement (IPCC et al., 2014) entwickelt. CO_2 aus dem Boden (CO_2-C on-site) und CH_4 aus dem Boden (CH_{4_land}) wurden für alle Landnutzungskategorien außer Wald mittels empirischer Modelle berechnet (Tier 3). Für Waldböden wurden die entsprechenden Emissionsfaktoren dem 2013 IPCC Wetlands Supplement (IPCC et al., 2014) entnommen. Für N_2O wurden Emissionsfaktoren aus nationalen jährlichen Messwerten entwickelt (Tier 2). Für CO_2 aus gelöstem organischen Kohlenstoff (CO_2-C_{DOC}) und CH_4 aus Gräben (CH_{4_Ditch}) wurden die Standardwerte aus dem 2013 IPCC Wetlands Supplement (IPCC et al., 2014) übernommen.

CO_2 aus dem Boden (CO_2-Con-site)

Die Datengrundlage sind repräsentativ erhobene, qualitätsgeprüfte, nationale jährliche Messwerte (261 Messjahre, 118 Standorte, 17 verschiedene Moorgebiete). Aus diesen Daten haben Tiemeyer et al. (2020) eine empirische (nichtlineare) Response-Funktion der Emission in Abhängigkeit vom Grundwasserstand abgeleitet. Diese wurde verwendet, um an jedem Punkt auf organischen Böden die Emission aus jahresgenau modellierten Grundwasserständen zu berechnen. Die benötigten Wasserstände wurden mittels des Machine-Learning-Modells aus (Bechtold et al., 2014) separat für die entsprechenden Jahre berechnet.

Das Modell wurde zu dieser Submission verbessert. Zum einen wurde der Hauptdatensatz, die Torfwasserstandsdatenbank für Deutschland, erweitert,

- von 53 Moorgebieten, mit 1094 Beobachtungsbrunnen und 7155 mittleren Jahreswasserständen, von 1988 bis 2012 (Submissionen vor 2024)
- auf 93 Moorgebiete, mit 1671 Beobachtungsbrunnen und 10761 mittleren Jahreswasserständen, von 1988 bis 2024 (vorherige Submission)
- auf 125 Moorgebiete, mit 1799 Beobachtungsbrunnen und 11852 mittleren Jahreswasserständen, von 1988 bis 2025 (diese Submission)

Darunter befinden sich auch die stetig aktualisierten Messdaten des deutschlandweiten Moorbodenmonitoring für den Klimaschutz im Offenland (MoMoK, https://moorbodenmonitoring.thuenen.de/), dessen Datenerhebung repräsentativ für die Landnutzungsverteilung und die Bodeneigenschaften organischer Böden in Deutschland erfolgt und somit auch die Datengrundlage für die Emissionsberichterstattung entscheidend verbessert.

Zum anderen: In früheren Einreichungen wurden die Auswirkungen der klimatischen Bedingungen auf die vorhergesagten Wasserstände anhand der durchschnittlichen klimatischen Bedingungen über die gesamte Zeitspanne des Trainingsdatensatzes (1980 bis 2010) ermittelt. Um diese Ungenauigkeit zu beseitigen und die Emissionen aus organischen Böden genauer darzustellen, werden seit der Submission 2024 jährliche Wetterdaten (klimatische Wasserbilanzen im Winter und im Sommer) für jedes Berichtsjahr zur Vorhersage der Torfwasserstände verwendet. Dies bewirkt eine deutliche wetterabhängige Dynamik der Emissionen. Der Einfluß der unterschiedlichen Berechnungsverfahren auf den Verlauf der Emissionskurven, einerseits auf Basis klimatischer Parameter, andererseits witterungsabhängig, verdeutlicht Abbildung 69. Über die Zeit gleichen sich die absoluten Emissionssummen. Sie eignet sich daher sehr gut als Summenparameter über die Zeit, da die $Emissionskurve_{Klima}$ nahezu der berechneten Trendkurve der $Emissionskurve_{Wetter}$ entspricht. Das tatsächliche Emissionsgeschehen gibt sie jedoch nicht wieder; (Kapitel 6.1.2.2.3;Abbildung 69).

Da für mineralisch überdeckte organische Böden nur wenige Emissionsbeobachtungen vorliegen und diese für eine Verallgemeinerung nicht ausreichen, wurde zur Abschätzung der Emissionen aus diesen Böden ein konservativer Ansatz gewählt. Für Böden mit einer mineralischen Bedeckung > 0,3 m wurden die modellierten Torfwasserstände vor der Berechnung der CO_2-Emissionen um die Mächtigkeit der jeweiligen mineralischen Bedeckung erhöht, wodurch ihre Auswirkungen auf das nationale Budget verringert werden.

Da das Modell transformierte Wasserstände vorhersagt und mit Unsicherheiten behaftete Wasserstände in die Emissionsberechnung eingehen, wurden punktweise Erwartungswerte und Unsicherheiten der Wasserstände und Emissionen durch eine Monte-Carlo-Simulation ermittelt

Der Response-Funktion aus Tiemeyer et al. (2020) liegen nur wenige, unsichere Messwerte aus Waldflächen zugrunde. Deshalb wurde für Punkte unter Waldnutzung der Standardemissionsfaktor aus dem 2013 IPCC Wetlands Supplement (IPCC et al., 2014) verwendet. Dieser kam auch für die Subkategorien „Gehölze und Hecken“ zur Anwendung.

CH_4 aus dem Boden (CH_{4_land})

Die Datengrundlage sind repräsentativ erhobene, qualitätsgeprüfte, nationale jährliche Messwerte (296 Messjahre, 137 Standorte, 17 verschiedene Moorgebiete). Die Emissionsberechnung erfolgte analog zum Vorgehen bei CO_2 auf Basis von Tiemeyer et al. (2020) und Bechtold et al. (2014). Da die Responsefunktion für Wald auf sehr wenigen Datenpunkten basiert und stark von nur zwei Messwerten bestimmt wird, wurde für Punkte unter Waldnutzung und die Kategorie Gehölze der Standardemissionsfaktor aus dem 2013 IPCC Wetlands Supplement (IPCC et al., 2014) verwendet.

N_2O

Die Datengrundlage sind repräsentativ erhobene, qualitätsgeprüfte, nationale Messwerte, die mindestens ein Jahr umfassen (320 Standorte, 21 verschiedene Moorgebiete). Da keine funktionalen Zusammenhänge identifiziert werden konnten, werden die Mittelwerte der Messwerte je Landnutzungskategorie als Emissionsfaktor herangezogen (Tiemeyer et al., 2020).

6.1.2.2.3 Implizite Emissionsfaktoren (IEF)

Im Rahmen der Inventarerstellung werden zur Berechnung der Emissionen aus organischen Böden, für jedes Treibhausgas und jede Landnutzungskategorie spezifische, implizite Emissionsfaktoren verwendet. Die im 2013 IPCC Wetlands Supplement (IPCC et al., 2014) aufgeführten Emissionsfaktoren gelten für spezifische Zustände organischer Böden. Bei der Ermittlung der Emissionen aus einer Landnutzungskategorie, müssen die nicht drainierten, nassen Flächen, der Kohlenstoffaustrag mit dem Bodenwasser in Form von gelöstem organischem Kohlenstoff (DOC) sowie die Methanemissionen aus Entwässerungsgräben organischer Böden jedoch ebenfalls berücksichtigt werden. Dadurch ergeben sich die in Tabelle 329 dargestellten impliziten Emissionsfaktoren (IEF) für CO_2-, CH_4- und N_2O-Emissionen aus organischen Böden Deutschlands für das Jahr 2023. Die CO_2- und CH_4-Emissionen sind wetterabhängig. Dadurch variieren die impliziten Emissionsfaktoren im Verlauf der Zeitreihe: in trockenen Jahren sind sie höher für CO_2 und niedriger für CH_4, in nassen Jahren umgekehrt.

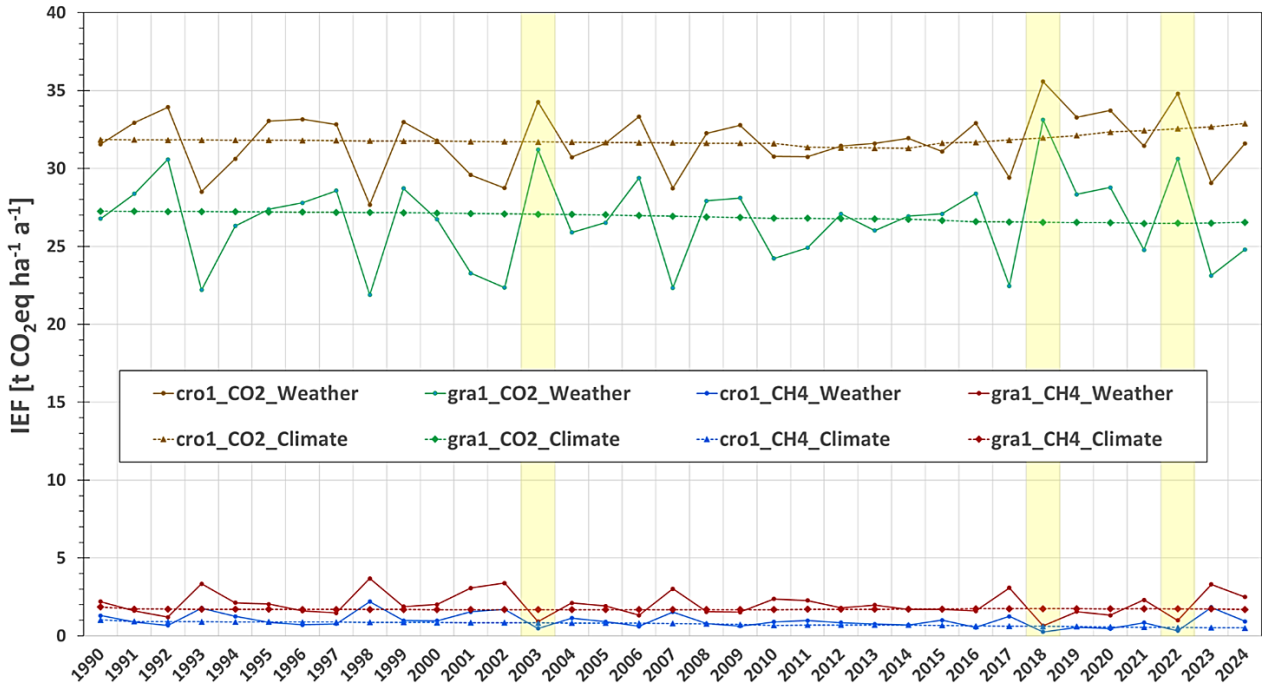
Tabelle 329: Implizite Emissionsfaktoren (IEF) und deren Unsicherheiten (95%-Perzentile) für CO_2-onsite + DOC, CH_{4_land} + CH_{4_ditch} und N_2O-onsite aus organischen Böden Deutschlands (4.A - 4.E; 4(II)) für das Jahr 2024

Landnutzung	CO_2-onsite + DOC		CH_{4_land} + CH_{4_ditch}		N_2O-onsite	
	IEF	95%-Perzentile	IEF	95%-Perzentile	IEF	95%-Perzentile
	t CO_2-C ha^{-1} a^{-1}		kg CH_4 ha^{-1} a^{-1}		kg N_2O-N ha^{-1} a^{-1}	
Wald	10,58	(8,51 - 13)	3,12	(1 - 6,44)	2,33	(0 - 5,12)
$Acker_{annuell}$	26,48	(17,33 - 32,68)	55,71	(30,8 - 228,04)	10,43	
Hopfen	26,58	(14,87 - 36,65)	50,67	(24,82 - 200,95)	10,45	
Weinanbau	16,26	(7,7 - 23,33)	9,36	(3,53 - 41,67)	11,1	
Obstanbau	19,41	(11,03 - 27,03)	99,9	(56,86 - 342,15)	9,42	
Baumschulen	20,29	(13,88 - 25,04)	103,09	(60,22 - 389,78)	9,34	
Weihnachtsbaumkulturen	18,86	(12,54 - 23,48)	119,5	(64,46 - 490,03)	9,01	
Kurzumtriebsplantagen	27,98	(5,41 - 49,3)	71,05	(22,77 - 275,4)	10,1	
Grasland i.e.S	26,23	(14,94 - 34,55)	52,67	(25,67 - 211,34)	4,23	
Gehölze	20,8	(13,95 - 25,86)	119,26	(83,61 - 319,13)	2,23	(0,86 - 7,8)
Hecken	26,45	(13,25 - 36,17)	73,07	(33,51 - 304,99)	2,55	(0,18 - 12,28)
Terrestrische Feuchtgebiete	11,94	(7,19 - 20,83)	60,76	(25,65 - 149,79)	0,35	(0,06 - 1,11)
Torfabbau	5,86	(3,63 - 8,08)	6,44	(1,86 - 15,07)	0,84	(0,43 - 1,19)
Siedlung	22,23	(15,77 - 26,88)	57,87	(29,91 - 209,55)	3,56	(1,4 - 12,37)

Abbildung 58 zeigt diesen Umstand beispielhaft für die Landnutzungskategorien *$Ackerland_{annuell}$*, *$Grünland_{i.e.S.}$* Modellrechnungen mit Parametern als Modellinput, die das Klima beschreiben und nicht die Witterung, können das tatsächliche Emissionsgeschehen in der Zeit nicht

nachzeichnen; jedoch erfassen Sie sehr gut die Summe der Emissionen über die Zeit (Abbildung 69; vergl. Kapitel6.1.2.2.2). Deshalb kommen für das Inventar die Berechnungen mit den Wettereingangsgrößen zur Anwendung.

Abbildung 69: Zeitreihen der Impliziten Emissionsfaktoren (IEF) für $CO_{2\text{-onsite}}$ + DOC und CH_{4_land} + CH_{4_ditch} [t CO_2-Equivalents] aus organischen Böden Deutschlands der Landnutzungssubkategorien Ackerlandannuell (cro1) und Grünland i.e.S. (gra1)



Gelb unterlegt: Extreme Trockenjahre

Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

6.1.2.3 Kohlenstoffemissionen aus der Biomasse (4.A bis 4.F)

6.1.2.3.1 Allgemeines

Im Rahmen der deutschen Inventarerstellung werden Emissionen aus dem Pool ober- und unterirdische pflanzliche Biomasse ausgewiesen für

- die Verbleibkategorien „Wald, Hopfen, Wein, Obst, Baumschulen, Weihnachtsbaumkulturen, Kurzumtriebsplantagen, Gehölze, Hecken, Terrestrische Feuchtgebiete, Gebäude und Freiflächen“
- sämtliche Übergangskategorien

Für die Verbleibkategorien „$Acker_{annuell}$“ und „Grünland i.e.S.“ werden bei gleichbleibender Kulturart (annuell oder perennierend) keine Kohlenstoffvorratsänderungen ausgewiesen, da gemäß der IPCC-Richtlinien (2006 IPCC Guidelines, IPCC (2006a)), in diesen Subkategorien ein Gleichgewichtszustand für die Kohlenstoffflüsse des annuellen Biomasse-Pools unterstellt wird. Nach der Gain-Loss Methode ist somit $\Delta C = 0$ (Equation 2.7 in den 2006 IPCC Guidelines, IPCC (2006a)). Die entsprechenden Felder in den CR-Tabellen werden mit NA gekennzeichnet. Für die Verbleibkategorien „Gewässer“ und „Sonstiges Land“ fallen keine Emissionen aus der pflanzlichen Biomasse an, da die Standorte vegetationslos sind.

Im Falle von Landnutzungsänderungen können annuelle Ackerlandkulturen, unterschieden nach Kulturart, mit dem derzeit bestehenden System nicht räumlich explizit und umfänglich

nachgewiesen werden. Dies hat zur Folge, dass ein nach Kultur und Anbaufläche gewichteter mittlerer Kohlenstoffvorrat als Mischwert für die Biomasse aller annueller Ackerlandkulturen aus Daten der Offizialstatistik (Statistisches Bundesamt, FS 3, R 3.2.1) abgeleitet werden muss (s. Kapitel 6.1.2.3.3). Dies ist die einzige konsistente (inhaltlich und zeitlich) Datenquelle, die nahezu flächendeckend (mit den Einschränkungen der Offizialstatistik; z.B. Ausschlussgrenzen) eine ertrags- und flächengewichtete Ableitung repräsentativer Kohlenstoffvorräte für krautige Pflanzen aus landwirtschaftlicher Produktion in Deutschland ermöglicht. Diese erfolgt derzeit maximal disaggregiert auf Ebene der Bundesländer, so dass, in jährlicher Auflösung, 16 regional unterschiedliche Straten allen Berechnungen der Emissionen aus der Biomasse im Falle von Landnutzungsänderungen von und zu Ackerland$_{annuell}$ zugrunde liegen.

Emissionen aus der Biomasse werden in dem Jahr ausgewiesen, in dem sie anfallen. Hierzu wird eine Methodik genutzt, die insbesondere die spezifische Zusammensetzung und Entwicklung der pflanzlichen Biomasse in den einzelnen Landnutzungskategorien erfasst. Unterteilt in verschiedene Kompartimente werden die Kohlenstoffvorräte der pflanzlichen Biomasse bzw. deren Änderung während deren Lebens- und Bewirtschaftungszyklen fortdauernd modelliert und aufgezeichnet (s. Kapitel 6.1.3.2).

6.1.2.3.2 Allgemeine Berechnungsmethoden

Bei Landnutzungsänderungen werden die Kohlenstoffvorratsänderungen in der annuellen und perennierenden Biomasse erfasst und berichtet. Die Berechnung der Biomassevorratsänderungen erfolgt gemäß der Gain-Loss Methode (2006 IPCC Guidelines). Die Einbindung bzw. die Emission von CO_2 wird über die Kohlenstoffvorratsänderungen, getrennt nach ober- und unterirdischer Biomasse, anhand nationaler Daten ermittelt.

Die Abschätzung der Kohlenstoffvorratsänderungen in der Biomasse erfolgt durch Subtraktion des vollständigen Biomassekohlenstoffvorrats unmittelbar vor Nutzungsänderung vom Vorrat, der im ersten Jahr nach der Nutzungsänderung aufwächst, bezogen auf die von der Änderung betroffene Fläche (n. Gleichung 2.16, 2006 IPCC Guidelines, IPCC (2006a)):

Gleichung 34:

$$\Delta C_{Bio} = \sum_{i=1}^{n} \left(A_i * EF_{final} - A_i * EF_{initial} \right)$$

- ΔC_{Bio}: = Veränderung des Kohlenstoffvorrates in der Biomasse einer Landnutzungskategorie im Jahr der Nutzungsänderung [t]
- A_i = Fläche der Landnutzungsänderung [ha]
- EF_{final} = Pflanzenspezifischer Biomassekohlenstoffvorrat im ersten Jahr nach der Nutzungsänderung [t ha^{-1}]
- $EF_{initial}$ = Pflanzenspezifischer Biomassekohlenstoffvorrat vor der Landnutzungsänderung [t ha^{-1}]
- N = Anzahl der Übergangskategorien
- I = Übergangskategorien

6.1.2.3.3 Annuelle Kulturen und Grünland: Berechnungsmethoden und Emissionsfaktoren

Für annuelle Feldfrüchte und Grünland bedeutet die in Kapitel 6.1.2.3.2 angeführte Berechnungsmethode, dass

- nach Landnutzungsänderungen von/zu diesen Kategorien der vollständige Kohlenstoffvorrat der Biomasse im Jahr der Landnutzungsänderung zur Anrechnung kommt; bei Landnutzungsänderungen hin zu diesen Kategorien, wird ab dem zweiten Jahr ein Gleichgewichtszustand angenommen
- in den Verbleibkategorien wird für die pflanzliche Biomasse dieser Kulturen ein Gleichgewicht unterstellt, folglich werden keine Emissionen berichtet (entsprechende Felder werden in den Common Reporting Tables mit NA ausgewiesen)

Der Kohlenstoffvorrat für die ober- und unterirdische Biomasse der Pflanzen annueller Acker- und Gartenlandkulturen sowie „Grünland i.e.S." wird jährlich auf Basis der Ernteerhebungen des statistischen Bundesamtes abgeleitet, wobei die gleichen Datenquellen und Algorithmen wie für die Berechnung der Ernterückstände in CRF-Sektor 3.D verwendet werden. Die Offizialstatistik ist die einzige deutschlandweite, konsistente (inhaltlich und zeitlich) Datenquelle, die flächendeckend eine Ableitung repräsentativer Emissionsfaktoren für krautige Pflanzen aus landwirtschaftlicher Produktion in Deutschland ermöglicht (vergl. Kapitel Kapitel 6.1.2.3.1). Diese Emissionsfaktoren werden regionalisiert, für die einzelnen Bundesländer, ausgewiesen

Die Grundlage für die Ermittlung der mittleren Kohlenstoffvorräte für Früchte von Acker- und Gartenlandkulturen bilden die Erträge und Anbauflächen von 65 Feldfrüchten. Diese sind:

- Winterweizen, Sommerweizen, Roggen, Triticale, Wintermenggetreide, Wintergerste, Sommergerste, Hafer, Sommermenggetreide, Körnermais;
- Futtererbsen, Ackerbohnen;
- Kartoffeln, Zuckerrüben, Runkelrübe;
- Winterraps;
- Klee, Luzerne, Gras, Silomais;
- Blumenkohl, Brokkoli, Chinakohl, Grünkohl, Kohlrabi, Rosenkohl, Rotkohl, Weißkohl, Wirsing, Eichblattsalat, Eissalat, Endiviensalat, Feldsalat, Kopfsalat, Lollosalat, Radicchio, Römischer Salat , Rucolasalat, sonstige Salate, Spinat, Rharbarber, Spargel, Staudensellerie, Knollenfenchel, Knollensellerie, Meerrettich, Möhren, Radieschen, Rettich, Rote Rüben, Einlegegurken, Schälgurken, Speisekürbisse, Zucchini, Zuckermais, Buschbohnen, Dicke Bohnen, Stangenbohnen, Frischerbsen-Drusch, Frischerbsen, Bundzwiebeln, Speisezwiebeln, Petersilie, Porree, Schnittlauch.

Für Grünland i.e.S. sind dies die Erträge und Anbauflächen aller statistisch erfassten

- Wiesen
- Mähweiden
- Weiden
- Almen und Hutungen

Die Ableitung der trockenen Biomasse einzelner Pflanzenteile aus den Ernteerträgen erfolgt nach Rösemann et al. (2015) mittels Verhältniszahlen und Wassergehaltsangaben aus unterschiedlichen Quellen. Die Daten und Methoden sind konsistent mit denen zur Berechnung des Stickstoffs in Ernterückständen (CRF 3.D.1.d).

Für die Berechnung des Kohlenstoffvorrats der Biomasse wurde, abweichend vom IPCC Standardwert (50 Gew-%), ein durchschnittlicher Kohlenstoffgehalt von 45 Gew.-% angenommen, da Osowski et al. (2004) Kohlenstoffgehalte für Pflanzen in Mitteleuropa von 44–48 Gew.-% ausweisen und Pöpken (2011), bei ihren Untersuchungen von Nutzgehölzpflanzen für das deutsche Inventar ebenfalls mittlere Werte von 45–46 % ermittelte.

Mithilfe all dieser Daten werden mittlere Kohlenstoffvorräte bezogen auf die Fläche berechnet, in dem, pflanzenspezifisch, die jeweiligen Anbauflächen ([ha]) mit den entsprechenden Erträgen ([t Biomasse ha^{-1}]) multipliziert werden. Diese Produkte (pflanzenspezifisch, absolute Erntemengen einzelner krautiger Pflanzen bzw. Teile derselben [t]) werden auf Trockenmasse und Kohlenstoffgehalt umgerechnet, summiert und durch die entsprechende Flächensumme ([ha] dividiert. Das Ergebnis sind flächen- und ertragsgewichtete Mittel für krautige Pflanzen aus landwirtschaftlicher Produktion [t C ha^{-1}], die repräsentativ für Deutschland sind. Diese flächenbezogenen mittleren Kohlenstoffvorräte [t C ha^{-1}] der ober- und unterirdischen Biomasse von Feldfrüchten und Gräsern werden als Emissionsfaktoren angesetzt. Dieses Vorgehen entspricht den Methoden der 2006 IPCC Guidelines.

Die Ergebnisse für annuelle Kulturen der Acker- und Gartenbauflächen sind in Tabelle 330 dargestellt, die für Grünlandkulturen i.e.S. in Tabelle 330. Den Berechnungen der Kohlenstoff-vorratsänderungen infolge Landnutzungsänderung wird immer der aktuelle regionale Wert des jeweiligen Jahres zugrunde gelegt.

Tabelle 330: Flächenbezogener Kohlenstoffvorrat der Biomasse annueller Kulturen auf Acker- und Gartenbauland, differenziert nach Bundesland, gesamter (Bio_{total}), ober- (Bio_{ober}) und unterirdischer Biomasse (Bio_{unter}) für 2024, in [t C ha^{-1} ± Hälfte des 95 % Konfidenzintervalls]

	Bio_{total}	Bio_{ober}	Bio_{unter}
Baden-Württemberg	5,62 (± 9,8 %)	4,41 (± 11,2 %)	1,21 (± 19,9 %)
Bayern	5,96 (± 11,5 %)	4,52 (± 13,5 %)	1,44 (± 22,3 %)
Berlin	2,89 (± 13 %)	2,25 (± 14,5 %)	0,64 (± 27,3 %)
Brandenburg	4,12 (± 10,7 %)	3,27 (± 12,8 %)	0,85 (± 17,3 %)
Bremen	6,13 (± 13,7 %)	4,59 (± 16,4 %)	1,54 (± 23,8 %)
Hamburg	5,27 (± 10,6 %)	4,27 (± 12,3 %)	1,00 (± 21,1 %)
Hessen	5,61 (± 9,3 %)	4,23 (± 9,7 %)	1,37 (± 23,4 %)
Mecklenburg-Vorpommern	5,87 (± 10,9 %)	4,51 (± 12,4 %)	1,37 (± 22,9 %)
Niedersachsen	6,70 (± 13,8 %)	4,66 (± 16 %)	2,04 (± 27 %)
Nordrhein-Westfalen	6,83 (± 11 %)	4,91 (± 11,7 %)	1,92 (± 25,6 %)
Rheinland-Pfalz	5,80 (± 9,3 %)	4,27 (± 9,8 %)	1,52 (± 22,5 %)
Saarland	3,87 (± 8,8 %)	3,16 (± 9,9 %)	0,72 (± 19,4 %)
Sachsen	5,26 (± 9,7 %)	4,08 (± 11,1 %)	1,18 (± 20,1 %)
Sachsen-Anhalt	5,98 (± 10,5 %)	4,41 (± 11,2 %)	1,56 (± 25,4 %)
Schleswig-Holstein	5,74 (± 11,9 %)	4,51 (± 14,3 %)	1,23 (± 19,7 %)
Thüringen	5,52 (± 9,5 %)	4,31 (± 10,8 %)	1,21 (± 20,4 %)

Tabelle 331: Flächenbezogener Kohlenstoffvorrat der Biomasse von Grünland im engeren Sinne, differenziert nach Bundesland, gesamter (Bio_{total}), ober- (Bio_{ober}) und unterirdischer Biomasse (Bio_{unter}) für 2024, in [t C ha^{-1} ± Hälfte des 95 % Konfidenzintervalls]

	Bio_{total}	Bio_{ober}	Bio_{total}
Baden-Württemberg	6,24 (± 32,2 %)	3,47 (± 38,5 %)	2,77 (± 54,2 %)
Bayern	8,55 (± 32,1 %)	4,75 (± 38,4 %)	3,80 (± 54,1 %)
Berlin	5,20 (± 29,6 %)	2,89 (± 35,4 %)	2,31 (± 49,8 %)
Brandenburg	5,18 (± 32,6 %)	2,88 (± 39,0 %)	2,30 (± 54,8 %)
Bremen	7,88 (± 37,8 %)	4,38 (± 43,3 %)	3,50 (± 62,4 %)
Hamburg	8,54 (± 36,4 %)	4,75 (± 43,5 %)	3,80 (± 61,2 %)
Hessen	6,12 (± 30,1 %)	3,40 (± 36,1 %)	2,72 (± 50,7 %)
Mecklenburg-Vorpommern	4,88 (± 31,8 %)	2,71 (± 38,1 %)	2,17 (± 53,5 %)
Niedersachsen	7,86 (± 36,8 %)	4,37 (± 44,0 %)	3,49 (± 61,8 %)
Nordrhein-Westfalen	6,22 (± 29,7 %)	3,45 (± 35,5 %)	2,76 (± 49,9 %)
Rheinland-Pfalz	6,48 (± 30,8 %)	3,60 (± 36,8 %)	2,88 (± 51,7 %)
Saarland	4,69 (± 29,4 %)	2,61 (± 35,1 %)	2,09 (± 49,3 %)
Sachsen	6,06 (± 31,0 %)	3,37 (± 37,1 %)	2,69 (± 52,1 %)
Sachsen-Anhalt	5,17 (± 32,6 %)	2,87 (± 39,0 %)	2,30 (± 54,9 %)
Schleswig-Holstein	8,40 (± 32,9 %)	4,67 (± 39,4 %)	3,73 (± 55,4 %)
Thüringen	6,52 (± 34,8 %)	3,62 (± 41,7 %)	1,74 (± 58,6 %)

6.1.2.3.4 Perennierende Kulturen: Berechnungsmethoden und Emissionsfaktoren

Für perennierende pflanzliche Biomasse außerhalb des Waldes werden anthropogen bedingte CO_2-Emissionen infolge von Kohlenstoffvorratsänderungen zu dem Zeitpunkt ausgewiesen, an dem sie auftreten. Hierzu ist es notwendig, die kompletten Wachstumszyklen der unterschiedlichen Gehölzpflanzen und Begleitvegetation zu erfassen und in der Zeit, in Abhängigkeit von Umtriebszyklen und Betriebsdauer, abzubilden. Je nach Landnutzung und Kultur setzt sich der Kohlenstoffvorrat der pflanzlichen Biomasse aus unterschiedlichen Kompartimenten zusammen. Die Landnutzungskategorien bzw. perennierenden Kulturen, die unterstellte Zusammensetzung der pflanzlichen Biomasse sowie deren Umtriebszyklen sind in Tabelle 332 dargestellt.

Tabelle 332: Landnutzungskategorien mit perennierenden Gehölzkulturen außerhalb des Waldes, deren Kompartimente und Umtriebszyklen [a]

Landnutzungskategorie	Kürzel	Kompartimente (Gewichtungsfaktor)	Umtriebszyklus [a]	Umtriebszyklus+
Obstanbau	croo	Obstgehölze (1), Grünland (0,75)	20	nächster Zyklus
Weinanbau	crow	Rebstöcke (1), Grünland (0,75)	30	nächster Zyklus
Baumschulen	crot	Forstgehölze (0,33), Ziergehölze (0,33), Grünland (0,33)	10	Gleichgewicht
Weihnachtsbaumkulturen	crox	Nadelhölzer (1), Grünland (0,75)	10	nächster Zyklus
Kurzumtriebsplantagen	cros	Laubgehölze (1)	10	nächster Zyklus
Hecken/Feldgehölze	gra2/gra3	Heckengehölze/Laubbäume (1)	12	nächster Zyklus

Landnutzungskategorie	Kürzel	Kompartimente (Gewichtungsfaktor)	Umtriebszyklus [a]	Umtriebszyklus+
Terrestrische Feuchtgebiete	wett	Heckengehölze/Laubbäume (0,33); Grünland (0,66)	20	Gleichgewicht
Siedlungen	set1	Heckengehölze/Laubbäume (0,25); Grünland (0,25)	44	Gleichgewicht

Die Kompartimente werden während der Umtriebszeiten unterschiedlich behandelt. Der aktuelle Kohlenstoffvorrat der Biomasse eines Standortes ergibt sich für ein spezifisches Jahr aus der Summe der aktuellen Vorräte der Kompartimente. Folgende weitere Annahmen liegen der Berechnungsmethodik zugrunde:

- Der Biomassevorrat perennierender Kulturen außerhalb des Waldes wird an jedem Stichprobenpunkt verfolgt; das beinhaltet die jährliche Erfassung der Veränderung des absoluten Vorrats
- Der Biomassevorrat der unterschiedlichen perennierenden Kulturen ist abhängig von deren Umtriebszyklen. Der systemrelevante maximale Vorrat wird im letzten Jahr des Zyklus erreicht
- Nach Ablauf der Umtriebszeit beginnt ein neuer Wachstumszyklus, unabhängig davon, ob sich die Kultur noch in einer Übergangskategorie oder einer Verbleibkategorie befindet
- Unabhängig von den Umtriebszyklen dauert die Übergangszeit max. 20 Jahre (Konzept der effektiven Übergangszeit (Kapitel 6.1.2)); nach Ablauf derselben, wird die Kultur in die der jeweiligen Übergangskategorie entsprechende Verbleibkategorie überführt und verbleibt im aktuellen Umtriebszyklus. Es ändert sich nur die Allokation der aktuellen Vorräte bzw. der Emission
- Bei Landnutzungsänderung von einer Landnutzungskategorie mit perennierenden Kulturen zu jedweder anderen Landnutzungskategorie, wird der aktuelle Kohlenstoffvorrat aller Kompartimente vollständig im Jahr der Landnutzungsänderung als Emission veranschlagt
- Allen Punkten, die für das Jahr 1990 perennierende Kulturen aufwiesen, wurde ein Stadium der kulturspezifischen Umtriebszeit mit einem Zufallsgenerator zugewiesen
- Da *Kurzumtriebsplantagen* im B-DLM nicht explizit ausgewiesen werden, erfolgt die Flächenzuteilung (Punkte) mittels Zufallsgenerator, in Abhängigkeit von den Daten der Offizialstatistik zu den entsprechenden Erhebungszeitpunkten. Daten zu Kurzumtriebsplantagen werden in der deutschen Offizialstatistik explizit erst seit 2010 erhoben.

Die jährliche Berechnung der Emission erfolgt nach Gleichung 2.7 IPCC 2006, Vol. 4:

Gleichung 35

$$\text{Emission}\ [\text{t}\ \text{CO}_2\ \text{ha}^{-1}\text{a}^{-1}] = \left(\text{C}_{\text{curr year}} - \text{C}_{\text{prev year}}\right) * {}^{-44}/_{12}$$

- $\text{C}_{\text{curr year}}$ = Kohlenstoffvorrat im aktuellen Jahr [t C ha^{-1} a^{-1}]
- $\text{C}_{\text{prev year}}$ = Kohlenstoffvorrat des vorhergehenden Jahres [t C ha^{-1} a^{-1}]

Dabei wird der Kohlenstoffvorrat, spezifisch für die unterschiedlichen Kulturen, wie folgt bestimmt:

Gleichung 36

$$C_{cultspec} = C_{cultspec_{abo}} + C_{cultspec_{bel}}$$

- $C_{cultspec}$ = Kulturspezifischer Kohlenstoffvorrat der Biomasse [t C ha^{-1} a^{-1}]
- $C_{cultspec_abo}$ = Oberirdischer kulturspezifischer Kohlenstoffvorrat der Biomasse [t C ha^{-1} a^{-1}]
- $C_{cultspec_bel}$ = Unterirdischer kulturspezifischer Kohlenstoffvorrat der Biomasse [t C ha^{-1} a^{-1}]

Zur Berechnung der Kohlenstoffvorräte der ober- und unterirdischen pflanzlichen Biomasse, werden die dafür benötigten Kohlenstoffvorräte der Subkompartimente mit einem spezifischen Gewichtungsfaktor multipliziert, in Abhängigkeit von der Bezugsgröße (z.B. Fläche, oberirdische Biomasse) des jeweiligen Subkompartiments. Die Terme für Schnitt und krautige Pflanzen (gra1) sind kulturspezifisch optional:

Gleichung 37

$$C_{abo} = C_{stem,branch} * GF + C_{cut} * GF + C_{gra1_{abo}} * GF$$

- C_{abo} = Oberirdischer Kohlenstoffvorrat der Biomasse [t C ha^{-1} a^{-1}]
- $C_{stem,branch}$ = Oberirdischer Kohlenstoffvorrat der Gehölze (Stamm, Äste) [t C ha^{-1} a^{-1}]
- GF = Kulturspezifischer Gewichtungsfaktor$_{Bezugsgröße}$
- C_{cut} = Kohlenstoffvorrat des Schnittgutes [t C ha^{-1} a^{-1}]
- $C_{gra1\ abo}$ = Oberirdischer Kohlenstoffvorrat der krautigen Biomasse [t C ha^{-1} a^{-1}]

Gleichung 38

$$C_{bel} = C_{roots} * GF + C_{gra1_{bel}} * GF$$

- C_{bel} = Unterirdischer Kohlenstoffvorrat der Biomasse [t C ha^{-1} a^{-1}]
- C_{roots} = Unterirdischer Kohlenstoffvorrat des Gehölzes (Wurzeln) [t C ha^{-1} a^{-1}]
- $C_{gra1\ bel}$ = Unterirdischer Kohlenstoffvorrat der krautigen Biomasse [t C ha^{-1} a^{-1}]
- GF = Kulturspezifischer Gewichtungsfaktor$_{Bezugsgröße}$

6.1.2.3.5 Ableitung der Emissionsfaktoren für perennierende Gehölzkulturen

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Methodenentwicklung zur Erfassung der Biomasse mehrjährig verholzter Pflanzen außerhalb von Waldflächen“ wurden landesspezifische Kohlenstoffvorräte für die ober- und unterirdische Biomasse von Obstgehölzen, Wein und Weihnachtsbaumkulturen in Deutschland erhoben. Außerdem wurden mittels dieser Daten und Ergebnissen der Bundeswaldinventur mittlere Kohlenstoffvorräte für die Pflanzenbestände in Baumschulen abgeschätzt. Die mittlere Baumbiomasse für Kurzumtriebsplantagen und Hopfen wurde landesspezifisch aus Literatur- und Forschungsprojektdaten hergeleitet.

6.1.2.3.5.1 Obstgehölze

Im Rahmen des oben genannten Forschungsprojektes wurden aus den zwei Hauptobstanbaugebieten Deutschlands (Altes Land: Norddeutschland und Bodenseegebiet: Süddeutschland) insgesamt 100 Obstbäume (91 Apfel-, 6 Kirsch- und 3 Pflaumenbäume) unterschiedlichen Alters und Sorte destruktiv untersucht. Zusätzlich wurden an 210 lebenden Apfelbäumen folgende Parameter erhoben:

- Stammfußdurchmesser
- Brusthöhendurchmesser
- Höhe

Betrachtet wurde ausschließlich der Erwerbsobstbau. Anhand aller im Forschungsprojekt erhobenen Daten sowie Ergebnissen der Offizialstatistik (Baumobstanbauerhebung Statistisches Bundesamt (FS 3, R 3.1.4) [83]) konnte der Gesamtkohlenstoffvorrat in der ober- und unterirdischen Biomasse der unterschiedlichen Obstgehölze für unterschiedliche Altersklassen und für alle Jahre der Obstanbauerhebungen (Statistisches Bundesamt, FS 3, R 3.1.4) (2002, 2007, 2012, 2017) ermittelt werden. Dabei wurden die für Apfelbäume abgeleiteten Werte auch den Birnen zugeteilt, die für Kirsche und Pflaume sowohl den Zwetschgen als auch den Mirabellen und Renekloden.

Für das Inventar können Obstanbauflächen nur pauschal georeferenziert, nicht differenziert nach Art der Obstgehölze ausgewiesen werden. Daher wurde aus den Daten ein langjähriger flächengewichteter, durchschnittlicher Kohlenstoffvorrat für die oberirdische Phytomasse von Obstgehölzen abgeleitet, Dies erfolgt mittels Division der Summe des Gesamtkohlenstoffvorrats jeder Partition einer Altersklasse durch die jeweils bestockte Fläche. Für die unterirdische pflanzliche Biomasse konnte dies nicht durchgeführt werden, da die im Forschungsprojekt erhobenen Originaldaten probenahmebedingt sehr stark variierten und keine signifikante Abhängigkeit von der oberirdischen Biomasse abgeleitet werden konnte. Aus diesem Grunde wurde die unterirdische pflanzliche Biomasse aus der oberirdischen Biomasse anhand der Gleichung von (Mokany et al., 2006a)[84] ermittelt.

Aus den so abgeleiteten Werten konnte dann für die oberirdische Biomasse durch Regression eine Sigmoidfunktion abgeleitet werden, die hochsignifikant das Verhältnis von Kohlenstoffvorrat in Obstgehölzen in Relation zum Alter beschreibt:

Gleichung 39

$$C_{croo_{stem,branch}} = -1{,}9798 + \frac{16{,}9435}{\left(1+e^{-\frac{a-13{,}0365}{6{,}1938}}\right)}$$

- $C_{croo\ stem,branch}$ = Kohlenstoffvorrat Stamm und Äste der Obstgehölze [t C ha^{-1}]
- A = Anzahl Jahre nach Neubegründung (1, 2, 3 - 20) nach Bestandserneuerung

[83] Bei der Baumobstanbauerhebung handelt es sich um eine repräsentative statistische Erhebung im Erwerbsobstbau Deutschlands, die alle 5 Jahre durchgeführt wird. Der vorliegenden Submission liegen die Ergebnisse der Obstanbauerhebungen der Jahre 2002, 2007, 2012 und 2017 zugrunde. Bei der Erhebung werden vom Statistischen Bundesamt u.a. die Stückzahlen von Apfel-, Birn-, Süß-, Sauerkirsch-, Pflaumen-, Zwetschgen-, Mirabellen- und Reneklodenbäumen in unterschiedlichen Altersklassen ermittelt, sowie die mit diesen Bäumen in der jeweiligen Altersklasse bestockten Flächen. Die Baumobstanbauerhebung ist eine Vollerhebung

[84] $Phytomasse_{unterirdisch}$ = 0,489 * ($Phytomasse_{oberirdisch}$Gehölze)^{0,890} - Mokany, K., Raison, R. J., & Prokushkin, A. S. (2006b). Critical analysis of root: shoot ratios in terrestrial biomes [Journal Article]. *Global Change Biology*, *12*(1), 84-96. http://reddcr.go.cr/sites/default/files/centro-de-documentacion/mokany_et_al._2006_-_critical_analysis_root_to_shoot_ratios.pdf haben in ihrer Übersichtsarbeit Wurzel/Spross-Verhältnisse für zahlreiche Vegetationstypen in Abhängigkeit von Biomasse, klimatischen und standortkundlichen Parametern abgeleitet, die als Default-Werte in die IPCC – Guidelines 2006 IPCC. (2006a). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories* [Report]. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, & K. Tanabe. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/ übernommen wurden

Diese Formel sowie die daraus abgeleiteten Werte für die unterirdische Biomasse (Mokany et al.) liegen im Inventar allen Berechnungen mit Obstgehölzen zugrunde.

Weitere Unterstellungen sind:

- Der Schnitt beträgt jährlich 20 % der oberirdischen Biomasse (PÖPKEN 2011)
- 75 % der Obstanbauflächen sind mit krautigen Pflanzen/Gras bewachsen
- Die Umtriebszeit der Obstgärten wird auf 20 Jahre festgelegt (Angaben zwischen 12 – 25 Jahren; rechnerisch, ermittelt aus der Verteilung der Baumbiomasse der unterschiedlichen Altersklassen nach Destatis: 18,3 Jahre); dann erfolgt eine vollständige Bestandserneuerung (nicht Gras)

Der oberirdische pflanzliche Biomassevorrat für Obstanbauflächen errechnet sich nach

Gleichung 40

$$C_{croo_{abo}} = C_{croo_{stem,branch}} + C_{croo_{cut}} + C_{gra1_{abo}} * 0{,}75$$

- $C_{croo\ stem,branch}$ = Kohlenstoffvorrat Stamm und Äste der Obstgehölze [t C ha^{-1}]
- $C_{croo\ cut}$ = Kohlenstoffvorrat des jährlichen Schnittguts [t C ha^{-1}]
- $C_{gra1\ abo}$ = Kohlenstoffvorrat für die oberirdische Biomasse von Grünland i.e.S. [3,78 t C ha^{-1}]

Der unterirdische pflanzliche Biomassevorrat für Obstanbauflächen errechnet sich nach:

Gleichung 41

$$C_{croo_{roots}} = 0{,}489 * C_{croo_{abo}}{}^{0{,}89}$$

- $C_{croo\ roots}$ = Kohlenstoffvorrat der unterirdischen Biomasse von Obstgehölzen [t C ha^{-1}]
- $C_{croo\ abo}$ = Kohlenstoffvorrat der oberirdische Biomasse von Obstgehölzen [t C ha^{-1}]

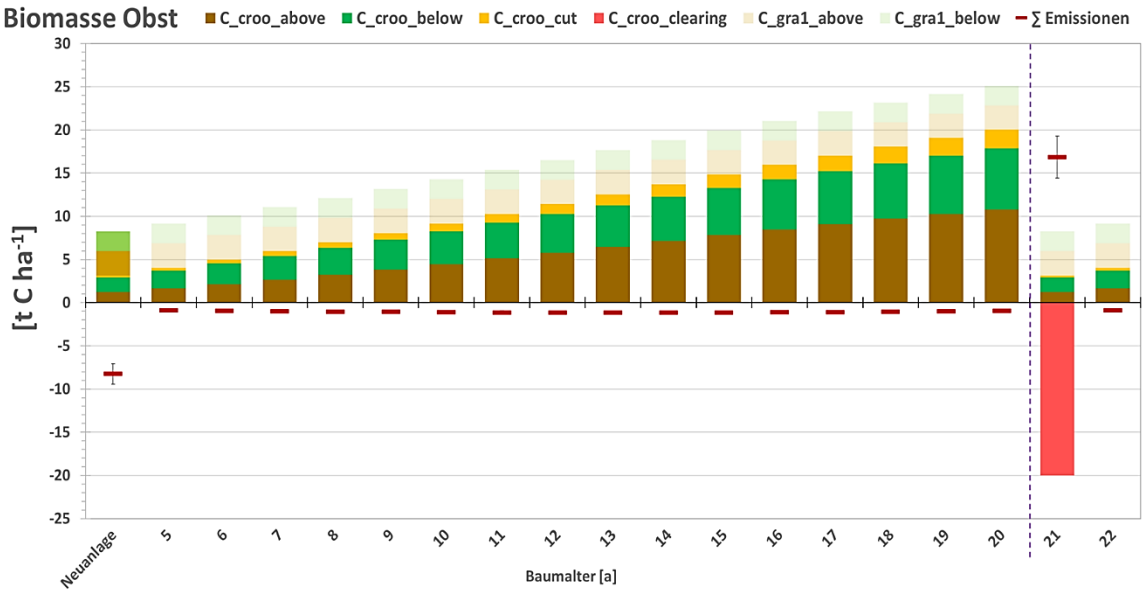
Gleichung 42

$$C_{croo_{bel}} = C_{croo_{roots}} + C_{gra1_{bel}} * 0{,}75$$

- $C_{croo\ bel}$ = Kohlenstoffvorrat der unterirdischen Biomasse von Obstgehölzen [t C ha^{-1}]
- $C_{croo\ roots}$ = Kohlenstoffvorrat der Wurzelbiomasse in [t C ha^{-1}]
- $C_{gra1\ bel}$ = Kohlenstoffvorrat für die unterirdische Biomasse von Grünland i.e.S. [3,03 t C ha^{-1}]

Zur Berechnung des gesamten Kohlenstoffvorrats in der pflanzlichen Biomasse von Obstanbauflächen und deren Verrechnung als Emissionen, kommen die in Kapitel 6.1.2.3.2 und Kapitel 6.1.2.3.3 aufgeführten Methoden zur Anwendung. Die Entwicklung der Kohlenstoffvorräte im Obstanbau während mehrerer Umtriebszyklen, sowie die damit verbundenen Emissionen, sind in Abbildung 70 dargestellt. Obstgehölze werden gewöhnlich in Baumschulen angezogen, bevor sie in Plantagen gepflanzt werden. Um eine Doppelzählung zu vermeiden, wird bei Neubegründung einer Obstanbaufläche für Obstbäume ein Alter von 4 Jahren unterstellt.

Abbildung 70: Entwicklung der Kohlenstoffvorräte [t C ha^{-1}] in Kompartimenten der pflanzlichen Biomasse von Obstanbauflächen sowie die daraus resultierenden Emissionen [t C ha^{-1}] in aufeinander folgenden Umtriebszyklen (|). Transparente Balken sind nur bei Landnutzungsänderung emissionsrelevant



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

6.1.2.3.5.2 Wein

Zur Ermittlung landesspezifischer Kohlenstoffvorräte für Weinstöcke wurden im Projekt „Methodenentwicklung zur Erfassung der Biomasse mehrjährig verholzter Pflanzen außerhalb von Waldflächen“ (Pöpken, 2011) 74 Weinstöcke destruktiv untersucht. Die Rebstöcke waren 15 bzw. 25 Jahre alt. Ermittelt wurden die Masse sowie der Wasser- und Kohlenstoffgehalt der ober- und unterirdischen Pflanzenteile (Pöpken, 2011). Aus diesen Daten konnte mittels nichtlinearer Regression ein hochsignifikanter Zusammenhang zwischen Alter und Kohlenstoffvorrat der ober- und unterirdischen Biomasse von Rebstöcken ermittelt werden. Da in Deutschland durchschnittlich 4.000 Weinstöcke auf einem Hektar stocken (Pöpken, 2011), wurden zur Berechnung des Kohlenstoffvorrats pro Flächeneinheit die C-Vorräte der einzelnen Pflanzenkompartimente bzw. der Gesamtpflanze mit 4.000 multipliziert und somit die Vorräte pro ha ermittelt. Die Berechnung der ober- und unterirdischen pflanzlichen Biomasse erfolgt nach folgenden Gleichungen:

Gleichung 43: Berechnung der oberirdischen Biomasse für Rebstöcke

$$C_{crow_{vine}} = (-0{,}004 * a^2 + 0{,}0234 * a) * \frac{4000}{1000}$$

- $C_{crow\ vine}$ = Kohlenstoffvorrat des Rebstocks [t C ha^{-1}]
- a = Anzahl Jahre nach Neubegründung (1 – 30)

Gleichung 44: Berechnung der unterirdischen Biomasse für Rebstöcke

$$C_{crow_{roots}} = (0{,}0001 * a^2 + 0{,}0096 * a) * \frac{4000}{1000}$$

- $C_{crow\ roots}$ = Kohlenstoffvorrat der Wurzel des Rebstocks [t C ha^{-1}]

- a = Anzahl Jahre nach Neubegründung (1 – 30)

Nicht zuletzt aus Gründen des Erosionsschutzes werden in Deutschland auf den Zwischenstreifen im Weinbau Grünlandpflanzen kultiviert. Wie im Obstbau wird auch im Weinbau der durchschnittliche Flächenanteil von Grünlandpflanzen mit 75 % angenommen. In weiteren Untersuchungen wurde festgestellt, dass jährlich ca. 0,81 t C ha^{-1} Schnitt anfallen. Grasanteil und Schnitt werden nur bei erstmaliger Bestandsneubegründung und bei Nutzungsänderung von Wein zu einer anderen Landnutzungskategorie in Rechnung gestellt. Die Betriebsdauer ist gleich der Umtriebszeit und beträgt 30 Jahre. So errechnet sich für den Weinanbau der Kohlenstoffvorrat in der Biomasse nach folgenden Formeln:

Gleichung 45: Summe der oberirdischen Biomasse im Weinanbau in [t C ha^{-1}]

$$C_{crow_{abo}} = C_{crow_{vine}} + C_{crow_{cut}} + C_{gra1_{abo}} * 0{,}75$$

- $C_{crow\ abo}$ = Kohlenstoffvorrat der oberirdischen Biomasse auf Weinanbauflächen [t C ha^{-1}]
- $C_{crow\ vine}$ = Kohlenstoffvorrat der oberirdischen Biomasse des Rebstocks [t C ha^{-1}]
- $C_{crow\ cut}$ = Kohlenstoffvorrat des jährlichen Schnittguts des Rebstocks [t C ha^{-1}]
- $C_{gra1\ abo}$ = Kohlenstoffvorrat der oberirdischen Biomasse des Grünlandes zwischen den Pflanzreihen [t C ha^{-1}]

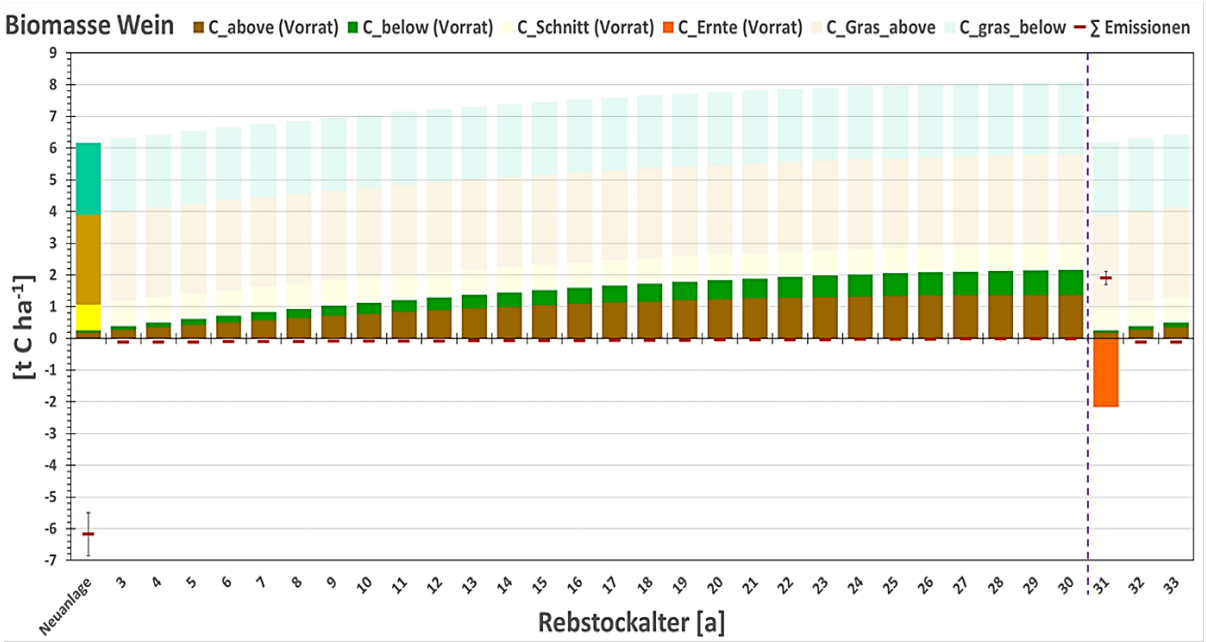
Gleichung 46: Summe der unterirdischen Biomasse im Weinanbau in [t C ha^{-1}]

$$C_{crow_{bel}} = C_{crow_{roots}} + C_{gra1_{bel}} * 0{,}75$$

- $C_{crow\ bel}$ = Kohlenstoffvorrat der unterirdischen Biomasse auf Weinanbauflächen [t C ha^{-1}]
- $C_{crow\ roots}$ = Kohlenstoffvorrat der unterirdischen Biomasse des Rebstocks [t C ha^{-1}]
- $C_{gra1\ bel}$ = Kohlenstoffvorrat der unterirdischen Biomasse des Grünlandes zwischen den Pflanzreihen [t C ha^{-1}]

Zur Berechnung des gesamten Kohlenstoffvorrats in der pflanzlichen Biomasse von Weinanbauflächen und deren Verrechnung als Emissionen kommen die in Kapitel 6.1.2.3.2 und Kapitel 6.1.2.3.3 aufgeführten Methoden zur Anwendung. Die Entwicklung der Kohlenstoffvorräte im Weinbau in der Zeit, sowie die damit verbundenen Emissionen sind in Abbildung 71 dargestellt. Weinpflanzen werden im ersten Jahr in der Regel in Baumschulen großgezogen; daher werden sie, um Doppelzählungen zu vermeiden, im Modell zweijährig ausgepflanzt.

Abbildung 71: Entwicklung der Kohlenstoffvorräte [t C ha^{-1}] in Kompartimenten der Biomasse von Weingärten sowie die daraus resultierenden Emissionen [t C ha^{-1}] in aufeinander folgenden Umtriebszyklen (|). Transparente Balken sind nur bei Landnutzungsänderung emissionsrelevant



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

6.1.2.3.5.3 Baumschulen

Aussagen über die Art der in Baumschulen (crot) aufgezogenen Gehölze gibt die Baumschulerhebung, die im Turnus von 4 Jahren als Vollerhebung vom Statistisches Bundesamt (FS 3, R 3.1.7) durchgeführt wird. Die Erhebung 2017 zeigte, dass auf den deutschen Baumschulflächen hauptsächlich Zier- und sonstige Gehölze angebaut (ca. 80 %) wurden; die Aufschulung von Forstpflanzen erfolgte auf ca. 20 % der Fläche (Statistisches Bundesamt (FS 3, R 3.1.7)). Da für Deutschland keine Untersuchungen über den durchschnittlichen Biomassevorrat im Aufwuchs von Baumschulen vorliegen, wurde aus landesspezifischen Biomassevorratswerten für Gehölzpflanzen ein mittlerer Kohlenstoffvorrat pro Baumschulflächeneinheit hergeleitet. Hierfür wurde Folgendes unterstellt:

- Der Gehölzbestand setzt sich zu zwei Dritteln aus Ziergehölzen und zu einem Drittel aus Waldbäumen zusammen (letztere werden zwar nur auf ca. 20 % der Fläche aufgezogen; da in Baumschulen aber auch Nadelgehölze für Weihnachten und auch im Zierpflanzenanbau, außerdem „Waldbäume“ wie Eiche und Buche geschult werden, wurde der Anteil auf 33 % aufgewertet)
- Baumschulpflanzen werden max. 10 Jahre geschult
- Die Altersklassen innerhalb der Gehölzgruppen sind gleichverteilt
- 6000 Pflanzen pro ha (dies entspricht einem mittleren Pflanzenabstand von ca. 120/130 cm)
- Zusätzlich 1/3 der Fläche ist mit krautigen Pflanzen/Gras bestanden; dies wird im Jahr der Begründung einmalig veranschlagt, dann erst wieder bei Nutzungsänderung von crot zu anderer LUC

- Umtriebszeit: 10 Jahre; es wird unterstellt, dass 10 Jahre nach der Betriebsbegründung das Gehölzsystem ins Gleichgewicht fällt, Entnahme und Zuwachs sich die Waage halten. Daher wird ab dem 10. Jahr der Mittelwert der in 10 Jahren produzierten Gehölzbiomasse als Gleichgewichtswert unterstellt. Es werden ab dem 11. Jahr keine Emissionen mehr berichtet.

Für Ziergehölze wurden stellvertretend die aus den Ergebnissen des Projekts „Methodenentwicklung zur Erfassung der Biomasse mehrjährig verholzter Pflanzen außerhalb von Waldflächen“ (Pöpken) abgeleiteten Kohlenstoffvorräte für Obstgehölze herangezogen. So wurden hälftig, für größere Gehölze, die für Kirsche und Pflaume ermittelten Kohlenstoffvorräte, für kleinere Gehölze, die für Apfelbäume zugrunde gelegt (s. Kapitel 6.1.2.3.5.1). Zur Berechnung der Biomasse der Waldbäume wurden die Methoden angewendet, die zur Berechnung der Waldbiomasse von (Bösch & Kändler) entwickelt wurden und in Kapitel 6.4.2.2 beschrieben sind. Die unterirdische Biomasse wurde für die einzelnen Gehölzgruppen anhand der Formel von Mokany et al. (2006b) abgeschätzt (s. Kapitel 6.1.2.3.5.1).

Aus den Kohlenstoffvorräten der einzelnen Gehölzgruppen wurden Mittelwerte in Abhängigkeit vom Alter gebildet, die den Kohlenstoffvorrat in der pflanzlichen Biomasse der Gehölzpflanzen einer Baumschule repräsentieren. Diese wurden zum Alter in Relation gesetzt, wodurch sowohl für die oberirdische als auch die unterirdische Biomasse hochsignifikante Regressionsgleichungen ermittelt werden konnten, die allen entsprechenden Berechnungen zugrunde liegen:

Gleichung 47: Oberirdische Biomasse für Baumschulen in [t C ha^{-1}]

$$C_{crot_{abo}} = 0{,}2673 * a^2 - 0{,}0744 * a + \frac{C_{gra1_{abo}}}{3}$$

- $C_{crot\ abo}$ = Kohlenstoffvorrat für die oberirdische Biomasse von Baumschulen in [t C ha^{-1}]
- a = Anzahl Jahre nach Neubegründung (1 – 10)
- $C_{gra1\ abo}$ = Kohlenstoffvorrat für die oberirdische Biomasse von Grünland i.e.S. [3,78 t C ha-^{1}]

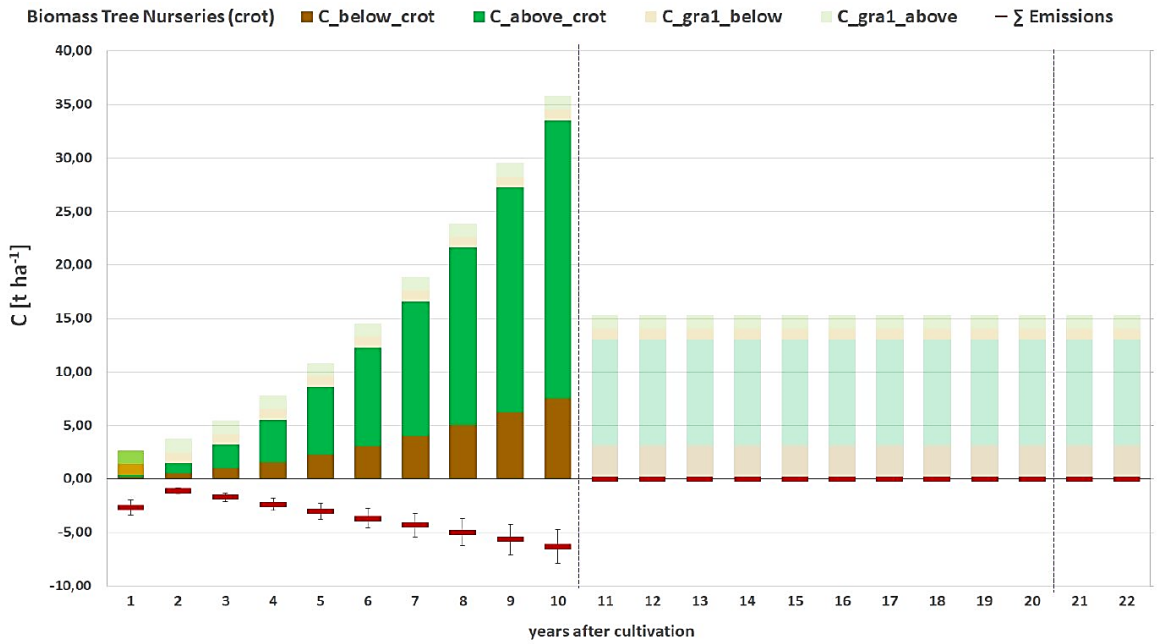
Gleichung 48: Unterirdische Biomasse für Baumschulen in [t C ha^{-1}]

$$C_{crot_{bel}} = 0{,}0599 * a^2 + 0{,}1562 * a + \frac{C_{gra1_{bel}}}{3}$$

- $C_{crot\ bel}$ = Kohlenstoffvorrat für die oberirdische Biomasse von Baumschulen in [t C ha^{-1}]
- a = Anzahl Jahre nach Neubegründung (1 – 10)
- $C_{gra1\ bel}$ = Kohlenstoffvorrat für die unterirdische Biomasse von Grünland i.e.S. [3,03 t C ha^{-1}]

Abgesehen von den o.a. Abweichungen, kommen zur Berechnung des gesamten Kohlenstoffvorrats in der pflanzlichen Biomasse von Baumschulen, den damit verbundenen Emissionen und deren Allokation, die in Kapitel 6.1.2.3.2 und Kapitel 6.1.2.3.3 aufgeführten Methoden zur Anwendung. In Abbildung 72 ist die Entwicklung der Kohlenstoffvorräte in Baumschulen während aufeinander folgender Umtriebszyklen sowie die damit verbundenen Emissionen dargestellt.

Abbildung 72: Entwicklung der Kohlenstoffvorräte [t C ha^{-1}] in Kompartimenten der pflanzlichen Biomasse von Baumschulen (SOC) sowie die daraus resultierenden Emissionen [t C ha^{-1}] in aufeinander folgenden Umtriebszyklen (|). Transparente Balken sind nur bei Landnutzungsänderung und Ablauf der Betriebsdauer emissionsrelevant



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

6.1.2.3.5.4 Weihnachtsbaumkulturen

Flächen zur Kultivierung von Weihnachtsbäumen (crox) setzen sich i.d.R. aus Nadelgehölzen und krautigen Pflanzen zusammen. Der Flächenanteil letzterer wird mit 75 % unterstellt; zur Berechnung des Kohlenstoffvorrates in der krautigen Biomasse wird als Proxy der Wert für Grünland i.e.S. herangezogen. Über die pflanzliche Biomasse von Weihnachtsbäumen gibt es kaum Daten. PÖPKEN (2011) führt Untersuchungen der Universität Kopenhagen an, die einen Wert von 50 t Biomasse ha^{-1} ergaben, bei einer Umtriebszeit von 8 – 12 Jahren. Daher wurde die Dauer für einen durchschnittlichen Umtriebszyklus auf 10 Jahre festgelegt. Da sich die 50 t Biomasse ha^{-1}, entsprechend 22,5 t Kohlenstoff ha^{-1}, auf die gesamte Biomasse beziehen, wurde nach der Formel von MOKANY et al. (2006) der unterirdische Anteil daran mit 5,95 t C ha^{-1} bestimmt. So ergibt sich für die oberirdische Biomasse der Weihnachtsbäume ein Wert von 16,56 t C $^{-1}$, die zur Ermittlung der jährlichen Kohlenstoffvorratsänderungen in der oberirdischen Biomasse der Weihnachtsbäume linear auf die Jahre eines Umtriebszyklus verteilt wurden, so dass sich der oberirdische Kohlenstoffvorrat berechnet nach:

Gleichung 49: Oberirdische Biomasse von Weihnachtsbaumkulturen

$$C_{crox_{abo}} = a * 1{,}656 + C_{gra1_{abo}} * 0{,}75$$

- $C_{crox\ abo}$ = Kohlenstoffvorrat in der Biomasse von Weihnachtsbaumkulturen [t C ha^{-1}]
- $C_{gra1\ abo}$ = Kohlenstoffvorrat in der oberirdischen Biomasse von krautigen, annuellen Pflanzen [3,78 t C ha^{-1}]
- a = Anzahl Jahre nach Neubegründung (Umtriebszyklus 10 Jahre)

Die unterirdische Biomasse errechnet sich für die Gehölze nach der Gleichung von MOKANY et al. (2006) zuzüglich der unterirdischen Biomasse der krautigen Pflanzen:

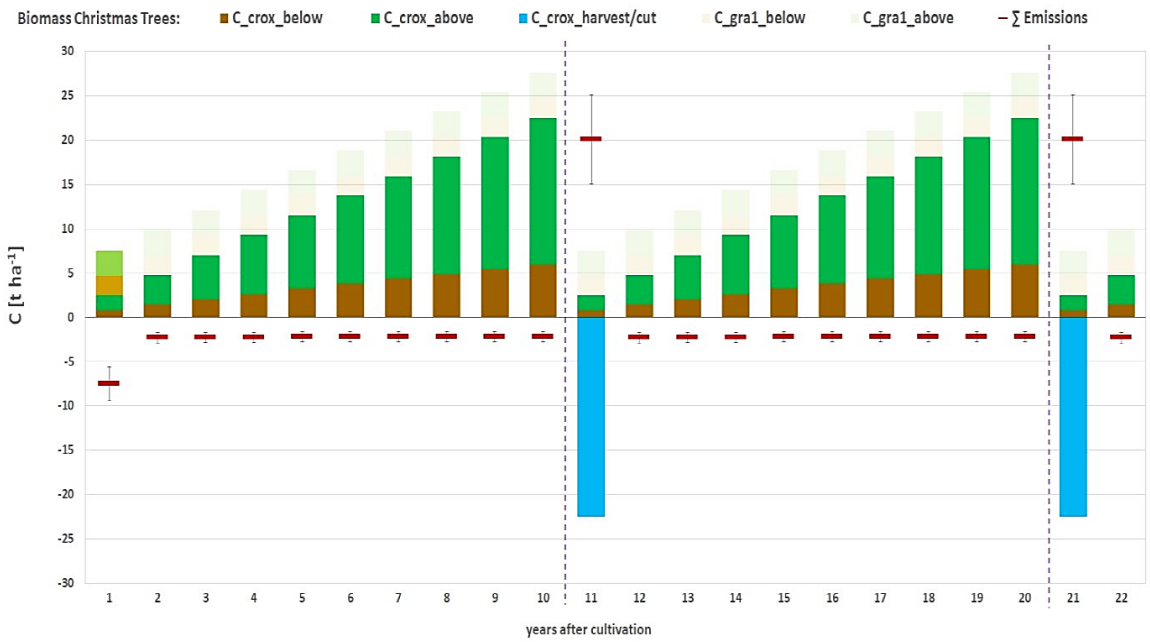
Gleichung 50: Unterirdische Biomasse von Weihnachtsbaumkulturen

$$C_{croz_{bel}} = 0{,}489 * x^{0{,}89} + C_{gra1_{bel}} * 0{,}75$$

- $C_{crox\ bel}$ = Kohlenstoffvorrat in der unterirdischen Biomasse von Weihnachtsbaumkulturen [t C ha^{-1}]
- x = Kohlenstoffvorrat der oberirdischen Biomasse $C_{crox\ abo}$
- $C_{gra1\ bel}$ = Kohlenstoffvorrat in der unterirdischen Biomasse von krautigen, annuellen Pflanzen [3,03 t C ha^{-1}]

Nach einem Umtriebszyklus wird ein vollständiger Ersatz der holzigen Biomasse in Weihnachtsbaumkulturen unterstellt; ansonsten kommen die in Kapitel 6.1.2.3.2 und Kapitel 6.1.2.3.3 aufgeführten Methoden zur Anwendung. Dies führt zur in Abbildung 73 dargestellten Entwicklung der Kohlenstoffvorräte in Weihnachtsbaumkulturen während aufeinander folgender Umtriebszyklen sowie den damit verbundenen Emissionen.

Abbildung 73: Entwicklung der Kohlenstoffvorräte [t C ha^{-1}] in Kompartimenten der Biomasse von Weihnachtsbaumkulturen (crox) sowie die daraus resultierenden Emissionen [t C ha^{-1}] in aufeinander folgenden Umtriebszyklen (|). Transparente Balken sind nur bei Landnutzungsänderung emissionsrelevant



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

6.1.2.3.5.5 Kurzumtriebsplantagen

Kurzumtriebsplantagen (KUP) sind in Deutschland nach § 2 des Bundeswaldgesetzes (BWaldG, 2015) kein Wald und werden deshalb im deutschen Inventar ausschließlich in der Landnutzungskategorie Ackerland berichtet. Da KUP auch im Rahmen der Bundeswaldinventur als Ackerland ausgewiesen werden, ist eine Doppelzählung ausgeschlossen. Die nach der Ernte anfallende Biomasse, welche ausschließlich energetisch genutzt wird, wird als

Kohlenstoffänderung unter 4.B verbucht. Somit werden Doppelzählungen im Energiesektor sowie unter Holzprodukten (HWP) (s. Kapitel 6.10.1) vermieden.

Zur Ermittlung landesspezifischer, mittlerer Kohlenstoffvorräte in der Biomasse von Kurzumtriebsplantagen (KUP) wurden Daten aus der einschlägigen Literatur abgeleitet. Grundlegend waren die Übersichtsarbeiten von Walter et al. (2015), Horn (2013), Gurgel (2011), Kern et al. (2010), Biertümpfel et al. (2009), Boelcke (2007), Stolzenburg (2006) und Maier and Vetter (2004). Diese Arbeiten enthalten die Ergebnisse von 23 Versuchsstandorten zu Kurzumtriebsplantagen, die über ganz Deutschland verteilt sind (Bayern, Baden-Württemberg, Thüringen, Sachsen, Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern und Niedersachsen), alle Klimazonen (Niederschlag: 550 – 1550 mm; Jahresdurchschnittstemperatur: 6,8 – 10,1°C) und Bodenarten umfassen (leichte bis schwere Böden) und vom Tiefland bis ins Mittelgebirge reichen. Auf insgesamt 62 Versuchsfeldern wurden die Kurzumtriebsplantagen überwiegend mit Pappeln (58 %) und Weiden (34 %) aber auch mit Birken (3 %), Erlen, Robinien und Blauglockenbäumen (5%) bestockt. Die Umtriebszeiten betrugen zwischen einem und zehn Jahren, bei einem Mittel von 4,2 Jahren. Da diese Studien bezüglich räumlicher Verteilung, Standortbedingungen, Bewuchs und Management[85] das ganze Spektrum des Betriebes von Kurzumtriebsplantagen in Deutschland widerspiegeln, sind sie repräsentativ.

Aus den Ergebnissen dieser Studien konnte der durchschnittliche jährliche Trockenertrag mit 9,05 (-6,0 % / +9,9 %) t ha^{-1} a^{-1} oberirdische Biomasse für Kurzumtriebsplantagen in Deutschland abgeleitet werden. Angelehnt an die Verhältnisse in Deutschland, wurde eine durchschnittliche Betriebsdauer von 20 Jahren und ein durchschnittlicher Umtriebszyklus von 10 Jahre unterstellt. Nach Ablauf der Umtriebszeit wird der Bestand auf den Stock gesetzt; d.h. es erfolgt die Anrechnung der kompletten oberirdischen Biomasse als Emission, die unterirdische Biomasse bleibt erhalten. Emissionen ergeben sich in der Folge nur aus Zuwachs der oberirdischen Biomasse. Nach Ablauf der Betriebsdauer erfolgt die vollständige Entfernung der ober- und unterirdischen Phytomasse, danach eine Bestandsneubegründung. Zur Herleitung der Wachstumskurven der oberirdischen Biomasse wird der mittlere jährliche Trockenertrag mit dem Faktor 0,45 in Kohlenstoff umgerechnet und mit der Anzahl der Jahre der Betriebsdauer multipliziert.

Gleichung 51: Oberirdische Biomasse von Kurzumtriebsplantagen

$$C_{cros_{abo}} = a * 9{,}05 \ * 0{,}45$$

- $C_{cros\ abo}$ = oberirdische Biomasse von Kurzumtriebsplantagen in [t ha^{-1}]
- 9,05 = Durchschnittlicher Trockenertrag der oberirdischen Biomasse in Kurzumtriebsplantagen [t ha^{-1}]
- 0,45 = Kohlenstoffanteil trockener pflanzlicher Biomasse

[85] Umsetzung der Befunde ARR 2021, KL.12, Table 5; 2020, KL.5+6, Table; 2018, KL.10+11; zur Verbesserung der Transparenz: Da in Deutschland flächendeckend keinerlei Daten zur Bewirtschaftung/Düngung landwirtschaftlicher Flächen erhoben werden, können hier keine konkreten Angaben zur Düngung von Kurzumtriebsplantagen getroffen werden. Allgemein gehen entsprechende Untersuchungen und Anbauempfehlungen jedoch davon aus, dass eine Düngung nur in absoluten Ausnahmefällen notwendig ist, da in der Regel die Versorgung mit den Hauptnährstoffen ausreichend ist (DBU. (2010). *Kurzumtriebsplantagen: Handlungsempfehlungen zur naturverträglichen Produktion von Energieholz in der Landwirtschaft - Ergebnisse aus dem Projekt NOVALIS* [Bricht]. D. B. U. (DBU). https://edocs.tib.eu/files/e01fn12/690161034.pdf; S. 19) und: "Insgesamt kann im Mittel für Kurzumtriebsbestände derzeit von Eintragsraten von ≥ 10 kg N ha^{-1} a^{-1} ausgegangen werden, so dass der durch die Erntemaßnahmen entstehende Entzug von N allein durch die jährlichen Einträge aus der atmosphärischen Deposition kompensiert wird" (ibid.; S. 20)

- a = Anzahl Jahre nach Neubegründung

Die unterirdische Biomasse wurde mittels des oberirdischen Kohlenstoffvorrates anhand der Formel von (Mokany et al.) bestimmt.

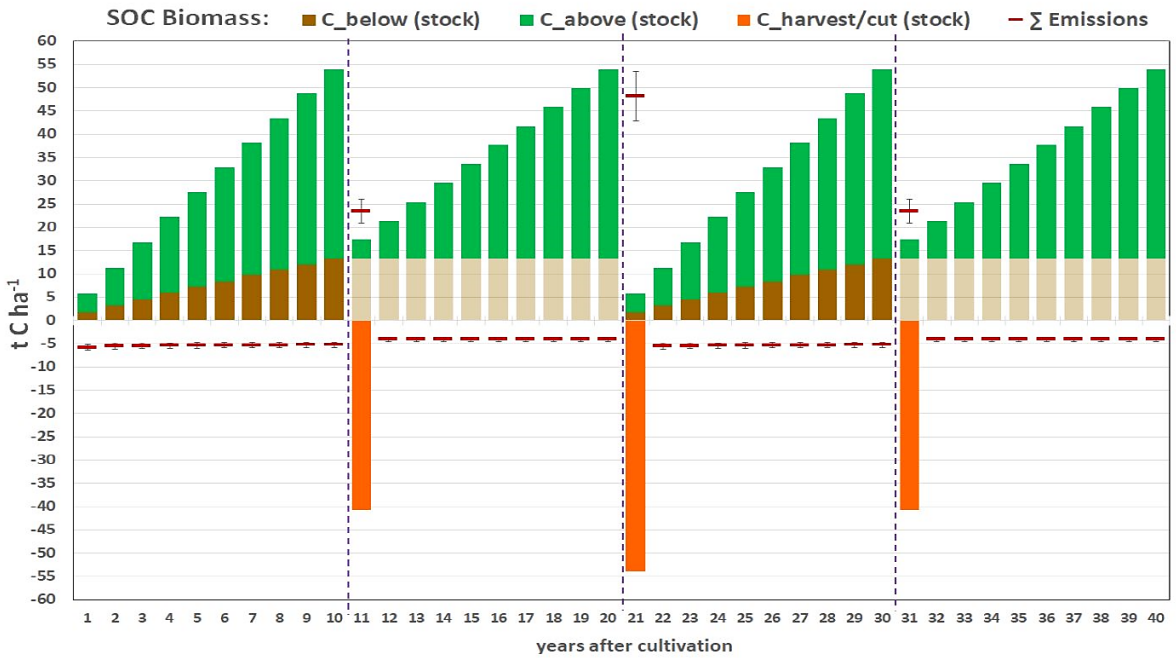
Gleichung 52: Unterirdische Biomasse von Kurzumtriebsplantagen

$$C_{cros_{bel}} = 0{,}489 * x^{0{,}89}$$

- $C_{cros\ bel}$ = unterirdische Biomasse von Kurzumtriebsplantagen in [t ha^{-1}]
- x = Kohlenstoffvorrat in der oberirdischen Biomasse $C_{cros\ abo}$

Zur Berechnung des gesamten Kohlenstoffvorrats in der pflanzlichen Biomasse von Kurzumtriebsplantagen, deren Verrechnung als Emissionen und deren Allokation, kommen die in Kapitel 6.1.2.3.2 und Kapitel 6.1.2.3.3 aufgeführten Methoden zur Anwendung. In Abbildung 74 ist die Entwicklung der Kohlenstoffvorräte in Kurzumtriebsplantagen während aufeinander folgender Umtriebszyklen sowie die damit verbundenen Emissionen dargestellt.

Abbildung 74: Entwicklung der Kohlenstoffvorräte [t C ha^{-1}] in Kompartimenten der pflanzlichen Biomasse von Kurzumtriebsplantagen (SOC) sowie die daraus resultierenden Emissionen [t C ha^{-1}] in aufeinander folgenden Umtriebszyklen (|). Transparente Balken sind nur bei Landnutzungsänderung und Ablauf der Betriebsdauer emissionsrelevant



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

6.1.2.3.5.6 Hopfen

Die Werte zur Biomasse von Hopfenanbauflächen entstammen Forschungsarbeiten und Veröffentlichungen des Hopfenforschungszentrums der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft. Portner et al. (2019) ermittelten an zwei Standorten in der Hallertau quantitativ die gesamte oberirdische Biomasse von Hopfen sowie der Zwischenfrüchte. Der Anteil der unterirdischen Biomasse wurde nach Graf et al. (2014); Graf (2016) und Sobotik et al. (2018) auf 50 % der oberirdischen Biomasse abgeschätzt. Für die Hopfenanbauflächen errechnen sich dann

die in Tabelle 330 aufgeführten Kohlenstoffvorräte für die einzelnen Phytomassekompartimente. Die unter Hopfenanbaufläche aufgeführten Werte sind Grundlage aller Emissionsberechnungen im Zusammenhang mit Hopfenanbauflächen. Zur Berechnung der Vorratsänderungen in der Phytomasse der Hopfenpflanzen infolge Nutzung und Landnutzungsänderung sowie Anrechnung der Emissionen, kommen die in Kapitel 6.1.2.3.2 und Kapitel 6.1.2.3.3 aufgeführten Methoden zur Anwendung.

Tabelle 333: Flächenbezogener Kohlenstoffvorrat der Biomasse von Hopfenkulturen, Zwischenfrüchten und deren Summe nach Portner et al. (2019), in [t C ha^{-1} ± Hälfte des 95 % Konfidenzintervalls]

Kultur	Kohlenstoffvorrat		
	$Phytomasse_{total}$	$Phytomasse_{above}$	$Phytomasse_{below}$
Hopfen	4,77 ± 0,84	3,18 ± 0,32	1,59 ± 0,80
Zwischenfrucht	0,61 ± 0,3	0,45 ± 0,18	0,15 ± 0,08
Hopfenanbaufläche	5,38 ± 0,89	3,64 ± 0,39	1,74 ± 0,80

6.1.2.3.6 Berechnungsmethodik und Ermittlung der Emissionsfaktoren für Hecken und Feldgehölze

Der Kohlenstoffvorrat der Phytomasse von Hecken/Feldgehölzen (gra2) setzt sich zusammen aus den Kompartimenten ober- und unterirdische Phytomasse und der toten organischen Substanz (Gleichung 53).

Gleichung 53:

$$C_{bio_{gra2}} = C_{gra2\ bio\ abo} + C_{gra2\ bio\ stump} + C_{gra2\ bio\ coarse\ roots} + C_{gra2\ bio\ fine\ roots} + C_{necromass}$$

- C_{bio_gra2} = Kohlenstoffvorrat der Phytomasse von Hecken/Feldgehölzen [t C ha^{-1}]
- $C_{gra2_bio_abo}$ = Kohlenstoffvorrat der erntbaren oberirdischen Phytomasse von Hecken/Feldgehölzen [t C ha^{-1}]
- $C_{gra2_bio_stump}$ = Kohlenstoffvorrat der oberirdischen Phytomasse von Stümpfen von Hecken-/Feldgehölzpflanzen [t C ha^{-1}]
- $C_{gra2_bio_coarse_roots}$ = Kohlenstoffvorrat in der Phytomasse von Grobwurzeln von Hecken-/Feldgehölzpflanzen [t C ha^{-1}]
- $C_{gra2_bio_fine_roots}$ = Kohlenstoffvorrat in der Phytomasse von Feinwurzeln von Hecken-/Feldgehölzpflanzen [t C ha^{-1}]
- $C_{necromass}$ = Summe des Kohlenstoffvorrats in der Phytomasse von toten Grobwurzeln, Totholz und Streu von Heckenpflanzen [t C ha^{-1}] (Gleichung 54)

Gleichung 54:

$$C_{necromass} = C_{gra2\ dead\ course\ roots} + C_{gra2\ bio\ dead\ wood} + C_{gra2\ bio\ litter}$$

- $C_{gra2_dead_coarse_roots}$ = Kohlenstoffvorrat in der Phytomasse abgestorbener Grobwurzeln von Hecken-/Feldgehölzpflanzen [t C ha^{-1}]

- $C_{gra2_bio_dead_wood}$ = Kohlenstoffvorrat im Totholz von Hecken/Feldgehölzen [t C ha^{-1}]
- $C_{gra2_bio_litter}$ = Kohlenstoffvorrat in der Streu von Hecken/Feldgehölzen [t C ha^{-1}]

Die Bestimmung des Kohlenstoffvorrates der einzelnen Kompartimente von Hecken/Feldgehölzen (gra2) erfolgte anhand der Untersuchungsergebnisse von Pöpken (2011) und (Drexler et al., 2021; Drexler et al., 2023) sowie ergänzender Literaturdaten ((Crossland, 2015),(Axe et al., 2017),(Lingner, Thiessen, & Hartung, 2018), (Lingner, Thiessen, Müller, et al., 2018)). Im Rahmen der Studien von Pöpken (2011) und (Drexler et al., 2021), (Drexler et al., 2023) wurde die oberirdische Biomasse (Schnittmaterial) an mehr als 50 Hecken destruktiv untersucht; außerdem wurde die Phytomasse der Stümpfe sowie die unterirdische Biomasse (Grob- und Feinwurzeln) sowie die Nekromasse (Tote Wurzelmasse, Totholz und Streu) an 15 Plots erhoben (Drexler et al., 2023)). Die Ausprägung der aufgenommenen Hecken variierte bezüglich

1. des Alters
   a. ca. 4-28 Jahre
2. der Ausdehnung
   a. Höhe ca. 2-15 m
   b. Tiefe ca. 1-10 m
   c. Länge ca. 100-500 m
3. der Artenzusammensetzung
   a. typische Heckenpflanzen, wie Hundsrose (Rosa canina), Schlehe (Prunus spinosa), Hasel (Corylus avellana), Holunder (Sambuccus spec.), Rot- und Weißdorn (Crataegus spec.), Heckenkirschen (Lonicera spec.) und Weiden (Salix spec.)
   b. Bäume, wie Feldahorn (Acer campestre), Hainbuche (Carpinus betulus), Weide (Salix spec.), Buche (Fagus sylvatica), Linde (Tilia spec.) und Ulme (Ulmus spec.),

so dass ein repräsentatives Spektrum dieser Feldgehölze erfasst wurde. An diesen Gehölzproben wurden im Labor die Masse, der Wasser- und Kohlenstoffgehalt gemessen, so das der absolute und der flächenbezogene Kohlenstoffvorrat in Verbindung mit den Feldmaßen ermittelt werden konnte.

Oberirdische Phytomasse

Anhand dieser Daten konnte mittels sigmoidaler Regression ein hochsignifikanter Zusammenhang zwischen dem durchschnittlichen Kohlenstoffvorrat der erntbaren oberirdischen Biomasse von Hecken und deren Alter ermittelt werden. Die Güte des Modells wurde durch Logarithmieren der Eingangsdaten gesteigert; die Residuen sind nicht autokorreliert, die Daten der Quellpopulation sind um die Regressionslinie normalverteilt und die Varianz ist konstant.

Gleichung 55: Funktion zur Berechnung der erntebaren oberirdischen Phytomasse von Hecken in Abhängigkeit von deren Alter

$$\ln C_{gra2\ bio\ abo} = \frac{4{,}1841}{\left(1+e^{\left(-\frac{ln\ x-1{,}4226}{0{,}229}\right)}\right)}$$

- r^2 = 0,9088 Standardfehler ((95%-KI)/2): 12,1 %
- LN[$C_{gra2\ bio\ abo}$] = Logarithmus des durchschnittlichen Kohlenstoffvorrats der oberirdischen Biomasse in Hecken/Feldgehölzen [t C ha^{-1}]
- LN[x] = Logarithmus des Alters der oberirdischen Biomasse von Hecken/Feldgehölze nach Begründung bzw. Schnitt [a]

Die finale Bestimmung des C-Vorrates erfolgt durch Entlogarithmieren des Ergebnisses der Gleichung 55 und der Anwendung einer varianzbasierten Bias-Korrektur (n. (Demetrescu et al., 2020)).

Gleichung 56

$$C_{gra2\ bio\ abo} = e^{\left(\ln C_{gra2\ bio\ abo} + \ln\frac{varianz}{2}\right)}$$

- $C_{gra2_bio_abo}$ = Kohlenstoffvorrats der oberirdischen Biomasse in Hecken [t C ha-1]
- LN[$C_{gra2_bio_abo}$] = Logarithmus des durchschnittlichen Kohlenstoffvorrats der oberirdischen Biomasse in Hecken [t C ha^{-1}]
- LN[Varianz/2] = Varianzbasierter Bias-Korrekturfaktor (n. DEMETRESCU et al. 2020)

Bei dem so ermittelten Kohlenstoffvorrat handelt es sich um den erntbaren Teil der oberirdischen Biomasse, dem Schnittgut nach Pflege-/Ernteschnitten. Die Gesamtunsicherheit ist lognormalverteilt und beträgt -18,4 % bzw. + 27,1 %.

Die Untersuchungen von (Drexler et al., 2023) haben ergeben, dass die Pflanzenstümpfe, die nicht abgeernteten Teile der oberirdischen Biomasse, einen erheblichen Teil der oberirdischen Biomasse von Heckenpflanzen bilden. Der Masseanteil der Stümpfe beträgt durchschnittlich 39 % des Kohlenstoffvorrats der erntebaren Phytomasse (Gleichung 57). Die Unsicherheiten der Kohlenstoffvorräte in der Phytomasse von Stümpfen sind aufgrund der unterschiedlichsten Ausprägungen der Pflanzen von Natur aus relativ groß (95%-KI: 17,1 % - 66,9 %) und lognormalverteilt.

Gleichung 57: Kohlenstoffvorrat in der Phytomasse der Pflanzenstümpfe

$$C_{gra2\ bio\ stump} = C_{gra2\ bio\ abo} * 0.39$$

- $C_{gra2_bio_stump}$ = Kohlenstoffvorrat der oberirdischen Phytomasse in Stümpfen von Hecken-/Feldgehölzpflanzen [t C ha^{-1}]
- $C_{gra2_bio_abo}$ = Kohlenstoffvorrat der erntebaren oberirdischen Biomasse in Hecken/Feldgehölzen [t C ha^{-1}]

Unterirdische Biomasse

Die Untersuchungen von (Drexler et al., 2021; Drexler et al., 2023) zum unterirdischen Kohlenstoffvorrat zeigen, dass dessen Anteil an deren Gesamtphytomasse deutlich größer ist, als bisher angenommen. Die von (Drexler et al., 2023) in Feldversuchen gemessenen Kohlenstoffvorräte in der lebenden, unterirdischen Phytomasse von Heckenpflanzen in Deutschland sind um einen Faktor 2 – 2,3 größer, als die bisher mit der Formel von (Mokany et al., 2006b) hierfür errechneten Werte. Bei (Drexler et al., 2023) beträgt der Anteil der unterirdischen, lebenden Phytomasse (Grob- und Feinwurzeln) an der erntbaren oberirdischen Phytomasse durchschnittlich 70 % (95%-KI: 42,3 % - 107,8 %).

Gleichung 58: Unterirdischer Kohlenstoffvorrat in der Phytomasse von Heckenpflanzen

$$C_{gra2\ bio\ below} = C_{gra2\ bio\ abo} * 0.7$$

- $C_{gra2_bio_below}$ = Kohlenstoffvorrat der unterirdischen Phytomasse von Hecken-/Feldgehölzpflanzen [t C ha^{-1}]

- $C_{gra2_bio_abo}$ = Kohlenstoffvorrat der erntebaren oberirdischen Biomasse in Hecken/Feldgehölzen [t C ha^{-1}]

Nekromasse

(Drexler et al., 2023) erfassten auf Ihren Versuchsflächen auch den Kohlenstoffvorrat der toten organischen Substanz phytogenen Ursprungs. Die Nekromasse setzt sich zusammen aus Totholz, Streu und toten Wurzeln (Gleichung 59). Es wird unterstellt, dass die bei den Untersuchungen ermittelten Mengen an Nekromasse dem langjährigen Gleichgewichtszustand entsprechen. Der Anteil dieser am Kohlenstoffvorrat der erntebaren oberirdischen Biomasse beträgt 7 % für die tote Wurzelmasse, 6 % für das Totholz und 5 % für die Streu, in Summe durchschnittlich 18 % (95%-Konfidenzintervall: 13,2 % – 23,7 %). Die Nekromasse von Hecken wird dem Pool Biomasse, nicht dem Pool tote organische Substanz zugerechnet. Der Kohlenstoffvorrat der Nekromasse von Hecken berechnet sich nach

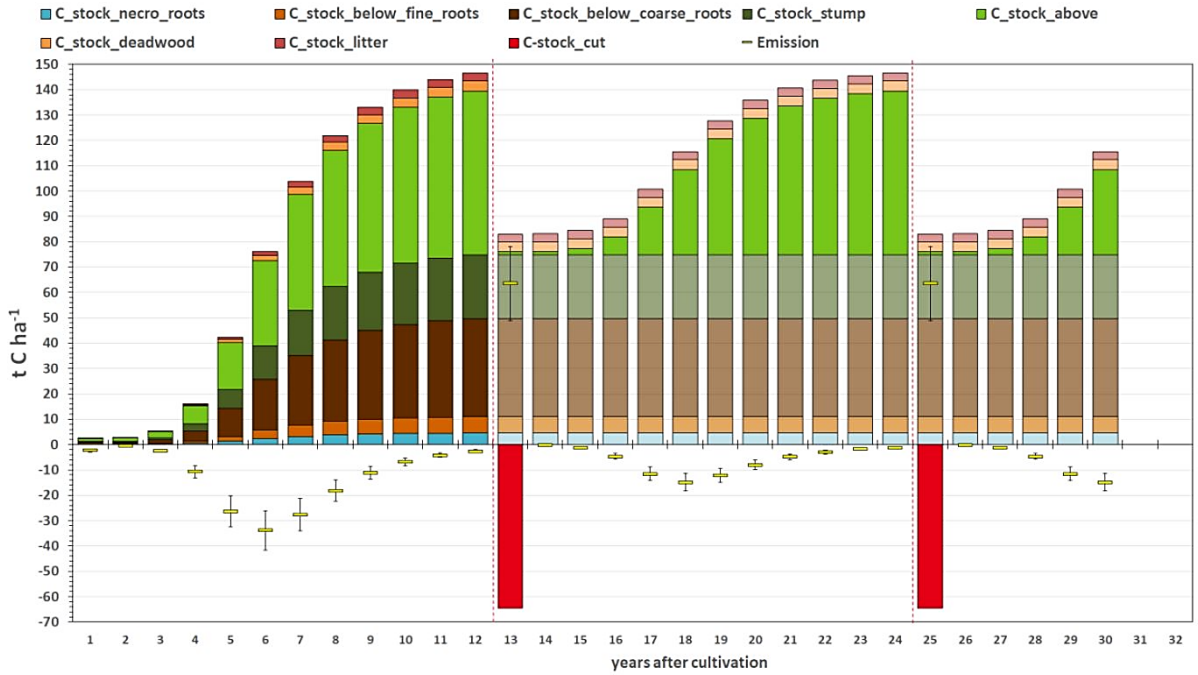
Gleichung 59:

$$C_{Necromass} = C_{gra2\ bio\ abo} * 0.18$$

- $C_{Necromass}$ = Summe des Kohlenstoffvorrats in der Phytomasse von toten Grobwurzeln, Totholz und Streu von Heckenpflanzen [t C ha^{-1}]
- $C_{gra2_bio_abo}$ = Kohlenstoffvorrat der erntebaren oberirdischen Biomasse in Hecken/Feldgehölzen [t C ha^{-1}]

Der Gesamtvorrat pro Altersklasse ergibt sich dann aus der Summe aller Kompartimente. Für einen Umtriebszyklus werden 12 Jahre unterstellt. Dies entspricht dem durchschnittlichen Umtriebszyklus für Hecken in Deutschland, wonach der Pflegeschnitt erfolgt, die Hecke auf den Stock gesetzt wird. Das bedeutet, dass ab dem 13-ten Jahr, da die unterirdische Biomasse erhalten bleibt, sich Emissionen nur aus Zuwachs und Schnitt der oberirdischen Biomasse ergeben. Die Entwicklung des Kohlenstoffvorrates in der pflanzlichen Biomasse von Hecken/Feldgehölzen ist in Abbildung 75 dargestellt.

Abbildung 75: Entwicklung der Kohlenstoffvorräte [t C ha^{-1}] in Kompartimenten der Biomasse von Hecken/Gehölzen sowie die daraus resultierenden Emissionen [t C ha^{-1}] in aufeinander folgenden Umtriebszyklen (|); transparente Balken sind nur bei Landnutzungsänderung emissionsrelevant



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

Bei Landnutzungsänderungen von Hecken/Feldgehölzen zu anderen Landnutzungskategorien, wird i.d.R. die Summe des aktuellen Kohlenstoffvorrats aller Kompartimente der Biomasse von Hecken/Feldgehölzen mit dem Vorrat der Biomasse der Folgenutzung verrechnet, der im ersten Jahr zuwächst (vergl. Kapitel 6.1.2.3.2 und Kapitel 6.1.2.3.3). Ausnahme von dieser Regel bildet der Nutzungsübergang von Hecken/Gehölzen zu Wald. In diesem Fall wird nur die Hälfte der aktuellen Biomasse der Hecken/Gehölze als Verlust gegengerechnet. Diese Korrektur wurde eingeführt, da eine diesbezügliche Auswertung der Daten der Bundeswaldinventuren ergab, dass bei ca. 50 % der Fälle solcher Landnutzungsänderungen die Biomasse der Kategorie Hecken/Feldgehölze vollständig in die des Waldes übergeht.

6.1.2.3.7 Terrestrische Feuchtgebiete und Siedlungen

Terrestrische Feuchtgebiete (wett)

Terrestrische Feuchtgebiete sind in der Regel mit Gehölzen (einzelne Büsche bis Wälder), Moosen und Gräsern bewachsen. Eine Erhebung auf Grundlage des B-DLM ergab, dass 2022 ca. 47 % der Fläche terrestrischer Feuchtgebiete mit Gehölzen und 22 % mit Gräsern bestanden waren, der Rest überwiegend mit Moosgesellschaften (eigene Auswertung, unveröffentlicht). Aufgrund dessen wird im Inventar folgende Annahme für die Flächenverteilung der Kohlenstoff-vorräte in der Biomasse unterstellt: 50% Gehölzanteil, 20% Grasanteil und 30% Moosanteil. Da für derartige Flächen keine spezifischen Biomasseerhebungen in Deutschland vorliegen, werden für Gehölzflächen die Werte für Hecken/Feldgehölze (Kapitel 6.1.2.3.6), für Flächen mit Gräsern die Werte für Grünland i.e.S. (Kapitel 6.1.2.3.3) näherungsweise zugrunde gelegt. Angaben zur Trockenmasse von Moosen auf Moor-/Feuchtgebietsflächen weisen in der Literatur eine sehr große Spannweite auf (< 0,1 t ha^{-1} a^{-1} - >15 t ha^{-1} a^{-1} (z.B. (Moore et al., 2002), (Gunnarsson, 2005), (Oestmann et al., 2022)). Mittelwerte werden zwischen 2 - 3 t ha^{-1} a^{-1} ausgewiesen

(Gunnarsson, 2005), (Oestmann et al., 2022)). Daher wird für die Trockenmasse der lebenden Phytomasse von Moosen ein Werte von 2,5 t ha^{-1} unterstellt, entsprechend ein Kohlenstoffvorrat von 1,25 t C ha^{-1}. Der Kohlenstoffvorrat terrestrischer Feuchtgebiete berechnet sich dann für die unter- und oberirdische Biomasse wie folgt:

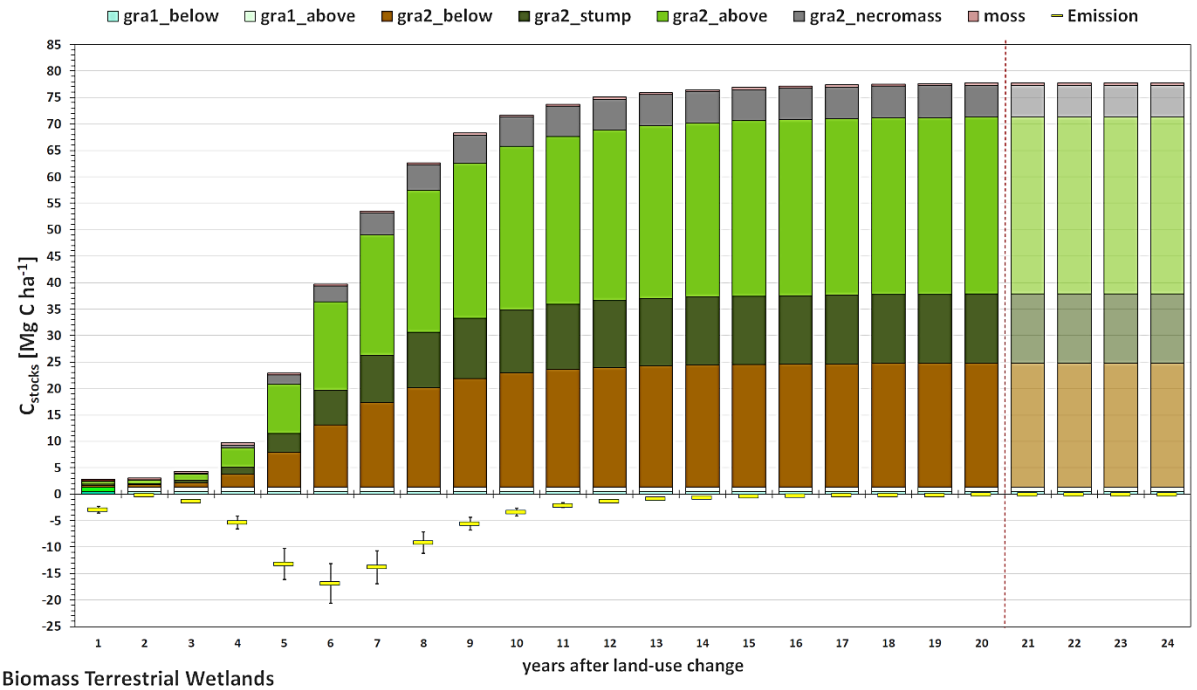
Gleichung 60: Kohlenstoffvorrat der Biomasse terrestrischer Feuchtgebiete

$$C_{wett} = 0.5C_{gra2} + 0.2C_{gra1} + 0.3\ C_{Moos}$$

- C_{gra2} = Kohlenstoffvorrat der ober-/unterirdischen Biomasse von Hecken/Feldgehölzen im Jahr x nach Bestandsbegründung [t C ha^{-1}] (Kapitel 6.1.2.3.6)
- C_{gra1} = Kohlenstoffvorrat in der ober-/unterirdischen pflanzlichen Biomasse von Grünland i.e.S [t C ha^{-1}] (Kapitel 6.1.2.3.3)
- C_{wett} = Kohlenstoffvorrat der ober-/unterirdischen Biomasse von Terrestrischen Feuchtgebieten im Jahr x nach Bestandsbegründung [t C ha^{-1}] (Kapitel 6.1.2.3.6)
- C_{Moos} = Kohlenstoffvorrat im Moosbestand Terrestrischer Feuchtgebiete [t C ha^{-1}]

Zur Berechnung des gesamten Kohlenstoffvorrats in der pflanzlichen Biomasse von Terrestrischen Feuchtgebietsflächen und deren Verrechnung als Emissionen, kommen die in Kapitel 6.1.2.3.6 und Kapitel 6.1.2.3.3 aufgeführten Methoden zur Anwendung. Es wird unterstellt, dass der Gleichgewichtsvorrat für die Gehölzpflanzen nach 20 Jahren erreicht wird, somit ab dem 21. Jahr am betreffenden Erhebungspunkt keine Emissionen mehr berichtet werden. Bei grasartigen Pflanzen und Moosen wird das Gleichgewicht schon zum zweiten Jahr nach Begründung erreicht. Die Ergebnisse der Kohlenstoffvorratsentwicklung in der Zeit zeigt die folgende Abbildung.

Abbildung 76: Entwicklung der Kohlenstoffvorräte [t C ha^{-1}] in Kompartimenten der pflanzlichen Biomasse von Terrestrischen Feuchtgebieten (wettwett) sowie die daraus resultierenden Emissionen [t C ha^{-1}] bis zum Erreichen eines unterstellten Gleichgewichtszustands (|). Transparente Balken sind nur bei Landnutzungsänderung emissionsrelevant



Biomass Terrestrial Wetlands

Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

Siedlungen – Gebäude und Freiflächen (set1)

Flächen im Siedlungs- und Verkehrsbereich weisen erhebliche Anteile an unversiegelten, mit Vegetation bedeckten Flächen auf. In einer großangelegten Studie des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) wurden diese mittels Methoden der Fernerkundung und Geoinformatik für die Siedlungsgebiete Deutschlands bestimmt (BBSR et al., 2022). Der Anteil der Vegetationsfläche an der Summe der *Gebäude- und Freiflächen* beträgt 45 %. Von dieser Fläche sind durchschnittlich 17 % mit Bäumen bestanden, 83 % mit krautartigen Pflanzen bedeckt (BBSR et al., 2022); vergl. Kapitel 6.2.5).

Emissionsfaktoren Biomasse Stadtgrün

In Ermangelung länderspezifischer Daten zu Kohlenstoffvorräten und Wachstumsraten von städtischen Bäumen und Sträuchern, wurden in der Submission 2025 die für Deutschland gemessenen Werte für Hecken und Gehölze verwendet, zum einen, da der C-Vorrat in diesen repräsentativ, länderspezifisch ermittelt wurde (z.B. (Drexler et al., 2021), zum anderen aufgrund der Variabilität der Ausprägung der innerstädtischen Gehölzpflanzen, -vom Kleingartengehölz über Hecken jeglicher Ausgestaltung bis zu Straßen- und Waldbäumen. Aufgrund der vermeintlich hohen jährlichen Wachstumsraten im Vergleich zu den Default-Werten der IPCC-Guidelines ((IPCC, 2006a); (IPCC, 2019)) wurden diese beim ESD-Review 2025 vom TERT nicht akzeptiert. Die daraufhin erfolgte Herleitung von neuen Emissionsfaktoren für verholzende Pflanzen in Siedlungsgebieten Deutschlands erfolgte in Anlehnung an die Methode des 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (IPCC, 2019). Es wurden Emissionsfaktoren abgeleitet, getrennt für ober- und unterirdische Biomasse, basierend auf den US-Datensätzen (Nowak & Crane, 2002); (Nowak et al., 2002);

(Nowak et al., 2008); (Nowak et al., 2013), aus denen die Default-Faktoren der Guidelines ((IPCC, 2006a); (IPCC, 2019)) hauptsächlich abgeleitet wurden.

Um die Vergleichbarkeit mit den Umweltbedingungen in Deutschland zu gewährleisten, wurden für die Ermittlung der EF nur Ergebnisse aus US-Bundesstaaten der gemäßigten Klimazone herangezogen. Die folgenden Schritte bilden die Grundlage für die Ableitung der durchschnittlichen Wachstumsraten von Stadtgehölzen in Deutschland (*Kursiv gedruckte Parameter*: Daten aus den Ergebnistabellen der US-Original-Literatur; **fett gedruckte Parameter**: aus den Literaturwerten abgeleitete Parameter):

1. Berechnung der **absoluten Kronenüberdeckungsfläche [ha]** durch Division des *jährlichen Bruttozuwachses* durch die gemessene *jährliche Bruttozuwachsrate pro ha Kronenschirm*

2. Berechnung des **Kohlenstoffvorrats pro ha Kronenüberdeckung [t C ha^{-1}]** durch Division des *absoluten C-Vorrats in städtischen Bäumen/Sträuchern* durch die **Kronenüberdeckungsfläche**

3. Bestimmung des **Gleichgewichtsalters der städtischen Baum-/ Strauchbestände** durch Division des *Gesamtkohlenstoffbestands* durch das Produkt aus *jährlichem Bruttozuwachs x 0,74* (0,74: Faktor zur Bestimmung des Nettozuwachses aus dem Bruttozuwachs (Nowak et al., 2013)

4. Bestimmung des **gesamten jährlichen Nettozuwachses [t C ha^{-1} Kronenschirm a^{-1}]** durch Division des *Gesamtkohlenstoffbestandes* durch das **Gleichgewichtsalter**

5. Bestimmung der **jährlichen Netto-Zuwachsrate für die unterirdische Biomasse [t C ha^{-1} Überschirmung a^{-1}]** durch Multiplikation der **Gesamt-Netto-Zuwachsrate** mit dem Faktor *0,26* (Wurzel-Spross-Verhältnis für gemäßigte Breiten nach CAIRNS et al. 1997)

6. Bestimmung des **jährlichen Nettozuwachses der oberirdischen Biomasse [t C ha^{-1} Überdachung a^{-1}]** durch Subtraktion des **jährlichen Nettozuwachses der unterirdischen Biomasse** vom **gesamten jährlichen Nettozuwachs**

Tabelle 334: Herleitung der jährlichen Kohlenstoffzunahme innerstädtischer Gehölzpflanzen der gemäßigten Klimazone sowie des Zeitraumes bis zum Erreichen des Gleichgewichtzustandes auf Grundlage der Daten von NOWAK et al. 2013

	Kohlenstoff-vorrat	Brutto-zuwachs	Zuwachsrate		Jahre bis Gleichgewicht	Kronenüberdeckung	C-Vorrat pro ha	Biomasse_Zuwachsrate		
			brutto	netto				Bio_total	Bio_above	Bio_below
	[t C]	[t C a^{-1}]	[t C ha^{-1} Kronenbedeckung a^{-1}]		[a]	[ha]	[t C ha^{-1}]	[t C ha^{-1} Kronenbedeckung a^{-1}]		
Connecticut	23.300.000	724.000	2,39	1,77	43,5	302.929	76,92	1,75	1,39	0,36
Illinois	18.700.000	688.000	2,83	2,09	36,7	243.110	76,92	1,75	1,39	0,36
Maine	3.800.000	109.000	2,21	1,64	47,1	49.321	77,05	1,76	1,39	0,36
Massachusetts	35.900.000	1.187.000	2,54	1,88	40,9	467.323	76,82	1,75	1,39	0,36
Michigan	22.900.000	654.000	2,2	1,63	47,3	297.273	77,03	1,76	1,39	0,36
Minnesota	9.300.000	275.000	2,29	1,69	45,7	120.087	77,44	1,77	1,4	0,36
Nebraska	1.600.000	51.000	2,38	1,76	42,4	21.429	74,67	1,7	1,35	0,35
New Hampshire	7.100.000	202.000	2,17	1,61	47,5	93.088	76,27	1,74	1,38	0,36
New York	32.100.000	1.005.000	2,4	1,78	43,2	418.750	76,66	1,75	1,39	0,36
North Dakota	400.000	12.000	2,23	1,65	45	5.381	74,33	1,69	1,34	0,35
Oregon	8.100.000	255.000	2,42	1,79	42,9	105.372	76,87	1,75	1,39	0,36
Rhode Island	4.100.000	139.000	2,58	1,91	39,9	53.876	76,1	1,73	1,38	0,36
South Dakota	700.000	21.000	2,36	1,75	45	8.898	78,67	1,79	1,42	0,37
Vermont	1.500.000	42.000	2,13	1,58	48,3	19.718	76,07	1,73	1,38	0,36
Washington	13.800.000	463.000	2,58	1,91	40,3	179.457	76,9	1,75	1,39	0,36
Wisconsin	9.400.000	275.000	2,25	1,67	46,2	122.222	76,91	1,75	1,39	0,36
Mittelwert					44		76,6	1,75	1,39	0,36

Die Berechnungen sind in (Tabelle 334) zusammengefasst dargestellt. Die Emissionsfaktoren sind die Mittelwerte aus den für die einzelnen Staaten berechneten Werten; die Unterschiede zwischen den einzelnen Staaten sind auf den Hektar bezogen gering (Tabelle 334); die Gesamtunsicherheit der Werte ist > 30 % (± die Hälfte des 95 %-KI):

- Der Mittelwert für die Zeit bis zum Erreichen des Gleichgewichts wurde auf 44 Jahre gerundet (± 18,2 %)
- Durchschnittlicher Kohlenstoffbestand pro ha Überschirmung: 76,60 t C ha^{-1} (± 24,0 %)
- Jährliche Netto-Zuwachsrate insgesamt: 1,75 t C ha^{-1} Kronenüberdeckung a^{-1} (± 30,1 %)
- Nettozuwachsrate oberirdische Biomasse: 1,39 t C ha^{-1} Kronenüberdeckung a^{-1} (± 37,1 %)
- Nettozuwachsrate unterirdische Biomasse: 0,36 t C ha^{-1} Kronenüberdeckung a^{-1} (± 30,7 %)

Für Flächen mit krautiger Vegetation werden die Faktoren und Methoden für „Grünland i.e.S." herangezogen (gra1; Kapitel 6.1.2.3.3). Der Kohlenstoffvorrat in der annuellen Biomasse dieser Subkategorie beträgt im Durchschnitt der Bundesländer 6,73 t C ha^{-1}.

Berechnung der Biomasse-Kohlenstoffvorräte in Siedlungsgebieten

Der Kohlenstoffvorrat für die Biomasse von „Gebäude- und Freiraumflächen (set1)" ergibt sich nach

Gleichung 61: Kohlenstoffvorrat in der Phytomasse von Gebäude- und Freiraumflächen (set1)

$$C_{set1} = A_{set1} * 0{,}45 * (0{,}17 C_{Stadtbäume} + 0{,}83 C_{gra1})$$

- C_{set1} = Kohlenstoffvorrat der ober-/unterirdischen Biomasse von Gebäude- und Freiflächen im Siedlungsräumen im Jahr x nach Bestandsbegründung [t C ha^{-1}]
- A_{set1} = Fläche der Gebäude- und Freiflächen [ha]
- 0,45 = Faktor für unversiegelte Fläche (45%)
- $C_{Stadtbäume}$ = Kohlenstoffvorrat der ober-/unterirdischen Biomasse von Stadtbäumen im Jahr x nach Bestandsbegründung [t C ha^{-1}](Kapitel 6.1.2.3.6)
- C_{gra1} = Kohlenstoffvorrat in der ober-/unterirdischen pflanzlichen Biomasse von Grünland i.e.S [t C ha^{-1}] (Kapitel 6.1.2.3.3)
- 0,17 = Flächenfaktor: 17 % Flächenanteil innerstädtischer Gehölze an unversiegeltem Boden
- 0,83 = Flächenfaktor: 83 % Flächenanteil krautiger Pflanzen an unversiegeltem Boden

Die Berechnung des gesamten Kohlenstoffvorrats in der pflanzlichen Biomasse von Siedlungsflächen und deren Verrechnung als Emissionen erfolgt nach den in Kapitel 6.1.2.3.2und Kapitel 6.1.2.3.3 aufgeführten Methoden. Für Siedlungsgebiete gilt, dass:

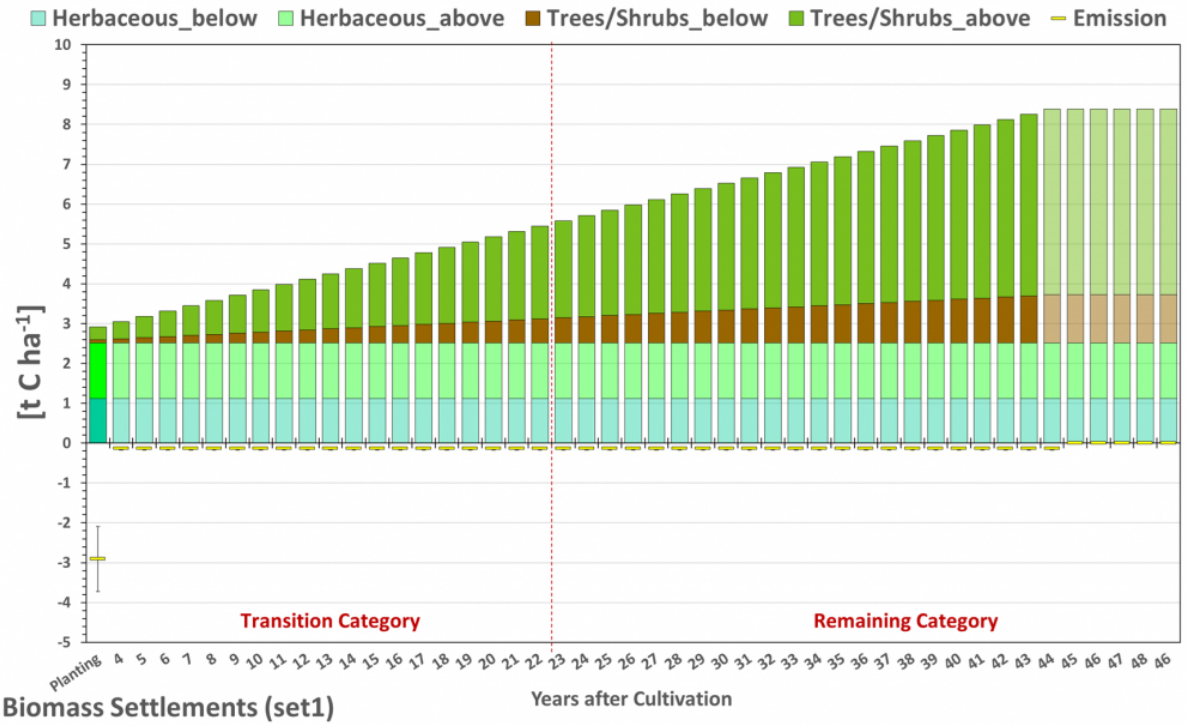
- die zur Bestandsbegründung gesetzten Gehölzpflanzen aus Baumschulen stammen. Um eine Doppelzählung zu vermeiden, wird daher unterstellt, dass die Gehölzpflanzen mit 3 Jahren gesetzt werden.
- die Gehölzpflanzen im Alter von 44 Jahren ihren Gleichgewichtsvorrat erreichen, nach der Neuanlage eines Gehölzbestandes auf unversiegelten Flächen der Subkategorie „Gebäude-

und Freiraumflächen“ folglich nach 41 Jahren. Somit werden ab dem 42 Jahr nach Neuanlage (bzw. ab einem Gehölzalter von 45 Jahren) am betreffenden Erhebungspunkt keine Emissionen mehr berichtet. Die Emissionen werden sowohl in den Übergangskategorien, als auch nach Übergang in die Verbleibkategorie berichtet (es gilt ein Übergangszeitraum von 20 Jahren)

- krautige Pflanzen das Gleichgewicht schon im ersten Jahr nach Neuanlage erreichen.

Die Ergebnisse der Kohlenstoffvorratsentwicklung in der Zeit zeigt die folgende Abbildung.

Abbildung 77: Entwicklung der Kohlenstoffvorräte [t C ha^{-1}] in Kompartimenten der pflanzlichen Biomasse von Gebäude und Freiraumflächen (set1) in Siedlungsräumen Deutschlands sowie die daraus resultierenden Emissionen [t C ha^{-1}] in aufeinander folgenden Umtriebszyklen (|). Transparente Balken sind nur bei Landnutzungsänderung emissionsrelevant



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

„Flächen mit Photovoltaikanlagen (setp)“ werden bezüglich der Aktivitätsdaten und Emissionsfaktoren wie „Grünland i.e.S.“ behandelt (Kapitel 6.1.2.3.3).

Das TERT hat die überarbeitete Methode zur Schätzung der innerstädtischen Biomasse akzeptiert ((EEA, 2025); Reference: No 3502/B2025/EEA.60384) und empfohlen, die Methode auf die gesamte Zeitreihe anzuwenden. Deutschland hat mit dieser Submission diese Empfehlung umgesetzt.

6.1.2.3.8 Wald

Die Berechnung der Vorratsänderungen der pflanzlichen Biomasse im Wald infolge von Landnutzung und Landnutzungsänderung erfolgt nach den in Kapitel 6.1.2.3.1 ff. aufgeführten Methoden. Für die Berechnung des Emissionsfaktors für die Umwandlung von Wald in andere Landnutzungen (Entwaldung) wurden die Daten der Bundeswaldinventuren 2002, 2012,2022 und der Inventurstudie 2018 verwendet. Von 1990 bis 2011 wurde ein durchschnittlicher EF für

Deutschland und ab 2012 stratifizierte EF hergeleitet. Die Methodik zur Herleitung der EF ist in Kapitel 6.4.2.2 ff beschrieben. Die jährliche Kohlenstoffvorratsänderung in der Waldbiomasse nach Aufforstung zeigt Tabelle 351 in Kapitel 6.4.2.2.2).

6.1.2.4 Kohlenstoffemissionen aus toter organischer Substanz (4.A bis 4.F)

Emissionen aus toter organischer Substanz werden nur für die Landnutzungskategorie „Wald“ und den Landnutzungsänderungen von Wald zu einer der Kategorien 4.B - 4.E berichtet. Dabei wird die tote organische Substanz in die zwei Pools Totholz und Streu unterteilt. Die methodische Beschreibung und die zugehörigen Ergebnisse finden sich in den Kapiteln 6.4.2.3 für Totholz und 6.4.2.4 für Streu in der Landnutzungskategorie „Wald“.

In den Landnutzungsänderungskategorien 4.B - 4.E werden die Emissionen aus der toten organischen Substanz mit den Emissionen aus der lebenden Biomasse erfasst, da bei der Abschätzung der Emissionen aus der lebenden Biomasse jeweils die der gesamten Pflanze zugrunde gelegt wird. Daher werden die Emissionen aus toter organischer Substanz in diesen Übergangskategorien in den CRF mit dem Vermerk IE (included elsewhere) versehen, um eine doppelte Anrechnung zu vermeiden. In der Kategorie 4.F wird der Vermerk NO (not occurring) verwendet, da es sich bei Flächen in dieser Kategorie per Definition um vegetationslose Flächen handelt.

6.1.2.5 Direkte N_2O-Emissionen aus Stickstoff-Düngung von Waldflächen und anderen Flächen (4(I))

Stickstoffdüngung von Wäldern, Feuchtgebieten und Siedlungen finden in Deutschland nicht statt. In der CRF 4(I) wird für alle Aktivitäten daher „NO“ (not occurring) eingetragen.

6.1.2.6 Emissionen aus fließenden und stehenden künstlichen Gewässern sowie der Entwässerung von organischen und mineralischen Böden

Gemäß der 2006 IPCC Guidelines (IPCC, 2006a) und des 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (IPCC, 2019) wird erstmalig unter *Flooded Land remaining Flooded Land* über Methanemissionen aus künstlichen stehenden und fließenden Gewässern berichtet, die Wasserstandsschwankungen unterliegen. Hierzu wurde die Landnutzungssubkategorie *Flooded Land* in folgende Kategorien weiter unterteilt:

1. Natürliche Gewässer (wetl, wetr): Alle fließenden und stehenden Gewässer, die nicht unter wetd, wetb und wets fallen
2. Stehende künstliche Gewässer (wetb):
   a. Stauseen, Wasserreservoirs, Bagger- und Tagebauseen
   b. Teiche, Speicher, künstliche Süßwasserbecken aller Art (Ausnahme: Abwasserbehandlungsanlagen)
3. Fließende künstliche Gewässer (wetd): Kanäle und Entwässerungsgräben der Wasserwirtschaft (Ausnahme: Entwässerungsgräben auf organischen Böden),
4. Künstliche Schifffahrtsgewässer (wets): Hafenbecken an Binnengewässern und Kanäle für die Schifffahrt

Emissionen aus der Entwässerung von Böden in Deutschland werden für organische und für mineralische Böden, durch Erfassung der Emissionen aus den Entwässerungsgräben, berichtet. Emissionen infolge Wiedervernässung von organischen Böden werden nur für Methan im Falle der Überflutung ehemaliger Torfabbauflächen berücksichtigt, sonst in der CRF als NO (nicht vorkommend) angegeben. Die Methodik entspricht den entsprechenden Ausführungen des 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (IPCC, 2019).

Gemäß des 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (IPCC, 2019) kommt der Managed Land Proxy (MLP) zum Ansatz. Bei diesem wird unterstellt, dass alle Emissionen, die von bewirtschaftetem Land stammen, anthropogen verursacht sind.

Die Kohlenstoffemissionen aus der Entwässerung der organischen Böden werden in den CRF 4.A bis 4.F übernommen. In der CRF 4(II) werden für organische Böden die Werte für N_2O und CH_4 sowie für CO_2 IE (included elsewhere) eingetragen. Die Methanemissionen der restlichen Subkategorien werden in der CRF 4.(II) berichtet. Die methodische Beschreibung für die Herleitung der Aktivitätsdaten und der Emissionsfaktoren der organischen Böden erfolgt im Kapitel 6.1.2.1.9 „Emissionen aus organischen Böden“.

Methodik

Stehende künstliche Gewässer - wetb

Unter stehenden künstlichen Gewässern werden die Emissionen aus

- Stauseen, Wasserreservoirs, Bagger- und Tagebauseen
- Teichen, Speichern, künstlichen Süßwasserbecken aller Art

subsumiert.

Die Berechnungen der Methanemissionen beider Subkategorien erfolgen nach der Defaultmethode des 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines IPCC (2019), für Stauseen/Wasserreservoirs, Bagger- und Tagebauseen nach Formel 7.10 (IPCC (2019); S. 7.12):

$$F_{CH4_tot} = F_{CH4_reservoir} + F_{CH4_downstream}$$

$$F_{CH4_reservoir} = \alpha_r * EF_{r_CH4>20a} * A_{reservoir}$$

$$F_{CH4_downstream} = \alpha_r * EF_{r_CH4>20a} * A_{reservoir} * R$$

- F_{CH4_tot} = Gesamte jährliche Methanemissionen aus künstlichen Stauseen/Wasserreservoirs, Bagger- und Tagebauseen älter als 20 Jahre [kg CH_4 a^{-1}]
- $F_{CH4_reservoir}$ = Annuelle Methanemissionen von der Oberfläche künstlicher Stauseen/Wasserreservoirs, Bagger- und Tagebauseen (älter 20 Jahre) [kg CH_4 a^{-1}]
- $F_{CH4_downstream}$ = Annuelle Methanemissionen künstlicher Stauseen/Wasserreservoirs, Bagger- und Tagebauseen (älter 20 Jahre) stromabwärts des Damms [kg CH_4 a^{-1}]
- α_r = Anpassungsfaktor für den Emissionsfaktor in Abhängigkeit vom trophischen Zustand von Stauseen/Wasserreservoirs, Bagger- und Tagebauseen (dimensionslos)
- $EF_{r_CH4>20a}$ = Methan - Emissionsfaktor für Stauseen/Wasserreservoirs, Bagger- und Tagebauseen älter als 20 Jahre [kg CH_4 ha^{-1} a^{-1}]
- $A_{reservoir}$ = Oberfläche von Stauseen/Wasserreservoirs, Bagger- und Tagebauseen (älter 20 a) [ha]
- R = Verhältnis der Methanemissionen von Stauseen/ Wasserreservoirs, Bagger- und Tagebauseen (älter 20 a) stromabwärts des Damms [kg CH_4 a^{-1}] zu Methanemissionen von deren Oberfläche [kg CH_4 a^{-1}]

Teiche, Speicher, künstliche Süßwasserbecken aller Art nach Formel 7.12 (IPCC (2019); S. 7.17):

$$F_{CH4_ponds} = \alpha_p * EF_{p_CH4>20a} * A_{ponds}$$

- F_{CH4_ponds} = Gesamte jährliche Methanflüsse von Teichen, Speichern und künstlichen Süßwasserbecken aller Art [kg CH_4 a^{-1}]
- α_p = Anpassungsfaktor für den Emissionsfaktor in Abhängigkeit vom trophischen Zustand von Teichen, Speichern, künstlichen Süßwasserbecken aller Art (dimensionslos)
- $EF_{p_CH4>20a}$ = Methan - Emissionsfaktor für Teiche, Speicher und künstliche Süßwasserbecken älter als 20 Jahre [kg CH_4 ha^{-1} a^{-1}] A_{ponds} = Oberfläche von Teichen, Speichern und künstlichen Süßwasserbecken aller Art (älter 20 a) [ha]

Fließende, künstliche Gewässer – wetd und Schifffahrtsgewässer (Hafenbecken, Kanäle) -wets

Unter fließenden, künstlichen Gewässern werden hauptsächlich Kanäle und Entwässerungsgräben der Wasserwirtschaft sowie Schiffahrtsgewässer zusammengefasst.

Die Berechnung der Methanemissionen für diese Subkategorie folgt der Defaultmethode des 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines, ebenfalls nach Formel 7.12 (IPCC (2019); S. 7.17):

$$F_{CH4_channels} = \alpha_c * EF_{c_CH4>20a} * A_{channels}$$

- $F_{CH4_channels}$ = Gesamte jährliche Methanflüsse von Kanälen, Entwässerungsgräben der [kg CH_4 a^{-1}]
- α_c = Anpassungsfaktor für den Emissionsfaktor in Abhängigkeit vom trophischen Zustand von Kanälen, Entwässerungsgräben der Wasserwirtschaft (dimensionslos)
- $EF_{c_CH4>20a}$ = Methan - Emissionsfaktor für Kanäle, Entwässerungsgräben der Wasserwirtschaft älter als 20 Jahre [kg CH_4 ha^{-1} a^{-1}]
- $A_{channels}$ = Oberfläche von Kanälen, Entwässerungsgräben der Wasserwirtschaft (älter 20 a) [ha]

Aktivitätsdaten

Grundlage zur Ermittlung der Aktivitätsdaten für die Teilkategorien der Subkategorie *Gewässer* bilden folgende Datenquellen:

- Datensätze des Basis-Digitalen Landschaftsmodells (B-DLM) des Amtlichen Topographisch-Kartographischen InformationsSystems (ATKIS®) der Jahre 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 und 2022 ((AdV 2000; 2005; 2010; 2015, 2020, 2022)
- Ein Datensatz der Bundesanstalt für Gewässerkunde mit georeferenzierten Informationen zu künstlichen stehenden Gewässern > 50 ha
- Studie zur Erfassung der Teichflächen in Bayern (Seitel & Oberle, 2022).
- Datensätze der Offizialstatistik zu Aquakulturbetrieben und deren Anlagengröße auf Ebene der Bundesländer (Statistisches Bundesamt, 2022a)

Durch Kombination statistischer Daten mit Datensätzen, die mittels Methoden der Geoinformation georeferenziert ermittelt wurden, konnten die Flächengrößen der stehenden und fließenden künstlichen Gewässer Deutschlands, differenziert nach Typ festgestellt werden. Die Fläche der natürlichen Gewässer ergibt sich durch Abzug der so ermittelten Flächen von der Gesamtgewässerfläche Deutschlands.

Die Flächen für die Gewässerkategorien wurden im Inventar statisch gehalten, da

- die Aufnahme in das B-DLM erst in den jüngeren Jahren erfolgte und im Vergleich mit den Vorjahren zu detektierende Flächenänderungen keine echten Landnutzungsänderungen darstellen sondern kartographische Artefakte
- die Flächendaten eine Kombination aus georeferenzierten und statistischen Daten sind, die letztlich keine Georeferenz mehr aufweisen

Grundlage der Flächenfestlegung sind die Flächen der LUM 2021 (bestes B-DLM). Für Landübergänge bezüglich der Feuchtgebietskategorie gelten folgende Regeln:

- Keine Landnutzungsänderungen von und zu „Natürlichen Gewässern und Fließenden künstlichen Gewässern“ zu anderen Landnutzungskategorien, bis eine zuverlässige, georeferenzierte AD-Grundlage verfügbar sein wird. Dies gilt im Wesentlichen auch für „Stehende künstliche Gewässer“, mit einer Ausnahme: Landnutzungsänderungen von *Torfabbau* zu „Stehenden künstlichen Gewässern“ werden einseitig zugelassen
- Keine Landnutzungsänderungen von „Natürlichen Gewässern, Stehenden künstlichen Gewässern“ und „Fließenden künstlichen Gewässern“ untereinander
- „Terrestrische Feuchtgebiete“ und „Torfabbau“ werden wie bisher behandelt, abgesehen davon, dass Landnutzungsänderungen von und zu diesen von „Natürlichen Gewässern, Stehenden künstlichen Gewässern“ und „Fließenden künstlichen Gewässern“ ausgeschlossen werden (Ausnahme „Torfabbau“ zu „Stehenden künstlichen Gewässern“)

Emissions- und Anpassungsfaktoren

Natürliche Gewässer

Gemäß 2019 Refinement IPCC (2019) müssen für „Natürliche Gewässer“ keine THG-Emissionen berichtet werden; folglich werden keine Emissionsfaktoren (EF) benötigt.

Stehende künstliche Gewässer – wetb

Emissionsfaktoren

Zur Berechnung der Methanemissionen aus stehenden künstlichen Gewässern Deutschlands (sowohl Stauseen/Wasserreservoirs, Bagger- und Tagebauseen, als auch Teiche, Speicher, künstliche Süßwasserbecken aller Art), werden als Emissionsfaktoren die Default-Werte aus dem 2019 Refinement IPCC (2019) übernommen. Für die kühl gemäßigten Breiten beträgt dieser für

Stauseen/Wasserreservoirs, Bagger- und Tagebauseen (> 20 a):

$EF_{r_CH4>20a}$ = 54,0 [kg CH_4 ha^{-1} a^{-1}] (95 % - Konfidenzintervall: -10,6 % / 10,2 %) (IPCC (2019); S. 7.15; Tabelle 7.9)

Teiche, Speicher, künstliche Süßwasserbecken aller Art:

$EF_{p_CH4>20a}$ = 183 [kg CH_4 ha_{-1} a_{-1}] (95 % - Konfidenzintervall: -35,5 % / 24,6 %) (IPCC (2019); S. 7.18; Tabelle 7.12)

Anpassungsfaktoren

Der Anpassungsfaktor α für den trophischen Zustand der Gewässer wurde für Stauseen/Wasserreservoirs, Bagger- und Tagebauseen (α_r) und für Teiche, Speicher, künstliche Süßwasserbecken aller Art (α_p) landesspezifisch ermittelt. Grundlage hierfür war das Forschungsprojekt „Ökologische Bewertung von künstlichen und erheblich veränderten Seen sowie Mittelgebirgsseen anhand der biologischen Komponente Phytoplankton nach den Anforderungen der EU-Wasserrahmenrichtlinie“ (Hoehn et al., 2009), in dessen Rahmen u.a. für 280 künstliche und 16 natürliche stehende Gewässer Deutschlands (z.B. Mittelgebirgsseen, Baggerseen, Tagebauseen, Talsperren und Sondertypen im Tiefland) u.a. die Trophieklassen ermittelt wurden. Anhand dieser wurde jeder Trophieklasse ein mittlerer Anpassungsfaktor α nach Tabelle 7.11 (S. 7.15) des 2019 Refinement (IPCC, 2019) zugeteilt. Hierfür wurden der Range der im Refinement (IPCC, 2019) für die einzelnen Trophieklassen aufgeführten Anpassungsfaktoren an die höhere Auflösung der Forschungsarbeit angepasst, indem der Range durch die Anzahl der Subkategorien geteilt und die Spannweite linear auf die Trophieklassen aufgeteilt wurde. Aus den daraus entstandenen neuen oberen und unteren Grenzen wurden dann die Mittelwerte als trophische Anpassungsfaktoren α_i den deutschen Trophieklassen zugeteilt (Tabelle 335).

Tabelle 335: Ermittlung des mittleren Trophic Adjustment Factors αi (nach 2019 IPCC Refinement) für künstliche, stehende Gewässer Deutschlands nach Trophieklassen (Hoehn et al., 2009)

LAWA 2009; Hoehn et al.		IPCC (2019 refinement)		Zuordnung trophische Anpassungsfaktoren αi			Unsicherheit (Unterstellung: Range = 95 %KI)	
Trophieklasse	Abkürzung	Trophieklasse	αi	αi US	αi _OS	αi _Trophieklassenmittel	[%]	Verteilung
oligotroph	ol	Oligotrophic	0,7	0,7	0,7	0,7	50	normal
mesotroph 1	meso 1	Mesotrophic	0,7 - 5,3	0,7	3	1,85	62,2	normal
mesotroph 2	meso 2			3	5,3	4,15	27,7	normal
eutroph 1	eu 1	Eutrophic	5,3 - 14,5	5,3	9,9	7,6	30,3	normal
eutroph 2	eu 2			9,9	14,5	12,2	18,9	normal
polytroph 1	poly 1		14,5 - 39,4	14,5	22,8	18,65	22,3	normal
polytroph 2	poly 2			22,8	31,1	26,95	26,7	normal
hypertroph	hyper	Hypereutrophic		31,1	39,4	35,25	26,7	normal

Die so ermittelten Anpassungsfaktoren wurden über die Trophieklasse den Gewässern der deutschen Studie zugeordnet und anhand der Anzahl der unterschiedlichen Gewässertypen in den diversen Trophieklassen gewichtet (Tabelle 336).

Tabelle 336: Ermittlung mittlerer trophischer Anpassungsfaktoren anhand des Gewässerzustandes künstlicher, stehender Gewässer Deutschlands basierend auf HOEHN et al. 2009

Gewässertyp	oligotroph	mesotroph 1	mesotroph 2	eutroph 1	eutroph 2	polytroph 1	polytr. 2 / hypertroph	∑ Gewässer
	Anzahl							
Baggersee	11	24	21	21	11	3	2	93
Teich						1	8	9
natürlicher See	4	4	5		1		2	16
Speicher	1				1		4	6
Tagebausee	20	8	5	1				34
Talsperre	35	27	33	11	12	11	9	138
∑total	71	63	64	33	25	15	25	296
∑ohne natürliche Seen	67	59	59	33	24	15	23	280
αi_Trophieklassenmittel	0,7	1,85	4,15	7,6	12,2	18,65	31,1	
	ol	meso 1	meso 2	eu 1	eu 2	poly 1	poly 2 / hyper	Anpassungs-faktor
	αi Trophieklassenmittel *Anzahl							αi_Mittel
Baggersee	7,7	44,4	87,15	159,6	134,2	55,95	62,2	5,9
Teich						18,65	248,8	29,7
natürlicher See	2,8	7,4	20,75		12,2		62,2	6,6
Speicher	0,7				12,2		124,4	22,9
Tagebausee	14	14,8	20,75	7,6				1,7
Talsperre	24,5	49,95	136,95	83,6	146,4	205,15	279,9	6,7
αr Talsperre/Tagebau-/Baggersee	46,2	109,15	244,85	250,8	280,6	261,1	342,1	5,8
αp_Teich/Speicher	0,7				12,2	18,65	373,2	27,0

Es zeigt sich, dass die so ermittelten trophischen Anpassungsfaktoren für Teiche und Speicher deutlich größer sind als in den anderen künstlichen Gewässern, da diese Gewässer überwiegend eutroph bis hypertroph sind. Die anderen künstlichen Gewässer weisen eine untereinander vergleichbare mittlere Trophiestufe auf. Diese ähnelt sehr derjenigen der natürlichen Seen. Eine Ausnahme bilden lediglich die Tagebauseen, die überwiegend oligo-bis mesotroph sind (Hoehn et al., 2009).

Für künstliche Seen über organischen Böden bzw. einem durch organische Böden geprägten Einzugsgebiet wird eine Gleichverteilung der Seen zwischen Meso- und Eutrophie unterstellt, da diese, je nach Umland, Zufluss, Gewässerausprägung und Bewirtschaftung alle diese Trophiestufen aufweisen können (Riedmüller et al., 2013) und (Mauersberger & Kopp, 2006).

Aufgrund dieser Ergebnisse werden gewichtete, mittlere trophische Anpassungsfaktoren für

1. Teiche, Speicher und künstliche Süßwasserbecken aller Art α_p = 27,0
2. Stauseen / Wasserreservoirs, Bagger- und Tagebauseen
   a. mineralischer Untergrund/Einzugsgebiet α_r_mineralisch = 5,8
   b. organischer Untergrund/Einzugsgebiet α_r_organisch = 7,6

ausgewiesen.

Für den Faktor R, der das Verhältnis der Methanemissionen von Stauseen/ Wasserreservoirs (älter als 20 a) am bzw. unterhalb des Auslasses des Dammes zu Methanemissionen von deren Oberfläche beschreibt, wird ebenfalls auf den Default-Faktor des 2019 Refinement (IPCC (2019)

zurückgegriffen. Der Wert für dieses Verhältnis ist dimensionslos und beträgt im Median (95%-Konfidenzintervall des Median):

R = 0,09 (-44,4 % / 144,4 %) (Tabelle 7.1; S. 7.15; IPCC 2019)

Fließende, künstliche Gewässer – wetb und Schifffahrtsgewässer (Hafenbecken, Kanäle) - wetd

Der Default-Wert für den Emissionsfaktor beträgt für Kanäle, Entwässerungsgräben der Wasserwirtschaft sowie Schifffahrtsgewässer

$EF_{c_CH4>20a}$ = 416 kg CH_4 ha^{-1} a^{-1} (95 % - Konfidenzintervall: -37,7 % / 60,8 %) (IPCC (2019); S. 7.18; Tabelle 7.12),

der Default-Wert für den dimensionslosen Anpassungsfaktor für den Emissionsfaktor in Abhängigkeit vom trophischen Zustand der Fließgewässer

α_c = 1 (IPCC 2019; S. 7.17; Gleichung 7.12)

6.1.2.7 Direkte Lachgas-Emissionen (N_2O) aus Stickstoff-Mineralisierung (CRF 4(III))

Die direkten (CRF 4 (III)) N_2O-Emissionen, die durch Verluste an organischer Bodensubstanz infolge von Landnutzungsänderungen bzw. Bewirtschaftungsmaßnahmen entstehen, wurden gemäß der 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories IPCC (2019) ermittelt. Hierfür wurden die für die einzelnen Landnutzungs-änderungsflächen ermittelten Kohlenstoffvorratsänderungen durch die mittleren C/N – Verhältnisse der entsprechenden Böden dividiert und somit die absoluten Veränderungen im Stickstoffvorrat der Böden bestimmt (Gleichung 11.8 in den IPCC Guidelines 2006, IPCC (2006a)). Die N-Vorräte für Waldböden entstammen den auf den Ergebnissen der BZE-Wald (Wellbrock et al., 2016) basierenden Bodenkarten (s. Kapitel 6.1.2.1.3). Die Emissionsfaktoren für die restlichen Landnutzungskategorien wurden aus den regionalisierten Ergebnissen der BZE-Landwirtschaft bezüglich der C/N-Verhältnisse der Mineralböden (Jacobs et al., 2018) abgeleitet (s. Kapitel 6.1.2.1.4, Kapitel 6.1.2.1.5; Kapitel 6.1.2.1.6 und Kapitel 6.1.2.1.7). Die C/N-Verhältnisse für Mineralböden der Kategorie *Terrestrische Feuchtgebiete* können derzeit nur auf Bundeslandebene regionalisiert werden.

Zur Ermittlung der direkten Emissionen wurden die absoluten Stickstoffvorratsunterschiede mit dem bezüglich Klima und Art des Inputs spezifizierten IPCC Standardwert von 0,006 kg N_2O-N $(kg\ N)^{-1}$ (aktualisierte Tabelle 11.1 (IPCC, 2019) gemäß Gleichung 11.1 in den 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (IPCC, 2006a) verrechnet. Die Unsicherheiten sind in den entsprechenden Kapiteln der einzelnen Landnutzungskategorien (vgl. Kapitel 6.4.3, 6.5.3, 6.6.3, 6.7.3 und 6.8.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz) zusammengefasst.

Die Lachgasemissionen unterliegen ebenfalls der Übergangszeit und werden analog zu den Kohlenstoffvorratsänderungen auf 20 Jahre verteilt. Auch bezüglich der effektiven Übergangszeit gelten die für den Kohlenstoff anzuwendenden Methoden. Zur Herleitung der impliziten Stickstoffemissionsfaktoren für den Wald gelten die diesbezüglich für den Kohlenstoff gemachten Ausführungen (vgl. Kapitel 6.1.2.1.1).

Die direkten Lachgas-Emissionen infolge des Zersatzes organischer Substanz aus der Verbleibkategorie Ackerland[86] sowie der Verbleibkategorie „Grünland i.e.S.“, werden gemäß IPCC Guidelines 2006 (IPCC, 2006a) & 2019 (IPCC (2019)) im Sektor Landwirtschaft unter 3.D.1.e berichtet.

[86] Summe der Emissionen aus den Verbleibkategorien und der Übergangskategorien untereinander der Landnutzungskategorien *$Ackerland_{annuell}$, Hopfenanbau, Obstanbau, Weinanbau, Baumschulen, Weihnachtsbaumkulturen* und *Kurzumtriebsplantagen*

6.1.2.8 Indirekte Lachgas-Emissionen (N_2O) aus bewirtschafteten Böden (CRF 4(IV))

Die indirekten N_2O-Emissionen, die durch Verluste an organischer Bodensubstanz infolge von Landnutzungsänderungen bzw. Bewirtschaftungsmaßnahmen entstehen, wurden gemäß der 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (IPCC (2006a) ermittelt und in der CRF 4(III) ausgewiesen. Die indirekten N_2O-Emissionen infolge atmosphärischer Deposition werden im Sektor Landwirtschaft (CRF 3.B.5) berichtet. In der CRF 4(III) sind die entsprechenden Spalten deshalb mit dem Notation Key IE versehen.

Zur Ermittlung der indirekten Lachgasemissionen wurden die für die einzelnen Landnutzungsänderungsflächen ermittelten Kohlenstoffvorratsänderungen durch die flächengewichteten mittleren C/N – Verhältnisse der entsprechenden Böden dividiert und somit die absoluten Veränderungen im Stickstoffvorrat der Böden bestimmt (Gleichung 11.8 in den IPCC 2019 IPCC (2019)). Die N-Vorräte für Waldböden entstammen den Bodenkarten (s. Kapitel 6.1.2.1.3) , die auf den Ergebnissen der BZE-Wald (Wellbrock et al., 2016)basieren. Die Emissionsfaktoren für die restlichen Landnutzungskategorien wurden aus den regionalisierten Ergebnissen der BZE-Landwirtschaft bezüglich der C/N-Verhältnisse der Mineralböden (JACOBS et al. 2018) abgeleitet (s. Kapitel 6.1.2.1.4, Kapitel 6.1.2.1.5; Kapitel 6.1.2.1.6 und Kapitel 6.1.2.1.7). Die C/N-Verhältnisse für Mineralböden der Kategorie *Terrestrische Feuchtgebiete* können derzeit nur auf Bundeslandebene regionalisiert werden.

Zur Abschätzung der indirekten Lachgasemissionen wurden die N-Vorratsunterschiede nach Gleichung 11.10 der 2019 Refinement to the IPCC Guidelines mit den Standardfaktoren $Frac_{Leach-(H)}$ (0,24 kg N_2O-N (kg N)$^{-1}$) und dem EF_5 (0,011 kg N_2O-N (kg N)$^{-1}$) multipliziert (IPCC, 2006a). Die Unsicherheiten werden in den Unsicherheiten-Kapiteln der Landnutzungskategorien beschrieben (vgl. Kapitel 6.4.3, 6.5.3, 6.6.3, 6.7.3 und 6.8.3). Die Ergebnisse werden in die CRF 4(III) eingetragen.

Die Lachgasemissionen unterliegen ebenfalls der Übergangszeit und werden analog zu den Kohlenstoffvorratsänderungen auf 20 Jahre verteilt. Auch bezüglich der effektiven Übergangszeit gelten die für den Kohlenstoff anzuwendenden Methoden. Zur Herleitung der impliziten Stickstoffemissionsfaktoren für den Wald gelten die diesbezüglich für den Kohlenstoff gemachten Ausführungen (vgl. Kapitel 6.1.2.1.1).

Die direkten Lachgas-Emissionen infolge des Zersatzes organischer Substanz aus der Verbleibkategorie Ackerland[87] sowie der Verbleibkategorie „Grünland i.e.S.“, werden gemäß IPCC Guidelines 2006 (IPCC, 2006a) & 2019 (IPCC (2019) im Sektor Landwirtschaft unter 3.D.1.e berichtet.

6.1.2.9 Verbrennung von Biomasse (CRF 4(IV))

Die Verbrennung von Biomasse im Landnutzungssektor tritt in Deutschland einzig durch Waldbrände auf. Die daduch entstandenen Emissionen werden in der CRF 4(IV) eingetragen. Die methodische Beschreibung zu den Waldbränden befindet sich im Waldbrand-Kapitel 6.4.2.7.5 in der Landnutzungskategorie Wald.

Für die Landnutzungskategorien „Ackerland, Grünland, Feuchgebiete“ und „Sonstiges Land“ gibt es keine Emissionen aus der Verbrennung von Biomasse. Dabei wird für alle Kategorien nach kontrollierten Feuern und Wildfeuern unterschieden. Spontane Feuer (Wildfeuer) in diesen Landnutzungskategorien sind in Deutschland seltene Ereignisse und werden daher nicht erfasst:

[87] Summe der Emissionen aus den Verbleibkategorien und der Übergangskategorien untereinander der Landnutzungskategorien $Ackerland_{annuell}$, Hopfenanbau, Obstanbau, Weinanbau, Baumschulen, Weihnachtsbaumkulturen und Kurzumtriebsplantagen

die Treibhausgasemissionen daraus sind zu vernachlässigen. In der CRF 4(IV) wird NO (not occurring) eingetragen.

Anthropogen verursachte Großbrände, wie der Moorbrand 2018, konnten in den Jahren 2019-2024 nicht verzeichnet werden.

Kontrollierte Feuer (On-site burning von Biomasse) sind in Deutschland per Gesetz verboten (§ 3 DirektZahlVerpflV; Bundesgesetzblatt (2004)) und treten in Deutschland nicht auf. Dies betrifft alle Landnutzungskategorien. In der CRF 4(IV) wird NO (not occurring) eingetragen.

6.1.2.10 Unsicherheiten

Die Unsicherheitenbestimmung im LULUCF Teil des deutschen Treibhausgasinventars folgt den Richtlinien der 2006 IPCC Guidelines und der Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories (IPCC, 2000). Bei Normalverteilung wird das 95 % Konfidenzintervall angegeben bzw. ± die Hälfte des 95 % Konfidenzintervals oder 1,96 x der Standardfehler in % vom Mittelwert. Bei asymmetrischen Verteilungen, hier triangular- oder logarithmisch-normalverteilte Daten, werden die Unsicherheiten in Prozent vom Lagemaß dargestellt, als obere und untere Schranke; in der Regel ermittelt über die Quantile (p = 0,025 bzw. p = 0,975). Bei der Unsicherheitenfortpflanzungsrechnung wurde gemäß der oben angegebenen Richtlinien, im Sinne einer konservativen Abschätzung, der Abstand zwischen dem Extremwert des schiefen Achsenabschnitts zum Lagemaß per Definition zur Hälfte des 95 % Konfidenzintervals erklärt. Für die Holzprodukte konnte wegen fehlender Unsicherheiten für die Emissionsfaktoren keine Unsicherheitenberechnung durchgeführt werden.

Die Gesamtunsicherheit des LULUCF-Sektors des deutschen THG-Inventars beträgt für das Jahr 2024 15,5 % bezüglich des Levels der Emissionen. Den größten Beitrag zur Gesamtunsicherheit bedingen die CO_2-Emissionen (76,8 %), der Einfluss der Methan- (23,1 %) und insbesondere der Lachgas-emissionen (0,1 %) ist deutlich geringer bzw. margial..

Bezogen auf die Pools tragen die organischen Böden mit Abstand den größten Beitrag (94,9 %) zur Gesamtunsicherheit des LULUCF-Inventars bei; der Beitrag des Mineralbodens beträgt 1,7 %, der Biomasse 1,2 %, der Gewässer 1,4 %, der DOM 0,8 %.

Insgesamt bedingen die Landnutzungskategorien „Grünland i.e.S“ 89,8 %, „$\text{Ackerland}_{\text{annuell}}$“ 5,5 %, „Wald“ 2,2 % sowie Siedlungen 0,2 % der Gesamtunsicherheit des deutschen LULUCF-Inventars.

6.1.3 Qualitätssicherung und -kontrolle

Eine allgemeine Qualitätskontrolle und für 4.A bis 4.G sowie die Landflächen zusätzlich auch eine kategoriespezifische Qualitätskontrolle sowie eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Bei der QS kamen detaillierte Checklisten und Einzelchecks zur Überprüfung und Dokumentation der Ergebnisse entsprechend dem Qualitätsmanagement des Thünen Instituts (Thünen-Institut (TI), 2016) zum Einsatz. Die Thünen-Checklisten sowie andere für die QK wichtigen Dokumente werden von der Nationalen Koordinierungsstelle archiviert und sind somit auch zur externen Überprüfung verfügbar.

6.1.3.1 Qualitätsmanagement Emissionsinventare des Thünen-Instituts

Das Qualitätsmanagement der Emissionsinventarerstellung am Thünen-Institut wurde konform zu den IPCC-Richtlinien und dem QSE-Handbuch (Kapitel 1.2.2.3) entwickelt. Rahmenbedingungen und Durchführung des Qualitätsmanagements sind im Konzept (BMELV, 2016) und in

der Ausführungsbestimmung des Konzepts (Thünen-Institut (TI), 2016) ausführlich beschrieben. Alle Dokumente und Daten werden in der Inventarbeschreibung abgelegt, die von der Nationalen Koordinierungsstelle archiviert wird. Die Vorgaben und Abläufe der Ausführungsbestimmung wurden vollständig eingehalten. Im Folgenden werden die besonderen zusätzlichen Qualitätskontrollen für diese Submission beschrieben.

6.1.3.2 Eingangsdaten, Berechnungsverfahren und Emissionsergebnisse

Im ersten Schritt wurde die Landnutzungsmatrix qualitätskontrolliert und zur Emissionsberechnung freigegeben. Die Prüfungen umfassten die Entscheidungsbäume und die Ergebnisse der jährlichen Landnutzungsmatrix und der 20-jährigen Übergangszeit. Im Folgenden sind wichtige Testkriterien für die Landnutzungsmatrix gelistet, die in der Prüfung zum Einsatz kamen. Diese gehen über die Anforderungen der Ausführungsbestimmung hinaus. Sie gelten für die gesamte Landnutzungsmatrix und die beiden Teilmatrizen für mineralische und organische Böden:

- Die nationale Fläche ist konstant.
- Die nationale Fläche ist die gleiche wie im Vorjahr.
- Die Flächen der Landnutzungskategorien sind gleich oder kaum unterschiedlich zum Vorjahr bzw. Unterschiede sind erklärbar.
- Die Flächen und Flächentrends sind konsistent mit statistischen Daten bzw. Unterschiede sind erklärbar.
- Die Summen der Gesamtflächen, bestehend aus verbleibenden Flächen und Landnutzungsänderungen, sind korrekt.
- Sonstige Flächen sind konstant oder nehmen ab; es findet keine Landnutzungsänderung zu sonstigen Flächen statt.
- Torfabbauflächen wurden getrennt ausgewiesen.

Die Emissionsberechnungen wurden mit der qualitätsgeprüften Landnutzungsmatrix durchgeführt. Aus den Flächendaten und Emissionsfaktoren bzw. impliziten Emissionsfaktoren (IEF) werden in Tabellen schrittweise die Emissionsberechnungen für jährliche Landnutzungsänderungen und die Übergangszeit durchgeführt. Die Tabellen wurden geprüft hinsichtlich:

1. Korrektheit der Berechnungen,
2. Konsistenz in der Zeitreihe,
3. Konsistenz mit den Berechnungen des Vorjahres.

Außerdem kamen folgende Testkriterien zum Einsatz:

- Emissionsfaktoren:
  - Die Berechnungen der Emissionsfaktoren bzw. impliziten Emissionsfaktoren (IEF) sind korrekt.
  - Die Zeitreihe der Emissionsfaktoren ist konsistent; Änderungen von Jahr zu Jahr sind erklärbar.

- Die Emissionsfaktoren sind gleich denen des Vorjahres außer bei Änderungen in Daten und Methoden: neue Emissionsfaktoren sind plausibel und Unterschiede zu denen des Vorjahres sind erklärbar und vollständig dokumentiert.
- Unsicherheiten sind korrekt angegeben und konsistent mit denen des Vorjahres.

► Berechnungen:

- Die Basisberechnungen, die Berechnungen für die jährlichen Landnutzungsänderungen und die Übergangszeit sind korrekt.
- Die Übersichtstabellen, die die Grundlage für die CRF und den Text bilden, sind korrekt.
- Die Emissionsergebnisse sind konsistent mit denen des Vorjahres bzw. Unterschiede aufgrund neuer Daten und Methoden erklärbar.

► Ergebnisse der Qualitätskontrollen:

- Alle Berechnungen sind korrekt.
- Die Zeitreihen sind konsistent. Größere Änderungen von Jahr zu Jahr sind ausschließlich bedingt durch die Periodizität der Daten und lineare Interpolationen dazwischen.
- Es wurden keine unerklärbaren Ausreißer der relativen Differenzen der Emissionen zum Vorjahr gefunden. Alle Änderungen gegenüber dem Vorjahr waren korrekt dokumentiert und sind im Nationalen Inventarbericht enthalten.

Nach Eingabe der Aktivitätsdaten und impliziten Emissionsfaktoren (IEF) in die ZSE-Datenbank (Zentrales System Emissionen) wurde zur Kontrolle ein Abgleich der im ZSE berechneten Emissionen mit den außerhalb der Datenbankumgebung errechneten Emissionsergebnissen durchgeführt. Die Schritte der Qualitätskontrolle und ihre Ergebnisse sind in der Inventarbeschreibung vollständig dokumentiert, die ebenfalls von der Nationalen Koordinierungsstelle archiviert wird.

6.1.3.3 Verifizierung

Für die Erstellung des Inventars im LULUCF-Sektor werden vor allem Daten von Inventuren und Erhebungen verwendet, die ein Alleinstellungsmerkmal in Deutschland aufweisen. Das heißt, es gibt keine vergleichbaren Daten, die es ermöglichen würden, diese zu verifizieren. Darunter zählen beispielsweise die Bundeswaldinventur (BWI), die Bodenzustanderhebungen Wald und Landwirtschaft (BZE), die ATKIS-Daten, die Waldbrandstatistik u.a. , die als Primärstatistiken zur Verfügung stehen. Um die Qualität der Daten zu gewährleisten, haben Inventuren wie zum Beispiel die BWI und BZE eigene umfangreiche Qualitätssicherungen und –kontrollen (siehe auch Kapitel 6.4.4). Alle verwendeten Ergebnisse beinhalten Fehlerangaben, die in die Unsicherheitenberechnung des LULUCF-Inventar einfließen.

Die Ergebnisse bzw. impliziten Emissionsfaktoren (IEF), differenziert nach Kohlenstoffpools und Landnutzungskategorien, wurden mit denen der Nachbarstaaten verglichen. Details dazu finden sich in den jeweiligen Kapiteln „Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung“ der Landnutzungskategorien.

6.1.3.4 Verbesserungsmaßnahmen, Reviews und Reports

6.1.3.4.1 Allgemeines und Chronologie der Inventar- und Methodenentwicklung

In den vergangenen Jahren wurde zur Erstellung des deutschen LULUCF-Inventars

- das Berichtsspektrum mehrfach um zusätzliche Kategorien erweitert
- zahlreiche Änderungen an den Methoden zur Berechnung der THG-Emissionen für alle Landnutzungskategorien und Pools vorgenommen
- die räumliche Auflösung des Inventars erhöht.

Diese Maßnahmen machten jedes Jahr eine vollständige Neuberechnung der Zeitreihen der THG-Emissionen des LULUCF-Inventars erforderlich, die z. T. zu erheblichen Unterschieden in den Ergebnissen der Treibhausgasberechnungen zwischen einzelnen Jahren führten. Die Gründe für die methodischen Änderungen waren

- Anforderungen der UNFCCC-Reviews (z.B. ARR/2018/DEU - ARR/2022/DEU)
- Anforderungen der EU-Reviews (z.B. ESD-Reviews; (Ecofys & Environment Agency Austria, 2017)
- eigenständig getroffene Maßnahmen/Inventarplan

um das deutsche LULUCF-Inventar stetig zu verbessern, zu vervollständigen und zu vervollkommnen, umfassend auf höchstmöglichem Berichtsstandard. Die geografisch explizite Bestimmung der Emissionen, unter Verwendung von regional spezifischen Emissionsfaktoren und Aktivitätsdaten mit sehr hoher räumlicher Auflösung soll es zudem ermöglichen, die Auswirkungen standortspezifischer Bewirtschaftungsmaßnahmen (positiv und negativ) auf die THG-Emissionen der einzelnen Pools und Landnutzungskategorien erfassen und im Inventar abbilden zu können. Die durchgeführten Maßnahmen zur Verbesserung des LULUCF-Inventars seit 2020 sind in Tabelle 337 aufgeführt.

Tabelle 337: Änderungen in der Methodik zur Erstellung des deutschen LULUCF-Inventars von 2020 - 2025 differenziert nach Pools

organische Böden		
Submission	**Methodenänderung**	**Gründe**
2021	- Neue Methode zur Bestimmung der CO_2- und CH_4-Emissionen für die Landnutzungskategorien (LUC) einjährige Ackerflächen, Hopfen, Streuobstwiesen, Weinberge, Baumschulen, Weihnachtsbaumplantagen und Kurzumtriebsplantagen, Grünland im engeren Sinne, Gehölze, Hecken sowie terrestrische Feuchtgebiete und Siedlungen in Abhängigkeit vom Grundwasserstand - Implementierung eines Modells zur flächendeckenden Berechnung und Regionalisierung der Grundwasserstände in organischen Böden Deutschlands auf jährlicher Basis	Eigene Maßnahme: Implementierung und Verbesserung des Tier 3 - Verfahrens, da bedeutende Schlüsselkategorie
2022	- Modifikation des Verfahrens zur Bestimmung der Flächen von Entwässerungsgräben auf organische Böden - Korrektur des Algorithmus zur Berechnung der Methanemissionen der Entwässerungsgräben auf organischen Böden - Änderung des Emissionsfaktors für Lachgasemissionen aus organischen Böden unter Siedlungen	
2025	- Implementierung eines neuen hydrologischen Modells zur Bestimmung der Wasserstände in organischen Böden	
mineralische Böden		
Submission	**Methodenänderung**	**Gründe**
2021	- Neues Verfahren zur Bestimmung von THG-Emissionen aus mineralischen Böden bei Landnutzungsänderungen von/zu Siedlungen	z.B. ARR/2020/DEU L.6 (2015: L.9; 2016: L.9; 2018; L.5

2022	- Aktualisierung des Wertes für Kohlenstoff- und Stickstoffvorräte mineralischer Böden, in der Kategorie Siedlungen	2016ARR/2022/DEU L.1; L.2; KL.2; EU-ESD-Review 2019 Inventarplan/Eigene Maßnahme: Implementierung eines Tier 3-Verfahrens ECOFYS & UMWELTAGENTUR ÖSTERREICH
2023	- Implementierung von flächendeckenden, hochauflösenden Karten von Kohlenstoff- und Stickstoffvorräten in mineralischen Böden der Landnutzungskategorien Ackerland, Grünland und Wald Deutschlands, als Grundlage zur Bestimmung regional spezifischer THG-Emissionen aus mineralischen Böden - Einführung des SOM-Prozessmodells YASSO15 zur Berechnung der THG-Emissionen aus mineralischen Waldböden, für den Zeitraum mit verfügbaren Eingangsdaten (seit 2008), in Kombination mit der " „stock-difference-method" (1990 – 2008) unter Anwendung der „Überlappungsmethode"	
2024	- Einführung regionalisierter Emissionsfaktoren für mineralische Böden der Subkategorie terrestrische Feuchtgebiete (wettwett) - Modifikation der Inputdaten für die computergestützte Modellierung mit YASSO15	
2025	- Berechnung der Kohlenstoff- und Stickstoffvorratsänderungen bzw. der CO_2- und N_2O-Emissionen aus den Verbleibkategorien Ackerland und Grünland infolge Bewirtschaftung mittels des Prozessmodells Roth-C	

Biomasse		
Submission	**Methodenänderung**	**Gründe**
2021	- Einführung neuer Emissionsfaktoren für die ober- und unterirdische Waldphytomasse	z.B. ARR/2022/DEU L.8; L.9; L.11; ARR/2020/DEU KL. 7 ARR/2018/DEU L.2; KL 10 – 12 ARR/2016/DEU KL. 13 ARR/2015/DEU KL.13 EU-ESD-Review 2019 ECOFYS & UMWELTAGENTUR ÖSTERREICH Inventarplan/Eigene Maßnahmen: Implementierung eines Tier3-Verfahrens Verfügbarkeit der Daten der aktuellen Bundeswaldinventur
2022	- Modifikation der Emissionsfaktoren für die ober- und unterirdische Waldphytomasse - Implementierung von Modellen zur Berechnung und der Nachverfolgung des Kohlenstoffvorrates in der Biomasse von perennierenden Pflanzen außerhalb des Waldes, in Abhängigkeit von Art, Alter und Bewirtschaftungsaspekten (z.B. Umtriebszeiten, Schnitt, Neubegründung), an jedem Aufnahmepunkt auf jährlicher Basis - Anpassung der Emissionsfaktoren für die Biomasse bei Landnutzungsänderungen von Gehölz- zu Waldflächen	
2024	- Einführung regionalisierter Emissionsfaktoren für Biomasse von einjährigen, krautigen Acker- und Grünlandpflanzen	
2025	- Neue Modelle zur Berechnung des Kohlenstoffvorrates der Biomasse von Hecken und Feldgehölzen - Neue Modelle zur Berechnung des Kohlenstoffvorrates der Biomasse in Terrestrischen Feuchtgebieten und Siedlungsflächen - Neue regionalisierte Emissionsfaktoren für die Waldbiomasse, abgeleitet aus den Ergebnissen der aktuellen Bundeswaldinventur	

Tote organische Substanz (DOM: Totholz, Streu)		
Submission	**Methodenänderung**	**Gründe**
2021	- Einführung neuer Emissionsfaktoren für Totholz	
2022	- Verbesserung der Emissionsfaktoren für Totholz	
2025	- Neue regionalisierte EF für Totholz, abgeleitet aus den Ergebnissen der aktuellen Bundeswaldinventur	Verfügbarkeit der Daten der aktuellen Bundeswaldinventur

Gewässer		
Submission	**Methodenänderung**	**Gründe**
2023	- Einführung einer Methode zur Abschätzung der Methanemissionen aus künstlichen stehenden und fließenden Gewässern	Eigene Maßnahme: Vervollständigung des Inventars
2025	- Berechnung der Emissionen für die LUC-Schifffahrtsgewässer - Korrektur des Emissionsfaktors für Entwässerungsgräben und -kanäle	

Waldbrand		
Submission	**Methodenänderung**	**Gründe**
2023	- Berücksichtigung der Biomasse der Pools Totholz und Streu bei Waldbränden	ARR/2022/DEU L.12

Landnutzung		
Submission	**Methodenänderung**	**Gründe**
2020-2024	- Thematische, räumliche und zeitliche Aktualisierung der Kartengrundlage zur Ermittlung von Aktivitätsdaten zur Ausweisung von Landnutzungen und Landnutzungsänderungen sowie Anpassung der Landnutzungsmatrix im Zeitverlauf	Eigene Maßnahmen: Vervollständigung und Verbesserung der Genauigkeit des Inventars durch Nutzung der jeweils aktuellsten und besten Datensätze, durch zunehmende Regionalisierung bzw. räumliche Auflösung, und zunehmend disaggregierter Erfassung diverser Landnutzungstypen
2023	- Einführung zusätzlicher Landnutzungssubkategorien ○ Hecken (LUC Grünland) ○ Natürliche Gewässer (LUC-Feuchtgebiete) ○ stehende künstliche Gewässer (LUC-Feuchtgebiete) ○ fließende künstliche Gewässer (LUC-Feuchtgebiete) ○ Straßen (LUC-Siedlungen) - Implementierung von Modellen zur Abschätzung der Emissionen in den neuen Landnutzungskategorien, einschließlich der Bestimmung von Aktivitätsdaten und Emissionsfaktoren	
2024	- Einführung zusätzlicher Landnutzungssubkategorien ○ Schifffahrtsgewässer (LUC-Feuchtgebiete) ○ Bahnanlagen (LUC-Siedlungen) - Implementierung von Modellen zur Erfassung der Aktivitätsdaten der neuen Subkategorien	
2025	- Thematische, räumliche und zeitliche Aktualisierung der Kartengrundlage zur Ermittlung von Aktivitätsdaten zur Ausweisung von Landnutzungen und Landnutzungsänderungen sowie Anpassung der Landnutzungsmatrix im Zeitverlauf - Neue Aktivitätsdatenbasis für Hecken	
Informationstechnologie		
Submission	**Methodenänderung**	**Gründe**
2023	- Vollständige Neuprogrammierung und Implementierung des LULUCF-Berechnungsmodells in den Programmiersprachen R und C++	Eigene Maßnahme zur Inventarverbesserung um Inventarberechnungen umfassend auf höchstem Berichtsstandard berechnen zu können, transparent, konsistent und genau; Qualitätskontrolle/-sicherung
2024	- Fehlerbehebungen im Programmcode des LULUCF-Berechnungsmodells bzgl. ○ zufällige Alterszuordnung von mehrjährigen Gehölzen in Gebieten, deren Etablierungszeitpunkt unbekannt ist ○ Berechnung der Emissionen aus mineralischen Böden im Bundesland Bayern	

6.1.3.4.2 Aktuelle Verbesserungsmaßnahmen

Auch mit der Submission 2026 wurden im LULUCF-Inventar Aktualisierungen durchgeführt, Verbesserungsmaßnahmen umgesetzt und Methodenänderungen implementiert (Tabelle 338). Diese sind grundlegend und machten eine vollständige Neuberechnung der THG-Emissionen für den gesamte Berichtszeitraum notwendig.

Tabelle 338: Verbesserungs- und Aktualisierungsmaßnahmen sowie methodische Änderungen zur Erstellung des deutschen LULUCF-Inventars 2026

organische Böden		
Submission	**Methodenänderung**	**Gründe**
2026	• Modifikation des hydrologischen Modells zur Berechnung der Grundwasserstände in organischen Böden	Eigene Maßnahme: Verbesserung des Tier 3 - Verfahrens, da bedeutende Schlüsselkategorie
mineralische Böden		
Submission	**Methodenänderung**	**Gründe**
2026	• Modifikation des Modells zur Berechnung der Kohlenstoffvorräte von Mineralböden auf Ackerland; Implementierung der Einzelstandortberechnung	z.B. ARR/2022/DEU EU-ESD-Review 2019 ECOFYS & UMWELTAGENTUR ÖSTERREICH

organische Böden		
	• Korrektur des Kohlenstoffvorrats um einen Versiegelungsfaktor bei Siedlungs- und Freiraumflächen sowie virtuelle Korrektur der Massenbilanz • Modifikation der Inputdaten für die computergestützte Modellierung mit YASSO15	Eigene Maßnahme: Implementierung eines Tier3-Verfahrens
Biomasse		
Submission	**Methodenänderung**	**Gründe**
2026	• Neues Modell zur Bestimmung der Entwicklung der perennierenden Phytomasse in Siedlungsgebieten, neuer Versiegelungsfaktor und neue Verteilungskoeffizienten für die unterschiedlichen Pflanzentypen	ESD-Review 2025 Eigene Maßnahme: Aktualisierung und Verbesserung des Tier 3 - Verfahrens
Landnutzung		
Submission	**Methodenänderung**	**Gründe**
2026	• Einführung der neuen Landnutzungskategorie Photovoltaikflächen unter LUC-Siedlungen • Unterteilung der Kategorie Natürliche Gewässer in die Subkategorien Flüsse (wetr) und Seen (wetl) • Implementierung eines neuen Verfahrens zur Bestimmung der Landnutzung vor 2010 • Explizite Aufnahme von Streuobstwiesen; Berichterstattung unter Obstanbau	Eigene Maßnahmen: Vervollständigung und Verbesserung der Genauigkeit und Vollständigkeit des Inventars

6.1.4 Geplante Verbesserungsmaßnahmen

Folgende Maßnahmen sind zur Verbesserung und Vervollständigung (Erweiterung des Berichtspektrums) des deutschen LULUCF-Inventars aktuell in Arbeit bzw. Planung. Deren vollständige Implementierung ist mittelfristig geplant; wenn sinnvoll und möglich werden Teilimplementierungen auch vorgezogen (s. Mineralboden-Prozessmodell):

1. Verbesserung des Modells zur Berechnung der Kohlenstoff- bzw. Stickstoffvorrats-änderungen in Mineralböden der Verbleibkategorien der Landnutzungskategorien *Ackerland* und *Grünland* (s. auch Kapitel 6.1.2.1.9).
   a. Weiterentwicklung des Modells zur hektargenauen Berechnung auf Ackerland, insbesondere im Hinblick auf die Inputdaten (in Arbeit; geplant zur Submission 2027)
   b. Weiterentwicklung des Modells um die Kohlenstoff- bzw. Stickstoffvorratsänderungen in Mineralböden der Landnutzungskategorie *Grünland* regionalisiert, hektargenau und zeitlich dynamisch berechnen zu können (in Arbeit; geplant zur Submission 2027/28)
2. Verbesserung der Methodik zur Erfassung der THG-Emissionen in Siedlungsgebieten
   a. Implementierung einer Methode zur Erfassung der Kohlenstoff- und Stickstoffvorratsänderungen in Mineralböden der Verbleibkategorien von Siedlungsgebieten, insbesondere der Subkategorie *Gebäude- und Freiflächen* (in Arbeit; geplant zur Submission 2028)
   b. Dynamisierung der Subkategorien *Straßen* und *Bahnanlagen* (in Arbeit; geplant zur Submission 2028)
   c. Erfassung der Emissionen aus den Subkategorien *Straßen* und *Bahnanlagen*: Ableitung und Implementierung von EF für Biomasse und Mineralböden (in Arbeit; geplant zur Submission 2028)
3. Verbesserung der Methodik zur Erfassung der THG-Emissionen aus Binnengewässern (geplant zur Submission 2028)
   a. Möglichst vollständige, georeferenzierte Erfassung aller Binnengewässer (insbesondere künstlicher Gewässer) und ihres Trophiegrades
   b. Ableitung landesspezifischer Emissionsfaktoren

4. Entwicklung von Methoden zur Erfassung der THG-Emissionen aus Küstenfeuchtgebieten (geplant zur Submission 2030)
   a. Definition der Grenzen der Landnutzungskategorie und ihrer Subkategorien
   b. Erfassung der entsprechenden Aktivitätsdaten
   c. Ableitung landesspezifischer Emissionsfaktoren

6.2 Definitionen von Landnutzung, Klassifizierungssysteme und ihre Widerspiegelung in den LULUCF-Kategorien

6.2.1 Wälder

Die dem deutschen Inventar zugrunde liegende Definition von Wald entspricht den 2006 IPCC Guidelines ((IPCC, 2006a): Vol. 4, Chapter 2.2). Die Zuordnung nationaler Landnutzungssysteme zu dieser Kategorie erfolgt nach Tabelle 341 in Kapitel 6.3.1.2.1.

Grundlage der Berichterstattung ist die Walddefinition der Bundeswaldinventur (Polley, 2001):

Wald im Sinne der BWI ist, unabhängig von den Angaben im Kataster oder ähnlichen Verzeichnissen, jede mit Forstpflanzen bestockte Grundfläche. Als Wald gelten auch kahl geschlagene oder verlichtete Grundflächen, Waldwege, Waldeinteilungs- und Sicherungsstreifen, Waldblößen und Lichtungen, Waldwiesen, Wildäsungsplätze, Holzlagerplätze, im Wald gelegene Leitungsschneisen, weitere mit dem Wald verbundene und ihm dienende Flächen einschließlich Flächen mit Erholungseinrichtungen, zugewachsene Heiden und Moore, zugewachsene ehemalige Weiden, Almflächen und Hutungen sowie Latschen- und Grünerlenflächen. Heiden, Moore, Weiden, Almflächen und Hutungen gelten als zugewachsen, wenn die natürlich aufgekommene Bestockung ein durchschnittliches Alter von fünf Jahren erreicht hat und wenn mindestens 50 % der Fläche bestockt sind. In der Flur oder im bebauten Gebiet gelegene bestockte Flächen unter 1.000 m^2, Gehölzstreifen unter 10 m Breite und Weihnachtsbaum- und Schmuckreisigkulturen sowie zum Wohnbereich gehörende Parkanlagen sind kein Wald im Sinne der BWI. Wasserläufe bis 5 m Breite unterbrechen nicht den Zusammenhang einer Waldfläche.

Abweichend zur Walddefinition der BWI wurden Flächen, die dort als Wald zählen, aber als Waldkategorie Nichtholzboden erfasst wurden und somit unbestockt sind, bei der Kohlenstoffvorrats- und -änderungsberechnung als Nichtwald berücksichtigt. Kurzumtriebsplantagen werden bei der BWI separat erfasst, sind aber kein Wald in Sinne der Waldinventur, des Waldgesetzes und des Inventars und werden deshalb unter Ackerland berichtet.

Nach den IPCC 2006 Guidelines (IPCC, 2006a) bleibt Neuwald 20 Jahre lang in der Neuwald-Kategorie und geht erst dann in die Verbleibkategorie über. Für die Aufforstungsfläche werden Daten ab 1970 berücksichtigt.

Deutschland hat die Option „natürliche Störungen“ nicht gewählt. Auftretende natürliche Störungen werden nicht gesondert betrachtet, sondern fließen in die Veränderungsrechnungen der entsprechenden Pools mit ein.

6.2.2 Ackerland

Die dem deutschen Inventar zugrunde liegende Definition von Ackerland entspricht den 2006 IPCC Guidelines ((IPCC, 2006a): Vol. 4, Chapter 3.2). Die Zuordnung nationaler Landnutzungs-systeme zu dieser Kategorie erfolgt nach Tabelle 341 in Kapitel 6.3.1.2.1. Die Landnutzungskategorie Ackerland wird in sieben Unterkategorien unterteilt: „$Ackerland_{annuell}$,

Hopfen-, Obst- und Weinanbauflächen, Baumschulen, Weihnachtsbaumkulturen“ sowie „Kurzumtriebsplantagen“.

Die Subkategorien werden unter CRF 4.B getrennt aufgeführt, bezüglich der Verbleib- und aller Übergangskategorien. Übergänge zwischen den Ackerlandsubkategorien werden wie Landnutzungsänderungen gehandhabt und im Tabellenwerk entsprechend berichtet (CRF 4.B.1).

Für die Berechnung der Emissionen werden diese Landnutzungssysteme poolspezifisch stratifiziert:

- Berechnung der Biomassevorräte: Jährlich variable Stratifizierung nach 65 annuellen Kulturarten, regionalisiert auf Ebene der Bundesländer (Kapitel 6.1.2.3.3) und Dauerkulturen: Hopfen (Kapitel 6.1.2.3.5.6), Obst (Kapitel 6.1.2.3.5.1), Wein (Kapitel 6.1.2.3.5.2), Baumschulen (Kapitel 6.1.2.3.5.3), Weihnachtsbaumkulturen (Kapitel 6.1.2.3.5.4)und Kurzumtriebsplantagen (Kapitel 6.1.2.3.5.5). Der Anteil der Dauerkulturen an der Gesamtfläche des Ackerlands betrug 2024 3,4 %.
- Berechnung der Emissionen aus Böden: Zeitlich konstante Stratifizierung nach organischen Böden und Mineralböden, unterschieden nach Nutzung (vergl. Kapitel 6.1.2.1 und 6.1.2.1.9); die Bodeneigenschaften von Mineralböden unter annuellem Ackerland liegen flächendeckend in Abhängigkeit zahlreicher standortsspezifischer Parameter in einer Rasterkarte 100 x 100 m vor (vergl. Kapitel 6.1.2.1.4)
- Zuzüglich zur Fläche der organischen Böden unter Ackerland wird die Fläche der offenen Entwässerungsgräben ermittelt.
- Berechnung der Emissionen aus Landnutzungsänderungen: Jährlich aktualisierte Stratifizierung nach Acker unter verbleibender Nutzung und Land, das in Acker umgewandelt wurde. Die Daten werden jährlich aus der Landnutzungsinformation übernommen (Kapitel 6.2 und Kapitel 6.3).

6.2.3 Grünland

Grünland im deutschen Inventar entspricht der Definition der 2006 IPCC Guidelines (Vol. 4, Chapter 3.2). Die Zuordnung nationaler Landnutzungssysteme zu dieser Kategorie erfolgt nach Tabelle 341 in Kapitel 6.3.1.2.1.

Grünland wird in drei Unterkategorien unterteilt, zum einen in mit Gräsern und Kräutern bewachsene Flächen (Grünland im engeren Sinn */ Grassland in a strict sense*), mit Gehölzen bestockte Flächen (Gehölze */ Woody Grassland*), die nicht der Walddefinition unterliegen und Gehölzflächen mit linearen Strukturen (Hecken */ Hedges*). Des Weiteren zählt die Objektart 4106 „Sumpf, Ried“ aus dem Basis-DLM (Kapitel 6.3.1.2.1) dazu, bei der es sich um nicht drainierte organische Böden im Grünland handelt, im Folgenden auch als Nassgrünland bezeichnet. Der Anteil von „Grünland i.e.S.“ an der Fläche des gesamten Grünlands betrug 2023 90,4 %, der Anteil der „Gehölze“ 6,4 %, der der der „Hecken“ 3,2%.

Die Unterkategorien umfassen folgende Flächennutzung und Pflanzenbestände:

- Wiesen, Weiden, Almen, Hutungen, Heideflächen, naturbelassenes Grünland, Erholungsflächen sowie Sumpf/Ried wurden unter „Grünland im engeren Sinne“ („Grünland i. e. S“.) zusammengefasst.
- Flächenhafte Feldgehölze sowie Strauchbestände bilden die Unterkategorie „Gehölze“

- „Hecken“ definiert als ein- oder mehrreihig, linear dicht beieinander stehender Sträucher (vereinzelt auch Bäume)

Übergänge zwischen den Unterkategorien werden wie Landnutzungsänderungen gehandhabt.

Für die Berechnung der Emissionen werden die Unterkategorien von Grünland poolspezifisch stratifiziert.

- Berechnung der Biomassevorräte: Stratifizierung innerhalb der Unterkategorien nach Kulturarten. Für Grünland i.e.S. sind dies ober- und unterirdische Biomasse von Gräsern bzw. krautigen Pflanzen (Kapitel 6.1.2.3.3), regionalisiert auf Bundeslandebene für Gehölze und Hecken wurde ein Modell zur Berechnung der Biomasse von Heckenpflanzen und Feldgehölzen, in Abhängigkeit vom Alter und Umtriebszyklen, Wuchsdichte und -höhe, entwickelt (Kapitel 6.1.2.3.6).
- Berechnung der Emissionen aus Böden: Zeitlich konstante Stratifizierung nach organischen Böden und Mineralböden, weitergehend unterschieden nach Nutzung, für Mineralböden regionalisiert in Abhängigkeit zahlreicher Kovariaten (vergl. Kapitel 6.1.2.1.5).
- Emissionen aus organischen Böden werden in Abhängigkeit vom Grundwasserflurabstand berichtet. (vergl. Kapitel 6.1.2.2). Außerdem wurde die Fläche der Entwässerungsgräben abgeschätzt.
- Berechnung der Emissionen aus Landnutzungsänderungen: jährlich aktualisierte Stratifizierung nach *Grünland i.e.S., Gehölze* und *Hecken* unter verbleibender Nutzung und Land, das in *Grünland i.e.S., Gehölze* und *Hecken* umgewandelt wurde. Die Daten werden jährlich aus der Landnutzungsinformation übernommen (Kapitel 6.2 und Kapitel 6.3.1).

6.2.4 Feuchtgebiete

Nach den 2006 IPCC Guidelines müssen in der Landnutzungskategorie Feuchtgebiete alle Landflächen subsummiert werden, deren Böden zeitweise oder das ganze Jahr wassergesättigt oder mit Wasser bedeckt sind und die nicht unter die Landnutzungskategorien 4.A, 4.B, 4.C und 4.E fallen. Diese Flächen werden im deutschen Inventar in den Unterkategorien „Terrestrische Feuchtgebiete“ (IPCC: *Other Wetlands*) und „Gewässer“ (IPCC: *Flooded Land*) zusammengefasst. Des Weiteren werden unter der Landnutzungskategorie „Wetlands“ alle Flächen, die im Zusammenhang mit „Torfabbau“ stehen, in einer weiteren Unterkategorie zusammengefasst (IPCC: *Peat Extraction*; vergl. 2006 IPCC Guidelines, (IPCC, 2006a)). Diese Torfabbauflächen und deren Veränderung in der Zeit werden räumlich explizit erfasst und ausgewiesen.

In Deutschland ist der Großteil der ehemaligen Feuchtgebietsflächen drainiert (>90%), unterliegt hauptsächlich land- und forstwirtschaftlicher Nutzung oder findet sich in Siedlungsgebieten. 2022 waren dies 1.660 kha ≙ 85,3 % der Gesamtfläche organischer Böden. Gemäß der 2006 IPCC Guidelines werden diese somit in den entsprechenden Landnutzungskategorien (CRF 4.A - 4.C und 4.E) berichtet. In der Unterkategorie „terrestrische Feuchtgebiete“ finden sich daher nur die wenigen, vom Menschen weniger beeinflussten, wenig drainierten und naturnahen Moorstandorte und sonstigen Feuchtgebiete auf mineralischen Böden.

In der Unterkategorie *Gewässer* wird ebenfalls nach dem Grad der anthropogenen Beeinflussung zwischen „überflutetem Land“[88] , sowie „nicht regulierten“ und „regulierten natürlichen

[88] Wasserkörper, die durch menschliche Aktivitäten reguliert werden und starke Wasserstandsschwankungen bzw. Änderungen im Flächenbedeckungsgrad aufweisen (Staubecken usw.) (2006 IPCC-Guidelines)

Gewässern“ unterschieden (nicht berichtspflichtig). Um die Emissionen aus der Subkategorie „Gewässer“ noch gezielter erfassen zu können, wurde die Kategorie „Feuchtgebiete“ weiter differenziert und mit der Submission 2024 die Subkategorie „Künstliche Schifffahrtsgewässer“ eingeführt. So setzt sich die Subkategorie „Gewässer“ nunmehr aus den Teilkategorien:

- Natürliche Gewässer,
- Stehende künstliche Gewässer,
- Fließende künstliche Gewässer
- Künstliche Schifffahrtsgewässer zusammen.

Tabelle 339 verdeutlicht die nach diesen Vorgaben ermittelte Zuordnung der unter die Kategorie Feuchtgebiete fallenden Flächen Deutschlands, deren Definitionen sowie deren Flächen für das Jahr 2024. Sie enthält außerdem ergänzend die Angaben zu Entwässerungsgräben auf organischen Böden (kursiv), die unter 4.A, B, C, E zu berichten sind.

Tabelle 339: Unterteilung der Landnutzungskategorie *Feuchtgebiete* in Subkategorien gemäß 2006 IPCC Guidelines und 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (IPCC 2019), die Teilkategorien der Subkategorie „Gewässer“ sowie deren Flächen im Jahr 2024 [ha]

Subkategorie	Kürzel	Flächenzusammenstellung	Fläche [ha]
Terrestrische Feuchtgebiete	wett	Terrestrische Feuchtgebiete, die nicht unter eine der anderen Landnutzungskategorien fallen (z.B. naturnahe Moore)	153.100
Natürliche Gewässer	wetl	Fläche der fließenden und stehenden Gewässer aus dem B-DLM abzüglich der wetb-Flächen	367.129
	wetr	Fläche der fließenden und stehenden Gewässer aus dem B-DLM	185.781
Torfabbauflächen	wetp	Flächen auf organischen Böden zur Torfgewinnung	10.076
Künstliche stehende Gewässer	wetb	Stauseen, Wasserreservoirs, Bagger- und Tagebauseen	34.104
	wetb	Teiche, Speicher, künstliche Süßwasserbecken aller Art (Ausnahme: Abwasserbehandlungsanlagen)	31.894
Künstliche fließende Gewässer	wetd	Kanäle und Entwässerungsgräben der Wasserwirtschaft, Hafenbecken an Binnengewässern	23.261
Künstliche Schifffahrtsgewässer	wets	Hafenbecken an Binnengewässern und Kanäle für die Schifffahrt	17.571
Entwässerungsgräben auf organischen Böden		*(zu berichten unter 4.A - 4.E)*	13.800

Das Emissionsverhalten der Unterkategorien Torfabbau, Terrestrische Feuchtgebiete und Gewässer ist unterschiedlich ausgeprägt. Daher werden sie als eigenständige Unterkategorien geführt und in den CRF (4.D und 4.(II)) getrennt berichtet (Details siehe Kapitel 6.3.1). Die Berechnung der Landflächen erfolgt für die Landnutzungskategorie „Feuchtgebiete“ durch eine jährlich aktualisierte Stratifizierung nach „Terrestrischen Feuchtgebieten, Gewässern“ und „Torfabbauflächen“; die Flächen der Subkategorien „Terrestrische Feuchtgebiete“ und „Torfabbauflächen“ werden weiterhin unterschieden nach Land unter verbleibender Nutzung und Land, das in „Terrestrische Feuchtgebiete“ oder „Torfabbauflächen“ umgewandelt wurde.

Die Flächendaten werden jährlich aus der Landnutzungsinformation übernommen (Kapitel 6.3.1). Umwandlungen zwischen den Subkategorien werden wie

Landnutzungsänderungen aus anderen Landnutzungskategorien nach den Vorgaben im Kapitel 6.1.2.6 behandelt.

Für die Berechnung der Emissionen werden die Unterkategorien „Torfabbau, Terrestrische Feuchtgebiete“ und „Gewässer“, poolspezifisch stratifiziert.

Verbleibkategorie:

- Berechnung der Biomassevorräte: In den Unterkategorien Gewässer und Torfabbau kommt keine Biomasse vor. Für die Unterkategorie Terrestrische Feuchtgebiete wurde die Biomasse aus den Werten für i.e.S. hergeleitet, regionalisiert auf Ebene der Bundesländer (Kapitel 6.1.2.1.7).
- Berechnung der Emissionen aus Mineralböden: Für Gewässerflächen werden keine Bodenkohlenstoffvorräte ausgewiesen; Torfabbauflächen finden sich ausschließlich auf organischen Böden. Im Tabellenwerk werden sie als „not occuring“ (NO) aufgeführt. Für die Unterkategorie Terrestrische Feuchtgebiete werden die Emissionen aus Mineralböden aus Werten für Grünland i.e.S. hergeleitet (Kapitel 6.1.2.1.7).
- Berechnung der Emissionen aus organischen Böden: Für die Torfabbauflächen werden on-site- und off-site-Emissionen (Kapitel 6.7.2.4) berechnet, gemäß 2006 IPCC Guidelines bzw. 2013 IPCC Supplement Wetland. Die Unterkategorie Terrestrische Feuchtgebiete wird in nasse (Grundwasserflurabstand < 0,1 m) und drainierte Flächen (Grundwasserflurabstand > 0,1 m) unterteilt (vergl. Kapitel 6.1.2.1.9); es werden on-site Emissionen berichtet; für die Unterkategorie Gewässer werden keine Emissionen berichtet.
- Methanemissionen werden für die Gewässerteilkategorien „Stehende künstliche Gewässer“ und „Fließende künstliche Gewässer“ in Abhängigkeit von der Art und dem Trophiezustand des Gewässers berichtet (Kapitel 6.1.2.6)

Übergangskategorien:

- Berechnung der Biomassevorräte: Bei Landnutzungsänderungen zu Gewässern wird der Biomassevorrat auf Null gesetzt. Für die Unterkategorie terrestrische Feuchtgebiete wurde die Biomasse aus den Werten für Grünland i.e.S. und Gehölzen hergeleitet (Kapitel 6.1.2.3.7).
- Berechnung der Emissionen aus Böden: In der Unterkategorie Gewässer treten keine Emissionen auf; für die „Terrestrischen Feuchtgebiete“ wird zeitlich konstant nach organischen Böden und Mineralböden unterschieden. Für organische Böden werden on-site Emissionen berichtet in Abhängigkeit vom Wasserstand (Kapitel 6.1.2.2). Mineralbodenemissionen treten nur in der Subkategorie Terrestrische Feuchtgebiete auf, da Torfabbauflächen per Definition keine Mineralböden aufweisen.

6.2.5 Siedlungen

Die Beschreibung der nationalen Landnutzungssysteme im Zusammenhang mit Siedlung und Verkehr, sowie deren Zuordnung zur IPCC-Landnutzungskategorie Siedlungen sind in Tabelle 341 in Kapitel 6.3.1.2.1 dargestellt. Die dem deutschen Inventar zugrunde liegende Definition von Siedlung entspricht der in 2006 IPCC Guidelines ((IPCC, 2006a): Vol. 4, Ch. 2.2). Die gesamte Siedlungsfläche wurde in die Subkategorien „Gebäude und Freiflächen (set1), Straßen (set2), Bahnkörper (set3) und Flächen mit Photovoltaikanlagen (setp)“ unterteilt.

Siedlungsbereiche weisen erhebliche Anteile an unversiegelten, mit Vegetation bedeckten Flächen auf. In einer großangelegten Studie des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und

Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) wurden diese mittels Methoden der Fernerkundung und Geoinformatik für die Siedlungsgebiete Deutschlands bestimmt (BBSR et al., 2022). Der Anteil der Vegetationsfläche an der Summe der "Baulich geprägten Siedlungsfläche" und der "Siedlungsfreifläche"(n. BBSR 2022) beträgt ca. 45 % (Tabelle 340). Die Flächensumme dieser beiden Kategorien der BBSR-Studie (2022) entspricht der deutschen Subkategorie Gebäude- und Freiflächen (set1). Von der mit Vegetation bestandenen Fläche entfallen ca. 17 % auf Bäume, 83 % auf niedrige Vegetation (z.B. Wiesen, Rasen, Stauden) (Tabelle 340).

Tabelle 340: Berechnung des Anteils [%] der begrünten Fläche an der Gesamtfläche der Landnutzungssubkategorie Gebäude- und Freiflächen (set1) sowie des Anteils der krautigen und holzigen Pflanzen an dieser Fläche

Landnutzungskategorie	Fläche [ha]			Anteil [%]	
	total (1)	Bäume (2)	krautige Pflanzen (3)	Bäume (2)	krautige Pflanzen (3)
Baulich geprägte Siedlungsfläche	3.381.402	216.410	1.159.821	6,4	34,3
Siedlungsfreifläche	450.628	81.113	282.994	18	62,8
Gebäude- und Freiflächen (set1)	**3.832.030**	**297.523**	**1.442.815**	**7,8**	**37,7**
	∑set1	***1.740.338***		***45,4***	
	share ∑set1			***17,1***	***82,9***

Flächendaten aus LUM 2025; relative Verteilung der Pflanzen nach 2022.(BBSR et al., 2022). Berechnete Werte für NID in Bold und italic

In Deutschland werden flächenhafte Photovoltaikanlagen nahezu ausschließlich auf Grünland betrieben. Aus diesem Grunde werden die Flächen der Subkategorie „Flächen mit Photovoltaikanlagen“ wie Grünland i.e. S. behandelt; dies betrifft alle Flächen der Verbleib- sowie der Übergangskategorien. Da bei flächenhaften Photovoltaikanlagen überwiegend punktförmige Fundamente (Ramm-, Schraub- und Betonfundamente) verwendet werden, erfolgt kein Flächenabschlag für die bauliche Versiegelung, da dieser i.d.R. nur sehr gering ist.

Zusammenfassend werden im deutschen Inventar für die Subkategorie „Gebäude und Freiflächen“ ein Versiegelungsgrad von ca. 55 %, für „Flächen mit Photovoltaikanlagen“ 0% unterstellt.

Für die Berechnung der Emissionen wird in der Landnutzungskategorie poolspezifisch stratifiziert:

- Berechnung der Biomassevorräte: Für die Kategorie „Gebäude und Freiflächen“ wurde die Biomasse aus den Werten für „Grünland i.e.S.“ und Daten aus der Literatur hergeleitet (Kapitel 6.1.2.3.7).
- Berechnung der Emissionen aus Böden: Zeitlich konstante Unterscheidung nach organischen und Mineralböden. Die Kohlenstoffvorräte der Mineralböden werden in Abhängigkeit von der Landnutzung aus den Daten der Bodenzustandserhebungen Wald und Landwirtschaft abgeleitet unter Berücksichtigung des Versiegelungsgrades (vergl. Kapitel 6.1.2.1) und der Vornutzung. Für die organischen Böden werden als Proxy die Werte des Grünlands i.e.S. herangezogen (Kapitel 6.1.2.2).
- Berechnung der Emissionen aus Landnutzungsänderungen: Eine jährlich aktualisierte Stratifizierung nach verbleibender Nutzung und Land, das in „Gebäude und Freiflächen“ und „Flächen mit Photovoltaikanlagen“ umgewandelt wurde, wurde angewandt. Die Daten werden jährlich aus der Landnutzungsinformation übernommen (Kapitel 6.2 und Kapitel 6.3.1).

6.2.6 Sonstiges Land

Folgende im ATKIS® ausgewiesenen Objektarten werden im deutschen Berichtssystem, gemäß der 2006 IPCC Guidelines, der Kategorie „Other Land“ zugeordnet: „Vegetationslose Fläche“ (AAA_Ob.-Nr. 43007) und „Fläche z.Z. unbestimmbar“ (AAA_Ob.-Nr. 43008). Beschreibung und Zuordnung der Flächen erfolgte nach Tabelle 341 in Kapitel 6.3.1.2.1und den dort beschriebenen Algorithmen.

6.3 Informationen zu den für die Ermittlung der Landflächen gewählten Ansätzen und zu den verwendeten Landnutzungs-Datenquellen

6.3.1 Informationen zu Ansätzen zur Darstellung von Landflächen und zu Landnutzungsdatenbanken, die für die Inventarerstellung verwendet werden

6.3.1.1 Einleitung

Die Methodik zur Erfassung von Landnutzungsänderungen im LULUCF-Sektor berücksichtigt zeitlich und räumlich konsistent alle Landnutzungen und Landnutzungsänderungen, getrennt für organische und mineralische Böden. Zur Anwendung kommt ein stichprobenbasiertes System. Die angewandte Methode beruht auf räumlich expliziten Beobachtungen und ist damit nach den 2006 IPCC-Guidelines ((IPCC, 2006b): Vol. 4 Kapitel 3.3.1) als „approach 3“ einzustufen. Entscheidungsgründe, die zur Anwendung des stichprobenbasierten Systems führten, sind in Freibauer et al., 2017 aufgeführt.

Das Stichprobensystem basiert auf einem regelmäßigen Raster von Stichprobenpunkten mit einem Abstand von 100 m x 100 m, welches über die Gesamtfläche Deutschlands gelegt wurde. Das gewählte Raster orientiert sich am Basis-DLM, welches als genauester zur Verfügung stehender Datensatz für Deutschland Flächen ab einer Größe von 1 ha aufnimmt. Es ergeben sich demnach 35.790.122 Stichprobenpunkte. Dies ermöglicht eine detaillierte Ausweisung von Landnutzung und Landnutzungsänderung auf organischen und mineralischen Böden in allen Landnutzungskategorien.

6.3.1.2 Datengrundlage und -aufbereitung

Die Herleitung der Landnutzungsmatrix (LUM) basiert auf dem Basis-DLM, wo notwendig ergänzt um weitere Datensätze (siehe Kapitel 6.3.1.2.1). Zur Nutzung einer Datenquelle müssen die durch Interpretation oder Modellierung zugewiesenen Landnutzungsklassen in die IPCC-Landnutzungskategorien überführbar sein. Dabei muss nicht jeder Datensatz alle Landnutzungs-kategorien ausweisen; mindestens eine der sechs Landnutzungskategorien ist ausreichend. Die Landnutzungsinformationen der verschiedenen Datensätze werden durch die geografische Lage den Stichprobenpunkten zugeordnet und somit stehen für jeden Stichprobenpunkt über die Zeit verteilte Informationen zur Verfügung.

Das Ziel dieses flexiblen Erfassungssystems ist es:

- aus der Menge an Informationen, die zuverlässigsten Landnutzungsinformationen zuzuweisen,
- Landnutzungsänderungen herauszufiltern und zu erfassen, sowie
- mögliche Unsicherheiten und Fehlerquellen zu eliminieren.

6.3.1.2.1 Datenquellen

Es wurden folgende Datenquellen/-sätze genutzt:

- Basis- Digitales Landschaftsmodell (Basis-DLM) zu den Zeitpunkten 2010, 2015, 2020 und 2024
- Karte organischer Böden Deutschlands
- Heckenkarte für Deutschland (hergestellt vom Thünen-Institut)

Dabei entstammen die Landnutzungsinformationen überwiegend aus dem Basis-DLM.

Basis-DLM

Das Basis-Digitale Landschaftsmodell (Basis-DLM) ist die Grundlage des Amtlich Topographisch-Kartographischen Informationssystems (ATKIS®) Deutschlands der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder (AdV). Das ATKIS® beschreibt die Oberfläche Deutschlands mit digitalen Landschafts- und Geländemodellen:

„Das Basis-DLM beschreibt die topographischen Objekte der Landschaft und das Relief der Erdoberfläche im Vektorformat. Die Objekte werden einer bestimmten Objektart zugeordnet und durch ihre räumliche Lage, ihren geometrischen Typ, beschreibende Attribute und Beziehungen zu anderen Objekten (Relationen) definiert. Jedes Objekt besitzt deutschlandweit eine eindeutige Identifikationsnummer (Identifikator). Die räumliche Lage wird für das Basis-DLM maßstabs- und abbildungsunabhängig im Koordinatensystem der Landesvermessung angegeben. Welche Objektarten das DLM beinhaltet und wie die Objekte zu bilden sind, ist im ATKIS®-Objektartenkatalog (ATKIS®-OK) festgelegt“ (AdV). Der Informationsumfang des Basis-DLM orientiert sich am Inhalt der Topographischen Karte 1:25.000, weist jedoch eine höhere Lagegenauigkeit (± 3m) für die wichtigsten punkt- und linienförmigen Objekte auf. Die Daten der Basis-DLM der Länder werden vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) übernommen und für ein bundeseinheitliches Basis-DLM geprüft, harmonisiert, georeferenziert, blattschnittfrei aufbereitet und für die Abgabe an Bundesbehörden und andere in einer Datenbank verwaltet.

Der Zweck des ATKIS® ist die Bereitstellung eines möglichst aktuellen und hochauflösenden Landschaftsmodells (Landbedeckung) für Deutschland, dessen Geometrien und Inhalte regelmäßig aktualisiert und erweitert werden. Die Vermessungsverwaltungen der Bundesländer erheben die Daten fortlaufend und nicht bundesweit zu einem Stichtag. Somit werden neue Vermessungsergebnisse laufend an das BKG übermittelt und in das ATKIS® eingepflegt. Die Vorgabe für eine komplette Überarbeitung ist fünf Jahre, wird von den Bundesländern aber sehr unterschiedlich gehandhabt. In der Praxis liegt die Aktualität bei Vegetationsflächen zwischen einem und sieben Jahren; für Flächen mit sehr hoher Aktualität, insbesondere was Flächenänderungen betrifft, z.B. Siedlungs- und Verkehrsflächen, wird eine Transferzeit in das ATKIS® von drei bis zwölf Monaten angegeben. Das BKG pflegt immer nur die aktuelle Version des Basis-DLM. Es wird keine Historie aufgezeichnet, noch werden alte Versionen archiviert.

Das bedeutet für die Berichterstattung am Thünen-Institut:

- Jährlicher Bezug des Basis-DLM für die jeweiligen Berichtsjahre (September) und
- Archivierung der Version des jeweiligen Jahres institutsintern.

Die Basis-DLM-Datensätze liegen dem Thünen-Institut erst seit 2005 auf jährlicher Basis vor, sowie ein Datensatz für das Jahr 2000. Für die Jahre vor 2000 existieren keine ATKIS®–Daten. Wegen der mehrjährigen Überarbeitungszyklen werden Basis-DLM-Datensätze im Abstand von fünf Jahren verwendet, um regionale Artefakte von scheinbar plötzlichen Schüben der Landnutzungsänderungen im Aktualisierungsjahr zu vermeiden.

Ab 2009 wurde das Basis-DLM auf ein neues Datenmodell umgestellt, im Weiteren als „Basis-DLM (ab 2013)" bezeichnet. In den Jahren 2009 bis 2012 lieferten einige Bundesländer im alten Modell und einige im neuen, seit 2013 gibt es das Basis-DLM (ab 2013) für ganz Deutschland.

Das Basis-DLM (bis 2012) besteht aus etwa 800 einzelnen Layern pro Datensatz, welche sich in ihrem Detaillierungsgrad unterscheiden. So liegen bspw. Polygone mit geringer Detailschärfe (z.B. Siedlungsfläche) zuunterst; Polygone mit sehr hohem Detaillierungsgrad (z.B. Wohngebiet) zuoberst. Daraus resultieren zahlreiche mehrfach übereinander liegende Polygone in einem Datensatz, welche jedoch inhaltlich den gleichen LULUCF-Kategorien zugeordnet werden können. Dieser gesamte Inhalt wird mit allen Überlagerungen eingelesen. Dadurch gibt es nur noch dort Datenlücken, wo im gesamten Basis-DLM keine Daten vorhanden sind. Anschließend werden die Flächen mit den Punkten des THG-Stichprobenrasters verschnitten. Bei Punkten, die mehrere übereinander liegende Flächen treffen, wird mit Hilfe einer Prioritätenliste nur ein Wert übernommen. Wenn gleiche Prioritäten überlagern (z.B. Vegetation mit Vegetation), dann wird die Fläche mit der niedrigeren ATKIS® eigenen Identifikation gewählt. Dieses Verfahren wurde für das Basis-DLM (bis 2012) aus dem Jahr 2010 durchgeführt. Die Kategorien des Basis-DLM (bis 2012) werden über eine Schlüsseltabelle den LULUCF-Kategorien zugeordnet (siehe Tabelle 341).

Das neue Datenmodell (Basis-DLM (ab 2013)) bietet einen Layer „Tatsächliche Nutzung". „Alle Objektarten dieses Objektartenbereichs nehmen an der lückenlosen, überschneidungsfreien und flächendeckenden Beschreibung der Erdoberfläche teil (Grundflächen)." Dadurch gibt es kaum noch Flächen, die übereinander liegen. Grundsätzlich hat sich die Qualität der Daten deutlich verbessert: Während nach dem Verwenden aller Flächen aus dem Basis-DLM (bis 2012) noch etwa 0,05 % der Punkte keine Information aus dem Basis-DLM zugewiesen werden konnte, sind es mit dem Basis-DLM (ab 2013) nur noch 0,0003 %. Die Kategorien des Basis-DLM (ab 2013) werden über eine Schlüsseltabelle den LULUCF-Kategorien zugeordnet (siehe Tabelle 341).

Seit 2024 wird das Basis-DLM nach einem neuen und etwas erweiterten Objektartenkatalog OK 7.1.2 aufgenommen. Auch diese Kategorien werden über eine Schlüsseltabelle den LULUCF-Kategorien zugeordnet (Tabelle 341).

Aus dem Basis-DLM abgeleitet werden die Flächen linearer Elemente, wie Straßen, Hecken und Fließgewässer bzw. Gräben. Diese linearen Elemente sind klassifiziert. Mit den jeder Klasse zugewiesenen Merkmalen/Eigenschaften wurden die linearen Elemente in der Karte gebuffert; dadurch konnten diese dann flächenhaft, georeferenziert ausgewiesen werden. Da insbesondere die Ausweisung von Hecken im B-DLM stark lückenhaft ist, wurde erstmalig eine neue, zusätzliche Datenquelle genutzt:

Die Heckenkarte Deutschlands

Diese Karte wurde am Thünen-Institut erstellt[89] und stellt in Form eines Rasterdatensatzes die detektierbaren Hecken bzw. linearen Gehölzstrukturen in der Agrarlandschaft dar. Die Erstellung der Karte basiert auf der Auswertung von deutschlandweiten Mosaiken sehr hoch aufgelöster Erdbeobachtungsdaten. Die Auswertung gründet auf einem deep learning Ansatz (semantic segmentation), der auf Basis von Referenzdaten zum Heckenvorkommen in Schleswig-Holstein trainiert und dann auf die gesamte Fläche der deutschen Agrarlandschaften angewendet wurde. Die Auflösung der, der Erhebung zugrunde liegenden, Satellitendaten beträgt 3 m x 3 m (Pixelgröße). Da sowohl die Karte der Hecken als auch das B-DLM nicht vollständig sind, werden beide Quellen miteinander kombiniert.

[89] Autoren: Javier Muro, Lukas Blickensdörfer, Axel Don, Anna Köber, Marcel Schwieder und Stefan Erasmi; Veröffentlichung in Vorbereitung; Thünen-Institut 2024

Aktualisierte Kulisse organischer Böden in Deutschland

Die "Aktualisierte Kulisse organischer Böden in Deutschland" (Wittnebel et al., 2023) stellt flächendeckend die organischen Böden Deutschlands dar. Sie enthält harmonisierte, georeferenzierte Informationen zu Bodentyp, Ausprägung und Eigenschaften aller organischen Böden Deutschlands, mit oder ohne anthropogene Überprägung. Die Kulisse wird zur Landnutzungserkennung sowie Zuordnung von Bodeneigenschaften verwendet. Die Kulisse ist frei zugänglich über https://www.openagrar.de/receive/openagrar_mods_00087123.

Zuordnungsschlüssel zwischen Datenquellen- und IPCC-Kategorien

Die unterschiedlichen Definitionen für Landnutzung der zugrunde liegenden Datenquellen wurden den LULUCF-Berichtskategorien zugeordnet (Tabelle 341).

Im Basis-DLM wurde der Objektartenkatalog (OK) mit der Einführung des neuen AAA-Modells verändert, deswegen gibt es ab 2013 eine neue Zuordnungstabelle. Den sechs IPCC Landnutzungskategorien werden die Objektarten aus dem Basis-DLM (AAA-Ebenen) des ATKIS® direkt zugeordnet (Tabelle 341).

Bei der Erstellung der Landnutzungsmatrix erfolgt die Zuordnung der Rasterpunkte rechnergestützt und vollautomatisch mittels dafür erstellter Programme. Die Zuordnungsschlüssel dieser Klassifizierungssysteme sind zu diesem Zweck digital hinterlegt, so dass stets eine eineindeutige Zuordnung eines Rasterpunktes zu einer Objektartenschlüsselnummer und somit zu einer Landnutzungskategorie führt, unabhängig von der Datenquelle. Die Scripte für diese Programme werden in der Inventarbeschreibung vorgehalten.

Tabelle 341: Zuordnung von Hauptobjektartenschlüsselnummern und Attributen des ATKIS® zu den IPCC-Landnutzungskategorien

ATKIS® Objektartenkatalog					
Objektnummer AAA-Ebenen (ab 2013)	**Attribut AAA-Ebenen (ab 2024 OK 7.1.2)**	**Attribut AAA-Ebenen (ab 2013 OK 6.0.2)**	**Objektnummer Ebenen (bis 2012 OK 3.2)**	**Objekttyp**	**Beschreibung/Attribute n. ATKIS® Objektartenkatalog**
IPCC-Kategorie: Wald					
43002	VEG Alle	VEG Alle	4107	Wald	Laub-, Nadel- und Mischwald
IPCC-Kategorie: Ackerland					
43001	VEG 1010	VEG 1010	4101	Landwirtschaft: Ackerland	Fläche für den Anbau von Feldfrüchten (z.B. Getreide, Hülsenfrüchte, Hackfrüchte) und Beerenfrüchten (z.B. Erdbeeren). Zum Ackerland gehören auch die Rotations-brachen, Dauerbrachen sowie Flächen, die zur Erlangung der Ausgleichszahlungen der EU stillgelegt worden sind.
43001	VEG 1012	VEG 1012	4109	Landwirtschaft: Hopfen	Hopfen.
43001	VEG 1030	VEG 1030	4103	Landwirtschaft: Gartenland	Gartenland ist eine Fläche für den Anbau von Gemüse, Obst und Blumen sowie für die Aufzucht von Kulturpflanzen.
43001	VEG 1031	VEG 1031	4109	Landwirtschaft: Baumschule	Baumschule ist eine Fläche, auf der Holzgewächse aus Samen, Ablegern oder Stecklingen unter mehrmaligem Umpflanzen (Verschulen) gezogen werden
43001	VEG 1060	n.v.	n.v.	Landwirtschaft: Weihnachtbaumkultur	Weihnachtsbaumkultur bezeichnet eine landwirtschaftliche Fläche, die vorrangig mit Weihnachtsbäumen bepflanzt ist.
43001	VEG 1100	n.v.	n.v.	Landwirtschaft: Kurzumtriebsplantage	Kurzumtriebsplantagen sind Flächen, auf denen Baumarten mit dem Ziel baldiger Holzentnahme angepflanzt werden und deren Bestände eine Umtriebszeit von nicht länger als 20 Jahren haben
43001	VEG 1011	VEG 1011	n.v.	Landwirtschaft: Streuobstacker	Streuobstacker beschreibt den Bewuchs einer Ackerfläche mit Obstbäumen.

ATKIS® Objektartenkatalog					
43001	VEG 1021	VEG 1021	n.v.	Landwirtschaft: Streuobstwiese	Streuobstwiese beschreibt den Bewuchs einer Grünlandfläche mit Obstbäumen.
43001	VEG 1013	n.v.	n.v.	Landwirtschaft: Spargel	Spargel beschreibt den Bewuchs einer Agrarfläche mit Spargelgewächsen.
43001	VEG 1014	n.v.	n.v.	Landwirtschaft: Hanf	Hanf beschreibt den Bewuchs einer Agrarfläche mit Nutzhanf.
43001	VEG 1040	VEG 1040	4109	Landwirtschaft: Weingarten	Weingarten
43001	VEG 1050	VEG 1050	4109	Landwirtschaft: Obstplantage	Obstplantage
IPCC-Kategorie: Grünland					
43001	VEG 1020	VEG 1020	4102	Landwirtschaft: Grünland	Grünland ist eine Grasfläche, die gemäht oder beweidet wird.
43001	VEG 1022	n.v.	n.v.	Landwirtschaft: Salzweide	Salzweide ist eine vom Meer periodisch überflutete Weidefläche, in der eine Salzpflanzenvegetation gedeiht. Dieser Bereich bildet den natürlichen Übergang vom Meer zum Festland.
43001	VEG 1200	n.v.	n.v.	Landwirtschaft: Brachland	Brachland ist eine Fläche der Landwirtschaft, die seit längerem nicht mehr zu Produktionszwecken genutzt wird.
43004			4104	Heide	Heide ist eine meist sandige Fläche mit typischen Sträuchern, Gräsern und geringwertigem Baumbestand.
43006			4106	Sumpf	Sumpf ist ein wassergesättigtes, zeitweise unter Wasser stehendes Gelände. Nach Regenfällen kurzzeitig nasse Stellen werden nicht als Sumpf erfasst.
43007	FKT 1300	FKT 1300		Unland und Vegetationslose Fläche: Naturnahe Fläche	Naturnahe Fläche ist eine nicht zum Anbau von Kulturpflanzen genutzte Fläche, die mit Gras, Wildkräutern und anderen Pflanzen bewachsen ist.
43003			4108	Gehölz	Fläche, die mit einzelnen Bäumen, Baumgruppen, Büschen, Hecken und Sträuchern bestockt ist.
43007	FKT 1200	FKT 1200		Unland und Vegetationslose Fläche: Sukzessionsfläche	Sukzessionsfläche ist eine Fläche, die dauerhaft aus der landwirtschaftlichen oder sonstigen bisherigen Nutzung herausgenommen ist und die in den Urzustand z. B. Gehölz, Moor, Heide übergeht.
54001	BWS 1100	BWS 1100		Hecke	Hecke besteht aus einer Reihe dicht beieinanderstehender, meist wildwachsender Sträucher.
61003		BEZ ART2000 Knick		Wallhecke	Wallhecken bestehen aus einem Steinwall mit einer Hecke darauf, kommt nur in Schleswig-Holstein und in Niedersachsen vor.
IPCC-Kategorie: Feuchtgebiete					
43005			4105	Moor	Unkultivierte Fläche, deren obere Schicht aus vertorften oder zersetzten Pflanzenresten besteht
41005	AGT 4010	AGT 4010	2301	Tagebau: Torfabbau	
44001			5101	natürliche Fließgewässer	Flüsse ab 12 m Breite
44004		FKT nicht 8300		natürliche Fließgewässer	Flüsse ab 3 m bis 12 m Breite, hergestellt aus Linienelementen
44003				künstliche Fließgewässer	Kanäle ab 12 m Breite
		5103		künstliche Fließgewässer	Gräben bis 12 m Breite, hergestellt aus Linienelementen
44006				natürliche, stehende Binnengewässer	Seen
44006	BWF 2030 und BWF 2040	BWF 2030 und BWF 2040		künstliche Binnengewässer	Stauseen (Seen mit Staudamm oder Staumauer in max. 10 m Entfernung)
44005			3402	künstliche Binnengewässer	Hafenbecken

ATKIS® Objektartenkatalog IPCC-Kategorie: Siedlungen					
41001 bis 41010			2101-2352	Siedlung	Siedlung beinhaltet die bebauten und nicht bebauten Flächen, die durch Ansiedlung von Menschen geprägt werden oder zur Ansiedlung beitragen.
42001 bis 42016			3101-3543	Verkehr	Verkehr enthält die bebauten und nicht bebauten Flächen, die dem Verkehr dienen.
41002	FKT 2530 & PEG 3000	FKT 2530 & PEG 3000	2126 & PEG 1300	Siedlung: Freiflächen Photovoltaik	'Kraftwerk' bezeichnet eine Fläche mit Bauwerken und sonstigen Einrichtungen zur Erzeugung von elektrischer Energie. 'Sonne' bedeutet, dass das Kraftwerk bzw. Heizwerk Sonnenenergie in eine andere Energieform umwandelt.
43007	FKT 1100	FKT 1100		Unland und Vegetationslose Fläche: Gewässerbegleitfläche	Gewässerbegleitfläche bezeichnet eine bebaute oder nicht bebaute Fläche, die einem Fließgewässer zugeordnet wird.
IPCC-Kategorie: Sonstiges Land					
43007	FKT 1000	FKT 1000	4120	Unland und Vegetationslose Fläche: Vegetationslose Fläche	Fläche ohne nennenswerten Bewuchs aufgrund besonderer Bodenbeschaffenheit wie z.B. nicht aus dem Geländerelief herausragende Felspartien, Sand- oder Eisflächen.

6.3.1.2.2 Ableiten der LULUCF-Informationen

Das THG Stichprobenraster wird mit den beschriebenen Karten verschnitten und jedem Punkt werden alle relevanten Informationen aus den Karten zugeordnet. Anschließend durchläuft jeder Punkt einen Entscheidungsbaum, in welchem ab dem Jahr 2010 grundsätzlich die Information aus dem Basis-DLM verwendet wird. Nur wenn die Information im Basis-DLM in einem Jahr nicht verfügbar ist, wird sie einem Basis-DLM eines anderen Jahres entnommen (zuerst immer möglichst nahe Jahre).

Die Ergebnisse für Wald wurden mit den Zahlen der Bundeswaldinventur (BWI) verglichen. Das Basis-DLM nimmt auch baumbewachsene Flächen auf, die nicht zwangsläufig der in der Berichterstattung zugrunde gelegten Walddefinition der BWI entsprechen. Dennoch war die Übereinstimmung der Waldfläche aus beiden Datensätzen in der Regel ausgezeichnet; Unterschiede waren kleiner 1 %, so dass das Ergebnis der Flächen als konsistent zur Walddefinition der Berichterstattung angesehen werden kann.

Das Basis-DLM (bis 2012) wurde schrittweise bis 2008 erweitert, was dazu führte, dass die Erhebungen vor 2008 weniger umfangreich sind. Das wirkte sich hauptsächlich auf drei Kategorien aus: Feuchtgebiete, Terrestrische Feuchtgebiete und Sonderkulturen, aber auch in anderen Kategorien traten methodisch bedingte Änderungen von Flächen auf.

Grundsätzlich problematisch ist die Ableitung von Landnutzung und Landnutzungsänderungen von 1990 zu 2000. Diese führt zu einer starken Untererfassung von Landnutzungsänderungen für diesen Zeitraum, was bis Submission 2025 zu abrupten Trendänderungen bei den Flächenentwicklungen im Jahr 2000 führte.

Aus diesen Gründen wurde die Zeitreihe für diesen Bericht aus Basis-DLM-Daten von 2010, 2015, 2020 und 2024 erstellt. Die Landnutzung und Landnutzungsänderungen vor 2010 wird mit Hilfe der Informationen von 2010 und 2015 zurück bis 1970 extrapoliert. Dazu werden zunächst für jede Landnutzungsänderung die Übergangswahrscheinlichkeiten ermittelt und mit diesen dann, in Fünfjahresschritten, im Inventarmodell stochastisch Punkte ausgewählt, denen dann die entsprechende Landnutzungsänderung unterstellt wird. Auf diese Weise wird die Landnutzung vor 2010 künstlich erzeugt. Ein Vergleich bestätigte, dass die Zurückextrapolation zu einer besseren Konsistenz mit verfügbaren Statistiken zur Landnutzung führt, als die

Nutzung von Corine Land Cover 1990 und 2000 und frühere Versionen des Basis-DLM. Das gilt insbesondere für den Trend der Flächenentwicklung, kaum für die absoluten Flächenwerte. Aufgrund der verschiedenen Erhebungsmethoden (z.B. statistische Methoden (beachte Ausschlussgrenzen), Vermessung, Fernerkundung) und -maßstäbe (ca. 1:1.000 - 1:250:000) als auch der unterschiedlichen Erhebungskategorien bzw. Systemnomenklatur und damit im Zusammenhang stehender Zusammenstellung der Einzelflächen, weisen diese absolut z.T. große Unterschiede auf.

Entsprechend den 2006 IPCC Guidelines werden bereits Flächennutzungsänderungen seit 1970 berücksichtigt. Damit werden die Übergangskategorien bereits mit Flächendaten gefüllt, so dass sie ab 1990 einen stabilen dynamischen Zustand mit Zugängen von neuen Umwandlungsflächen und Abgängen von Flächen in die Verbleibkategorie erreichen.

6.3.1.3 Fehlerbetrachtung

Bei der verwendeten Stichprobenmethode lassen sich verschiedenen Fehlerquellen unterscheiden, wie:

- der Stichprobenfehler,
- Definitionsunterschiede,
- voneinander unterschiedliche Minimum Mapping Units und
- Fehler bei der Georeferenzierung der Datensätze.

Die Fehlerquellen Definitionsunterschiede, unterschiedliche Minimum Mapping Units und ungenaue Georeferenzierung können nicht quantifiziert werden und nur der Stichprobenfehler wird in die Unsicherheitsbetrachtung einbezogen.

6.3.1.4 Schrittweise Implementierung

Die vollständige Umsetzung des hier beschriebenen Systems zur zeitabhängigen Erfassung der Landnutzung und -änderungen für ganz Deutschland erfordert umfangreiche Vor- aber auch ständige Begleitarbeiten. So müssen:

- die verschiedenen Datenmaterialien für unterschiedliche Zeitpunkte akquiriert werden,
- geometrische Korrekturen (defekte Geometrien, etc.) bzw. Kontrollen durchgeführt werden,
- Konvertierungsfunktionen geschrieben werden, um die Ursprungsklassifizierung in die verwendete Kategorisierung zu überführen,
- die Stichprobenpunkte mit den Kartenwerken verschnitten werden,
- der Entscheidungsbaum programmiert und je nach Datenlage angepasst werden und
- die „Transition Time“-Prozeduren programmiert und je nach Datenlage angepasst werden.

Die Entscheidung für dieses flexible, stichprobenbasierte System wurde in Abstimmung mit der Nationalen Koordinierungsstelle (Umweltbundesamt, UBA) und dem für die Waldinventur zuständigen Ministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) im Frühjahr 2011 getroffen.

Angepasst auf die derzeitige Datenstruktur wurden der Entscheidungsbaum pro Klassifizierungsjahr und die „Transition Time“-Prozeduren programmiert.

6.3.1.4.1 Ableitung der Landnutzung

Aufgrund des Datenmaterials (siehe Kapitel 6.3.1.2), welches am jeweiligen Stichprobenpunkt zur Verfügung steht, kann für diesen für die Jahre 2010, 2015, 2020 und 2024 eine Zuordnung zu einer Landnutzungskategorie vorgenommen werden. Die Basistabelle ist wie folgt aufgebaut (hier anhand dreier Beispielstichprobenpunkte):

Tabelle 342: Basistabelle zur Ableitung der Landnutzungen

Punkt-ID	Hecke	Strassen_dlm22	org. Boden	Gleise_ DLM22	DLM 2010	DLM 2015	DLM 2020	DLM 2024	Hecke	Strassen_ dlm22	org. Boden	Gleise_ DLM22	DLM 2010
1	0	0	0	crop	crop	set1	set1	set1	0	0	0	crop	crop
1000	0	1	0	gra1	gra1	gra1	gra1	gra1	0	1	0	gra1	gra1
2000	1	0	0	crop	crop	crop	crop	crop	1	0	0	crop	crop

Für die Landnutzungskategorien wurden in den Datensätzen folgende Kodierungen verwendet:

Tabelle 343: Kodierungen in der Basistabelle

Kodierung	Kategorie	Subkategorie
crop	$Acker_{annuell}$	$Acker_{annuell}$
croh	Sonderkultur	Hopfen
crow	Sonderkultur	Wein
croo	Sonderkultur	Obstplantage
cros	Sonderkultur	Kurzumtriebsplantagen
crot	Sonderkultur	Baumschulen
crox	Sonderkultur	Weihnachtsbaumkulturen
gra1	Grünland	Grünland im engeren Sinn (i.e.S)
gra2	Grünland	Gehölze
gra3	Grünland	Hecken
forl	Wald	Wald
wett	Feuchtgebiete	Terrestrische Feuchtgebiete
wetl	Feuchtgebiete	natürliche stehende Gewässer
wetr	Feuchtgebiete	natürliche fließende Gewässer
wetp	Feuchtgebiete	Torfstich
wetb	Feuchtgebiete	künstliche stehende Gewässer
wetd	Feuchtgebiete	künstliche fließende Gewässer
wets	Feuchtgebiete	künstliche Schifffahrtsgewässer
set1	Siedlungen	Gebäude und Freiflächen
set2	Siedlungen	Straßen
set3	Siedlungen	Bahnkörper
setp	Siedlungen	Photovoltaikflächen
othl	Sonstiges Land	Sonstiges Land
dlm0	Keine Information[90]	

Auf diese Basistabelle wurden für die Jahre 2010, 2015, 2020 und 2024 die Entscheidungsbäume für das jeweilige Jahr angewandt. Dabei wird immer das Basis-DLM verwendet, es sei denn im Basis-DLM liegen für einen Punkt keine Informationen vor, dann gibt es eine Abstufung von zeitlichen nahen Basis-DLM mit Daten.

[90] Keine Landnutzungsinformation an diesem Punkt aus den Basis-DLM-Daten

Durch die Anwendung der Entscheidungsbäume resultiert eine weitere Tabelle (siehe Tabelle 344) mit den wahrscheinlichsten Landnutzungen pro Stichprobenpunkt und Jahr (2010, 2015, 2020, 2024) und der jeweils besten Datenquelle.

Tabelle 344: Wahrscheinlichste Landnutzung (LU) und deren Datenquelle (DB)

Punkt-ID	LU 2010	LU 2015	LU 2020	LU 2024	DB 2010	DB 2015	DB 2020	DB 2024
1	crop	set1	set1	set1	dlm	dlm	dlm	dlm
1000	set2	set2	set2	set2	Strassen_DLM22	Strassen_DLM22	Strassen_DLM22	Strassen_DLM22
2000	gra3	gra3	gra3	gra3	Hecke	Hecke	Hecke	Hecke

(Abkürzungen siehe Tabelle 343)

6.3.1.5 Ergebnisse der Landnutzungsmatrix

Die bisher beschriebene Methode zur Erfassung von Landnutzungsänderungen und die daraus resultierende vollständige Landnutzungsmatrix (siehe Tabelle 345), inklusive einer 20-jährigen „Transition Time“ seit 1970 ist konform zur Berichterstattung nach der Klimarahmenkonvention und den 2006 IPCC Guidelines. Tabelle 346 zeigt beispielhaft die komplette detaillierte Landnutzungsmatrix für das Jahr 2024.

Tabelle 345: Flächen der Landnutzungskategorien und ihrer Übergänge inklusive 20-jähriger Transition Time.

Jahr	4.A.1 Verbleibender Wald [ha]	4.A.2 ... LUC zu Wald [ha]	4.B.1 Verbleibender Acker [ha]	4.B.2 ... LUC zu Acker [ha]	4.C.1 Verbleibendes Grünland [ha]	4.C.2 ... LUC zu Grünland [ha]	4.D.1 Verbleibende Feuchtgebiete [ha]	4.D.2 ... LUC zu Feuchtgebieten [ha]	4.E.1 Verbleibende Siedlungen [ha]	4.E.2 ... LUC zu Siedlungen [ha]	4.F.1 Verbleibendes Sonstiges Land [ha]	4.F.2 ... LUC zu Sonstigem Land [ha]
1990	10.403.254	227.951	11.684.880	1.752.658	5.301.420	1.698.418	777.704	15.062	3.176.557	668.780	83.438	0
1991	10.411.604	228.495	11.670.450	1.745.620	5.296.665	1.689.088	777.760	15.122	3.197.150	676.148	82.020	0
1992	10.419.924	229.040	11.653.664	1.740.925	5.287.952	1.683.745	777.777	15.218	3.217.558	683.698	80.621	0
1993	10.428.234	229.587	11.634.454	1.738.664	5.275.703	1.681.932	777.784	15.320	3.237.633	691.570	79.241	0
1994	10.436.537	230.134	11.612.896	1.738.747	5.259.560	1.684.016	777.784	15.426	3.257.532	699.616	77.874	0
1995	10.444.826	230.678	11.588.824	1.741.357	5.239.431	1.690.086	777.754	15.566	3.276.942	708.135	76.523	0
1996	10.453.112	231.243	11.572.626	1.733.725	5.233.580	1.681.459	777.850	15.624	3.299.515	716.260	75.128	0
1997	10.461.370	231.806	11.553.973	1.728.534	5.223.547	1.677.042	777.884	15.739	3.321.584	724.893	73.750	0
1998	10.469.625	232.368	11.532.984	1.725.682	5.209.864	1.676.271	777.915	15.857	3.343.519	733.643	72.394	0
1999	10.477.864	232.929	11.509.545	1.725.290	5.192.609	1.679.057	777.926	16.003	3.365.007	742.840	71.052	0
2000	10.486.089	233.499	11.483.548	1.727.459	5.171.498	1.685.705	777.910	16.177	3.386.248	752.271	69.718	0
2001	10.494.302	234.088	11.464.098	1.719.757	5.164.100	1.678.822	777.991	16.305	3.410.851	761.459	68.349	0
2002	10.502.489	234.685	11.442.414	1.714.283	5.152.963	1.675.692	778.049	16.448	3.435.018	771.085	66.996	0
2003	10.510.672	235.269	11.418.500	1.711.058	5.137.717	1.676.673	778.102	16.596	3.458.891	780.981	65.663	0
2004	10.518.842	235.854	11.392.083	1.710.317	5.119.010	1.681.130	778.121	16.779	3.482.405	791.236	64.345	0
2005	10.527.000	236.444	11.363.108	1.712.140	5.096.642	1.689.243	778.147	16.964	3.505.619	801.776	63.039	0
2006	10.535.106	237.050	11.339.506	1.703.773	5.087.599	1.685.191	778.260	17.137	3.532.326	812.481	61.693	0
2007	10.543.191	237.662	11.313.374	1.697.935	5.074.709	1.684.995	778.321	17.359	3.558.656	823.551	60.369	0
2008	10.551.264	238.269	11.284.939	1.694.398	5.058.130	1.688.501	778.423	17.541	3.584.680	834.915	59.062	0
2009	10.559.328	238.873	11.253.814	1.693.546	5.037.802	1.695.762	778.451	17.789	3.610.510	846.473	57.774	0
2010	10.567.381	239.483	11.219.947	1.695.439	5.013.704	1.706.793	778.471	18.045	3.635.993	858.371	56.495	0
2011	10.575.259	233.947	11.189.330	1.686.394	5.006.768	1.708.430	778.692	18.387	3.665.818	871.808	55.289	0
2012	10.583.116	228.404	11.156.225	1.679.858	4.996.141	1.713.768	778.845	18.789	3.695.199	885.676	54.101	0
2013	10.590.969	222.855	11.120.245	1.676.192	4.981.960	1.722.678	779.027	19.158	3.724.454	899.653	52.931	0
2014	10.598.809	217.309	11.081.740	1.675.056	4.963.820	1.735.534	779.166	19.567	3.753.272	914.065	51.784	0
2015	10.606.631	211.769	11.040.183	1.676.970	4.942.499	1.751.593	779.269	20.013	3.781.941	928.602	50.652	0
2016	10.613.236	212.817	11.041.310	1.646.166	4.942.651	1.748.846	779.092	21.430	3.812.802	922.590	49.182	0
2017	10.619.825	213.871	11.041.149	1.616.670	4.940.933	1.747.956	778.845	22.911	3.843.403	916.819	47.740	0
2018	10.626.410	214.909	11.039.903	1.588.253	4.937.212	1.749.089	778.586	24.414	3.873.675	911.359	46.312	0
2019	10.632.983	215.942	11.037.324	1.561.158	4.932.006	1.751.734	778.315	25.926	3.903.464	906.365	44.905	0

	4.A.1 Verbleibender Wald	4.A.2 ... LUC zu Wald	4.B.1 Verbleibender Acker	4.B.2 ... LUC zu Acker	4.C.1 Verbleibendes Grünland	4.C.2 ... LUC zu Grünland	4.D.1 Verbleibende Feuchtgebiete	4.D.2 ... LUC zu Feuchtgebieten	4.E.1 Verbleibende Siedlungen	4.E.2 ... LUC zu Siedlungen	4.F.1 Verbleibendes Sonstiges Land	4.F.2 ... LUC zu Sonstigem Land
2020	10.639.557	216.967	11.033.944	1.534.864	4.924.247	1.756.947	778.012	27.468	3.932.903	901.702	43.511	0
2021	10.645.645	217.141	11.044.599	1.484.266	4.946.036	1.740.368	778.155	31.689	3.968.157	890.984	43.082	0
2022	10.651.726	217.301	11.054.009	1.434.909	4.966.739	1.724.931	778.267	35.940	4.003.139	880.488	42.673	0
2023	10.657.793	217.456	11.062.431	1.386.556	4.986.374	1.710.562	778.315	40.252	4.037.842	870.264	42.277	0
2024	10.663.852	217.608	11.069.768	1.339.305	5.004.400	1.697.826	778.286	44.633	4.072.201	860.354	41.889	0

Tabelle 346: Landnutzungsmatrix 2024. Die Diagonale zeigt die Fläche in verbleibender Nutzung, die anderen Felder die jeweiligen Landnutzungsänderungen (einschließlich 20-jähriger Übergangszeiten)

Initial*Final*	***Wald***	***Acker$_{annuell}$***	***Acker perenierend***	***Grünland i.e.S.***	***Gehölze & Hecken***	***Terrestr. Feuchtgebiete***	***Gewässer***	***Torfabbau***	***Siedlungen***	***Verkehrswege***	***Photovoltaik***	***Sonstiges Land***	Σ Abnahme	Σ Zunahme - Σ Abnahme
Wald	**10.663.852**	0	728	0	95	8.187	0	127	78.337	0	0	0	87.474	130.134
Acker$_{annuell}$	104	**10.627.213**	47.815	1.459.583	39.240	443	0	409	377.185	0	16.517	0	1.941.296	- 583.039
Acker perenierend	2	47.688	**347.052**	24.960	8.873	18	0	35	14.104	0	61	0	95.741	- 19.190
Grünland i.e.S.	47.886	1.226.982	14.359	**4.271.121**	131.345	26.217	0	2.138	309.767	0	7.669	0	1.766.363	7.364
Gehölze & Hecken	146.089	38.751	11.786	156.937	**444.997**	6.746	0	20	51.150	0	1.324	0	412.803	- 200.422
Terrestrische Feuchtgebiete	4.624	870	15	6.360	1.305	**99.903**	0	869	443	0	1	0	14.487	38.710
Gewässer	0	0	0	0	0	0	**659.743**	0	0	0	0	0	0	0
Torfabbau	69	3.063	2	1.305	46	11.342	0	**6.429**	161	0	66	0	16.054	- 12.407
Siedlungen	15.098	40.751	1.843	117.779	27.831	243	0	49	**2.899.007**	0	8.872	0	212.466	622.196
Verkehrswege	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**1.163.504**	0	0	0	0
Photovoltaik	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	**818**	0	0	34.564
Sonstiges Land	3.736	152	3	6.803	3.646	1	0	0	3.515	0	54	**41.889**	17.910	- 17.910
Σ Zunahme	217.608	1.358.257	76.551	1.773.727	212.381	53.197	0	3.647	834.662	0	34.564	0		
Σ Landnutzungskategorie	10.881.460	11.985.470	423.603	6.044.848	657.378	153.100	659.743	10.076	3.733.669	1.163.504	35.382	41.889		
Fläche **Deutschland**	35.790.122													

Tabelle 347: Jährliche Flächen der Landnutzungsänderungen, die den Berechnungen für das Inventar (20-jährige Übergangszeit) zugrunde liegen.

Landnutzungsänderung [Hektar pro Jahr]	1990-2000	2001-2005	2006-2010	2011-2015	2016-2020	2021-2024
... zu Wald						
Acker$_{annuell}$ zu Wald	7	7	7	4	2	9
Hopfen zu Wald	0	0	0	0	0	0
Weinbau zu Wald	0	0	0	0	0	0
Obstbau zu Wald	0	0	0	0	0	0
Baumschulen zu Wald	0	0	0	0	0	0
Weihnachtsbaumkulturen zu Wald	0	0	0	0	0	0
Kurzumtriebsplantagen zu Wald	0	0	0	0	0	0
Grünland i.e.S. zu Wald	2.021	2.082	2.119	1.086	3.679	2.848
Gehölze zu Wald	8.020	8.173	8.269	4.189	8.213	8.566
Hecken zu Wald	0	0	0	0	0	77
Terrestrische Feuchtgebiete zu Wald	188	199	214	115	289	335
Torfabbau zu Wald	4	4	4	2	5	3
Siedlung zu Wald	1.278	1.297	1.306	661	521	343
Sonstiges Land zu Wald	281	284	287	146	228	38
... zu Acker$_{annuell}$						
Wald zu Acker$_{annuell}$	0	0	0	0	0	0
Hopfen zu Acker$_{annuell}$	338	336	335	334	217	72
Weinbau zu Acker$_{annuell}$	128	125	124	122	155	119
Obstbau zu Acker$_{annuell}$	983	962	945	924	1.543	1.697
Baumschulen zu Acker$_{annuell}$	0	0	0	0	13	0
Weihnachtsbaumkulturen zu Acker$_{annuell}$	1.326	1.296	1.275	1.253	930	899
Kurzumtriebsplantagen zu Acker$_{annuell}$	0	0	0	0	0	0
Grünland i.e.S. zu Acker$_{annuell}$	92.385	91.335	90.584	89.716	52.430	42.856
Gehölze zu Acker$_{annuell}$	2.098	2.059	2.022	1.972	2.579	1.925
Hecken zu Acker$_{annuell}$	0	0	0	0	0	183
Terrestrische Feuchtgebiete zu Acker$_{annuell}$	34	36	36	38	91	34
Torfabbau zu Acker$_{annuell}$	150	156	160	164	168	162
Siedlung zu Acker$_{annuell}$	2.421	2.367	2.324	2.274	3.200	2.124
Photovoltaikflächen zu Acker$_{annuell}$	0	0	0	0	0	0
Sonstiges Land zu Acker$_{annuell}$	8	8	8	9	48	1
... zu Hopfen						
Wald zu Hopfen	0	0	0	0	0	0
Acker$_{annuell}$ zu Hopfen	330	335	338	343	544	246
Weinbau zu Hopfen	0	0	0	0	0	1
Obstbau zu Hopfen	7	7	6	6	5	40
Baumschulen zu Hopfen	0	0	0	0	0	0
Weihnachtsbaumkulturen zu Hopfen	1	1	1	1	1	0
Kurzumtriebsplantagen zu Hopfen	0	0	0	0	0	0
Grünland i.e.S. zu Hopfen	34	35	36	39	33	33
Gehölze zu Hopfen	1	1	1	2	4	2
Hecken zu Hopfen	1	1	1	1	2	1
Terrestrische Feuchtgebiete zu Hopfen	0	0	0	0	0	0
Torfabbau zu Hopfen	0	0	0	0	0	0
Siedlung zu Hopfen	1	1	1	1	1	1
Photovoltaikflächen zu Hopfen	0	0	0	0	0	0
Sonstiges Land zu Hopfen	0	0	0	0	0	0
... zu Weinbau						
Wald zu Weinbau	0	0	0	0	0	0
Acker$_{annuell}$ zu Weinbau	220	223	226	232	309	369
Hopfen zu Weinbau	0	0	0	0	0	0
Obstbau zu Weinbau	42	43	45	49	80	175
Baumschulen zu Weinbau	0	0	0	0	0	0
Weihnachtsbaumkulturen zu Weinbau	2	2	2	3	1	1
Kurzumtriebsplantagen zu Weinbau	0	0	0	0	0	0
Grünland i.e.S. zu Weinbau	100	100	101	102	140	144
Gehölze zu Weinbau	38	38	38	39	68	81

Landnutzungsänderung [Hektar pro Jahr]	1990-2000	2001-2005	2006-2010	2011-2015	2016-2020	2021-2024
Hecken zu Weinbau	1	1	1	1	2	2
Terrestrische Feuchtgebiete zu Weinbau	0	0	0	0	0	0
Torfabbau zu Weinbau	0	0	0	0	0	0
Siedlung zu Weinbau	13	14	15	19	20	27
Photovoltaikflächen zu Weinbau	0	0	0	0	0	0
Sonstiges Land zu Weinbau	0	0	0	0	0	0
... zu Obstbau						
Wald zu Obstbau	0	0	0	0	0	0
$Acker_{annuell}$ zu Obstbau	1.116	1.123	1.128	1.134	1.392	1.436
Hopfen zu Obstbau	4	4	4	4	19	6
Weinbau zu Obstbau	20	20	19	18	24	19
Baumschulen zu Obstbau	0	0	0	0	0	0
Weihnachtsbaumkulturen zu Obstbau	137	135	135	137	100	170
Kurzumtriebsplantagen zu Obstbau	0	0	0	0	0	0
Grünland i.e.S. zu Obstbau	426	416	407	400	641	376
Gehölze zu Obstbau	64	63	61	61	78	53
Hecken zu Obstbau	4	5	5	6	12	2
Terrestrische Feuchtgebiete zu Obstbau	0	0	0	0	1	1
Torfabbau zu Obstbau	0	0	0	0	0	1
Siedlung zu Obstbau	94	92	90	89	59	31
Photovoltaikflächen zu Obstbau	0	0	0	0	0	0
Sonstiges Land zu Obstbau	0	0	0	0	0	0
... zu Baumschulen						
Wald zu Baumschulen	0	0	0	0	0	0
$Acker_{annuell}$ zu Baumschulen	837	794	815	977	921	683
Hopfen zu Baumschulen	0	0	0	0	0	0
Weinbau zu Baumschulen	2	2	2	2	4	1
Obstbau zu Baumschulen	57	50	47	51	53	70
zu Baumschulen	0	0	0	0	0	0
zu Baumschulen	0	0	0	0	0	0
Grünland i.e.S. zu Baumschulen	248	246	270	370	328	195
Gehölze zu Baumschulen	344	414	607	1.198	435	198
Hecken zu Baumschulen	0	0	0	0	12	14
Terrestrische Feuchtgebiete zu Baumschulen	1	1	1	1	1	0
Torfabbau zu Baumschulen	0	0	0	0	0	0
Siedlung zu Baumschulen	30	26	25	26	76	63
Photovoltaikflächen zu Baumschulen	0	0	0	0	0	0
Sonstiges Land zu Baumschulen	0	0	0	0	0	0
... zu Weihnachtsbaumkulturen						
Wald zu Weihnachtsbaumkulturen	0	0	0	0	0	0
$Acker_{annuell}$ zu Weihnachtsbaumkulturen	0	0	0	0	0	0
Hopfen zu Weihnachtsbaumkulturen	0	0	0	0	0	0
Weinbau zu Weihnachtsbaumkulturen	0	0	0	0	0	0
Obstbau zu Weihnachtsbaumkulturen	0	0	0	0	0	0
Baumschulen zu Weihnachtsbaumkulturen	0	0	0	0	0	0
Kurzumtriebsplantagen zu Weihnachtsbaumkulturen	0	0	0	0	0	0
Grünland i.e.S. zu Weihnachtsbaumkulturen	0	0	0	0	0	0
Gehölze zu Weihnachtsbaumkulturen	0	0	0	0	0	0
Hecken zu Weihnachtsbaumkulturen	0	0	0	0	0	0
Terrestrische Feuchtgebiete zu Weihnachtsbaumkulturen	0	0	0	0	0	0
Torfabbau zu Weihnachtsbaumkulturen	0	0	0	0	0	0
Siedlung zu Weihnachtsbaumkulturen	0	0	0	0	0	0
Photovoltaikflächen zu Weihnachtsbaumkulturen	0	0	0	0	0	0
Sonstiges Land zu Weihnachtsbaumkulturen	0	0	0	0	0	0
... zu Kurzumtriebsplantagen						

Landnutzungsänderung [Hektar pro Jahr]	1990-2000	2001-2005	2006-2010	2011-2015	2016-2020	2021-2024
Wald zu Kurzumtriebsplantagen	1	6	25	120	0	0
$Acker_{annuell}$ zu Kurzumtriebsplantagen	7	42	150	558	56	96
Hopfen zu Kurzumtriebsplantagen	0	0	0	0	0	0
Weinbau zu Kurzumtriebsplantagen	0	0	0	0	0	0
Obstbau zu Kurzumtriebsplantagen	0	0	0	0	0	0
Baumschulen zu Kurzumtriebsplantagen	0	0	0	0	0	0
Weihnachtsbaumkulturen zu Kurzumtriebsplantagen	0	0	1	3	0	0
Grünland i.e.S. zu Kurzumtriebsplantagen	0	2	10	44	92	112
Gehölze zu Kurzumtriebsplantagen	0	0	0	1	0	0
Hecken zu Kurzumtriebsplantagen	0	0	0	0	0	0
Terrestrische Feuchtgebiete zu Kurzumtriebsplantagen	0	0	0	0	0	0
Torfabbau zu Kurzumtriebsplantagen	0	0	0	0	0	0
Siedlung zu Kurzumtriebsplantagen	0	0	0	0	0	0
Photovoltaikflächen zu Kurzumtriebsplantagen	0	0	0	0	0	0
Sonstiges Land zu Kurzumtriebsplantagen	0	0	0	0	0	0
... zu Grünland i.e.S.						
Wald zu Grünland i.e.S.	0	0	0	0	0	0
$Acker_{annuell}$ zu Grünland i.e.S.	94.405	95.705	98.096	102.699	69.977	69.067
Hopfen zu Grünland i.e.S.	17	17	17	18	26	19
Weinbau zu Grünland i.e.S.	179	176	174	174	233	220
Obstbau zu Grünland i.e.S.	827	869	920	1.003	913	1.251
Baumschulen zu Grünland i.e.S.	0	0	0	0	0	0
Weihnachtsbaumkulturen zu Grünland i.e.S.	251	243	238	234	328	302
Kurzumtriebsplantagen zu Grünland i.e.S.	0	0	0	0	0	0
Gehölze zu Grünland i.e.S.	6.650	6.583	6.574	6.621	10.058	14.570
Hecken zu Grünland i.e.S.	0	0	0	0	0	143
Terrestrische Feuchtgebiete zu Grünland i.e.S.	267	259	251	243	420	625
Torfabbau zu Grünland i.e.S.	76	74	73	72	130	84
Siedlung zu Grünland i.e.S.	6.397	6.282	6.213	6.157	9.047	8.812
Photovoltaikflächen zu Grünland i.e.S.	0	0	0	0	0	0
Sonstiges Land zu Grünland i.e.S.	378	374	371	368	682	296
... zu Gehölze						
Wald zu Gehölze	0	0	0	0	86	0
$Acker_{annuell}$ zu Gehölze	3.010	2.854	2.721	2.678	2.999	2.279
Hopfen zu Gehölze	0	0	0	0	0	0
Weinbau zu Gehölze	98	101	104	110	171	71
Obstbau zu Gehölze	209	210	211	224	506	383
Baumschulen zu Gehölzen	0	0	0	0	0	0
Weihnachtsbaumkulturen zu Gehölzen	81	74	68	66	99	78
Kurzumtriebsplantagen zu Gehölzen	0	0	0	0	0	0
Grünland i.e.S. zu Gehölze	9.625	9.299	9.040	9.264	11.483	8.313
Hecken zu Gehölze	0	0	0	0	0	29
Terrestrische Feuchtgebiete zu Gehölze	75	73	69	71	130	118
Torfabbau zu Gehölze	8	8	7	8	7	4
Siedlung zu Gehölze	1.835	1.728	1.640	1.624	2.472	2.177
Photovoltaikflächen zu Gehölze	0	0	0	0	0	0
Sonstiges Land zu Gehölze	487	429	388	365	268	48
... zu Hecken						
Wald zu Hecken	0	0	0	0	0	11
$Acker_{annuell}$ zu Hecken	0	0	0	0	0	169
Hopfen zu Hecken	2	2	2	3	2	1
Weinbau zu Hecken	2	2	2	3	2	3
Obstbau zu Hecken	9	9	9	12	21	17
Baumschulen zu Hecken	0	0	0	0	0	0
Weihnachtsbaumkulturen zu Hecken	21	22	22	25	21	14
Kurzumtriebsplantagen zu Hecken	0	0	0	0	0	0
Grünland i.e.S. zu Hecken	0	0	0	0	1	98

Landnutzungsänderung [Hektar pro Jahr]	1990-2000	2001-2005	2006-2010	2011-2015	2016-2020	2021-2024
Gehölze zu Hecken	0	0	0	0	0	0
Terrestrische Feuchtgebiete zu Hecken	0	0	0	0	0	1
Torfabbau zu Hecken	0	0	0	0	0	0
Siedlung zu Hecken	0	0	0	0	0	25
Photovoltaikflächen zu Hecken	0	0	0	0	0	0
Sonstiges Land zu Hecken	0	0	0	0	0	0
... zu terrestrische Feuchtgebiete						
Wald zu terrestrische Feuchtgebiete	124	137	153	191	411	1.109
$Acker_{annuell}$ zu terrestrische Feuchtgebiete	18	20	21	24	23	55
Hopfen zu terrestrische Feuchtgebiete	0	0	0	0	0	0
Weinbau zu terrestrische Feuchtgebiete	0	0	0	0	0	0
Obstbau zu terrestrische Feuchtgebiete	1	1	1	1	0	0
Baumschulen zu terrestrische Feuchtgebiete	0	0	0	0	0	0
Weihnachtsbaumkulturen zu terrestrische Feuchtgebiete	0	0	0	0	0	2
Kurzumtriebsplantagen zu terrestrische Feuchtgebiete	0	0	0	0	0	0
Grünland i.e.S. zu terrestrische Feuchtgebiete	423	484	540	647	1.483	3.614
Gehölze zu terrestrische Feuchtgebiete	109	126	143	172	394	825
Hecken zu terrestrische Feuchtgebiete	0	0	0	0	0	3
Torfabbau zu terrestrische Feuchtgebiete	172	174	176	178	443	1.849
Siedlung zu terrestrische Feuchtgebiete	7	7	7	8	21	32
Photovoltaikflächen zu terrestrische Feuchtgebiete	0	0	0	0	0	0
Sonstiges Land zu terrestrische Feuchtgebiete	1	1	0	0	0	0
... zu Torfabbau						
Wald zu Torfabbau	8	8	8	8	8	11
$Acker_{annuell}$ zu Torfabbau	49	48	47	46	47	25
Hopfen zu Torfabbau	0	0	0	0	0	0
Weinbau zu Torfabbau	0	0	0	0	0	0
Obstbau zu Torfabbau	0	0	0	0	0	0
Baumschulen zu Gewässer	0	0	0	0	0	0
Weihnachtsbaumkulturen zu Gewässer	1	1	1	1	6	1
Kurzumtriebsplantagen zu Gewässer	0	0	0	0	0	0
Grünland i.e.S. zu Torfabbau	198	194	191	187	216	88
Gehölze zu Torfabbau	1	1	1	1	2	3
Hecken zu Torfabbau	0	0	0	0	0	0
Terrestrische Feuchtgebiete zu Torfabbau	80	78	77	75	122	83
Siedlung zu Torfabbau	7	7	7	7	31	5
Sonstiges Land zu Torfabbau	0	0	0	0	0	0
... zu Siedlung						
Wald zu Siedlung	2.828	3.125	3.336	3.579	4.806	4.854
$Acker_{annuell}$ zu Siedlung	21.034	23.428	25.169	27.157	13.484	12.165
Hopfen zu Siedlung	9	10	10	12	6	7
Weinbau zu Siedlung	69	76	80	86	74	86
Obstbau zu Siedlung	441	484	512	544	459	469
Baumschulen zu Siedlung	0	0	0	0	0	0
Weihnachtsbaumkulturen zu Siedlung	126	140	149	161	163	115
Kurzumtriebsplantagen zu Siedlung	0	0	0	0	0	0
Grünland i.e.S. zu Siedlung	14.182	15.660	16.720	17.920	16.928	14.968
Gehölze zu Siedlung	2.107	2.316	2.463	2.633	2.796	2.960
Hecken zu Siedlung	0	0	0	0	0	45
Terrestrische Feuchtgebiete zu Siedlung	13	15	17	21	133	31
Torfabbau zu Siedlung	4	5	5	6	14	16
Photovoltaikflächen zu Siedlung	0	0	0	0	0	0
Sonstiges Land zu Siedlung	217	240	254	273	200	23
... zu Photovoltaikflächen						

Landnutzungsänderung [Hektar pro Jahr]	1990-2000	2001-2005	2006-2010	2011-2015	2016-2020	2021-2024
Wald zu Photovoltaikflächen	2.828	3.125	3.336	3.579	4.806	4.854
$Acker_{annuell}$ zu Photovoltaikflächen	21.034	23.428	25.169	27.157	13.484	12.165
Hopfen zu Photovoltaikflächen	9	10	10	12	6	7
Weinbau zu Photovoltaikflächen	69	76	80	86	74	86
Obstbau zu Photovoltaikflächen	441	484	512	544	459	469
Baumschulen zu Photovoltaikflächen	0	0	0	0	0	0
Weihnachtsbaumkulturen zu Photovoltaikflächen	126	140	149	161	163	115
Kurzumtriebsplantagen zu Photovoltaikflächen	0	0	0	0	0	0
Grünland i.e.S. zu Photovoltaikflächen	14.182	15.660	16.720	17.920	16.928	14.968
Gehölze zu Photovoltaikflächen	2.107	2.316	2.463	2.633	2.796	2.960
Hecken zu Photovoltaikflächen	0	0	0	0	0	45
Terrestrische Feuchtgebiete zu Photovoltaikflächen	13	15	17	21	133	31
Torfabbau zu Photovoltaikflächen	4	5	5	6	14	16
Siedlung zu Photovoltaikflächen	0	0	0	0	0	0
Sonstiges Land zu Photovoltaikflächen	217	240	254	273	200	23

6.3.1.6 Verifizierung

Die Landnutzungskategorien wurden für das Inventar so gewählt, dass sie den Definitionen von UNFCCC bzw. IPCC entsprechen. Neben dem Basis-Digitalen Landschaftsmodell des AKTIS®, welches die Datengrundlage des deutschen Inventars ist, existieren weitere, unabhängige Systeme zur Erhebung von Landflächen (auf die deutschen InVeKoS-Daten (IACS) kann in diesem Zusammenhang leider nicht zurückgegriffen werden). Es existiert jedoch kein System, welches georeferenziert Landnutzungsänderungen ausweist. Zur Verifizierung können folglich immer nur Flächensummen für Landnutzungskategorien untereinander verglichen werden. Zum Vergleich herangezogene Datensätze:

- Flächenerhebung nach Art der tatsächlichen Nutzung (Erhebung auf Basis des automatischen Liegenschaftkatasters und des B-DLM des ATKIS®, mit Nachbearbeitungsschritten (z.B. Konversion linearer Elemente zu Flächen); Offizialstatistik Statistisches Bundesamt (FS 3, R 3.1.2))
- Agrarstrukturerhebung (ASE; Erhebung durch Befragung; Landwirtschaftsstatistik) (Statistisches Bundesamt, FS 3, R 3.1.2)
- Beprobungsraster der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft (Jacobs et al., 2018)

Zu Verifikationszwecken können diese Datenquellen jedoch nur mit starken Einschränkungen herangezogen werden, da

- unterschiedliche Ausgabeformate vorliegen: Statistische Daten gegenüber räumlich hochauflösender Karte. Dadurch lassen sich nur Flächensummen vergleichen. Landnutzungsänderungen können aus den Daten der Statistik nicht abgeleitet werden.
- sie abweichende Definitionen für wichtige Landnutzungskategorien, insbesondere für landwirtschaftliche Flächen, Siedlungen und sonstiges Land aufweisen
- große Unterschiede in der Methodik der Datenerhebung vorhanden sind, z.B.
  - unterschiedlicher Erhebungsumfang
  - unterschiedliche räumliche Auflösung

- statistischer Ansatz vs. Wall to Wall - Ansatz (Vermessung, Fernerkundung)
- Landbedeckung, Landnutzung oder Mischform
- Ausschlussgrenzen und –kriterien
- unterschiedliche Erfassung und Darstellung linearer Elemente
- Periodizität der Erhebung usw.

Daraus ergeben sich je nach Erhebungssystemen z.T. stark unterschiedliche Flächenangaben für gleiche Landnutzungskategorien. Diese Unterschiede können über 10 % betragen, sind seit langem bekannt, werden aber beibehalten, um in jedem Datensatz konsistente Zeitreihen zu erhalten. Absolut sind die Ergebnisse der einzelnen Erhebungssysteme ohne Manipulation kaum miteinander vergleichbar. Aus diesem Grunde wurde als zusätzliches Kriterium die Entwicklung der Flächensumme einzelner Landnutzungskategorien seit dem Jahr 2000, deren Trends, in den unterschiedlichen Erhebungssystemen miteinander verglichen. Hierbei zeigte sich eine sehr gute Übereinstimmung der Ergebnisse der Flächenerhebung und der aus dem B-DLM stammenden Werte. Aus diesem Grunde kann davon ausgegangen werden, dass die Flächenerhebung nach Art der tatsächlichen Nutzung konsistent mit dem Inventar ist.

Alle drei Erhebungen lassen sich nur anhand der gesamten Landwirtschaftsfläche vergleichen. Hier wird der Trend auch sehr gut wiedergegeben. Im Vergleich einzelner Aspekte der Landwirtschaftsfläche zwischen der Landwirtschaftsstatistik (ASE) und den Werten der dem Inventar zugrunde liegenden Landnutzungsmatrix aus dem B-DLM des AKTIS®, zeigt sich, auf Bundes und Landesebene, dass das Bild deutlich diffuser wird. Neben hervorragenden Übereinstimmungen im Trend, sind auch stark abweichende Kurvenverläufe festzustellen, offensichtlich in Abhängigkeit von der Anzahl der Flächen, die in den entsprechenden Bezugsräumen in der Offizialstatistik unter Ausschlusskriterien fallen.

Dies bestätigt ein weiterer Test. In diesem wurden die Daten des B-DLM mit denen der Bodenzustandserhebung-LW (Jacobs et al., 2018) als auch denen der Agrarstrukturerhebung (ASE) (Statistisches Bundesamt, FS 3, R 3.1.2) verglichen. Grundlage der BZE-LW war ein landesweites, flächendeckendes systematisches Beprobungsraster (8 x 8 km) zur Erfassung der Bodenqualität landwirtschaftlich genutzter Standorte. Die Landnutzung wurde an allen Rasterpunkten vor Ort verifiziert. Unterschiede zwischen BZE-LW und B-DLM ergeben sich nur durch die Erhebungsmethodik; während bei der BZE-LW Flächen mit Grünland-Wechselwirtschaft extra ausgewiesen wurden und in der Nachbearbeitung komplett dem Ackerland zugeschlagen werden (in der ASE werden diese als Ackerland kartiert), fixiert das B-DLM die aktuelle Nutzung, also Grünland oder Ackerland, zum Zeitpunkt der Erhebung. Eine Anpassung des Grünlandwertes/Ackerlandwertes des B-DLM an den jeweiligen Wert der BZE-LW, mit entsprechenden Flächenausgleich in der jeweils anderen Kategorie ergibt eine sehr gute Übereinstimmung der Ergebnisse beider Erhebungssysteme, wogegen die Agrarstrukturerhebung die Landwirtschaftsfläche unterschätzt, insbesondere in Bezug auf das Ackerland (aufgrund von Ausschlusskriterien, Tabelle 348). Bezüglich des geringen Unterschieds in der Gesamtflächenrepräsentanz von BZE-LW und B-DLM sei darauf hingewiesen, dass in gröberen statistischen Erhebungssystemen kleine Flächen oft überschätzt werden (vergl. Jacobs et al. (2018)).

Tabelle 348: Verteilung der Flächen landwirtschaftlicher Landnutzung nach Bodenzustandserhebung Landwirtschaft (BZE-LW), Basis-Digitalem Landschaftsmodell des ATKIS® (B-DLM) und der Agrarstrukturerhebung (ASE). Referenz ist die Gesamtfläche der BZE-LW, in [%]

	BZE-LW	B-DLM_GL_an	B-DLM_AL_an	ASE
Ackerland	71,9	71,0	71,9	59,6
Grünland	26,4	26,4	25,5	23,5
Sonderkulturen	1,6	1,3	1,3	1,0
Gesamtflächenrepräsentanz	100,0	98,8	98,8	84,1

6.3.2 Informationen über die bei natürlichen Störungen angewandten Ansätze, falls zutreffend

Deutschland hat die Option natürliche Störungen nicht gewählt. Auftretende natürliche Störungen werden nicht gesondert betrachtet, sondern fließen in die Veränderungsrechnungen der entsprechenden Pools mit ein. Deshalb gibt es keine relevanten Informationen für dieses Kapitel.

6.3.3 Informationen zu den Ansätzen für die Berichterstattung über Holzprodukte

Für die Abschätzung der CO_2-Emissionen und ihre Einbindungen in Holzprodukten verwendet Deutschland den Produktionsansatz. Weitere Informationen finden sich in Kapitel 6.10.

6.4 Wälder (4.A)

6.4.1 Beschreibung der Kategorie (4.A)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
L/T	4 A, Forest Land	0	CO_2	-26920,55	-2,09	1648,08	0,24	-106,12
-/-	4 A, Forest Land	0	CH_4	32,44	0,01	26,91	0,01	-17,04
-/-/2	4 A, Forest Land	0	N_2O	435,49	0,04	465,46	0,07	6,88

Gas	Pool	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2	Mineralboden	Tier 3	NS/M	CS/M
N_2O	Mineralboden	Tier 3	NS/M	CS/M
CO_2	organischer Boden	Tier 2	NS/M	D
N_2O	organischer Boden	Tier 2	NS/M	D
CH_4	organischer Boden	Tier 2	NS/M	D
CO_2	Biomasse	Tier 3	NS/M	CS/M
CO_2	Totholz	Tier 3	NS/M	CS
CO_2	Streu	Tier 3	NS/M	CS/M
N_2O	Waldbrand	Tier 2	Q	CS/D
CH_4	Waldbrand	Tier 2	Q	CS/D

Die Kategorien Forest Land remaining Forest Land (4.A.1) und *Land converted to Forest Land* (4.A.2) sind für CO_2-Emissionen bzw. -Einbindungen Hauptkategorie nach der Emissionshöhe und dem Trend, sowie für N_2O nach der Methode-2-Analyse.

Die Kategorie „Wald“ wird in den 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (IPCC, 2006a) und in den offiziellen Berichtstabellen Common Reporting Tables (CRTs) für die an das Klimasekretariat zu übermittelnden Treibhausgasinventare in verbleibende Waldfläche und Neuwald unterteilt. Neuwald entsteht durch Sukzession, Wiederbewaldung und Aufforstung, auf zuvor anderweitig genutzten Flächen (Land converted to Forest Land). Nach derartigen Landnutzungsänderungen muss gemäß den IPCC Guidelines 2006 mit einer 20-jährigen Übergangszeit („Transition Time“) auf der Datengrundlage ab dem Jahr 1970 gerechnet werden (siehe Kapitel 6.3.1); folglich verbleiben Neuwaldflächen 20 Jahre lang in den entsprechenden Übergangskategorien, bevor sie in die „verbleibende Waldfläche“ wechseln. Als verbleibende Waldfläche wird die Fläche bezeichnet, die im Berichtsjahr unverändert Wald bleibt (Forest Land remaining Forest Land) zuzüglich der Flächen, die nach 20 Jahren aus den Übergangskategorien (Land converted to Forest Land (4.A.2)) in die verbleibende Waldfläche überführt werden.

In der Kategorie *Forest Land* wird über die Emission/Einbindung von CO_2 aus organischen und mineralischen Böden, der ober- und unterirdischen Biomasse, Streu, Totholz sowie Waldbrand berichtet; außerdem über Lachgasemissionen aus Waldbränden, Drainage organischer Böden und Mineralisierung in Mineralböden sowie Methanemissionen aus Waldbränden und Drainage organischer Böden.

Die Gesamtemissionen aus den Wäldern betrugen im Jahre 2024 2.141 kt CO_2-Äquivalente. In der Tabelle 349 sind die Emissionen für den Wald unterteilt nach Pools und Treibhausgasen sowie ihre Unsicherheiten zusammengestellt.

Tabelle 349: Emissionen im Waldbereich für das Jahr 2024

Kategorie	Gas	Emission	2,5 % Perzentil	97,5 % Perzentil	2,5 % Perzentil	97,5 % Perzentil
		[kt CO_2-Äq.]			%	
Waldtotal [1]		2.140,5	1.881,1	2.458,4	12,12	14,85
Mineralböden	CO_2 [2]	2.175,0	1.416,3	3.358,1	34,88	54,4
	$N_2O_{indirekt}$ [3]	63,5	0,1	171,5	99,9	170,27
	N_2O_{direkt} [3]	144,2	36,1	282,3	74,97	95,77
Organische Böden	CO_2 [2]	2.995,6	2.411,5	3.678,9	19,5	22,81
	CH_4 [4]	24,8	8,0	51,1	67,59	106,23
	N_2O [4]	256,7	0,3	536,9	99,9	109,2
Biomasse	CO_2 [2]	1.773,0	1.632,3	1.913,9	7,94	7,94
Streu	CO_2 [2]	IE	IE	IE	IE	IE
Totholz	CO_2 [2]	-5.295,6	-4.002,1	-6.589,0	24,43	24,43
Waldbrände	CO_2 [5]	IE	IE	IE	IE	IE
	CH_4 [5]	2,1	0,38	3,89	82,12	82,12
	N_2O [5]	1,1	0,48	1,76	57,01	57,01

1 Summe der Emissionen aus den CRT-Tabellen 4.A, 4.(II).A, 4.(III).A, 4.(IV).A

2 CRT-Tabelle 4.A

3 CRT-Tabelle 4.(III).A

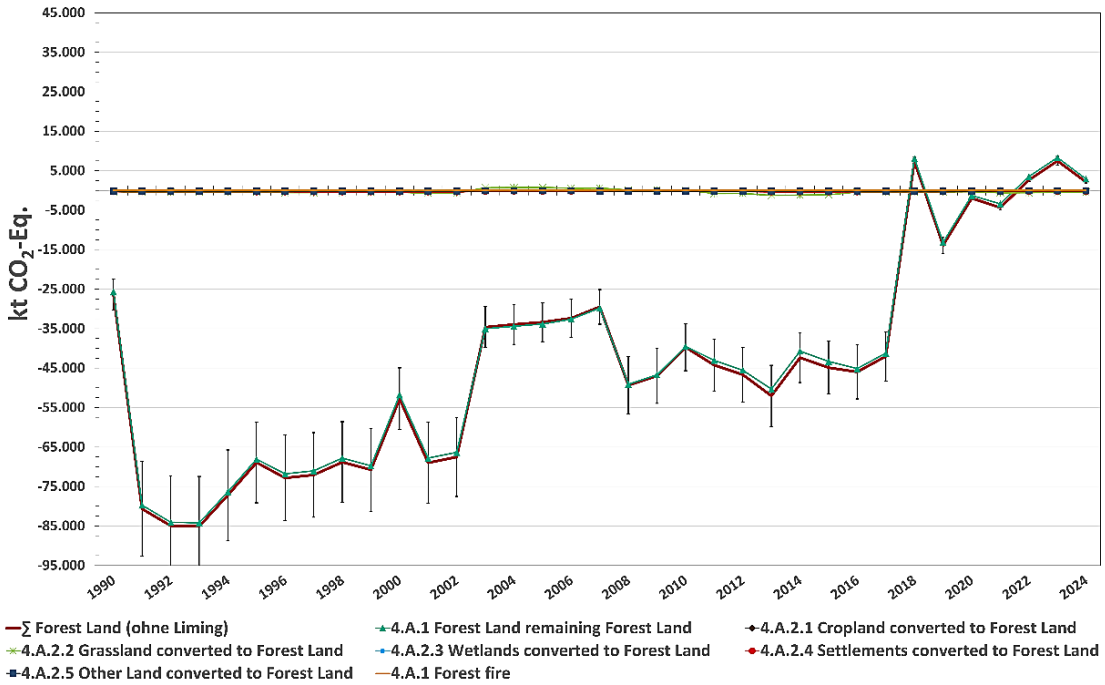
4 CRT-Tabelle 4.(II).A

5 CRT-Tabelle 4.(IV).A

Ausschlaggebend für die Einbindung in der Waldkategorie (2024) ist der Pool Totholz (-5.295,6 kt CO_2-Äq.). Quellen entstehen durch die Pools Biomasse (1.773,0 kt CO_2-Äq.), mineralische

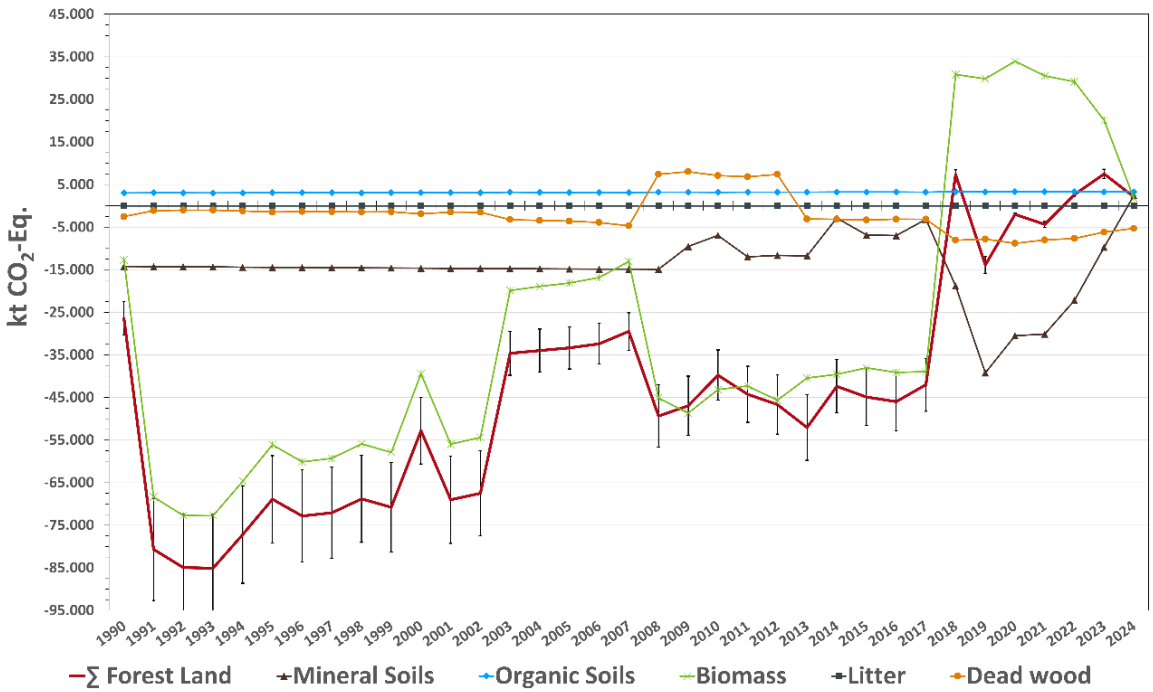
Böden inkl. Streu (IE) (2.382,7 kt CO_2-Äq.) und organische Böden (3.277,0 kt CO_2-Äq.). Waldbrände tragen mit 3,3 kt CO_2-Äq. nur einen geringen Anteil bei.

Abbildung 78: Treibhausgasemissionen (Summe aus CO_2, CH_4 und N_2O) [kt CO_2-Äq.] infolge Landnutzung und Landnutzungsänderung aus Wäldern von 1990 – 2024 nach Unterkategorien



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

Abbildung 79: Treibhausgasemissionen (Summe aus CO_2, CH_4 und N_2O) [kt CO_2-Äq.] infolge Landnutzung und Landnutzungsänderung aus Wäldern von 1990 – 2024 nach Pools



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

6.4.2 Methodische Aspekte (4.A)

6.4.2.1 Datenquellen

Zur Ermittlung der Waldflächen, der eingetretenen Landnutzungsänderungen, der Schätzung der Emissionsfaktoren für Boden, Biomasse, Streu und Totholz sowie für die Berechnung der Kohlenstoffvorräte und -vorratsveränderungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten bzw. in verschiedenen Zeiträumen sowie für die Emissionsberechnung für Waldbrand, Drainage und Mineralisierung wurden folgende Datenquellen genutzt:

- Bundeswaldinventur 1987 (BWI 1987)
- Bundeswaldinventur 2002 (BWI 2002)
- Bundeswaldinventur 2012 (BWI 2012)
- Bundeswaldinventur 2022 (BWI 2022)
- Inventurstudie 2008 (IS08)
- Kohlenstoffinventur 2017 (CI 2017)
- Datenspeicher Waldfonds (DSWF)
- Holzeinschlagszahlen des Thünen-Instituts für Holzforschung (auch für HWP verwendet)
- Bodenzustandserhebung im Wald I (BZE I-Wald)
- Bodenzustandserhebung im Wald II (BZE II-Wald)
- Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem (ATKIS®)
- CORINE Land Cover (CLC)
- Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland 1:1.000.000 (BÜK 1000)
- Karte der organischen Böden Deutschlands (Wittnebel et al., 2023)
- Waldbrandstatistik der Bundesrepublik Deutschland
- Klimadaten des DWD

6.4.2.1.1 Bundeswald- und Zwischeninventuren, Datenspeicher Waldfonds und Holzeinschlagszahlen

Die Bundeswaldinventur erfasst die großräumigen Waldverhältnisse und forstlichen Produktionsmöglichkeiten auf Stichprobenbasis nach einem einheitlichen Verfahren in Deutschland. Sie ist eine terrestrische Stichprobeninventur mit permanent markierten Probepunkten in einem 4 km x 4 km Grundnetz, das auf Wunsch der Bundesländer regional verdichtet wurde[91]. Die erste Bundeswaldinventur (BWI 1987) erstreckte sich nur über das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland in ihren Grenzen vor 1990 und Westberlin und wurde im Zeitraum 1986 bis 1989 (Stichjahr 1987) durchgeführt. Die zweite Bundeswaldinventur (BWI 2002) wurde in den Jahren 2001 bis 2003 (Stichjahr 2002) als Wiederholungsinventur in den alten Bundesländern und als Erstinventur in den neuen Bundesländern durchgeführt (BMELV, 2005; Polley, 2001). Als Wiederholungsinventuren erfolgten die Erhebungen zur dritten Bundeswaldinventur (BWI 2012)

[91] weitere Informationen: http://www.bundeswaldinventur.de

von 2011 bis 2012 (Stichjahr 2012) und vierten Bundeswaldinventur (BWI 2022) von 2021 bis 2022 im gesamten Bundesgebiet.

Zusätzlich zu den Bundeswaldinventuren wurden Daten zum Zustand des Waldes in den Jahren 2008 und 2017 auf einer Teilstichprobe der Bundeswaldinventur im Netz von 8 km x 8 km ermittelt. Die Inventurstudie 2008 (IS08) und die Kohlenstoffinventur 2017 (CI 2017) bedienen sich im Wesentlichen der Methodik der Bundeswaldinventur (BMELF, 2008; Riedel et al., 2019; Schwitzgebel et al., 2009).

Der Datenspeicher Waldfonds (DSWF) enthält flächendeckende Forsteinrichtungsdaten für das Gebiet der DDR bis 1993. Diese Daten wurden in periodischen Abständen erhoben und jährlich mit Wachstumsmodellen fortgeschrieben sowie nach Vollzugs- und Änderungsmeldungen der Forstbetriebe aktualisiert (BMELF, 1994).

Die Holzeinschlagszahlen werden aus der nationalen Holzeinschlagstatistik (Statistisches Bundesamt, FS 3, R 3.3.1) hergeleitet. Diese unterschätzt den jährlichen Rohholzeinschlag um circa 30 % und wird deshalb mit den Daten aus den Waldinventuren über den Abgang von Derbholz kalibriert Rüter (2017) (vgl. auch Kapitel 6.10.2.1).

6.4.2.1.2 Bodenzustandserhebung im Wald (BZE-Wald)

Zur Bestimmung der Kohlenstoffemissionen aus Waldböden wurde die „stock-difference-methode“ und das Bodenkohlenstoffmodel YASSO verwendet. Yasso berechnet die Menge des organischen Kohlenstoffs im Boden (inkl. Streu und Totholz), die Änderungen der Menge und die heterotrophe Bodenatmung (siehe auch Kapitel 6.4.2.5). Als Eingangsdaten konnten Daten aus den bodenkundlichen Inventuren BZE I-Wald und BZE II-Wald genutzt werden. Die BZE I-Wald wurde von 1987 bis 1992 und die BZE II-Wald von 2006 bis 2008 durchgeführt. Bei allen drei Inventuren wurden sowohl die gesamte organische Auflage, im folgendem nach IPCC 2006 Guidelines Streu genannt, als auch der Mineralboden beprobt.

Eine Beschreibung des Inventurdesigns und der Probenahme finden sich im Kapitel 6.4.2.5.3.2.

6.4.2.2 Biomasse (CRF 4.A)

6.4.2.2.1 Verbleibende Waldfläche

Die Berechnung der Änderungen der Kohlenstoffvorräte für die Biomasse erfolgt nach dem Tier 3-Ansatz mit der Vorratsveränderungsmethode (stock-difference method, Equation 2.8, 2006 IPCC Guidelines (IPCC (2006a))). Dabei werden nur Waldflächen berücksichtigt, die zu beiden Zeitpunkten Wald waren (Forest Land remaining Forest Land). Aufforstungs- und Entwaldungsflächen (Land to Forest Land and Forest Land to Land) werden nicht berücksichtigt und werden jeweils separat mit der Vorratsveränderungsmethode (stock-difference method) berechnet.

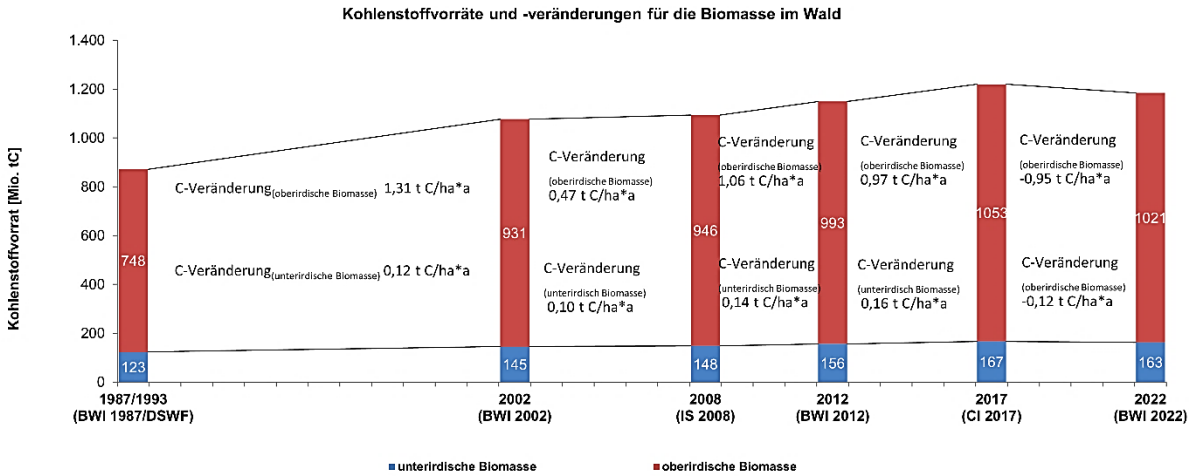
Im Wald erfolgt eine Stratifizierung nach den Forstlichen Großlandschaften und Bundesländern. Die Vorratsveränderungsmethode wird für jedes Stratum und jede Inventurperiode angewendet. Dadurch erhält man durchschnittliche Emissionsfaktoren für jedes Stratum der Zeiträume zwischen den jeweiligen Inventuren.

Die periodischen Emissionsfaktoren werden mit den jährlichen Holzeinschlagszahlen kalibriert, so dass für jedes Jahr und Stratum ein an den Holzeinschlag angepasster EF vorliegt. Die Beschreibung des methodischen Vorgehens findet sich in Kap. 6.4.2.2.9 und in (Röhling et al., 2016). Am Ende wird für jedes Jahr über die Flächenanteile der Straten ein deutschlandweiter IEF berechnet.

Für die Jahre nach der letzten Bundeswaldinventur wird die Waldentwicklung der Inventurperiode von 2012 bis 2022 mit Hilfe des Matrix-Modelles (Rock et al., 2025) fortgeschrieben.

In Abbildung 80 sind die Kohlenstoffvorräte und –veränderungen für die Inventurzeitpunkte und –perioden angegeben. Diese Zahlen verdeutlichen die Veränderungen der Kohlenstoffvorräte in den Wäldern, wobei hier nur die Vorräte für die verbleibenden Waldflächen ohne Neuwaldflächen berücksichtigt wurden. Die Kohlenstoffveränderungswerte sind die deutschlandweiten EF für die entsprechende Periode.

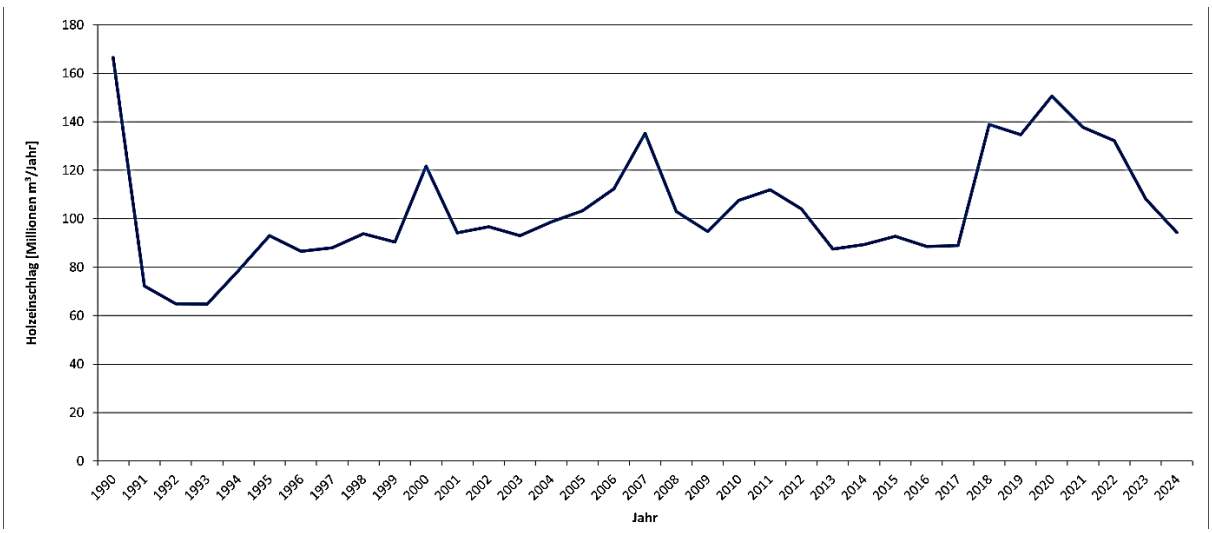
Abbildung 80: Kohlenstoffvorräte und Kohlenstoffvorratsveränderungen für die unterirdische und oberirdische Biomasse im Wald für die Jahre 1987/1993, 2002, 2008, 2012, 2017, 2022



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

In Abbildung 81 sind die Holzeinschlagszahlen für Deutschland dargestellt. Die methodische Beschreibung für die Herleitung der Zahlen findet sich in Kapitel 6.10.2.1 und in (Rüter, 2017). Mit den Zahlen der Einschlagsrückrechnung wurden die jährlich EF hergeleitet, die in Tabelle 350 zu finden sind.

Abbildung 81: Holzeinschlag in Deutschland



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

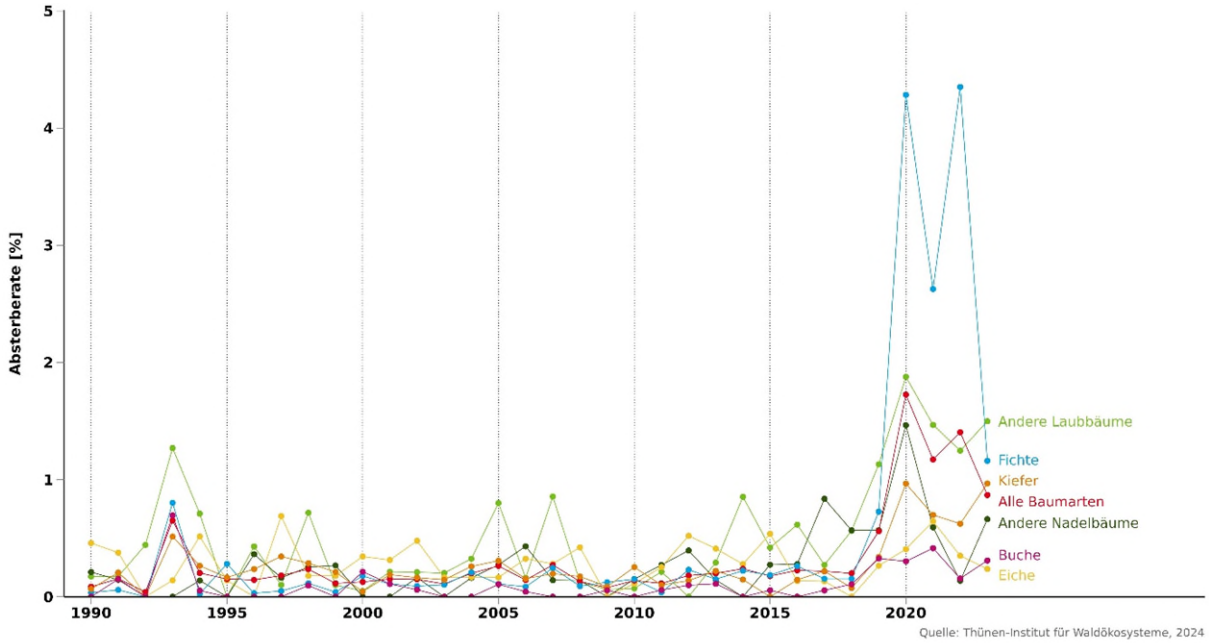
Tabelle 350: Emissionsfaktoren der verbleibenden Waldflächen der ober- und unterirdischen Biomasse, in [t C*ha]

Jahr	EF oberirdische Biomasse [t C*ha]	EF unterirdische Biomasse [t C*ha]	Gesamt EF Biomasse [t C*ha]
1990	0,28	0,03	0,30
1995	1,31	0,12	1,44
2000	0,91	0,09	1,00
2005	0,38	0,10	0,48
2006	0,35	0,09	0,44
2007	0,27	0,07	0,35
2008	1,02	0,14	1,16
2009	1,10	0,15	1,25
2010	0,97	0,13	1,11
2011	0,93	0,13	1,06
2012	1,01	0,14	1,15
2013	0,84	0,16	1,00
2014	0,82	0,16	0,98
2015	0,79	0,15	0,94
2016	0,83	0,16	0,99
2017	0,83	0,16	0,98
2018	-0,71	-0,09	-0,81
2019	-0,69	-0,09	-0,78
2020	-0,78	-0,10	-0,89
2021	-0,71	-0,09	-0,8
2022	-0,68	-0,09	-0,77
2023	-0,47	-0,06	-0,53
2024	-0,05	-0,01	-0,06

Auffällig sind die sehr niedrigen Emissionsfaktoren in den Jahren 1990 und 2007, die mit dem hohen Holzeinschlag in den Jahren korreliert. Dies ist auf Sturmereignisse mit sehr hohem Schadholzanfall zurückzuführen. 1990 traf auf Deutschland eine Serie von Orkanen mit einem daraus resultierenden Sturmholzaufkommen von ca. 70 Mill. m^3. 2007 war es der Sturm Kyrill mit einem Sturmholzvolumen von ca. 37 Mill m^3.

In dem Zeitraum 2018 bis 2022 sind auf einer Fläche von ca. 540.000 ha der Waldbestand, vor allem Fichte, abgestorben (BMEL, 2024c). Bestätigt wird dies vom Waldzustandsbericht 2024 (BMEL, 2024a). In Abbildung 82 sind die Absterberaten nach Baumarten seit 1990 dargestellt. Ab 2018 haben die Absterberaten für alle Baumarten zugenommen, besonders bei der Fichte. Aus den genannten Gründen übersteigt der Vorratsverlust den Zuwachs und es kommt zu einem Kohlenstoffvorratsabbau im Wald. Dies spiegelt sich in negativen Emissionsfaktoren ab 2018 wider (siehe Tabelle 350). Ein Teil der Verluste findet sich im Totholzvorrat, im mineralischen Boden (Streu) und in den Holzprodukten wieder. Ein weiterer Teil des geschädigten Holzes wurde exportiert.

Abbildung 82: Entwicklung der Absterberaten nach Baumarten seit 1990 (Waldzustandsbericht 2024)



6.4.2.2.2 Neuwaldfläche

Die Berechnung der Änderungen der Kohlenstoffvorräte für die Biomasse auf Neuwaldflächen erfolgt nach dem Tier 3-Ansatz gemäß der *2006 IPCC Guidelines nach der* Formel 2.16. Dabei wird die Vorratsveränderung durch die Differenz zwischen dem Biomassevorrat vor und nach der Umwandlung gebildet (siehe auch 6.1.2.2.3). In den CRF wird der Biomassevorrat der Vornutzung, der verloren geht, bei "losses" und der Biomassezuwachs der Neuwaldfläche bei "gains" eingetragen.

Die BWI unterscheidet zwischen Waldflächen, die aufgeforstet wurden (Land to Forest Land), Flächen die schon Wald sind (Forest Land remaining Forest Land) und Flächen die entwaldet wurden (Forest Land to Land). Die Veränderungsrechnung erfolgt getrennt nach Aufforstung, verbleibender Wald und Entwaldung. Die hier berechneten Vorratsveränderungen (stock-difference-methode) beziehen sich nur auf die Aufforstungsflächen.

Für die Neuwaldfläche wurde auf Basis der BWI 1987, BWI 2002, IS2008, BWI 2012 und BWI 2022 eine Einzelbaumberechnung durchgeführt. Für den Zeitraum bis 2002 wurden nur Bäume in den alten Bundesländern berücksichtigt, da die BWI 1987 nur dort durchgeführt wurde. Ab dem Jahr 2002 erfolgte eine Berechnung für Gesamtdeutschland. Die Kohlenstoffvorräte der Biomasse wurden für jede Umwandlungsfläche einer Landnutzungskategorie in Wald berechnet und am Ende in der Kategorie Neuwald zusammengefasst. Die Vorräte der Vornutzungskategorien wurden abgezogen und somit berücksichtigt.

Da für den Zeitraum von 1990 bis 2002 in den neuen Bundesländern die Holzvorräte der Neuwaldflächen nicht direkt aus dem Vergleich zweier Inventuren abgeleitet werden konnten, wurden die Werte der alten Bundesländer verwendet.

Zu beachten ist, dass die Aufforstungsflächen 20 Jahre in dieser Landnutzungskategorie verbleiben. Bei den jährlich hinzukommenden Flächen ist der Kohlenstoffvorratsverlust von der Vornutzung im Umwandlungsjahr zu berücksichtigen, der sofort als Emission gewertet wird.

In Tabelle 351 sind die EF für die jährliche Zunahme der ober- und unterirdischen Biomasse auf Aufforstungsflächen ohne die Vornutzung zusammengefasst. Die unterschiedlichen EF in den

Inventurperioden sind auf unterschiedliche Wachstumsbedingungen in Gebieten zurückzuführen, in denen zwischen den Waldinventuren in unterschiedlichen Zeiträumen Aufforstungen stattfanden. Dies betrifft unterschiedliche Standortbedingungen, unterschiedliche Baumartenauswahl, Anpflanzung oder natürliche Verjüngung, unterschiedliche klimatische Bedingungen, unterschiedliche Bestandsbewirtschaftung usw., die in Verbindung mit einer ungleichmäßigen räumlichen Verteilung der Aufforstungen über ganz Deutschland im Laufe der Zeit zu Unterschieden in den jeweiligen periodischen EFs führen.

Tabelle 351: EF für die Neuwaldflächen der ober- und unterirdischen Biomasse, in [t C*ha]

Periode	1990-2002	2003-2007	2008-2012	2013-2024
EF oberirdische Biomasse	2,82	1,42	1,96	2,67
EF unterirdische Biomasse	0,58	0,21	0,37	0,55

6.4.2.2.3 Herleitung der Einzelbaumbiomassen

Die Schätzung der oberirdischen Biomasse erfolgt durch Biomassefunktionen, die mit den Daten der Bundeswaldinventuren hergeleitet werden. Weitere Informationen finden sich in Bösch and Kändler (2013) und im Kapitel 6.4.2.2.4. Auch die unterirdische Biomasse wird über Biomasse-funktionen hergeleitet. Dies geschieht mit Hilfe bundesweit repräsentativer Funktionen (siehe Kapitel 6.4.2.2.5).

Für die Berechnung von Kohlenstoffvorräten wurden für 1987 für die alten Bundesländer die Daten der BWI 1987 (ca. 230.000 vermessene Bäume) verwendet. Für die neuen Bundesländer liegen mit dem Datenspeicher Waldfonds die Daten der Forsteinrichtung bis 1993 in aggregierter Form zur Kohlenstoffvorrats-Berechnung vor. Die BWI 2002, mit ca. 377.000 vermessenen Bäumen bildet die Datengrundlage für das Stichjahr 2002. Hinzugekommen sind die Daten der BWI 2012 mit rund 537.000 und der BWI 2022 mit 521.000 aufgenommenen Bäumen. Ergänzt werden die BWI-Daten durch die wiederholte Aufnahme von ca. 83.000 Bäumen in der Inventurstudie 2008 sowie ca. 96.000 Bäumen in der Kohlenstoffinventur 2017. Diese Datenquellen bilden so gute Berechnungsgrundlagen für die Kohlenstoffvorrats-Veränderungsschätzungen, dass die Vorratsveränderungsmethode (Stock-Difference Method, IPCC (2006a)) der Biomasse-Zunahme-Abnahme-Methode (Gain-Loss Method, IPCC (2006a)) vorgezogen werden konnte.

6.4.2.2.4 Konvertierung in oberirdische Einzelbaumbiomasse

Die rund 1600 Bäume der Studie von Bösch and Kändler (2013) beschränkten sich auf die Baumarten Fichte, Kiefer, Buche und Eiche. Alle weiteren Baumarten werden mit Ausnahme der Weichlaubhölzer den bereits genannten zugeordnet. Würden die Weichlaubhölzer ebenfalls der Baumart Buche zugeordnet und die entsprechenden Funktionen und Koeffizienten angewendet, wäre eine deutliche Überschätzung der Biomasse für diese Baumartengruppe die Folge. Aus diesem Grund wurde über sogenannte Pseudobeobachtungen basierend auf den Grundner and Schwappach (1952)-Tafeln für die Weichlaubhölzer eine Biomassefunktion gleichen Typs angepasst.

Die Biomassefunktionen nach Baumartengruppen gliedern sich in drei Teile:

- Bäume >= 10 cm Brusthöhendurchmesser (BHD)
- Bäume >= 1,3 m Höhe und < 10 cm BHD sowie
- Bäume < 1,3 m Höhe

Bei Bäumen < 1,3 m Höhe (hier kann kein BHD gemessen werden) ist eine Differenzierung nach den genannten 5 Baumartengruppen nicht mehr sinnvoll. Deshalb wird hier nur nach Nadel- und Laubholz unterschieden. In den Übergangsbereichen wurden die Funktionen mit Hilfe statistischer Verfahren geglättet, so dass hier mögliche Sprünge zwischen den Funktionen vermieden werden konnten.

Im Folgenden sind die Funktionen zur Ableitung der oberirdischen Biomasse aus den Bundeswaldinventurdaten und deren Koeffizienten, getrennt nach Baumartengruppen aufgeführt.

Bäume ab 10 cm BHD

Gleichung 62:

$$Y_{BIOM_0} = b_0 e^{b_1 \frac{BHD}{BHD+k_1}} e^{b_2 \frac{D03}{D03+k_2}} H^{b_3}$$

- mit Y_{BIOM_0} = Oberirdische Biomasse in kg pro Einzelbaum,
- $b_{0,1,2,3}$ und $k_{1,2}$ = Koeffizienten der Marklundfunktion,
- BHD = Brusthöhendurchmesser in cm,
- D03 = Durchmesser in cm auf 30% der Baumhöhe,
- H = Baumhöhe in m.

Tabelle 352: Koeffizienten der Biomassefunktion für Bäume >= 10 cm BHD

Baumart	b_0	b_1	b_2	b_3	k_1	k_2	RMSE%
Fichte	0,75285	2,84985	6,03036	0,62188	42,0	24,0	11,2
Kiefer	0,33778	2,84055	6,34964	0,62755	18,0	23,0	15,6
Buche	0,16787	6,25452	6,64752	0,80745	11,0	135,0	18,8
Eiche	0,09428	10,26998	8,13894	0,55845	400,0	8,0	12,1
Weichlaubholz	0,27278	4,19240	5,96298	0,81031	13,7	66,8	50,0[92]

Bäume > 1,3 m Höhe und < 10 cm BHD

Gleichung 63:

$$Y_{BIOM_0} = b_0 + \left(\frac{b_s - b_0}{d_s^2} + b_3(BHD - d_s)\right) BHD^2$$

- Y_{BIOM_0} = Oberirdische Biomasse in kg pro Einzelbaum,
- $b_{0,s,3}$ = Koeffizienten der Funktion,
- BHD = Brusthöhendurchmesser in cm ,
- d_s = Durchmessergültigkeitsgrenze für diese Funktion = 10 cm.

[92] Für diese Funktion ist keine Angabe des RMSE% verfügbar, deshalb wurde der IPCC-Standardwert von 50% eingesetzt.

Tabelle 353: Koeffizienten der Biomassefunktion für Bäume >= 1,3 m Höhe und < 10 cm BHD

Baumart	b_0	b_s	b_3
Fichte	0,41080	26,63122	0,01370
Kiefer	0,41080	19,99943	0,00916
Buche	0,09644	33,22328	0,01162
Eiche	0,09644	28,94782	0,01501
Weichlaubholz	0,09644	16,86101	-0,00551

Bäume < 1,3 m Höhe

Gleichung 64:

$$Y_{BIOM_0} = b_0 \, H_1^b$$

- Y_{BIOM_0} = Oberirdische Biomasse in kg pro Einzelbaum,
- $b_{0,1}$ = Koeffizienten der Funktion,
- H = Baumhöhe in m.

Die Baumhöhe bei Bäumen unter 1,3 m Höhe wird bei der Bundeswaldinventur lediglich in zwei Stufen erfasst: 20-50 cm und 50-130 cm, so dass hier in die Funktion die jeweiligen Mittelwerte dieser Klassen von 35 und 90 cm als Standardwerte eingesetzt werden.

Tabelle 354: Koeffizienten der Biomassefunktion für Bäume < 1,3 m Höhe

Baumart	b_0	b_1
Fichte	0,23059	2,20101
Buche	0,04940	2,54946

Für die Neuen Bundesländer lagen für den Zeitpunkt 1990 keine Inventurdaten vor. Einzige verfügbare Datenquelle ist der Datenspeicher Waldfonds von 1993, welcher die Vorräte und die Waldflächen für die Neuen Bundesländer nach einer einheitlichen Methode erfasst. Deshalb wurden die Derbholzvorräte mittels der in Burschel et al. (1993) beschriebenen Methoden in Biomasse umgewandelt. In einem ersten Schritt wird das Derbholzvolumen mit dem Wurzelprozent multipliziert (Tabelle 355), so dass daraus die Angabe des unterirdischen Volumens resultiert. Anschließend wird das Derbholzvolumen und das unterirdische Volumen mit einem Volumensexpansionsfaktor multipliziert (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht g efunden werden.**). Daraus resultiert das gesamte Baumholzvolumen. Wird vom Baumholzvolumen das Derbholz- und unterirdische Volumen subtrahiert, erhält man das Astvolumen. Anschließend werden die Volumina mit der Raumdichte multipliziert, wobei für das Astvolumen nach Pistorius et al. (2007) spezifische Raumdichten verwendet werden. Alle Werte sind in den folgenden Tabellen aufgeführt.

Tabelle 355: Wurzelprozent und Raumdichten zur Konvertierung der Datenspeicher Waldfonds-Daten

Baumart	Wurzelprozent (bis 20 Jahre)	Wurzelprozent (> 20 Jahre)	RMSE%	Raumdichte (Derbholz und Wurzel)	Raumdichte (Astholz)	RMSE%
Fichte	100	30	50	0,38	0,49	18,8
Tanne	100	25	50	0,36	0,49	22,7
Douglasie	100	25	50	0,41	0,49	20,7
Kiefer	100	25	50	0,43	0,49	27,2
Lärche	100	25	50	0,49	0,49	18,2
Buche	100	25	50	0,56	0,54	13,7
Eiche	100	25	50	0,57	0,57	19,8
Hartlaubholz	100	25	50	0,56	0,57	15,0
Weichlaubholz	100	25	50	0,46	0,54	8,7

Tabelle 356: Volumensexpansionsfaktoren zur Konvertierung von Derbholzvolumen + unterirdischem Volumen zum Baumholzvolumen der Datenspeicher Waldfonds-Daten

Baumart	0 bis 20 Jahre	21 bis 40 Jahre	41 bis 60 Jahre	61 bis 80 Jahre	81 bis 100 J.	101 bis 120 J.	121 bis 140 J.	141 bis 160 J.	> 160 J.	RMSE%
Fichte	4	1,65	1,51	1,45	1,45	1,45	1,46	1,47	1,48	50
Tanne	4	1,52	1,44	1,44	1,38	1,41	1,41	1,42	1,41	50
Douglasie	4	1,65	1,51	1,45	1,45	1,45	1,46	1,47	1,48	50
Kiefer	4	1,51	1,42	1,40	1,36	1,34	1,34	1,34	1,33	50
Lärche	4	1,51	1,42	1,40	1,36	1,34	1,34	1,34	1,33	50
Buche	4	1,69	1,47	1,41	1,38	1,39	1,39	1,38	1,39	50
Eiche	4	1,58	1,41	1,39	1,37	1,35	1,34	1,35	1,34	50
Hartlaubholz	4	1,69	1,47	1,41	1,38	1,39	1,39	1,38	1,39	50
Weichlaubholz	4	1,69	1,47	1,41	1,38	1,39	1,39	1,38	1,39	50

Sowohl für das Wurzelprozent als auch für den Volumensexpansionsfaktor sind keinerlei Unsicherheiten bekannt. Aus diesem Grund wird hier der IPCC Standardwert von 50 % verwendet.

6.4.2.2.5 Konvertierung in unterirdische Biomasse

Um zwischen der Herleitung der ober- und der unterirdischen Biomasse vergleichbare und transparente Methoden anwenden zu können, werden seit der Submission 2015 Biomassefunktionen basierend auf begutachteten Artikeln verwendet. Für die Kiefer wurde vom Thünen Institut eine eigene Biomassefunktion zur Ableitung der unterirdischen Biomasse entwickelt. Alle gewählten Biomassefunktionen entsprechen der Gleichung 65.

Gleichung 65:

$$Y_{BIOM_u} = b_0 \, BHD^{(b_1)}$$

- Y_{BIOM_u} = unterirdische Biomasse in kg pro Einzelbaum
- $b_{0,1}$ = Koeffizienten der unterirdischen Biomassefunktion.

► BHD = Brusthöhendurchmesser in cm

Tabelle 357: Koeffizienten, Parameter, Unsicherheiten und Quellen für die verwendeten Biomassefunktionen, unterteilt nach Baumarten

Baumart	b_0	Parameter	b_1	RMSE%	Region	Quelle
Fichte	0.003720	BHD [cm]	2.792465	34,6	Solling	**(Bolte et al., 2003)**
Kiefer	0.006089	BHD [cm]	2.739073	26,3	Barnim	(Neubauer & Demant, 2016)
Buche	0.018256	BHD [cm]	2.321997	49,0	Solling	(Bolte et al., 2003)
Eiche	0.028000	BHD [cm]	2.440000	50,0[93]	Nordost Frankreich	(Drexhage & Colin, 2001) in (Bolte et al., 2003)
Weichlaubholz (Wurzelbiomasse)	0.000010	BHD [mm]	2.529000	9,6	Südschweden	(Johansson & Hjelm, 2012)
Weichlaubholz (Wurzelstumpfbiomasse)[94]	0.000116	BHD [mm]	2.290300	15,9	Südschweden	(Johansson & Hjelm, 2012)

Auf die Verwendung von log-Funktionen, welche in der Literatur ebenfalls vorhanden sind (siehe Abbildung 83), wurde bewusst verzichtet. Eine „Rücktransformierung" der Fehlerwerte zur Weiterverwendung im Fehlerbudget ist nicht möglich bzw. es stellte sich heraus, dass bei Vorliegen der original Messwerte, die log-Fehlerangaben nach einer „Rücktransformation" ähnlich hoch ausfallen, wie in der ursprünglichen Skaleneinheit.

Neben der Thünen-Institut-eigenen Kiefernfunktion (Neubauer & Demant, 2016) ist auch die Funktion von Drexhage and Colin (2001) in Bolte et al. (2003) für Eiche in Europa einzigartig. Die gewählten Funktionen für Buche und Fichte decken einen wesentlich breiteren Bereich in der BHD-Verteilung ab, vor allem im stärkeren Bereich, als Vergleichsstudien von Wutzler et al. (2008) und Wirth et al. (2004). Die Funktionen haben somit einen wesentlich geringeren Extrapolationsbereich, wodurch ein „abdriften" der Biomassewerte nach oben vermieden wird (siehe Abbildung 83).

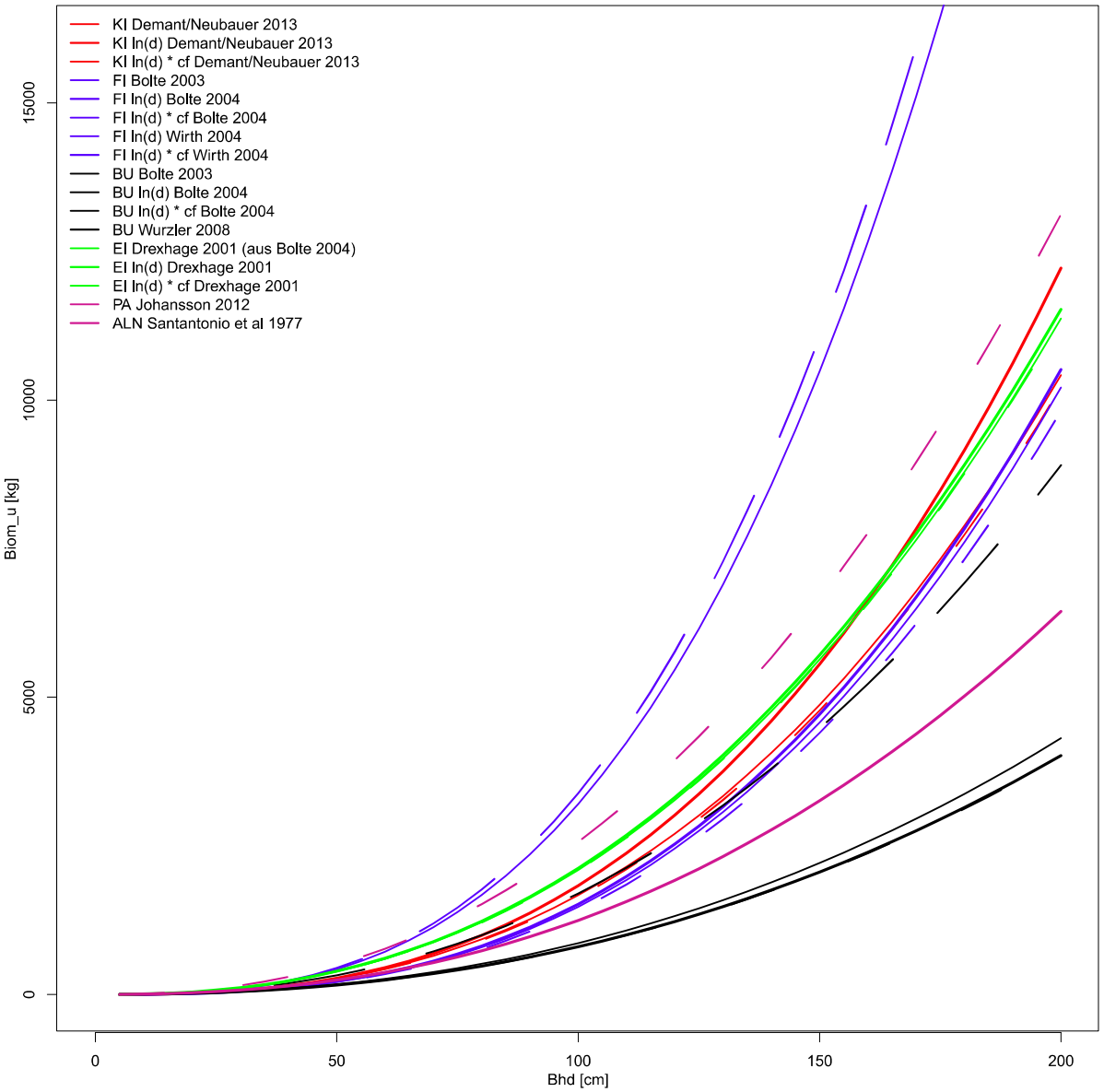
Gleichzeitig wurden die gewählten Funktionen für Fichte und Buche jedoch nur in einem kleinen Gebiet, dem Solling erhoben. Dagegen beziehen die Funktionen von Wutzler et al. (2008) und Wirth et al. (2004) Daten aus verschiedenen, geographisch unterschiedlichen Studien ein.

Dieser Vergleich der gewählten Funktionen für Fichte, Buche und Weichlaubholz (jeweils durchgezogene Linie in Abbildung 83) mit weiteren Veröffentlichungen zeigt, dass die gewählten Funktionen stets konservative Biomassevorräte schätzen. Die Veränderungsraten zwischen zwei Zuständen sind somit ebenfalls im Bezug auf andere Funktionen gering. Da in der Kategorie der unterirdischen Biomasse über den gesamten Berichtszeitraum Kohlenstoff akkumuliert wird, sind die Schätzungen zur Sequestrierungsrate als konservativ zu werten.

[93] Für diese Funktion ist keine Angabe des RMSE% verfügbar, deshalb wurde der IPCC-Default von 50% eingesetzt.

[94] Der mittlere RMSE% beider Funktionen (Wurzelstumpfmasse + Wurzelmasse) beträgt 24,2%.

Abbildung 83: Vergleich verschiedener Funktionen zur Ableitung der unterirdischen Biomasse



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

6.4.2.2.6 Konvertierung der Einzelbaumbiomasse in Kohlenstoff

Für die Konvertierung der Biomasse in Kohlenstoffvorräte wurde ein Wert von 0,5 angewandt. Wirth et al. (2004) berichten, dass die Unterschiede zwischen den Kompartimenten innerhalb einer Baumart größer sind als die Unterschiede zwischen den Baumarten. Sie kommen auf eine Spanne von 0,5 bis 0,56 g C g^{-1} in Nadelbäumen. Der relative Standardfehler des Kohlenstoffgehaltes in Holz wird von Burschel et al. (1993) mit 1 bis 2 % angegeben, Weiss et al. (2000) benutzten 2 %. Insgesamt scheint daher ein mittlerer Kohlenstoffgehalt von 0,5 g C g^{-1} als gute Annahme für den durchschnittlichen Gehalt mit einem relativen Standardfehler von ± 2 % als angemessen.

6.4.2.2.7 Zustandsschätzer für 1987, 2002, 2008, 2012, 2017 und 2022

Einige Bundesländer verwenden ein Stichprobennetz, das dichter ist als 4 x 4 km. Darüber hinaus haben einige Bundesländer das Stichprobennetz zwischen den Inventuren verdichtet. Daher muss die Hochrechnung auf die Bundesfläche stratifiziert nach homogenen Netzdichten, sogenannten Samplingstraten, erfolgen. An dieser Stelle werden die Hochrechnungsprozeduren

für den stratifizierten Stichprobenplan für die Zielgrößen Derbholzvorrat, Biomasse und Kohlenstoff zu einem Zeitpunkt vorgestellt. Berechnet werden die Zustände zu den Zeitpunkten 1987, 2002, 2008, 2012, 2017 und 2022. Die Hochrechnungsalgorithmen sind für unterschiedliche Aussageeinheiten (gesamtes Bundesgebiet, verschiedene Regionen (Alte/Neue Bundesländer) und unterschiedliche LULUCF- bzw. ARD-Kategorien) identisch.

Die Bundeswaldinventur ist eine Traktstichprobe. Die kleinste Stichprobeneinheit ist der Trakt (Cluster) mit vier Trakt-Ecken (Probepunkten). An der Grenze des Inventurgebietes bzw. der Straten gibt es jedoch unvollständige Trakte mit variabler Größe, d.h. die Anzahl der Stichprobenpunkte (Trakt-Ecken im Wald und Nichtwald) innerhalb eines Traktes kann zwischen den Werten 1 bis 4 variieren. Für jeden Trakt *c*, der im Stratum *l* lokalisiert ist, muss vorab die lokale Dichte (*Y*) berechnet werden:

Gleichung 66:

$$Y_{lc} = \frac{\sum_{m=1}^{M} I_{l,c,m} Y_{l,c,m}}{M_{l,c}}$$

- *Y* = lokale Stichprobendichte
- *l* = Stratum
- *c* =Trakt
- *m* =Stichprobenpunkt
- *M* = Anzahl Stichprobenpunkte

Daraus ergibt sich der Mittelwertschätzer der Dichte bezogen auf Wald und Nichtwald für das Stratum *l* wie folgt:

Gleichung 67:

$$\hat{\bar{Y}}_l = \frac{\sum_{c_l=1}^{C_l} M_{l,c} Y_{lc}}{\sum_{c_l=1}^{C_l} M_l}$$

- $\hat{\bar{Y}}$= gewichteter Mittelwert der lokalen Stichprobendichte
- *l* = Stratum
- c = Trakt
- *C* = Anzahl Trakte
- *M* = Anzahl Stichprobenpunkte
- *Y* = lokale Stichprobendichte

Der Gesamtschätzer für eine Zielgröße über alle Straten hinweg ist ein mit den Flächenanteilen der Straten gewichteter Mittelwert aus den einzelnen Stratenschätzern:

Gleichung 68:

$$\hat{\hat{Y}}_{st} = \sum_{l=1}^{L} \hat{\hat{Y}}_l \frac{\lambda(U_l)}{\lambda(U)}$$

- $\hat{\hat{Y}}_{st}$= Gesamtschätzer
- l = Stratum
- U = Fläche
- λ= Schätzgröße

Das Total einer Zustandsschätzung ergibt sich durch Multiplikation des Gesamtschätzers mit der Gesamtfläche *λ(U)*.

Gleichung 69:

$$\hat{Y}_{st} = \hat{\bar{Y}}_{st} \lambda(U)$$

- $\hat{Y}_{st}$= Total Zustandsschätzung
- *st* = Zustand
- *U* = Fläche
- *λ* = Schätzgröße

Der (wald-) flächenbezogene Mittelwert ist definiert als Quotienten- oder Ratioschätzer aus:

Gleichung 70:

$$\hat{R}_{st} = \frac{\hat{Y}_{st}}{\lambda(U_{Wald})}$$

- $\hat{R}_{st}$ = Ratioschätzer
- $\hat{Y}_{st}$= Totaler Zustandsschätzer
- U_{Wald} = Waldfläche
- λ = Schätzgröße

6.4.2.2.8 Schätzer für die Vorratsveränderung nach der „Stock-Difference-Method“

Für die Berechnung der Veränderung zwischen zwei Zeitpunkten (den Perioden 1987-2002, 2002-2008, 2008 – 2012, 2012-2017, 2017-2022) wurde die CFI (Continuous Forest Inventory) Methode gewählt, d.h. für die Hochrechnung werden nur die Traktecken herangezogen, die zu beiden Zeitpunkten aufgenommen wurden. Die Veränderungsschätzung beruht somit auf der Differenz beider Zustandsschätzungen. Auf Ebene der Straten wird die Gesamtveränderung geschätzt durch:

Gleichung 71:

$$\hat{G}_l = \hat{Y}_l^{(t_2)} - \hat{Y}_l^{(t_1)}$$

- $\hat{G}_l$ = Gesamtveränderung im Stratum
- l = Stratum
- t = Zeitpunkt
- $\hat{Y}$ = Zustandsschätzung

Die Schätzung der Gesamtveränderung über die Straten hinweg für die gesamte Aussageeinheit erfolgt analog zu Gleichung 71. Die Schätzung des Veränderungstotals berechnet sich nach Gleichung 72. Die Veränderung des flächenbezogenen Mittelwertes ergibt sich aus:

Gleichung 72:

$$\hat{G}_{R\,st} = \hat{R}_{st}^{(t_2)} - \hat{R}_{st}^{(t_1)}$$

- $\hat{G}_{R_{st}}$ = Gesamtveränderung über die Straten
- t = Zeitpunkt
- $(\hat{R}_{st})$ = Ratioschätzer

6.4.2.2.9 Herleitung der jährlichen Veränderungsschätzungen

Da es sich bei der Bundeswaldinventur um eine periodisch wiederkehrende Inventur handelt, können für die Jahre in den Perioden nur durchschnittliche EF ermittelt werden. Um die Variabilität in den Perioden zu ermöglichen, wurde die Holzeinschlags-Faktor-Methode (logging factor method) verwendet (Röhling et al., 2016). Die durch die Holzernte verursachten Kohlenstoffverluste beeinflussen die Änderung der Kohlenstoffvorräte. Je höher die Menge des geernteten Holzes und den dadurch verursachten Kohlenstoffverlust in einem bestimmten Jahr im Vergleich zum periodischen Durchschnitt ist, desto mehr wird der EF entsprechend der Holzernte angepasst. Für die Holzeinschlags-Faktor-Methode (LFM) kommen folgende Gleichungen zur Anwendung:

Gleichung 73:

$$EF_{LFM} = EF * (1 + F_1)$$

- EF_{LFM} = Jährlicher mit dem Holzeinschlag korrigierter Emissionsfaktor (tC/ha*a)
- EF = Durchschnittlicher Emissionsfaktor der Inventurperiode (tC/ha*a)
- F_1 = Korrekturfaktor

Gleichung 74:

$$F_1 = \frac{(L_{fp} - L_{fa})}{L_{fp}}$$

- F_1 = Korrekturfaktor
- L_{fa} = jährlicher Holzeinschlag (m³)
- L_{fp} = periodischer Holzeinschlag (m³)

6.4.2.3 Totholz (CRF 4.A)

6.4.2.3.1 Verbleibende Waldfläche

Die Berechnung der Änderung des Totholzkohlenstoffvorrates erfolgt nach dem Tier 3-Ansatz mit der Vorratsveränderungsmethode (Stock-Difference Method, Equ. 2.19, IPCC (2006a)).

Für die Berechnung der Kohlenstoffvorräte im Totholz wurden die Daten der BWI 2002 (BMELV, 2005), der Inventurstudie 2008, der BWI 2012, der Kohlenstoffinventur 2017 und der BWI 2022 verwendet. Totholzdaten zum Zeitpunkt der BWI 1987 stehen nicht zur Verfügung, da bei dieser Inventur kein Totholz aufgenommen wurde. Die terrestrische Aufnahme der BWI 2002 beschränkte sich auf Totholz mit einem Durchmesser ab 20 cm am dickeren Ende bei liegendem Totholz bzw. BHD bei stehendem Totholz sowie Stöcke ab 50 cm Höhe oder 60 cm Schnittflächendurchmesser (Polley, 2001). Aufgrund der Vorgaben der Klimaberichterstattung wurde die Erfassungsgrenze für Totholzobjekte bei den Erhebungen der Inventurstudie 2008, der BWI 2012, der CI 2017 und BWI 2022 auf einen Durchmesser ab 10 cm am dickeren Ende gesenkt (BMELF, 2008). Bei allen vier Waldinventuren erfolgte eine Unterteilung in die drei Baumartengruppen Nadelbäume (NDH), Laubbäume (LBH) (außer Eiche) und Eiche (EI). Der Zersetzungsgrad des Totholzes wurde in vier Klassen angesprochen (BMELF, 2008), (Polley, 2001).

Die periodischen Emissionsfaktoren der Inventurperioden werden mit den jährlichen Holzeinschlagszahlen kalibriert, so dass für jedes Jahr ein an den Holzeinschlag angepasster EF vorliegt. Die Beschreibung des methodischen Vorgehens findet sich in (Röhling et al., 2016).

Für die Berichterstattung nach den 2006 IPCC Guidelines wurde aus den in der Inventurstudie erhobenen Daten die Relation des Totholzvorrates zwischen der Aufnahmegrenze von 10 cm und 20 cm ermittelt. Unter der Annahme, dass dieses Verhältnis zum Zeitpunkt der BWI 2002 gleich war, erfolgte die Schätzung des Totholzvorrates ab 10 cm Aufnahmegrenze für das Jahr 2002. Für die Totholzvorräte wurde die Biomasse für die einzelnen Zersetzungsgrade mit der Raumdichte nach Fraver et al. (2002) für Nadelholz und nach Müller-Using and Bartsch (2009) für Laubholz ermittelt. Für die Berechnung der Raumdichte des Laubholzes wurden die Totholzobjekte der Baumartengruppen Laubbäume (außer Eiche) und Eiche zusammengelegt. Einen Überblick über die verwendeten Biomasse-Expansionsfaktoren und deren Fehler getrennt nach Baumartenklassen und Zersetzungsgraden finden sich in Tabelle 358.

Tabelle 358: Biomasse Expansionsfaktoren (BEF) und deren Fehler (RMSE%) für die Baumarten-klassen und Zersetzungsgrade (NDH = Nadelbäume, LBH = Laubbäume, EI = Eiche)

Totholzart	Zersetzungsgrad		BEF	RMSE%	Quelle
NDH	1	frisch abgestorben	0.372	17,2	(Fraver et al.)
NDH	2	beginnende Zersetzung	0.308	27,9	(Fraver et al.)
NDH	3	fortgeschrittene Zersetz.	0.141	35,5	(Fraver et al.)
NDH	4	stark vermodert	0.123	25,2	(Fraver et al.)
LBH	1	frisch abgestorben	0.58	12,1	(Müller-Using & Bartsch)
LBH	2	beginnende Zersetzung	0.37	43,2	(Müller-Using & Bartsch)
LBH	3	fortgeschrittene Zersetz.	0.21	33,3	(Müller-Using & Bartsch)
LBH	4	stark vermodert	0.26	65,4	(Müller-Using & Bartsch)
EI	1	frisch abgestorben	0.58	12,1	(Müller-Using & Bartsch)
EI	2	beginnende Zersetzung	0.37	43,2	(Müller-Using & Bartsch)
EI	3	fortgeschrittene Zersetz.	0.21	33,3	(Müller-Using & Bartsch)
EI	4	stark vermodert	0.26	65,4	(Müller-Using & Bartsch)

Die jährliche Änderung des Kohlenstoffvorrates im Totholz wurde nach Gleichung 75 (Eq. 2.19, IPCC (2006a))berechnet. Die mittleren EF für die Inventurperioden auf der verbleibenden Waldfläche sind in Tabelle 359 zusammengefasst.

Gleichung 75:

$$\Delta C_{FF_{DW}} = \frac{A * \left(B_{t_2} - B_{t_1}\right)}{T} CF$$

mit:

- ΔC_{FFDW} = jährliche Änderung des Kohlenstoffes im Totholz auf verbleibenden Waldflächen
- A = Fläche des verbleibenden Waldes
- B_{t1} = Totholzvorrat zum Zeitpunkt t_1 (Beginn der Periode) für den verbleibenden Wald
- B_{t2} = Totholzvorrat zum Zeitpunkt t_2 (Ende der Periode) für den verbleibenden Wald
- $T=(t_2-t_1)$ = Zeitraum zwischen den beiden Schätzungen
- CF = Kohlenstoffkonversionsfaktor (Standardwert = 0,5)

Tabelle 359: Totholz-Emissionsfaktoren für die verbleibende Waldfläche, in [t C*ha]

	1990-2002	2003-2007	2008-2012	2013-2017	2018-2024
EF	0,037	0,097	-0,188	0,101	0,113

6.4.2.3.2 Neuwaldfläche

Die jährliche Änderung des Kohlenstoffvorrates im Totholz auf Neuwaldflächen wurde nach Equation 2.19 der 2006 IPCC Guidelines (IPCC, 2006a) berechnet. Sie ist identisch mit der Gleichung für die Veränderung der Totholzvorräte für verbleibenden Wald (siehe Gleichung 75). Für die Bestimmung von Totholzvorräten für Neuwaldflächen standen die Daten der BWI 2002, BWI 2012, CI 2017 und BWI 2022 zur Verfügung. Bei der Inventurstudie 2008 wurden keine

Neuwaldflächen erhoben und bei der BWI 1987 wurde kein Totholz erfasst. Die mittleren EF für die Inventurperioden auf Neuwaldflächen sind in Tabelle 360 zusammengefasst.

Tabelle 360: Totholz-Emissionsfaktoren für Neuwaldflächen, in [t C*ha]

	1990-2007	2008-2012	2013-2017	2018-2024
EF	0,034	0,229	0,101	0,113

6.4.2.4 Streu (CRF 4.A)

6.4.2.4.1 Verbleibende Waldfläche

Die Berechnung der Emissionen der Streu erfolgt modellbedingt zusammen mit dem mineralischen Boden. Deswegen ist in den CRF in den entsprechenden Feldern der Notation Key IE (included elsewhere) zu finden. Die Berechnung der Kohlenstoffvorratsveränderung für die mineralischen Böden inkl. der Streu erfolgt nach der Überlappungsmethode (overlap method) und verwendet einen Tier 3-Ansatz (IPCC, 2006a).

Für die Streu gelten die Beschreibungen für den mineralischen Boden im Kapitel 6.4.2.5.1. Das methodische Vorgehen wird ausführlich in dem Kapitel 6.4.2.5.3 ff. und die Ergebnisse im Kapitel 6.4.2.5.4 ff. beschrieben.

6.4.2.4.2 Neuwaldflächen

Für Neuwaldflächen erfolgt die Berechnung ebenfalls modellbedingt zusammen mit dem mineralischen Boden. Deswegen ist in den CRF der Notation Key IE (included elsewhere) zu finden. Für die Neuwaldflächen wird die Berechnung der Kohlenstoffvorräte für die mineralischen Waldböden inkl. Streu, die als Endvorrat für die Veränderungsrechnung einfließen, wie bei den verbleibenden Waldflächen mit einer Kombination aus zwei Methoden (overlap method) nach einem Tier 3-Ansatz durchgeführt (Equation 2.25, (IPCC, 2006a)).

Für die Streu gelten die Beschreibungen für den mineralischen Boden im Kapitel 6.4.2.5.2. Das methodische Vorgehen wird ausführlich in dem Kapitel 6.4.2.5.3 ff. und die Ergebnisse im Kapitel 6.4.2.5.4 ff. beschrieben.

Die Kohlenstoffänderungen in den mineralischen Böden inkl. der Streu auf Neuwaldflächen werden entsprechend den Methodenbeschreibungen im Kapitel 6.1.2.1 berechnet.

6.4.2.5 Mineralische Böden (CRF 4.A)

6.4.2.5.1 Verbleibende Waldfläche

Die Berechnung der Kohlenstoffvorratsveränderung für die mineralischen Böden erfolgt nach der Überlappungsmethode (overlap method) und verwendet einen Tier 3-Ansatz (2006 IPCC Guidelines - Equ. 2.25, IPCC (2006a)).

Die Berechnung der Kohlenstoffvorräte und -vorratsveränderungen in den mineralischen Böden basieren für den Zeitraum 1990 bis 2008 auf der "stock-difference-methode" und für den Zeitraum ab 2008 auf Ergebnissen des Modells Yasso15. Mit Einführung der neuen Methode erfolgte auch eine Regionalisierung der Böden (siehe auch Kapitel 6.1.2.1.3). Die dazu notwendigen Daten basieren auf den bundesweiten Bodenzustandserhebungen im Wald (BZE I-Wald und BZE II-Wald, siehe Kapitel 6.4.2.1.2 und Grüneberg et al. (2014)). Das methodische Vorgehen wird ausführlich in dem Kapitel 6.4.2.5.3 ff. und die Ergebnisse im Kapitel 6.4.2.5.4 ff. beschrieben.

Aktuell wird die dritte Bodenzustandserhebung im Wald (BZE III-Wald) durchgeführt. Mit den Ergebnissen der BZE III-Wald erfolgt eine Verbesserung der verwendeten Methode.

6.4.2.5.2 Neuwaldflächen

Für die Neuwaldflächen wird die Berechnung der Kohlenstoffvorräte für die mineralischen Waldböden, die als Endvorrat für die Veränderungsrechnung einfließen, wie bei den verbleibenden Waldflächen mit einer Kombination aus zwei Methoden (overlap method) nach einem Tier 3-Ansatz durchgeführt (Equation 2.25, (IPCC, 2006a)).

Das methodische Vorgehen wird ausführlich in dem Kapitel 6.4.2.5.3 ff. und die Ergebnisse im Kapitel 6.4.2.5.4 ff. beschrieben.

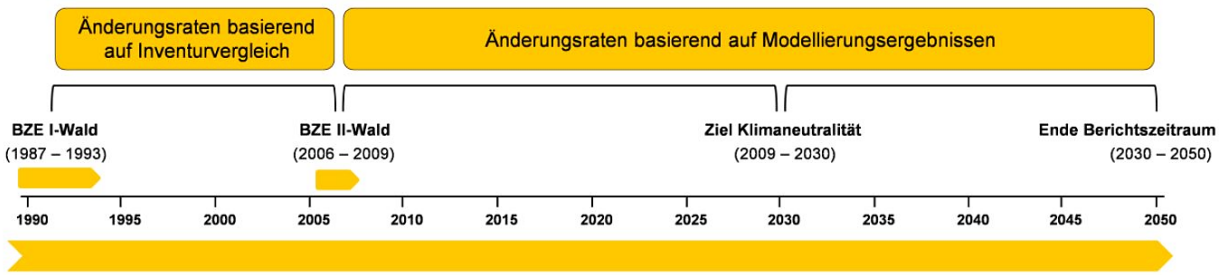
Die Kohlenstoffvorratsänderungen in den mineralischen Böden auf Neuwaldflächen werden entsprechend den Methodenbeschreibungen im Kapitel 6.1.2.1 berechnet.

6.4.2.5.3 Material und Methoden

6.4.2.5.3.1 Einleitung

Datengrundlage für die Berechnungen der jährlichen Veränderungsraten der organischen Kohlenstoffvorräte in der Humusauflage und im Mineralboden ist die bundesweite Bodenzustandserhebung im Wald (BZE Wald). Das Bodenkohlenstoffmodell Yasso15 (Yärvenpää et al., 2018, Tuomi et al., 2009) bezieht die Inventurergebnisse der BZE-Wald ein und diente zur Prognose der Änderungsraten bis zum Jahr 2050 (Abbildung 84). Dabei spiegeln die Modellergebnisse die jährlichen Änderungen der organischen Kohlenstoffvorräte bis in eine Mineralbodentiefe von 30 cm wider.

Abbildung 84: Zeitlicher Verlauf der Datenerhebung durch die Bodenzustandserhebung im Wald sowie die darauf basierende Bodenkohlenstoffmodellierung.



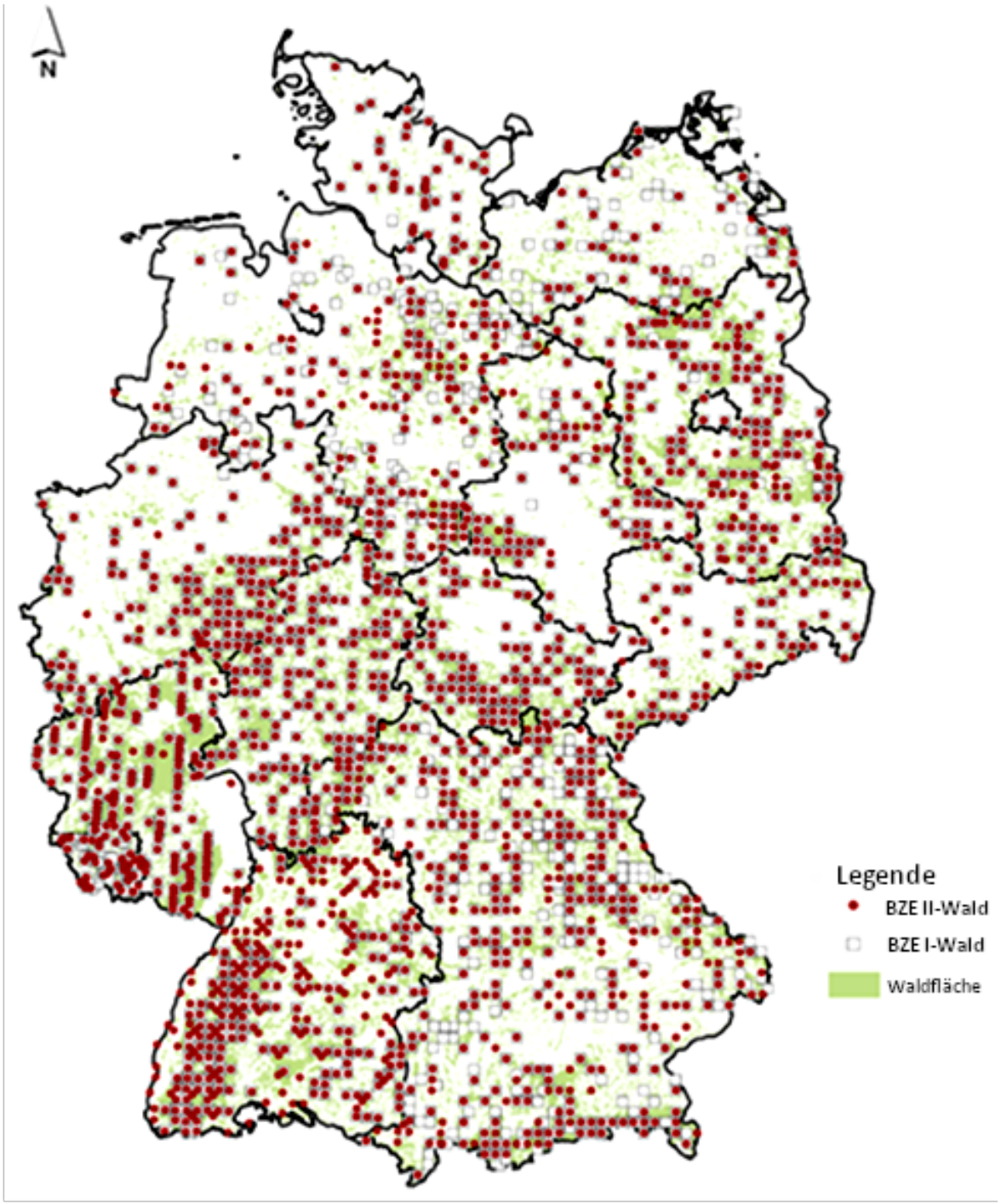
Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

6.4.2.5.3.2 Inventurdesign und Probennahme

Die BZE Wald ist ein Teil des Forstlichen Umweltmonitorings und erfasst auf einem landesweit repräsentativen und systematischen Stichprobennetz von 8 x8 km die gesamte Waldfläche Deutschlands. Entsprechend der föderalen Struktur der Bundesrepublik erheben die Bundesländer die Daten. Die erste Bodenzustandserhebung im Wald (BZE I-Wald) erfolgte auf Grundlage einer zu diesem Zweck entwickelten Arbeitsanleitung für bodenkundliche Außenaufnahmen (BMELV, 1990). Eine weiterentwickelte abgestimmte und vergleichbare Arbeitsanweisung zur bodenkundlichen Erhebung, die sich insbesondere auf die in Deutschland verwendete Bodenkundliche Kartieranleitung bezieht (Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden, 1982, 1994, 2005), kam bei der zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II-Wald) zur Anwendung (Wellbrock et al., 2006). Die erste Erhebung fand in den Jahren 1987 bis 1993 an 1.936 Stichprobenpunkten statt (Abbildung 85). Die Wiederholungsinventur wurde zwischen 2006 und 2008 zum Teil an den gleichen Stichprobenpunkten und zum Teil andernorts wiederholt. In dieser Auswertung wurden Daten von 1.865 Punkten der BZE I-Wald und 1.813 Punkte der BZE II-Wald berücksichtigt. Die wiederholte Beprobung eines BZE-Punktes floss als gepaarte und die nicht am gleichen Standort wiederholte Beprobung als ungepaarte Stichprobe

in die Auswertung ein. Während 624 BZE-Punkte nicht erneut beprobt wurden, kamen 577 neue hinzu, die mit der BZE II erstmalig beprobt wurden. Die nicht wiederholt beprobten Punkte der Erstinventur und die neu etablierten Punkte der BZE II flossen als ungepaarte Stichprobe in die Auswertung ein.

Abbildung 85: Räumliche Verteilung der Inventurpunkte der ersten und zweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE-Wald).

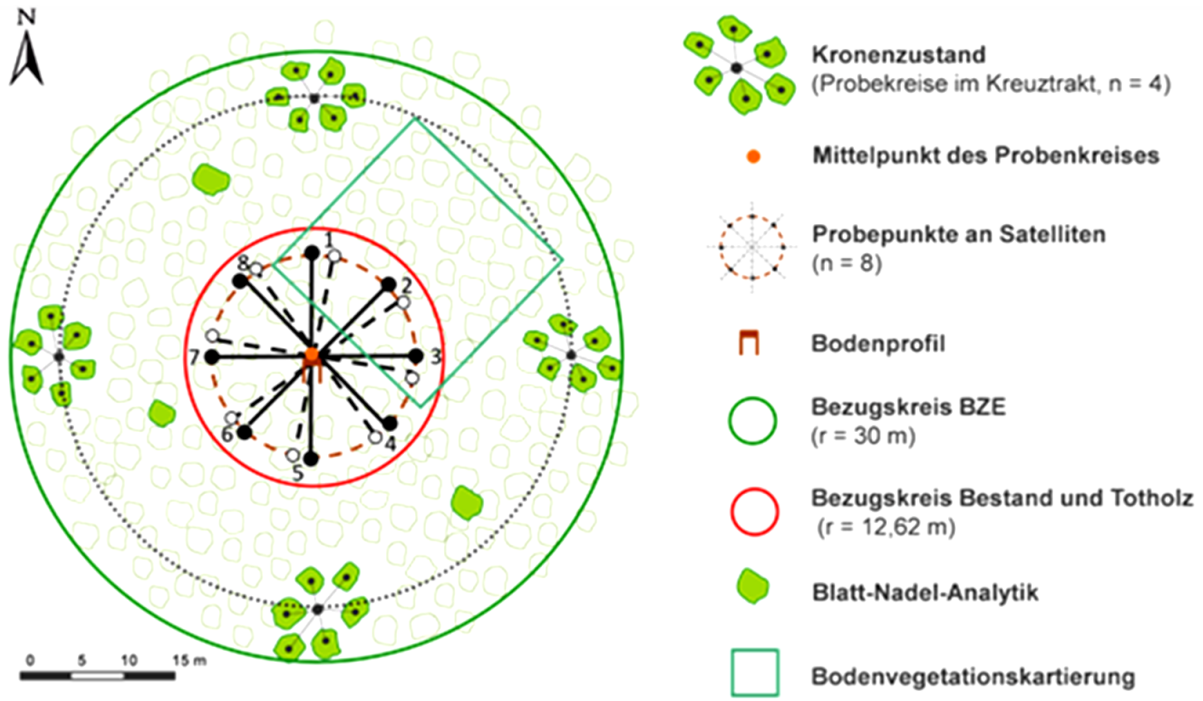


Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

Das Standardverfahren zur bodenkundlichen Beprobung der BZE-Punkte ist die Beprobung von Satelliten mit einem Bodenprofil am BZE-Mittelpunkt. Die Profilgrube liegt innerhalb eines 30

m-Radius der BZE-Fläche. Bei der Beprobung der Satelliten wurden zunächst in einem Abstand von 10 m vom BZE-Mittelpunkt acht, bis 90 cm Tiefe Bohrungen radial in einem Winkel von 50 Gon niedergebracht. Mit der Wiederholungsinventur erfolgen die Bohrungen auf dem ursprünglichen Umkreis mit gleicher Entfernung, jedoch um 10 Gon versetzt (Abbildung 86).

Abbildung 86: Aufbau eines Inventurpunktes der Bodenzustandserhebung im Wald (BZE-Wald)



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

Am Bodenprofil erfolgte die bodenkundliche Ansprache entsprechend der Arbeitsanleitung mit Beschreibung des Ausgangssubstrats der Bodenentwicklung und der Bodentypen sowie weiterer Merkmale, wie z. B. Gefüge, Textur oder Farbe. Die Beprobung der organischen Auflage erfolgte an den acht Satelliten mittels Stechrahmen, Stechzylindern oder speziellen Bohrern. Die organischen Horizonte wurden über alle Satelliten zu einer Mischprobe vereinigt. Bei der BZE I Wald blieben Äste, Zapfen sowie grüne Vegetationsanteile unberücksichtigt, wohingegen bei der Wiederholungsinventur ausschließlich Äste und Zapfen mit einem Durchmesser >20 mm unberücksichtigt blieben.

Für die chemischen Parameter des Mineralbodens wurden bei beiden Inventuren die oberen 30 cm an den Satelliten beprobt und zu einer Mischprobe vereinigt. Eine volumengetreue Beprobung des Mineralbodens ist zur Abschätzung des Feinbodenvorrats essentiell. Sie basiert auf der Masse und dem Gewicht der volumenbezogenen Fein- und Grobbodenfraktion. So zeigte eine Studie an einem Teilkollektiv von BZE-Proben, dass sich geschätzte Feinbodenvorräte signifikant von gemessenen Werten unterschieden (Wirth et al., 2004) Für eine volumengetreue Beprobung zur Bestimmung bodenphysikalischer Parameter wurden mittels Stechzylinder Proben aus der Stirnwand des Bodenprofils entnommen. Eine Schätzung z. B. der Trockenrohdichten war nur zulässig, wenn die Entnahme von Stechzylinderproben aufgrund des hohen Steingehalts nicht möglich war. Auf einigen Standorten erfolgte die Beprobung der Bodenphysik durch Rammkernsondierungen.

6.4.2.5.3.3 Probenvorbereitung und Laboranalytik

Obwohl die Bodenanalysen in verschiedenen Laboren erfolgten, konnte die Vergleichbarkeit der Methoden durch Ringanalysen gewährleistet werden (König & Wolff, 1993). Basierend auf dem Handbuchs Forstliche Analytik wurden die entsprechenden Labormethoden angewandt (GAFA, 2006). Die organische Auflage wurde für 48h bei 60°C getrocknet, danach durch ein Sieb <2mm gerieben und letztendlich analysefein gemahlen. Die Aufbereitung der Mineralbodenproben erfolgte durch Trocknung bei 40°C über 48h und anschließender Siebung <2mm und abschließendem analysefeinen mahlen. Bei den BZE I Proben kamen als Kohlenstoffanalyseverfahren entweder die Wösthoff Carmhographie, die indirekte Bestimmung durch Glühverlust bei 550°C oder die Nassveraschung mit $K_2Cr_2O_7$ und H_2SO_4 zum Einsatz. Die Bestimmung des Stickstoffs erfolgte entweder durch eine gaschromatographische Elementaranalyse oder dem Kjeldahl-Aufschluss mit anschließender photometrischer oder titrimetrischer Stickstoffbestimmung. Es sind alle Labormethoden in die anschließende Auswertung eingeflossen, wobei >79% der Proben ausschließlich mit der gaschromatographischen Elementaranalyse untersucht worden sind. Gesamtkohlenstoff und -Stickstoff an den Proben der Folgeinventur wurde ausschließlich gaschromatographisch mittels Elementaranalyse bestimmt. Während der anorganische Kohlenstoff des Mineralbodens anhand der Methode nach Scheibler erfolgte (Schlichting & Blume, 1966), wurde der organische Kohlenstoffgehalt karbonathaltiger Böden aus der Differenz zwischen Gesamt- und anorganischem Kohlenstoff ermittelt.

6.4.2.5.3.4 Berechnung der organischen Bodenkohlstoffvorräte

Die organischen Kohlenstoffvorräte (C) der Humusauflage berechneten sich aus einer Funktion von beprobter Fläche i.d.R. des Stechrahmens oder Stechzylinders (F) sowie dem Gewicht (W) und der Kohlenstoffkonzentration (C_{coc}) der entnommenen Probe (Gleichung 76):

Gleichung 76:

$$\boldsymbol{C = F * W * C_{coc}}$$

Die Berechnung der organischen Kohlenstoffvorräte der oberen 30 cm des Mineralbodens erfolgte zunächst durch die Bestimmung der Feinbodenvorräte (FES) aus einer Funktion von Daten zur Trockenrohdichte des Feinbodens (BDFE) und dem Volumen der Grobbodenfraktion (CSV) (Gleichung 77) oder dem Vorrat der Grobbodenfraktion (CSS) und der Trockenrohdichte des Gesamtbodens (BDg) (Gleichung 78).

Gleichung 77:

$$\boldsymbol{FES_i = BD_{FE_i} * \left(1 - \frac{CSV_i}{100}\right)}$$

Gleichung 78:

$$\boldsymbol{FES_i = BD_g * 100 - CSS_i}$$

Durch Multiplizieren der Feinbodenvorräte mit den organischen Kohlenstoffkonzentrationen ergibt sich der organische Kohlenstoffvorrat (C) (Gleichung 79).

Gleichung 79:

$$C = FES * C_{coc}$$

6.4.2.5.3.5 Berechnung der jährlichen Änderungsraten der organischen Bodenkohlenstoffvorräte

Raumbezogene Informationen aus den Bodenzustandserhebungen zum Waldbestand und zum Boden wurden mit flächendeckend verfügbaren Geodatensets verknüpft. Alle Standorte wurden entsprechend der Klassifikationsschemata der Geodatensets in deren Gruppen überführt. Um die organischen Kohlenstoffvorräte des Mineralbodens bestimmen zu können, wurden allen BZE-Standorten bestimmte Bodengruppen innerhalb der Bundesländer zugeordnet. Der Waldbestandstyp innerhalb der Bundesländer für jeden Punkt diente als Gruppierung zur Berechnung der organischen Kohlenstoffvorräte der Humusauflage. Die Einbeziehung der Waldflächen innerhalb der Bundesländer in das Klassifikationsschema wurde notwendig, damit länderspezifische Abweichungen vom Standardraster der BZE-Wald berücksichtigt werden können. Die CORINE Landbedeckungsdaten der Jahre 1990 und 2006 wurden zum einen zur Erfassung der Waldverteilung in Deutschland und zum anderen zur Unterscheidung der Bestandstypen Laub-, Nadel- und Mischwald herangezogen (EEA, 2010a), (EEA, 2010b). Der flächenbezogenen Berechnung der nationalen jährlichen Kohlenstoffspeicherungsrate liegt ohne Berücksichtigung von organischen Böden eine Waldfläche von 10,2 Mill. ha zugrunde (UBA et al., 2012). Weiterhin wurden Bodensubstratgruppen gebildet, deren Verteilung der nationalen Bodenübersichtskarte im Maßstab 1:1.000.000 entstammen (BGR, 1998). Die Bodenübersichtskarte enthält 72 Bodeneinheiten, aufgeschlüsselt nach Ausgangsgesteinen, die sich auf die überarbeitete FAO Legende beziehen (FAO, 1990). Jeder BZE-Punkt wurde anhand seiner bodenchemischen und -physikalischen Eigenschaften und der Bodenansprache den entsprechenden Leitbodeneinheiten zugeordnet. Von den 72 Leitbodeneinheiten ließen sich 52 durch BZE-Punkte zuordnen. Mit dem Ziel einer verbesserten Repräsentativität und statistischer Evidenz wurden diese Leitbodeneinheiten zu 16 neuen Bodensubstratgruppen entsprechend ihrer bodensystematischen sowie physikochemischen Eigenschaften zusammengefasst (Tabelle 361). Aufgrund ihrer kaum in ihrer Breite zu erfassenden heterogenen Eigenschaften blieben organische und anthropogene Böden in der Auswertung unberücksichtigt. Zusätzlich erfolgte eine noch weitgehendere, ausschließlich auf dem Bodensubstrat basierende Aggregierung der Bodensubstratgruppen (Böden mit geringer oder hoher Basensättigung aus Fest- oder Lockergestein), um eine Flächengewichtung der Humusauflage in Kombination mit dem Bestandstyp (Laub-, Misch- und Nadelwald) gewährleisten zu können.

Tabelle 361: Bodensubstratgruppen basierend auf den zusammengefassten Legendeneinheiten der Bodenübersichtskarte im Maßstab 1:1.000.000 (BÜK 1.000).

ID	Bodensubstratgruppen	Legendeneinheit
1	Böden aus nährstoffarmen Sanden	17, 25, 28, 31, 33, 34
2	Böden aus sandigen bis lehmigen Terrassen- oder Flussablagerungen	10, 11, 12, 16
3	Böden aus kalkhaltigen, lehmig-tonigen Terrassen- oder Flussablagerungen	8, 9, 13, 14, 15
4	Böden aus sandig-lehmigen Geschiebeablagerungen (ohne Stau- oder Grundwassereinfluss)	18, 19, 20, 21, 24, 26, 27, 30, 32
5	Böden aus sandig-lehmigen Geschiebeablagerungen (mit Stau- oder Grundwassereinfluss)	22, 23, 29
6	Böden der Lössgebiete (ohne Stau- oder Grundwassereinfluss)	35, 36, 37, 39, 40, 41, 42, 43, 45, 46
7	Böden der Lössgebiete (mit Stau- oder Grundwassereinfluss)	38, 44, 47, 48

ID	Bodensubstratgruppen	Legendeneinheit
8	Böden aus Umlagerungsprodukten der Kalk-, Dolomit-, Mergel- und Tonsteinverwitterung	49, 50, 51, 52, 67
9	Böden aus basischen und intermediären magmatischen Gesteinen	53, 54
10	Böden aus sauren magmatischen und metamorphen Gesteinen	55, 57
11	Böden aus sauren Sedimentgesteinen	58, 59, 60, 61, 63
12	Böden aus lösshaltigen Deckschichten über sauren Sedimentgesteinen oder magmatischen und metamorphen Gesteinen	56, 62, 64, 65, 66
13	Hochgebirgsböden	68
14	Moore	6, 7
15	Tidebeeinflusste Böden	2, 3, 4, 5
16	Initialböden	1, 69

Für die gepaarte Stichprobe wurden die jährlichen Kohlenstoffveränderungsraten der Humusauflage für die aggregierten Bodensubstratgruppen und Bestandstypen sowie des Mineralbodens für die Bodensubstratgruppen durch die Differenz der gemittelten Kohlenstoffvorräte zum jeweiligen Aufnahmezeitpunkt gebildet (Abbildung 87). Die Vorräte beziehen sich somit auf die vergangene Zeit zwischen den Inventuren (Gleichung 59):

Gleichung 80:

$$rC_m = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{(CII_i - CI_i)}{\Delta t_1}$$

Wobei rC_m die Veränderung der Kohlenstoffvorräte im Mineralboden oder in der Humusauflage der Kategorie m (Bodensubstratgruppen bzw. aggregierte Bodensubstratgruppen innerhalb des Bundeslands), CI_i der Bodenkohlenstoffvorrat der BZE I-Wald, CII_i der Bodenkohlenstoffvorrat der BZE II-Wald und Δt_i die Zeit zwischen beiden Inventuren des BZE-Punkts i ist.

Kohlenstoffvorratsänderungen bezüglich der ungepaarten Stichprobe (Abbildung 87) wurden durch gemittelte Kohlenstoffvorräte über die Bodensubstratgruppen für Mineralböden sowie über die aggregierten Bodensubstratgruppen und Bestandstypen für die Humusauflage unter Berücksichtigung der gemittelten Zeitpunkte der jeweiligen Erhebungen errechnet (Gleichung 81):

Gleichung 81:

$$rC_m = \frac{\left(\frac{1}{nII}\sum_{i=1}^{nII} CII_i - \frac{1}{nI}\sum_{i=1}^{nI} CI_i\right)}{\left(\frac{1}{nII}\sum_{i=1}^{nII} tII_i - \frac{1}{nI}\sum_{i=1}^{nI} tI_1\right)}$$

Um die mittlere jährliche Änderungsrate der Kohlenstoffvorräte für Deutschland abschätzen zu können, erfolgte die Verschneidung der Bodensubstratgruppen für den Mineralboden sowie für die aggregierten Bodensubstratgruppen sowie Bestandstypen mit der entsprechenden Waldfläche (Gleichung 82):

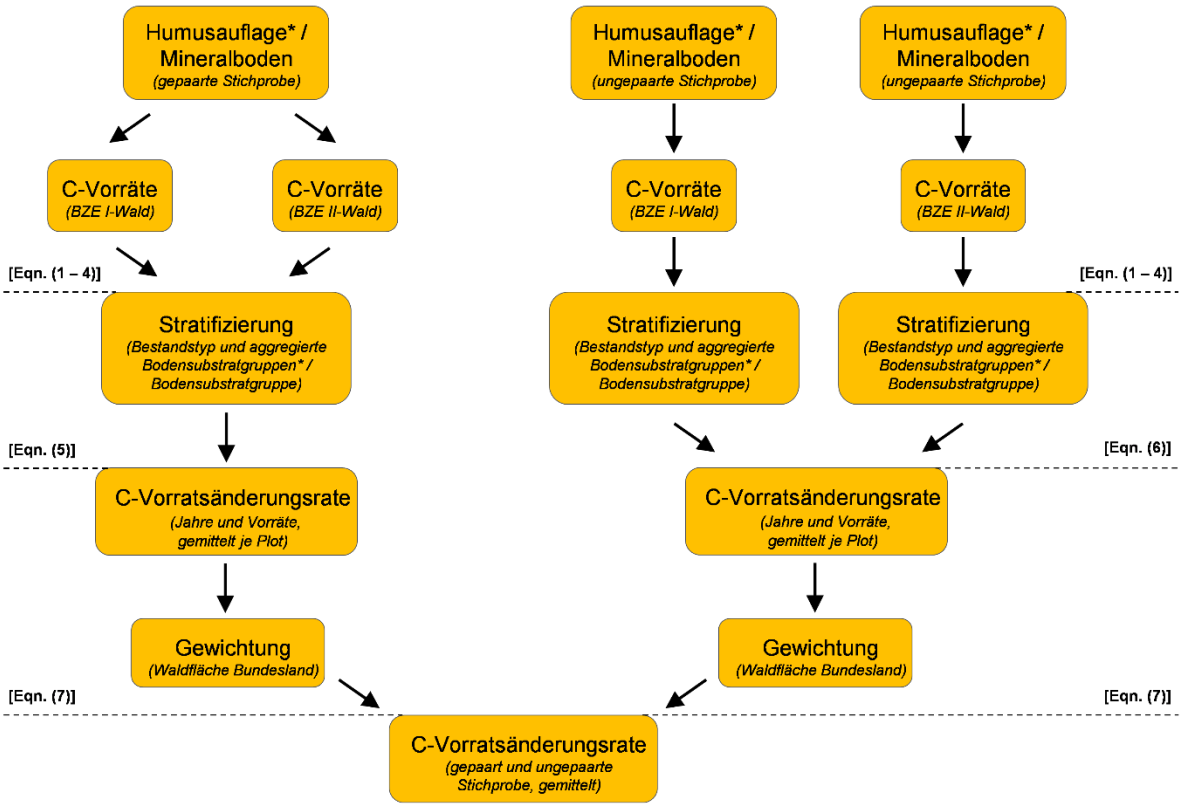
Gleichung 82:

$$rC_m = \frac{1}{\sum_{m=1}^{k} A_m} \sum_{m=1}^{k} rC_m * A_m$$

wobei A_m die Waldfläche von Kategorie m (Bodensubstratgruppen bzw. aggregierte Bodensubstratgruppen innerhalb des Bundeslands) ist. Dabei wurde eine Mindeststichprobengröße von n=5 angenommen. Die Flächendaten entstammen einer GIS-basierten Verschneidung der deutschen Bodenkarte BÜK 1.000 und der rasterbasierten CORINE Landbedeckungskarte. Dieser Ansatz ermöglichte die Berechnung flächengewichteter Mittelwerte, um etwaige bundeslandspezifische Unterschiede im BZE-Raster zu berücksichtigen.

Weiterhin ermöglichte die Bestimmung von standorts- und flächenbasierten Prozentangaben für die jeweilige Inventur die Beurteilung der Repräsentativität einer Stichprobe hinsichtlich der Skalierung auf Bodensubstratgruppenebene. Bei diesem Ansatz wurde die Waldfläche für die aggregierten Bodensubstratgruppen und Bestandstypen (Humusauflage) bzw. Bodensubstratgruppen (Mineralboden) auf die Gesamtwaldfläche innerhalb des jeweiligen Bundeslandes bezogen. Zusätzlich erfolgte die Verknüpfung der Anzahl der BZE-Punkte für die aggregierten Bodensubstratgruppen und Bestandstypen (Humusauflage) bzw. Bodensubstratgruppen (Mineralboden) mit der Gesamtanzahl der Inventurpunkte innerhalb der Bundesländer. Allerdings waren die flächen- und punktbezogenen Prozentangaben für beide Inventuren nicht signifikant verschieden voneinander.

Abbildung 87: Übersicht über die Berechnung der jährlichen Änderungsraten für organischen Kohlenstoff in der Humusauflage und im Mineralboden



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

6.4.2.5.3.6 Bodenkohlenstoffmodelierung

Mit dem Bodenkohlenstoffmodell Yasso15 ((Järvenpää et al., 2018) (Tuomi et al., 2009)) erfolgte in Monatsschritten eine Modellierung für alle Punkte der BZE Wald separat ab den jeweiligen Punktspezifischen Erhebungsjahren (1988 – 2001 für BZE I-Wald und 2004 – 2008 für BZE II-Wald) bis 2070. Die zur BZE I-Wald gemessenen Werte wurden als Startwerte herangezogen und nur falls keine Daten aus der Erstinventur vorlagen, fand die Modellierung mit den zur BZE II-Wald gemessenen Werten, statt. Die Modellergebnisse beziehen sich auf Änderungen der organischen Kohlenstoffvorräte bis in eine Mineralbodentiefe von 30 cm. Die bei der Modellierung benötigten Klimadaten (mittlere Monatswerte der Lufttemperatur und monatliche Niederschlagswerte) wurden bis zum Simulationsjahr 2023 aus den aktuellen, in 1 km^2 Auflösung vorliegenden Daten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) berechnet und mittels räumlicher Interpolation zwischen den jeweils nächsten vier Datenpunkten um einen BZE-Punkt angepasst. Dabei gingen die räumlichen Abstände und das Quadrat des geodätischen Höhenunterschieds umgekehrt proportional als Gewichtungsfaktoren ein. Ab dem Simulationsjahr 2024 wurden Klimaprojektionsdaten des IPCC Szenarios RCP4.5 benutzt ((IPCC, 2014; Meinshausen et al., 2011)). Diese Daten liegen für Deutschland in sechs Varianten mit 5 x 5 km^2 Auflösung vor, je herunterskaliert mit verschiedenen regionalen Klimamodellen (Dalelane et al., 2018). Diese Daten wurden für die Modellierung mit Yasso zu sechs Reihen von Teilsimulationen benutzt und das Endergebnis aus dem Median der sechs Teilsimulationen gebildet. Die räumliche Interpolation für die Klimaprojektionsdaten wurde nach derselben Methode wie für die gemessenen Klimadaten durchgeführt. Die Herleitung der Daten zu den Kohlenstoffeinträgen in den Boden an den jeweiligen BZE-Punkten und den entsprechenden Simulationsjahren erfolgte nach (Ziche et al., 2019). Zusätzlich erfolgte die Aktualisierung der für die jährlichen Variationen des organischen Inputs verantwortlichen Erntefaktoren bis 2024. Ab dem Simulationsjahr 2025 wurden Mittelwerte von 2014 bis 2023 genutzt.

Yasso15 wurde mit dem Modellierungsrahmen Sorcering (Scherstjanoi & Dechow, 2024) in der Softwareumgebung R (v.4.2.1, (The R Core Team, 2025)) ausgeführt. Totholz, welches als wichtige Inputquelle für Waldböden gilt, erforderte eine gesonderte Betrachtung bei der Modellierung. Es erhält in Yasso15 zwar spezielle Eigenschaften als Inputgröße, wird aber nicht als modellierte Zustandsgröße geführt, so dass ein Totholzanteil im modellierten organischen Kohlenstoff nicht mehr ausgemacht werden kann. Deshalb wurde zuerst eine Modellierung des gesamten organischen Kohlenstoffs durchgeführt und nachträglich die Menge an Totholz wieder abgezogen. Dies wurde sowohl bei der Initialisierung der Simulationen, als auch bei den Simulationen selbst angewandt. Zur Initialisierung der Simulationen erfolgte ein für alle BZE-Punkte einzeln durchgeführter Modell-Spinup über 3.000 Jahre. Das zum Ende des Spinups gewonnene Mengenverhältnis zwischen den Yasso Modellpools wurde vor dem Start der Simulationen auf die Summe aus a) gemessenen BZE-Startwerten für den organischen Bodenkohlenstoffvorrat und b) den neu berechneten Werten für Totholz übertragen und somit Startwerte für die Simulation generiert. Zur Bestimmung dieser Totholzmenge erfolgten zusätzlich separate Spinup-Läufe mit ausschließlich Holz-Input und ohne Holz-Input. Aus deren Ergebnissen und den Merkmalen des Holz-Inputs wurde die Menge an noch nicht verwittertem Totholz über die Verteilungen zwischen den fünf Yasso15 Modellpools abgeleitet (Scherstjanoi et al., in prep.). Ebenso wurde für das Totholz bei den anschließenden Simulationen verfahren.

Um Modellunsicherheiten abzubilden, erfolgten hundertfache Simulationen mit stochastisch variierenden Modellgrößen:

1. Aus 10.000 Modellparametersets wurde von den Yasso15-Entwicklern mittels Bayesischer Methoden und Markovketten Monte Carlo Sampling eine Liste erstellt, aus der je stochastischer Wiederholung eine zufällige Auswahl erfolgte.

2. Bereits von (Ziche et al., 2019) generierten zu jedem Kohlenstoffeintrag Verteilungen zur Berücksichtigung von Unsicherheiten, um daraus 100 Sets von Inputdaten durch Zufallsentnahmen zu erstellen. Nach Eliminierung unplausibler Werte (Verdopplung oder Halbierung des Kohlenstoffvorrats zwischen den Inventuren) blieben 1.672 Punkte für die Modellierung übrig, von denen 1.189 Punkte zum Kollektiv der BZE I Wald gehören.

Die Modellergebnisse eines jeden Ausgabejahres wurden auf die entsprechenden Klassen der Bodensubstratgruppen übertragen, um eine bundesweite kartographische Darstellung zu ermöglichen.

6.4.2.5.3.7 Unsicherheitsanalyse

Die Unsicherheiten der berechneten Kohlenstoffvorräte in der Humusauflage und im Mineralboden resultieren aus den individuellen Unsicherheiten der gemessenen Variablen (Gleichung 83) (Gesetz der Fehlerfortpflanzung, ISO/IEC Guide 98–3: 2008):

Gleichung 83:

$$S_y^2 = \left(\sum_{i=1}^{n} \frac{\partial y}{dx_1} S_{x1}\right)^2 + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} \frac{\partial_y}{d_{x_i}} \frac{\partial y}{dx_j} cov(x_i, x_j)$$

mit

$$y = \int (x_1, \ldots, x_n)$$

- $S_{x_i} = Standardabweichung\ vom\ Mittelwert\ x_1$,
- cov(x_i,x_j) = Kovarianz von x_i und x_j,
- $\frac{\partial_y}{d_{x_i}} \frac{\partial_y}{d_{x_j}}$ = partielle Abweichung von y entsprechend x_i und x_j

Zunächst wurden Unsicherheiten berechnet, die sich aus der Stichprobenvarianz ergeben. Hinsichtlich der Humusauflage (Bestandstyp und Bundesland) und des Mineralbodens (Bodensubstratgruppe und Bundesland) erfolgte die Ermittlung der Varianz der organischen Bodenkohlenstoffvorräte individuell für jede Kategorie. Inkludiert in jede dieser Kategorien wurden Standardfehler und Mittelwert von FESI, FESII, C_{orgI}, C_{orgII}, Δ_t sowie die Kovarianz zwischen diesen Variablen und die Stichprobenanzahl entsprechend Gleichung 80, Gleichung 81 und Gleichung 82. Beim ungepaarten Stichprobenkollektiv spielte die Kovarianz der Variablen zwischen den Inventuren keine Rolle. Die darauffolgende Kombination der Varianz der individuellen Kategorien ermöglichte die Berechnung einer flächengewichteten Gesamtvarianz (Gleichung 84):

Gleichung 84:

$$S^2{}_{rC} = \frac{\sum_{m=1}^{k} A^2 m^{C^2} rCm}{\left(\sum_{m=1}^{k} A_m\right)^2}$$

mit

- $S^2{}_{rC}$ = Gesamtvarianz
- $c^2{}_{rCm}$ Varianz der Kategorie m,
- A_i = Fläche der Kategorie m.

Um den Einfluss der Eingangsvariablen auf die gesamten Stichprobenvarianz zu bewerten, wurde jeder Term von Gleichung 60 separat berechnet und als Prozentangabe aus der Summe der Absolutwerte ausgedrückt (Schrumpf et al., 2011). Allerdings wurden für diese Auswertung ausschließlich Feinbodenvorräte von BZE-Punkten verwendet, die wiederholt beprobt worden sind. Zusätzlich zur Stichprobenvarianz ergeben sich Unsicherheiten aus verschiedenen Messtechniken. Ergebnisse von Ringanalysen zwischen den verschiedenen Laboren dienten zur Quantifizierung der Unsicherheiten für die Kohlenstoffanalysen. Mit diesen Ergebnissen ließen sich die Unsicherheiten der Kohlenstoffanalysen innerhalb der Labore abschätzen. Bezugnehmend auf die zwischen den Laboren erfolgten Ringtests zur Bestimmung der Kohlenstoffkonzentrationen von Proben der BZE II-Wald wurde die Wiederholstandardabweichung als zusammengefasste Intra-Labor-Standardabweichung innerhalb der Labore und die Inter-Labor-Standardabweichung genutzt, um die Standardabweichung aller Mittelwerte abzuschätzen. Dies wiederum erlaubt die Berechnung der Vergleichsstandardabweichung (Gleichung 85), die sich als Maß zur Abschätzung von Messunsicherheiten eignet.

Gleichung 85:

$$S^2_R = S^2_L + S^2_r$$

mit

- S_R = Vergleichsstandardabweichung,
- S_r = Wiederholungsstandardabweichung,
- S_L = Standardabweichung zwischen den Laboren

Die Vergleichsstandardabweichungen der Ringtests zwischen den Laboren lagen zwischen 0,9 mg/g und 2,9 mg/g für Mineralböden ohne und mit Karbonat. Für die Humusauflage ergab sich eine Vergleichsstandardabweichungen von 20,2 mg/g. Somit liegen alle Werte im Bereich von 5% um die Stichprobenmittel. Für karbonathaltige Bodenproben ergab sich ein Variationskoeffizient von 18%. Die von (Wolff & Riek, 1997) veröffentlichten Variationskoeffizienten zu Auswertungen von Ringanalysen zur BZE I-Wald schwankten für die Humusauflage zwischen 5 und 10% und für den Mineralboden zwischen 5 und 20%. Weiterhin ergeben sich Unsicherheiten, die auf methodologischen Änderungen von Analysetechniken zwischen der ersten und zweiten Erhebung beruhen. An 40 Bodenproben, bei denen während der BZE I-Wald die Bestimmung der organischen Kohlenstoffkonzentration durch Nassveraschung mit Kaliumdichromat-Lösung ($K_2Cr_2O_7$) erfolgte, wurde eine erneute Analyse mit der während der BZE II-Wald angewandten Methode der trockenen Verbrennung durchgeführt. Die organischen Kohlenstoffkonzentrationen in der Humusauflage ergaben im Mittel für die BZE I Wald (Nassveraschung) 309,9 ± 11,9 mg/g und für die BZE II Wald (trockene Verbrennung) 320,8 ± 12,6 mg/g. Dabei lag der quadrierte mittlere quadratische Fehler (RMSE) bei 54,3 mg/g. Im Mineralboden hingegen sank die organische Kohlenstoffkonzentration von 12,2 ± 1,0 mg/g auf 11,3 ± 1,1 mg/g, wobei der RMSE 2,8 mg/g ergab. Für die Kohlenstoffkonzentrationen beider Datenkollektive wurde eine Regressionsanalyse durchgeführt. Varianzhomogenität der Kohlenstoffkonzentrationen des Mineralbodens wurde durch eine Log Transformation gewährleistet. Für beide Datenkollektive ergab die F-Statistik weder eine signifikante Abweichung von 0 noch eine signifikante Abweichung des Regressionskoeffizienten von 1. Somit lässt sich kein systematischer Fehler durch die Änderung der Messmethoden nachweisen. Für die Abschätzung der Unsicherheiten der Feinbodenvorräte wurden nur BZE-Punkte ausgewählt, die als gepaarte Stichprobenpunkte und zu denen an beiden Inventuren gemessene Werte

vorlagen. Gleichbleibende Feinbodenvorräte zu beiden Inventuren wurden angenommen. Ein Vergleich der Feinbodenvorräte zwischen den Inventuren ergab keine signifikanten Unterschiede. Die Messunsicherheit für Feinbodenvorräte lässt sich durch die mittlere Abweichung zuzüglich der Abweichung der Feinbodenvorräte (Standardfehler) bestimmen. Die Varianz der jährlichen Kohlenstoffvorratsänderungen wurden kombiniert mit den Messunsicherheiten der Analysetechniken, um die Unsicherheiten für Kategorie m zu erhalten (Gleichung 86):

Gleichung 86:

$$u^2{}_{rCm} = S^2{}_{rCm} + \left(\frac{C_{org_m}}{(\Delta t_m)} MD_{FES}\right)^2 + \left(\frac{FESI}{(\Delta t_m)} S_{C_{org_{RI}}}\right)^2 + \left(\frac{FESII}{(\Delta t_m)} S_{C_{org_{RII}}}\right)^2$$

mit

- $S^2{}_{rCm}$ = Stichprobenvarianz der Bodenkohlenstoffvorräte in Kategorie m,
- MD_{FES} = mittlere Abweichung der Feinbodenvorräte (+ Standardfehler) zwischen beiden Inventuren,
- C_{org_m} = mittlere organische Kohlenstoffkonzentration on Kategorie m,
- $S_{C_{org_{RI}}} S_{C_{org_{RII}}}$ = Unsicherheiten der Bestimmung der Kohlenstoffkonzentrationen während beider Inventuren (I, II),
- $FESI_m$, $FESII_m$ = Feinbodenvoräte in Kategorie m
- Δt_m = mittlere Zeit zwischen beiden Inventuren in Kategorie m

Die flächengewichtete Gesamtunsicherheit wurde entsprechend Gleichung 84 ermittelt.

6.4.2.5.3.8 Statistik

Alle statistischen Analysen wurden mit SAS 9.2. (SAS Institut, Carry, NC, USA) ausgeführt. Die Daten wurden allesamt als ungepaart betrachtet und auf Normalverteilung (Shapiro-Wilk-Test) und Varianzhomogenität (Levene-Test) getestet. Um auch nicht-normalverteilte Daten statistisch testen zu können, wurden diese durch Ziehen der Quadratwurzel oder Log-Transformation in eine Normalverteilung überführt. Zwei-Wege-ANOVA Typ I sowie der Tukey-Kramer-Test wurden für statistische Tests mit Signifikanzniveau α= 0,05 verwendet. Die Stichproben wurden von statistischen Ausreißern bereinigt, indem nicht normal oder untypische und zu Verzerrungen tendierende Beobachtungen eliminiert wurden. Die Bereinigung von Ausreißern erfolgte durch eliminieren von Werten, die sich außerhalb der doppelten Standardabweichung (x±2σ) der nach Bestand oder Bodensubstratgruppe zusammengefasste Einheiten befanden. Zudem wurden die Bodenkohlenstoffvorräte der gepaarten Stichprobe durch eine einfache lineare Regression auf Ausreißer untersucht, indem Hebelwerte (leverage) bei 3(p+1)/n und studentisierte Residuen außerhalb des Wertebereich ±√n-k-1 eliminiert wurden.

6.4.2.5.4 Ergebnisse

6.4.2.5.4.1 Inventurbasierte Änderungsraten der Kohlenstoffvorräte in der Streu

Die für Deutschland in der Humusauflage (Streu) gespeicherten Kohlenstoffvorräte sanken vom Zeitpunkt der BZE I-Wald von 19,0 ± 0,33 t/ha mit der Wiederholungsinventur auf 18,8 ± 0,3 t/ha. Der Jährliche Verlust an Kohlenstoff beläuft sich somit auf 0,02 ± 0,02 tC/ha/a. Die Änderungen sind nicht signifikant, da sowohl der Standardfehler als auch die Änderungsrate

einen gleichhohen Betrag aufweisen und die Gesamtunsicherheit mit 0,03 tC/ha sogar höher ausfällt. In Hinblick auf die aggregierten Bodensubstratgruppen speichert die Humusauflage auf Böden aus Festgestein mit hoher Basensättigung die geringsten Mengen Kohlenstoff, während Böden aus Lockersedimenten mit niedriger Basensättigung die größte Speicherkapazität aufwiesen (Tabelle 362). Ebenso variierten die Vorräte in der Humusauflage zwischen den Waldbeständen beträchtlich. Während unter Laubwald auf basenreichen Böden aus Festgestein die Speicherleistung am geringsten war, ergaben sich unter Nadelwäldern aus basenarmen Böden aus Lockersubstraten die höchsten Werte. Sowohl die Kohlenstoffvorräte der Humusauflage zwischen den aggregierten Bodensubstratgruppen als auch zwischen den Beständen unterscheiden sich signifikant voneinander (ANOVA; P<0,001). Dies gilt für beide Inventuren. Allerdings sind die Veränderungen zwischen den Inventuren sowohl für die aggregierten Bodensubstratgruppen als auch für die Bestände ungerichtet (ANOVA; P<0,001). Es gab einen Vorratsanstieg auf Lockersedimenten mit niedriger Basensättigung unter Nadelwald, während grundsätzlich auf Festgestein und allen Bestandstypen eine Abnahme zu verzeichnen war (Tukey; P<0,05).

Tabelle 362: Mittlere Kohlenstoffvorräte und deren Änderungen in der Humusauflage für die BZE I-Wald und BZE II-Wald auf verschiedenen aggregierten Bodensubstratgruppen und unter Waldbeständen

Aggr. Boden- Substrat-Gruppen	Bestandstyp	C-Vorrat BZE I Wald		C-Vorrat BZE II Wald		rC	rC (UC)
		n	[t/ha]	n	[t/ha]	[t/ha/a]	[t/ha/a]
1 Lockersedimente mit niedriger Basensättigung	Nadelwald	148	26,2 ± 1,2 [1)]	152	28,5 ± 1,0 [1)]	0,15 ± 0,08	0,11
	Mischwald	5	19,6 ± 7,2	5	11,2 ± 5,7	−0,62 ± 0,15	0,23
2 Lockersedimente mit hoher Basensättigung	Laubwald	100	8,0 ± 0,6	102	5,9 ± 0,5	−0,14 ± 0,04	0,07
	Nadelwald	216	21,5 ± 0,8	183	24,9 ± 1,0	0,23 ± 0,07	0,09
	Mischwald	77	17,1 ± 1,2	79	17,2 ± 1,6	0,00 ± 0,11	0,10
3 Festgesteine mit niedriger Basensättigung	Laubwald	116	10,7 ± 0,8 [1)]	106	8,3 ± 0,6 [1)]	−0,18 ± 0,06	0,07
	Nadelwald	342	26,4 ± 0,7 [1)]	334	25,5 ± 0,7 [1)]	−0,08 ± 0,05	0,07
	Mischwald	187	18,9 ± 0,9 [1)]	180	16,2 ± 1,0 [1)]	−0,17 ± 0,06	0,08
4 Festgesteine mit hoher Basensättigung	Laubwald	79	5,7 ± 0,4 [1)]	95	4,5 ± 0,3 [1)]	−0,09 ± 0,03	0,03
	Nadelwald	77	14,3 ± 0,6 [1)]	50	9,6 ± 0,9 [1)]	−0,30 ± 0,06	0,08
	Mischwald	74	10,4 ± 0,7 [1)]	78	6,1 ± 0,5 [1)]	−0,28 ± 0,05	0,08

[1)] basierend auf Signifikanzlevel von α = 0,05, basierend auf eine Zwei-Wege-Varianzanalyse Typ I (ANOVA) mit nachgeschalteten Tukey HSD Test, Vergleich der Inventuren über aggregierte Bodensubstratgruppen

6.4.2.5.4.2 Inventurbasierte Änderungsraten der Kohlenstoffvorräte im Mineralboden

Die für Deutschland abgeschätzten mittleren organischen Kohlenstoffvorräte im Mineralboden bis 30cm Tiefe sind von 55,6 ± 3,4 t/ha während der BZE I Wald auf 61,8 ± 3,7 t/ha während der BZE II Wald gestiegen, was entsprechend des Berechnungsverfahrens eine jährliche Speicherung von 0,41 ± 0,03 tC/ha ergab. Die Varianzanalyse ergab eine signifikante Vorratszunahme (ANOVA; P<0,001) und eine Gesamtunsicherheit von 0,11 tC/ha. Zwischen den Bodensubstratgruppen ergaben sich ebenso signifikante Unterschiede (ANOVA; P<0,001), wobei die Interaktionen zwischen den Klassenvariablen auf eine texturabhängige Abhängigkeit der Kohlenstoffvorräte hinweist. Dies zeigt sich in geringeren Vorräten in Böden aus sandigem Substrat im Vergleich zu einer mäßigen Kohlenstoffakkumulation in lehmigen Böden des Tieflands sowie in Böden aus Festgestein der Bergländer und Mittelgebirge (Tabelle 363). Trotz geringer Kohlenstoffvorräte verzeichneten besonders die sandigen Böden des Tieflands hohe Zunahmen (Tukey, P<0,05). Besonders in karbonathaltigen Böden fanden sich unabhängig ihrer Verbreitung hohe Vorräte. Die Böden aus Festgestein des Hügellands und Mittelgebirge sowie in den Böden der Alpen waren geprägt durch moderate Akkumulationsraten (Tukey, P<0,05). Kohlenstoffvorratsänderungen in Böden aus karbonatischem Gestein wurden nicht festgestellt. Die

Ergebnisse zeigen, dass signifikante positive Änderungen Standorte mit initialen niedrigen Vorräten betreffen, während Böden mit hohen Vorräten keine signifikanten Änderungen unterlagen.

Tabelle 363 Kohlenstoffvorräte und deren Veränderungen in den oberen 30 cm des Mineralbodens für die BZE I-Wald und BZE II-Wald in verschiedenen Bodensubstratgruppen

Boden-Substrat-Gruppen	C-Vorrat BZE I Wald		C-Vorrat BZE II Wald		rC	rC (UC) 1)
	n	[t/ha] 2)	n	[t/ha] 2)	[t/ha/a]	[t/ha/a]
1	201	52,8 ± 1,6 3)	187	65,5 ± 6.8 3)	0,95 ± 0,12	0,24
2	56	60,5 ± 2,6	62	65,0 ± 4.9	0,02 ± 0,20	0,31
3	20	67,3 ± 3,2	25	68,1 ± 2.4	0,20 ± 0,33	0,88
4	105	66,4 ± 1,8	87	64,1 ± 4.5	0,14 ± 0,12	0,29
5	77	33,4 ± 1,6 3)	75	52,8 ± 2.2 3)	1,19 ± 0,14	0,21
6	34	24,6 ± 1,6 3)	34	43,7 ± 1.8 3)	1,35 ± 0,19	0,24
7	126	55,8 ± 1,5 3)	109	63,0 ± 2.2 3)	0,47 ± 0,12	0,20
8	110	76,3 ± 2,4	106	79,1 ± 0.8	−0,17 ± 0,16	0,83
9	36	77,1 ± 4,9	43	68,3 ± 1.0	−0,71 ± 0,28	1,39
10	55	56,7 ± 2,1	63	60,8 ± 0.8	0,19 ± 0,14	0,56
11	39	51,3 ± 3,2	39	54,6 ± 0.9	0,38 ± 0,17	0,36
12	187	59,5 ± 1,7 3)	163	62,5 ± 2.2 3)	0,11 ± 0,10	0,31
13	222	54,7 ± 1,4 3)	233	60,1 ± 4.1 3)	0,44 ± 0,08	0,23
14	245	50,5 ± 1,2 3)	257	55,3 ± 3.2 3)	0,35 ± 0,08	0,18
15	30	51,8 ± 2,9	30	49,0 ± 0.9	−0,26 ± 0,20	0,64
16	34	84,4 ± 6,2 3)	26	104,5 ± 0.5 3)	0,40 ± 0,46	2,40

1) UC, Unsicherheiten

2) ± Ausgewiesener Standardfehler

3) basierend auf Signifikanzlevel von α = 0,05, basierend auf eine Zwei-Wege-Varianzanalyse Typ I (ANOVA) mit nachgeschalteten Tukey HSD Test, Vergleich der Inventuren über Bodensubstratgruppen

In Oberböden von Wäldern sind im Vergleich zu Unterböden die Änderungen von Kohlenstoffvorräten besonders ausgeprägt. Dementsprechend fanden sich mit der Wiederholungsinventur signifikante Veränderungen in allen Tiefenstufen (ANOVA; P<0,001). Zudem variierten in allen Tiefenstufen zwischen den Bodensubstratgruppen die Vorräte signifikant (ANOVA; P<0,001). Weiterhin gab es signifikante Interaktionen zwischen den Klassenvariablen, was den Auswertungsansatz über eine Klassifizierung unterstütz, da in der Magnitude der Veränderungen jeder Tiefenstufe die Bodensubstratgruppen einen hinlänglichen Teil der Varianz erklären. Bei Betrachtung der obersten Tiefenstufe zeigte sich mit der Wiederholungsinventur in fast allen Bodensubstratgruppen eine Vorratszunahme. Die Magnitude der Zunahme sank jedoch mit zunehmender Tiefe. Auch hier wiesen die sandigen Böden des Tieflands die höchsten Zunahmen in allen Tiefenstufen auf. In den darunter folgenden Tiefenstufen waren in den meisten Boden-substratgruppen die Zunahmen weniger ausgeprägt. Abgesehen von den sandigen Böden des Tieflands zeigen auch die nährstoffarmen Böden des Hügellands und der Mittelgebirge eine Zunahme in den unteren Tiefenstufen.

6.4.2.5.4.3 Modellierte Änderungsraten der organischen Bodenkohlenstoffvorräte

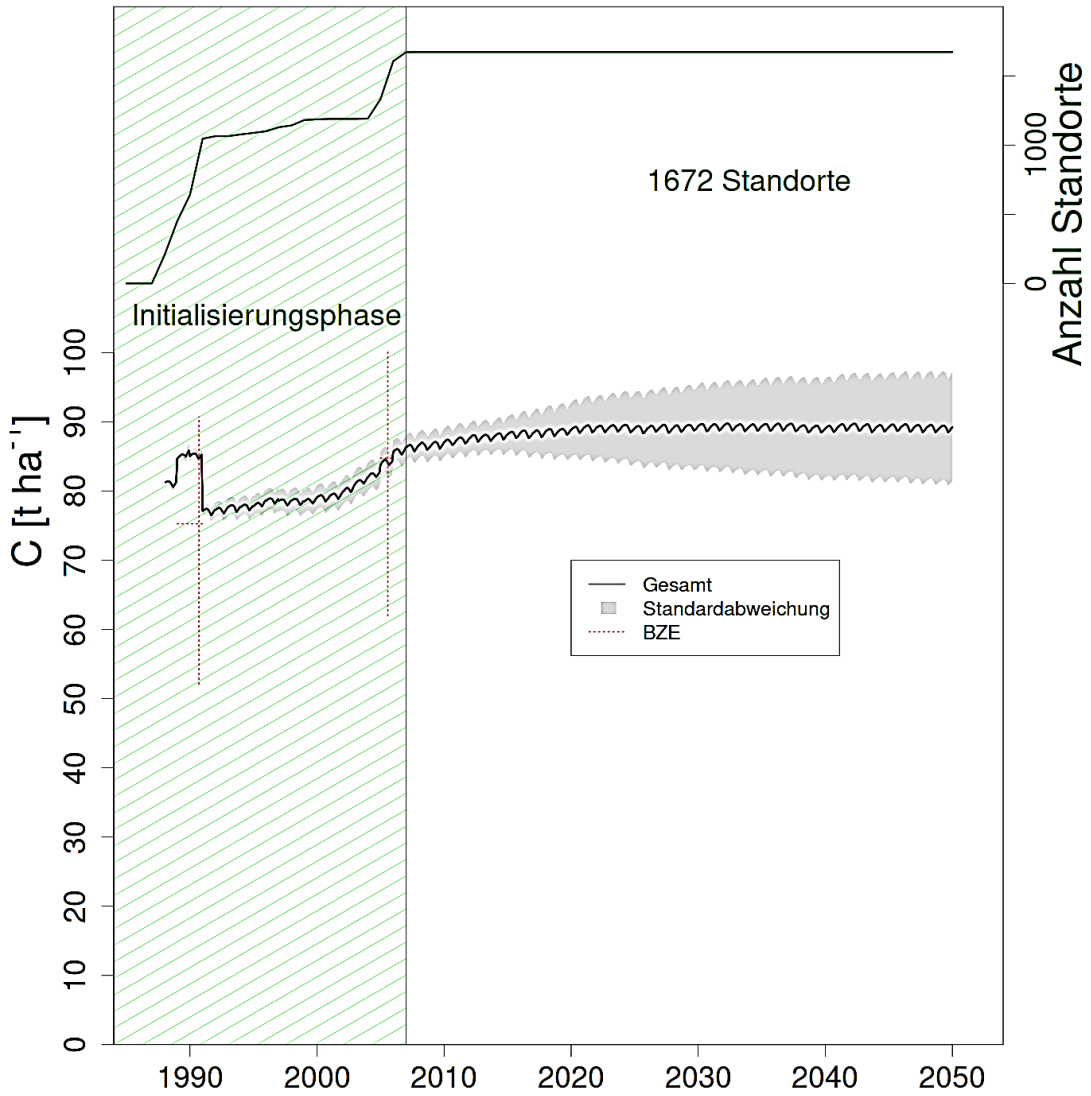
In Abbildung 88 wird anhand der mit Yasso modellierten mittleren Bodenkohlenstoffvorräte deutlich, dass

1. sich der Trend von BZE I-Wald zu BZE II-Wald in den Modellergebnissen widerspiegelt,
2. sich bevor der Trend abflacht, die Vorräte von 2018 bis 2023 stärker zunehmen und

3. die mittleren Modellergebnisse zum Anfang der Simulationen Schwankungen unterworfen sind.

Die starken Zunahmen zwischen 2018 und 2023 stammen von einem erhöhten Schadholzeinschlag in dieser Periode. Die anfänglich großen Sprünge zum Anfang in den Simulationen sind dadurch bedingt, dass sich die Grundgesamtheit ändert und nicht davon ausgegangen werden kann, dass die wenigen 100 vor 1991 gestarteten Simulationen repräsentativ für Deutschland sind (grüne Linie in Abbildung 88). Das ist vollständig erst nach Ablauf der Initialisierungsphase ab 2008 der Fall. Die mittleren modellierten Änderungsraten der Bodenkohlenstoffvorräte der in den jeweiligen neuen Leitbodeneinheiten befindlichen BZE-Punkten wurden für jedes Simulationsjahr bestimmt. Wegen der nicht vollständigen Anzahl an Standorten in der Initialisierungsphase erfolgte dazu nach der Stratifizierung zu Bodensubstratgruppen für den Zeitraum vor 2008 eine rückwärtsgerichtete lineare Interpolation der Modellergebnisse. Dazu wurde die zwischen den Inventuren berechnete jährliche Speicherungsrate für jede Bodensubstratgruppe berechnet und als Faktor für die lineare Extrapolation verwendet. Unter Berücksichtigung dessen ergeben sich Änderungsraten von ca. 0,43 tC/a für 1970 bis 2030 und von ca. 0,35 tC/a für 1970 bis 2050.

Abbildung 88: Mittlere modellierte Bodenkohlenstoffvorräte in [t ha^{-1}]



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

Der obere Linienverlauf in Grün zeigt die erstmalige Erfassung der einzelnen 1.672 Standorte, während die Linien in rot BZE Messungen (senkrecht: 1. bis 3. Quantil der Messwerte, waagerecht: 1. bis 3. Quantil der Erfassungsjahre) dargestellen. Der Unsicherheitsbereich wird vom 15. und 85. Perzentil begrenzt und verdeutlicht den Einfluss von Parameter- und Modell-Input-Unsicherheiten.

6.4.2.6 Organische Böden (CRF 4.A)

In diesem Kapitel wird einzig auf die CO_2-Emissionen aus organischen Böden eingegangen. Diese werden in der CRF 4.A unter organische Böden eingetragen. Für die Treibhausgase N_2O und CH_4 wird das methodische Vorgehen im Kapitel 6.1.2.2 beschrieben. Diese Emissionen werden in die CRF 4(II) berichtet.

6.4.2.6.1 Verbleibende Waldfläche

Die Ermittlung der Flächen der organischen Böden erfolgte georeferenziert durch Verschneidung der "Karte organischer Böden" und der ATKIS®-Daten. Dabei wird zwischen drainierten und nicht drainierten organischen Böden unterschieden. Für die verbleibende Waldfläche beträgt die Fläche organischer Böden für das Jahr 2024 262.797 ha. Eine detaillierte Beschreibung zur Herleitung der organischen Bodenflächen und zum drainierten Anteil findet sich im Kapitel 6.1.2.2.1.

Die methodische Beschreibung zur Herleitung des Emissionsfaktors befindet sich in dem Kapitel 6.1.2.2.2, und für den impliziten Emissionsfaktor (IEF) im 6.1.2.2.3. Für organische Waldböden sind die impliziten Emissionsfaktoren in Tabelle 364 zusammengefasst.

Tabelle 364: Implizite Emissionfaktoren (IEF) (Kohlenstoff) für organische Böden, in [t CO_2 ha^{-1}]

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023	2024
IEF	10,57	10,55	10,57	10,56	10,55	10,60	10,60	10,56	10,61	10,54	10,55

6.4.2.6.2 Neuwaldflächen

Für die Neuwaldfläche beträgt die Fläche organischer Böden für das Jahr 2024 21.086 ha (siehe Kapitel 6.1.2.2.1). Für organische Böden unter Neuwald werden ebenfalls die in Tabelle 364 zusammengefassten Emissionsfaktoren verwendet. Diese jährlichen Emissionen werden für alle Jahre seit der Umwandlung berichtet. Im Kapitel 6.1.2.2 wird die Herleitung der Treibhausgas-emissionen aus organischen Böden für alle Landnutzungskategorien beschrieben.

Tabelle 365: Implizite Emissionfaktoren (IEF) (Kohlenstoff) für Neuwaldflächen auf organischen Böden, in [t CO_2 ha^{-1}]

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023	2024
IEF	10,57	10,57	10,57	10,57	10,54	10,56	10,58	10,54	10,60	10,51	10,53

6.4.2.7 Sonstige Treibhausgasemissionen aus Wäldern

6.4.2.7.1 Lachgas-Emissionen aus Stickstoffdüngung (CRF 4(I))

Stickstoffdüngung von Wäldern findet in Deutschland nicht statt. In der CRF 4(I) wurde diese Aktivität daher als nicht vorkommend „NO“ (not occurring) bezeichnet (siehe auch Kapitel 6.1.2.5).

6.4.2.7.2 Entwässerung und Wiedervernässung von organischen und mineralischen Böden (CRF 4(II))

Die Herleitung der Treibhausgasemissionen aus organischen und mineralischen Böden durch Entwässerung und Wiedervernässung wird für alle Landnutzungskategorien im Kapitel 6.1.2.6

beschrieben. Die CO_2-Emissionen für Wälder werden in die CRF 4.A eingetragen und in der CRF-Tabelle 4(II) als IE (included elsewhere) gekennzeichnet (siehe auch Kapitel 6.4.2.6). Die CH_4- und N_2O-Emissionen hingegen sind in der CRF 4(II) zu finden. Für organische Waldböden sind die impliziten Emissionsfaktoren in Tabelle 366 zusammengefasst.

Wiedervernässung auf mineralischen Böden im Wald gibt es nicht und wird in der CRF 4(II) mit NO (not occurring) gekennzeichnet.

Tabelle 366: Implizite Emissionfaktoren (IEF) (Methan und Stickstoff) für organische Böden

	Methan [kg CH_4 ha^{-1}]	Stickstoff [kg N_2O ha^{-1}]
1990	3,09	2,32
1995	3,09	2,16
2000	3,10	2,26
2005	3,11	2,24
2010	3,11	2,11
2015	3,12	2,47
2020	3,12	2,5
2021	3,12	2,24
2022	3,12	2,59
2023	3,12	2,10
2024	3,12	2,17

6.4.2.7.3 Direkte Lachgas-Emissionen von Stickstoff-Mineralisierung bzw. Immobilisierung (CRF 4(III))

Die Ermittlung der direkten N_2O-Emissionen durch Mineralisierung und Immobilisierung von mineralischen Böden für alle Landnutzungskategorien wird im Kapitel 6.1.2.7 beschrieben. Die N_2O-Emissionen sind in der CRF 4(III) zu finden.

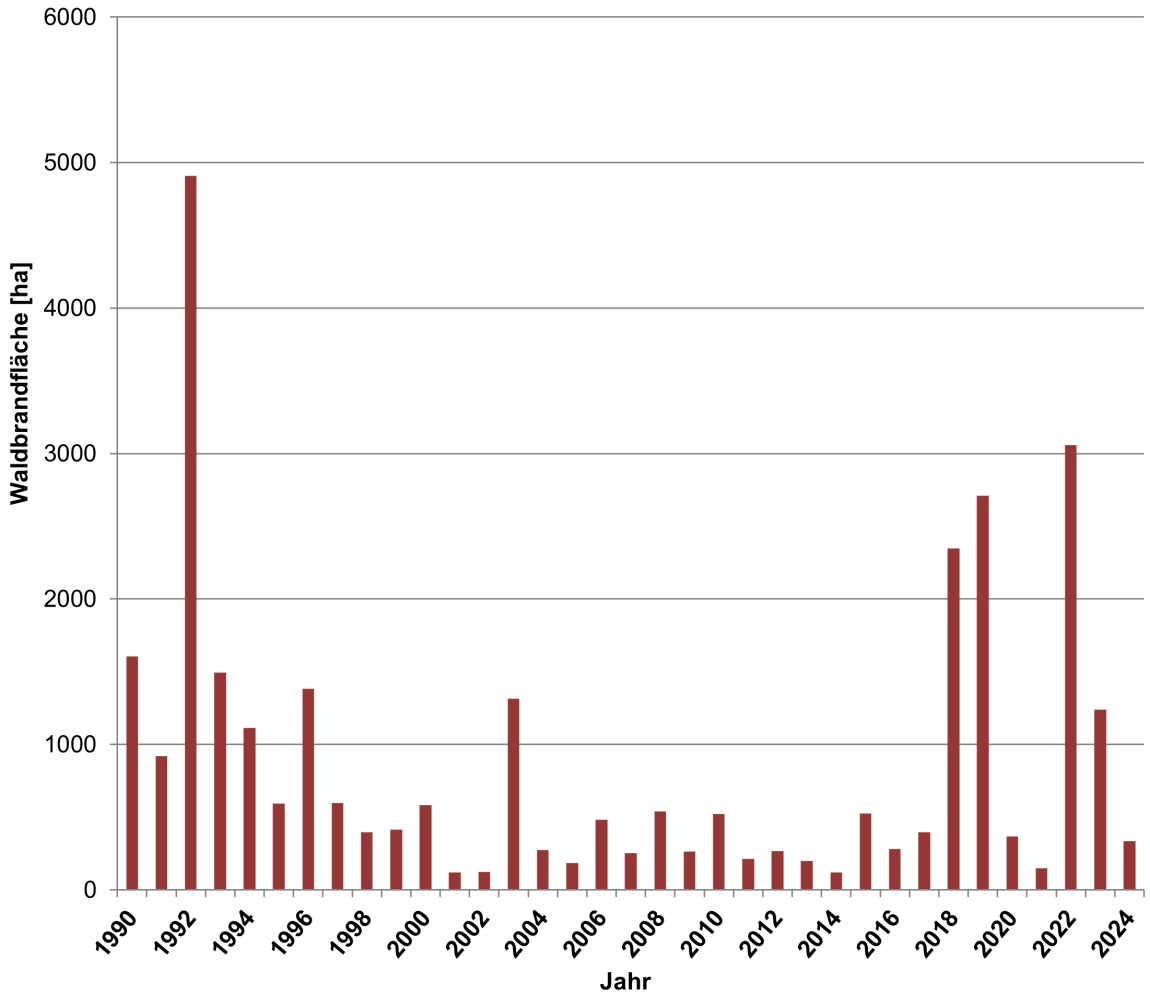
6.4.2.7.4 Indirekte Lachgas-Emissionen aus bewirtschafteten Böden (CRF 4(IV))

Die Ermittlung der indirekten N_2O-Emissionen durch Verluste an organischer Bodensubstanz infolge von Landnutzungsänderungen bzw. Bewirtschaftungsmaßnahmen wird zusammenfassend für alle Landnutzungskategorien im Kapitel 6.1.2.8 beschrieben. Die N_2O-Emissionen sind in der CRF 4(IV) zu finden.

6.4.2.7.5 Waldbrand (CRF 4(V))

Während in anderen Ländern Feuer in Form von „kontrollierten Bränden“ (prescribed burning) als Methode zur Flächenberäumung dienen oder Bestandteil der Bewirtschaftung von Ökosystemen sind, findet in Deutschland im bewirtschafteten Wald keine kontrollierte Verbrennung von Biomasse statt. In der CRF 4 (IV) wird deshalb für "Controlled Burning" NO geführt. Aufgrund der klimatischen Lage Deutschlands und der Maßnahmen zur Vorbeugung von Waldbränden sind Waldbrände ein eher seltenes Ereignis, was durch die in der Waldbrandstatistik (BLE, 2024) erfassten Waldbrandflächen bestätig wird (siehe Abbildung 89). Für den Zeitraum 1990-2024 lag die mittlere Waldbrandfläche bei 866 ha. In manchen Jahren führten sehr hohe Temperaturen in den Sommermonaten zu höheren Waldbrandflächen, wie z. B. 1996, 2003, 2018, 2019 und 2022. Eine überdurchschnittlich hohe Waldbrandfläche von rund 4.908 ha wurde im Jahr 1992 ermittelt, das durch einen extrem warmen Sommer geprägt war.

Abbildung 89: Waldbrandflächen zwischen 1990 und 2024 (nach BLE, 2024)



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

Bei Waldbränden („wild fires“) werden neben CO_2 auch sonstige Treibhausgase (CO, CH_4, N_2O, NO_x und NMVOC) freigesetzt. Die aus der Verbrennung von Biomasse resultierenden CO_2-Emissionen werden bereits bei der Änderung der Biomassevorräte (CRF Sector 4.A.1 Forest land remaining forest land) mittels der „Stock-Difference-Method“ berücksichtigt und deshalb als „IE“ (included elsewhere) angegeben. Die Emissionen sonstiger Treibhausgase wurden nach Gleichung 87 (Equ. 2.27, IPCC (2006a)) berechnet.

Gleichung 87:

$$L_{fire} = A*B*C*D*10^{-6}$$

- L_{fire} = Menge des durch Feuer freigesetzten Treibhausgases [t]
- A = Waldbrandfläche [ha]
- B = Masse des vorhandenen Brennmaterials (Biomasse) [kgTM ha^{-1}]
- C = Verbrennungseffizienz
- D = Emissionsfaktor [g$(kgTM)^{-1}$]

Für die Berechnung der NMVOC-Emissionen kam die Gleichung nach EMEP/EEA emission inventory guidebook 2016 (EMEP/EEA, 2023) zur Anwendung

Gleichung 88:

$$M(C) = 0{,}45 * A * B * \alpha * \beta$$

- 0.45 = Durchschnittlicher Kohlenstoffanteil in Brennholz (average fraction of carbon in fuel wood);
- A = Verbrannte Fläche (area burnt) [m^2];
- B = Durchschnittliche zur Verfügung stehende Gesamtbiomasse pro Flächeneinheit (average total biomass of fuel material per unit area) [kg m^{-2}];
- α = Anteil der durchschnittlichen oberirdischen Biomasse, relativ zu B (fraction of average above-ground biomass, relative to the total average biomass B);
- β = Anteil tatsächlich verbrannter Biomasse (burning efficiency (fraction burnt) of the above-ground biomass).

Die Waldbrandflächen für die Jahre 1990 bis 2024 wurden aus der bei der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung geführten Waldbrandstatistik (BLE, 2025) entnommen. Bei der Erhebung der Flächen wird nicht zwischen Neuwaldflächen und verbleibendem Wald unterschieden. Aus diesem Grund werden die Emissionen aus Neuwaldflächen in der Sektion „verbleibender Wald“ berichtet und in der CRF 4(IV) mit „IE“ gekennzeichnet.

Für die Biomassebestimmung der Pools Biomasse und Totholz stehen die Daten für 1990 aus der BWI 1987 und DSWF, für 2002 aus der BWI 2002, für 2008 aus der IS08, für 2012 aus der BWI 2012, für 2017 aus der CI 2017 und für 2022 aus der BWI 2022 zur Verfügung. Die durchschnittliche oberirdische Biomasse wurde für jedes Jahr durch lineare Interpolation zwischen 1990, 2002, 2008, 2012, 2017 und 2022 und Extrapolation ab dem Jahr 2023 hergeleitet. Die Biomasse des Pools Streu wird aus der BZE I-Wald (1990) und BZE II-Wald (2006) berechnet. Hier wird die jährliche Biomasse durch lineare Interpolation zwischen 1990 und 2006 und Extrapolation ab 2016 ermittelt.

Basierend auf der Expertenschätzung von König (2007) sind 80 % der Waldbrände in Deutschland Bodenfeuer und 20 % Vollfeuer. Nach Tabelle 2.6 (IPCC, 2006a) wurde eine Verbrennungseffizienz (Massenverlust durch direkte Verbrennung) von 0,15 für Bodenfeuer und 0,45 für Vollfeuer angewandt. Die Emissionsfaktoren für CH_4, N_2O, CO und NO_X wurden aus Tabelle 2.5 (IPCC, 2006a) entnommen. Für NMVOC kommt der Emissionsfaktor aus dem EMEP/EEA Emission Inventory Guidebook 2016 (EEA, 2016).

Die Waldbrandflächen in Deutschland und damit auch die dabei entstehenden CH_4-, N_2O-, CO-, NO_X und NMVOC-Gasmengen sind gering. Die vollständige Zeitreihe für die aus Waldbränden resultierenden Treibhausgase ist in Tabelle 367 zu finden.

Tabelle 367: Durch Waldbrände emittierte Treibhausgase

Jahr	Oberirdische Biomasse	Totholz	Streu	Waldbrandfläche [ha]	emittierte Gase [t]				
	[t ha^{-1}]				CH_4	N_2O	CO	NOX	NMVOC
1990	170,9	14,0	38,0	1606	353,31	19,54	8043,39	225,52	710,40
1991	171,0	13,7	38,0	920	202,18	11,18	4602,83	129,05	406,50
1992	171,2	13,3	38,0	4908	1077,45	59,60	24529,28	687,74	2166,40
1993	171,4	12,9	37,9	1493	327,41	18,11	7453,88	208,99	658,30
1994	171,5	12,5	37,9	1114	244,04	13,50	5555,84	155,77	490,70

Jahr	Oberirdische Biomasse	Totholz	Streu	Waldbrandfläche [ha]	emittierte Gase [t]				
	[t ha^{-1}]				CH_4	N_2O	CO	NOX	NMVOC
1995	171,7	12,1	37,9	592	129,55	7,17	2949,36	82,69	260,50
1996	171,9	11,8	37,9	1381	301,89	16,70	6872,92	192,70	607,00
1997	172,0	11,4	37,8	599	130,81	7,24	2977,93	83,49	263,00
1998	172,2	11,0	37,8	397	86,60	4,79	1971,60	55,28	174,10
1999	172,4	10,6	37,8	415	90,43	5,00	2058,81	57,72	181,80
2000	172,6	10,2	37,8	581	126,47	7,00	2879,27	80,73	254,30
2001	172,7	9,9	37,7	122	26,53	1,47	603,96	16,93	53,30
2002	172,9	9,5	37,7	122	26,52	1,47	603,81	16,93	53,30
2003	173,6	9,1	37,7	1315	286,09	15,83	6513,03	182,61	575,20
2004	174,4	8,7	37,7	274	59,76	3,31	1360,47	38,14	120,20
2005	175,1	8,3	37,6	183	40,01	2,21	910,97	25,54	80,50
2006	175,8	8,0	37,6	482	105,34	5,83	2398,16	67,24	211,80
2007	176,6	7,6	37,6	254	55,93	3,09	1273,33	35,70	112,50
2008	177,3	7,2	37,6	539	118,01	6,53	2686,58	75,32	237,30
2009	179,3	6,8	37,5	262	167,04	9,24	3802,89	106,62	335,90
2010	181,2	6,4	37,5	522	115,99	6,42	2640,59	74,04	233,20
2011	183,2	6,1	37,5	214	47,89	2,65	1090,30	30,57	96,30
2012	185,2	5,7	37,5	269	60,53	3,35	1377,95	38,63	121,70
2013	187,0	5,9	37,4	199	45,17	2,50	1028,30	28,83	90,80
2014	188,9	6,0	37,4	120	27,52	1,52	626,42	17,56	55,30
2015	190,7	6,2	37,4	526	121,53	6,72	2766,84	77,57	244,40
2016	192,6	6,4	37,4	283	66,01	3,65	1502,77	42,13	132,70
2017	194,4	6,6	37,3	395	92,86	5,14	2114,11	59,27	186,70
2018	193,0	6,8	37,3	2349	549,51	30,40	12510,23	350,75	1104,90
2019	191,5	7,0	37,3	2711	630,80	34,90	14360,80	402,64	1268,30
2020	190,1	7,2	37,3	368	85,08	4,71	1936,93	54,31	171,10
2021	188,6	7,3	37,2	148	34,02	1,88	774,42	21,71	68,40
2022	187,2	8,4	37,2	3058	702,52	38,86	15993,49	448,42	1412,50
2023	185,7	8,8	37,2	1240	283,57	15,69	6455,79	181,00	570,20
2024	184,3	9,1	37,2	334	76,37	4,22	1738,66	48,51	152,82

6.4.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (4.A)

Bei der Berechnung der Kohlenstoffvorräte müssen verschiedene Unsicherheiten berücksichtigt werden. Zur Abschätzung der Unsicherheiten werden pragmatische Ansätze herangezogen, die lediglich eine Annäherung an die tatsächlichen Unsicherheiten ermöglichen.

Die in den folgenden Kapiteln vorgestellten Unsicherheiten fließen in ein Gesamtfehlerbudget für den LULUCF-Sektor ein, welches im Kapitel 6.1.2.10 zu finden ist.

Hinsichtlich der Unsicherheiten des Kohlenstoff-Konversionsfaktors wird an dieser Stelle auf Kapitel 6.4.2.2.6 verwiesen.

Fehlerschätzungen (U) für Zielgrößen (1, …, i, …, I) pflanzen sich bei deren Aggregation auf zwei unterschiedliche Arten fort. Werden zwei Zielgrößen addiert oder subtrahiert, erfolgt die Fehlerweitergabe additiv (siehe Gleichung 89):

Gleichung 89:

$$U = \frac{\sqrt{\sum_i (U_i x_i)^2}}{\sum_i x_i}$$

- U = Gesamtunsicherheit
- U_i = Unsicherheit für Zielgröße
- x_i = Quantität der Zielgröße

Werden dagegen zwei Zielgrößen multipliziert bzw. dividiert, pflanzen sich die Fehler beider Größen multiplikativ fort (siehe Gleichung 90)

Gleichung 90:

$$U = \sqrt{\sum_i (U_i)^2}$$

- U = Gesamtunsicherheit
- U_i = Unsicherheit für Zielgröße

6.4.3.1 Unsicherheiten bei der Schätzung von Landnutzungsänderungsflächen

Aufgrund der stichprobenbasierten Landnutzungsänderungserfassung konnten die Stichprobenfehler für jede LULUCF-Kategorie berechnet werden. Der Stichprobenfehler wird nach den Formeln im Kapitel 6.4.3 berechnet. Alle anderen Fehlerquellen lassen sich nach Abschluss der Validierung ausschließen (siehe auch Kapitel 6.3.1.3). Alle Flächen sind signifikant erfasst.

6.4.3.2 Unsicherheiten bei der Schätzung der Emissionsfaktoren von lebender und toter Biomasse

Die Ableitung der Biomassen und der Kohlenstoffvorräte im Wald bzw. deren Veränderungen unterliegen einer Reihe von Fehlerquellen, da sich die Biomasse nicht direkt messen lässt. In den Kapiteln 6.4.2.2.4, 6.4.2.2.5 und 6.4.2.2.6 sind die Fehler der Biomassefunktionen und des Kohlenstoffkonversionsfaktors aufgeführt und diskutiert. Für das Totholz sind die Fehler der Biomassekonversionsfaktoren nach Baumarten und Zersetzungsgrad im Kapitel 6.4.2.3 aufgeführt.

Die spezifischen Fehler der Baumartengruppen werden zu den Unsicherheiten der ober- und unterirdischen Biomasse addiert und anschließend zu einer Fehlerangabe für die Gesamtbiomasse aggregiert. Durch die Subtraktion des Biomassevorrates des ersten Zeitpunktes vom Biomassevorrat des zweiten Zeitpunktes ergibt sich die Unsicherheit für die Biomasseveränderung durch Addition. Der Fehler für die Gesamtbiomasseveränderung wird mit dem Fehler des Kohlenstoffkonversionsfaktors und dem Stichprobenfehler multipliziert. Der Stichprobenfehler leitet sich aus der Varianz der Stichprobe her.

In den folgenden Tabellen sind die Unsicherheiten für die einzelnen Fehlerquellen als auch für den resultierenden Emissionsfaktor aufgeführt.

Tabelle 368: Unsicherheiten der Emissionsfaktoren für die lebende Biomasse der verbleibenden Waldfläche für unterschiedliche Perioden

1987 – 2002	Fehler % (Biomasse Umwandlung)						Fehler % (C)	SE %	RMSE%
Alte Bundesländer	**Fichte**	**Kiefer**	**Buche**	**Eiche**	**Weich-holz$_{Laub}$**	**Alle**			
Biomasse$_{oberirdisch}$	7,96	11,06	13,39	8,62	36,07	7,04	2,00	6,47	9,77
Biomasse$_{unterirdisch}$	24,52	18,63	34,86	35,60	17,41	13,53	2,00	6,24	15,03
Emissionsfaktor						6,67	2,00	5,68	8,76
1993 – 2002	**Fehler % (Biomasse Umwandlung)**						**Fehler % (C)**	**SE %**	**RMSE%**
Neue Bundesländer	**Fichte**	**Kiefer**	**Buche**	**Eiche**	**Weich-holz$_{Laub}$**	**Alle**			
Biomasse$_{oberirdisch}$	11,34	24,66	17,35	12,93	37,15	9,03	2,00	5,43	10,73
Biomasse$_{unterirdisch}$	30,38	27,74	38,90	43,94	22,49	16,82	2,00	5,93	17,97
Emissionsfaktor						8,16	2,00	5,51	10,05
2002 – 2008	**Fehler % (Biomasse Umwandlung)**						**Fehler % (C)**	**SE %**	**RMSE%**
Deutschland	**Fichte**	**Kiefer**	**Buche**	**Eiche**	**Weich-holz$_{Laub}$**	**Alle**			
Biomasse$_{oberirdisch}$	7,95	11,05	13,30	8,57	35,39	13,69	2,00	23,30	27,10
Biomasse$_{unterirdisch}$	24,47	18,60	34,67	35,39	17,15	18,28	2,00	13,50	22,82
Emissionsfaktor						11,71	2,00	18,83	22,17
2008 – 2012	**Fehler % (Biomasse Umwandlung)**						**Fehler % (C)**	**SE %**	**RMSE%**
Deutschland	**Fichte**	**Kiefer**	**Buche**	**Eiche**	**Weich-holz$_{Laub}$**	**Alle**			
Biomasse$_{oberirdisch}$	7,95	11,04	13,30	8,57	35,39	6,19	2,00	8,36	10,59
Biomasse$_{unterirdisch}$	24,47	18,60	34,65	35,38	17,15	12,64	2,00	8,93	15,60
Emissionsfaktor						5,99	2,00	7,40	9,52
2012 – 2017	**Fehler % (Biomasse Umwandlung)**						**Fehler % (C)**	**SE %**	**RMSE%**
Deutschland	**Fichte**	**Kiefer**	**Buche**	**Eiche**	**Weich-holz$_{Laub}$**	**Alle**			
Biomasse$_{oberirdisch}$	7,94	11,05	13,30	8,56	35,39	6,73	2,00	7,62	10,36
Biomasse$_{unterirdisch}$	24,47	18,61	34,67	35,38	17,15	12,33	2,00	6,31	14,00
Emissionsfaktor						6,33	2,00	6,54	9,10

Tabelle 369: Unsicherheiten der Emissionsfaktoren für die lebende Biomasse auf Aufforstungsflächen für unterschiedliche Perioden

1987 – 2002	Fehler % (Biomasse Umwandlung)						Fehler % (C)	SE %	RMSE%
Alte Bundesländer	**Fichte**	**Kiefer**	**Buche**	**Eiche**	**Weichholz$_{Laub}$**	**Alle**			
Biomasse$_{oberirdisch}$	11,23	15,62	18,80	12,10	50,00	18,63	2,00	19,37	26,95
Biomasse$_{unterirdisch}$	34,60	26,30	49,00	50,00	24,23	17,31	2,00	18,92	25,72
Emissionsfaktor						15,99	2,00	-16,52	22,99
2002 – 2008	**Fehler % (Biomasse Umwandlung)**						**Fehler % (C)**	**SE %**	**RMSE%**
Deutschland	**Fichte**	**Kiefer**	**Buche**	**Eiche**	**Weichholz$_{Laub}$**	**Alle**			
Biomasse$_{oberirdisch}$	11,23	15,62	18,80	12,10	50,00	26,79	2,00	48,70	55,62

1987 – 2002	Fehler % (Biomasse Umwandlung)						Fehler % (C)	SE %	RMSE%
$Biomasse_{unterirdisch}$	34,60	26,30	49,00	50,00	24,23	18,68	2,00	44,38	48,20
Emissionsfaktor						21,86	2,00	-39,98	45,57
2008 – 2012	**Fehler % (Biomasse Umwandlung)**						**Fehler % (C)**	**SE %**	**RMSE%**
Deutschland	**Fichte**	**Kiefer**	**Buche**	**Eiche**	**$Weichholz_{Laub}$**	**Alle**			
$Biomasse_{oberirdisch}$	11,23	15,62	18,80	12,10	50,00	20,13	2,00	18,05	27,11
$Biomasse_{unterirdisch}$	34,60	26,30	49,00	50,00	24,23	17,82	2,00	20,10	26,94
Emissionsfaktor						17,48	2,00	-15,67	23,48
2012 – 2017	**Fehler % (Biomasse Umwandlung)**						**Fehler % (C)**	**SE %**	**RMSE%**
Deutschland	**Fichte**	**Kiefer**	**Buche**	**Eiche**	**$Weichholz_{Laub}$**	**Alle**			
$Biomasse_{oberirdisch}$	11,23	15,62	18,80	12,10	50,00	17,88	2,00	38,43	42,43
$Biomasse_{unterirdisch}$	34,60	26,30	49,00	50,00	24,23	16,30	2,00	37,11	40,58
Emissionsfaktor						15,24	2,00	-32,55	35,95

Tabelle 370: Unsicherheiten der Emissionsfaktoren für die lebende Biomasse auf Entwaldungsflächen für unterschiedliche Perioden

1987 – 2002	Fehler % (Biomasse Umwandlung)						Fehler % (C)	SE %	RMSE%
Alte Bundesländer	**Fichte**	**Kiefer**	**Buche**	**Eiche**	**$Weichholz_{Laub}$**	**Alle**			
$Biomasse_{oberirdisch}$	11,23	15,62	18,80	12,10	50,00	9,41		17,45	19,93
$Biomasse_{unterirdisch}$	34,60	26,30	49,00	50,00	24,23	16,90		19,68	26,02
Emissionsfaktor						8,63	2,00	15,13	17,42
2002 – 2008	**Fehler % (Biomasse Umwandlung)**						**Fehler % (C)**	**SE %**	**RMSE%**
Deutschland	**Fichte**	**Kiefer**	**Buche**	**Eiche**	**$Weichholz_{Laub}$**	**Alle**			
$Biomasse_{oberirdisch}$	11,23	15,62	18,80	12,10	50,00	9,13	2,00	23,98	25,73
$Biomasse_{unterirdisch}$	34,60	26,30	49,00	50,00	24,23	16,59	2,00	23,32	28,69
Emissionsfaktor						8,47	2,00	21,06	22,70
2008 – 2012	**Fehler % (Biomasse Umwandlung)**						**Fehler % (C)**	**SE %**	**RMSE%**
Deutschland	**Fichte**	**Kiefer**	**Buche**	**Eiche**	**$Weichholz_{Laub}$**	**Alle**			
$Biomasse_{oberirdisch}$	11,23	15,62	18,80	12,10	50,00	12,58	2,00	22,66	26,00
$Biomasse_{unterirdisch}$	34,60	26,30	49,00	50,00	24,23	24,07	2,00	20,98	31,99
Emissionsfaktor						11,63	2,00	20,17	23,29
2012 – 2017	**Fehler % (Biomasse Umwandlung)**						**Fehler % (C)**	**SE %**	**RMSE%**
Deutschland	**Fichte**	**Kiefer**	**Buche**	**Eiche**	**$Weichholz_{Laub}$**	**Alle**			
$Biomasse_{oberirdisch}$	11,23	15,62	18,80	12,10	50,00	10,06	2,00	28,69	30,47
$Biomasse_{unterirdisch}$	34,60	26,30	49,00	50,00	24,23	19,01	2,00	27,57	33,55
Emissionsfaktor						9,37	2,00	25,52	27,18

Tabelle 371: Unsicherheiten der Emissionsfaktoren für Totholz für unterschiedliche Perioden

	Fehler % (Biomasse Umwandlung)													Fehler % (C)	SE %	RMSE %
Deutschland	EI1	EI2	EI3	EI4	L1	L2	L3	L4	N1	N2	N3	N4	Alle			
verbl. Wald 2008 – 2012	8,59	30,60	24,09	47,41	8,63	30,58	23,76	47,01	12,95	19,81	25,08	17,85	8,59	2,00	26,37	27,80
verbl. Wald 2012 – 2017	8,91	30,73	23,82	52,92	8,89	30,83	23,61	46,96	12,37	19,75	25,08	18,00	10,03	2,00	22,56	24,77
Aufforstung 2008 – 2012	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	33,33	65,38	17,20	27,92	35,46	25,20	18,81	2,00	41,38	45,50
Aufforstung 2012 – 2017	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	65,38	0,00	0,00	0,00	0,00	65,38	2,00	98,02	117,84
Entwaldung 2008 – 2012	0,00	0,00	0,00	0,00	12,07	43,24	33,33	65,38	0,00	27,92	35,46	25,20	19,82	2,00	46,73	50,80
Entwaldung 2012 – 2017	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	43,24	33,33	65,38	17,20	27,92	35,46	25,20	16,58	2,00	49,56	52,30

mit N = Nadelholz, L = Laubholz ohne Eiche, EI = Eiche und 1-4 = Zersetzungsgrad

6.4.3.3 Unsicherheiten bei der Schätzung der Streu und der mineralischen Böden

Im Kapitel 6.4.2.5.3.7 wird eine gesamtheitliche Betrachtung der Unsicherheiten im mineralischen Boden und der Streu beschrieben. In dem folgenden Kapitel werden einzelne Aspekte für die Berechnung der Unsicherheiten betrachtet.

6.4.3.3.1 Probenahmefehler

Ein Problem der Beprobung von Böden ist die korrekte Trennung der Streu vom Mineralboden, da der Übergang zwischen beiden Kompartimenten nicht immer eindeutig identifizierbar ist. Dies ist umso problematischer, da die Kohlenstoffkonzentration der Streu sich deutlich gegenüber dem darunter liegenden Mineralboden unterscheidet. Eine unsaubere oder unsachgemäße Abtrennung der Streu vom Mineralboden kann daher große Auswirkungen auf die Kohlenstoffvorräte des jeweiligen Horizontes bzw. der jeweiligen Tiefenstufe haben.

6.4.3.3.2 Kleinräumige Variabilität

Die Bestimmung von Kohlenstoffvorräten unterliegt aufgrund der hohen räumlichen Variabilität in der Streu und im Mineralboden einer hohen Unsicherheit, da Kohlenstoffvorräte nur über kurze Distanzen eine räumliche Kontinuität aufweisen. Schöning et al. (2006) berechneten für die Streu eines Buchenwaldes einen Vorrat von 4,0 t C ha^{-1} mit einem Variationskoeffizienten von 38 %. Im Mineralboden (0-36 cm) fanden sie Kohlenstoffvorräte von 64,0 t C ha^{-1} mit Variationskoeffizienten zwischen 30 % und 43 %. Ähnliche Werte sind auch von Liski (1995) dokumentiert. Er zeigte, dass Kohlenstoffvorräte unter einem Fichtenstandort innerhalb eines bestimmten Horizontes ab 8 m räumlich unabhängig voneinander waren.

6.4.3.3.3 Repräsentanz von Punkten innerhalb der Straten

Ein Problem bei der Auswertung nach den Leitbodeneinheiten ergab sich aus der unterschiedlichen Besetzung der Klassen. Kleinen Klassen fehlt die statistische Validität gegenüber einer großen Grundgesamtheit. Wenn aufgrund fehlender Daten kein Vergleich zwischen BZE I-Wald und BZE II-Wald möglich war, konnte die vom Wald bedeckte Fläche der Leitbodeneinheiten ebenfalls nicht in die Berechnung einfließen. Weiterhin war es nicht möglich, alle Leitbodeneinheiten zu besetzen, da einige nur auf kleinere Flächen im Bundesgebiet beschränkt sind. Somit blieben 4,3% der Waldfläche unberücksichtigt.

6.4.3.3.4 Stichprobenfehler

Die Vorratsänderung für die Streu wurde stratifiziert als ungepaarte Stichprobe berechnet. Es ergab sich dabei ein Stichprobenfehler von 0,02 t C ha^{-1} a^{-1} oder 100%.

Bei der Berechnung der Vorratsänderung für Mineralböden wurde die Stichprobe in eine gepaarte und eine ungepaarte Stichprobe unterteilt. Weiterhin wurde nach Leitbodeneinheiten und den beiden Teilstichproben stratifiziert. Insgesamt betrug der Stichprobenfehler für Mineralböden 0,037 t C ha^{-1} a^{-1} oder 9 %.

6.4.3.3.5 Quantifizierung von methodisch bedingten Unsicherheiten

Als weitere Unsicherheit kommen zur Stichprobenvarianz messtechnisch bedingte Abweichungen bei der Einzelmessung hinzu. Sowohl die Kohlenstoffkonzentration als auch der Vorrat im Feinboden würden bei mehreren, an einem Standort unabhängig voneinander genommenen Proben in einem durch die Genauigkeit der Messtechnik bestimmten Bereich schwanken. Um diese Schwankungsbreite bei der Messung der Kohlenstoffkonzentration zu quantifizieren, wurden die Ergebnisse aus den Ringanalysen herangezogen (Blum & Heinbach, 2006, 2007b). Bei den Ringanalysen zur BZE II-Wald wurden die Wiederholstandardabweichung als mittlere laborinterne Standardabweichung (DIN ISO 5725 2, (Normung, 2022)) mehrerer

Kohlenstoffmessungen und die Sollstandardabweichung als Standardabweichung der Mittelwerte bestimmt. Daraus wurde die Vergleichsstandardabweichung berechnet. Diese eignet sich als Schätzwert für die Messunsicherheit. Die Vergleichsstandardabweichung der Mineralbodenmessungen betrug bei kalkfreien Böden 0,9 g kg^{-1} und bei kalkhaltigen Böden 2,9 g kg^{-1}, sowie bei der organischen Auflage 20,2 g kg^{-1}. Für die BZE I-Wald wurde auf Werte von Wolff and Riek (1997) zurückgegriffen, die Variationskoeffizienten für die Kohlenstoffbestimmung in Mineralböden zwischen 5 und 20 % sowie für die Kohlenstoffbestimmung in der organischen Auflage zwischen 5 und 10 % angaben. Davon wurde jeweils der Mittelwert eingesetzt. Bei der Berechnung der Unsicherheiten des Vorrats im Feinboden konnte nicht auf Ergebnisse von Ringversuchen zurückgegriffen werden. Für alle BZE-Standorte erfolgte die Auswahl all jener Punkte, für die zu beiden Inventurzeitpunkten Ergebnisse für die Feinbodenbestimmung vorlagen. Es wurde die mittlere Abweichung der beiden Messungen voneinander berechnet. Die mittlere Abweichung lag bei 193 ± 35 t ha^{-1}. Im Sinne einer konservativen Fehlerabschätzung wurde angenommen, dass sich die Feinbodenvorräte zwischen den beiden Inventuren nicht ändern und dass die mittlere Abweichung plus ihre Streuung ein Maß für die Messunsicherheit des Feinbodenvorrats darstellt. Die Unsicherheit der jährlichen Kohlenstoffänderungsrate wurde um die Messunsicherheiten der Einzelmessung erweitert.

Die Unsicherheiten bei der Abschätzung der jährlichen Änderungsrate in Mineralböden betrugen für die Stichprobenvarianz 0,037 t C ha^{-1} a^{-1}, für die Laboranalytik der C-Bestimmung zum Zeitpunkt der BZE I-Wald 0,058 t C ha^{-1} a^{-1}, zum Zeitpunkt der BZE II-Wald 0,056 t C ha^{-1} a^{-1} und für die Bestimmung des Feinbodenvorrates 0,05 t C ha^{-1} a^{-1}. Damit ergab sich eine Gesamtunsicherheit von 0,11 t C ha^{-1} a^{-1}. Die Gesamtunsicherheit bei der Abschätzung der jährlichen Kohlenstoffänderungsrate der organischen Auflage betrug 0,035 t C ha^{-1} a^{-1}.

6.4.3.4 Zeitreihenkonsistenz

An die Zeitreihenkonsistenz werden folgende Bedingungen geknüpft:

- die Berechnung der Emission erfolgt über die gesamte Zeitreihe mit der gleichen Methode bzw. mit Methoden, die in einem Überlappungsbereich gleiche Ergebnisse liefern (overlap method) und den selben bzw. untereinander konsistenten Datenquellen;
- ergeben sich Änderungen an der Methode, sollte eine Neuberechnung mit der neuen Methode über die gesamte Zeitreihe erfolgen;
- neue Daten, z.B. aus Wiederholungsinventuren, sind konsistent mit früheren Daten.
- stehen neue Daten zur Verfügung, die zu einer Verbesserung des Inventars führen, sollte eine Rekalkulation über die gesamte Zeitreihe erfolgen;
- werden Fehler in den Schätzungen identifiziert müssen diese korrigiert und die gesamte Zeitreihe neu berechnet werden.

Diese Bedingungen wurden konsequent auf alle Zeitreihen der Submission angewendet. Wenn in einigen Zeitreihen in zwei aufeinanderfolgenden Jahren größerer Unterschiede bei den Werten auftreten, liegt dies an der Periodizität der verfügbaren Daten in einer konsistenten Zeitreihe. Denn auch für diese Zeitreihen wurden für alle Jahre dieselbe Methode und dieselbe Datenquelle zugrunde gelegt.

6.4.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (4.A)

Die durchgeführten QK/QS-Maßnahmen für den gesamten LULUCF -Sektor finden sich in Kapitel 6.1.3.

Die zur Erstellung dieses Inventars verwendeten Datenquellen erfüllen die Prüfkriterien des QSE – Handbuchs für Datenquellen. Bezüglich der Qualitätssicherung der Eingangsdaten (ATKIS®, BÜK, Offizialstatistik, Waldbrandstatistik, siehe Kapitel 6.4.2.1) wird auf die Datenhalter verwiesen (Dokumentation in der Inventarbeschreibung).

Es wurde eine vollständige Fehlerbetrachtung für den Sektor LULUCF durchgeführt, wobei versucht wurde, alle vorhandenen Fehlerquellen zu quantifizieren. Darin enthalten sind Fehlerrechnungen aus dem Forstbereich für Biomasse, Totholz, Streu, mineralische Böden, organische Böden und Waldbrand der Treibhausgase CO_2, N_2O und CH_4. Zusammenfassend wurde im Kapitel 6.1.2.10 ein Gesamtfehlerbudget erstellt.

6.4.4.1 Biomasse und Totholz

Die Schätzungen der Kohlenstoffvorräte und der Kohlenstoffvorratsänderungen in den Pools Biomasse und Totholz zu den jeweiligen Zeitpunkten beruhen auf Hochrechnungen am Thünen Institut für Waldökosysteme (TI-WO), die auf die Daten der Bundeswaldinventuren und der Inventurstudie 2008 bzw. Kohlenstoffinventur 2017 zugreifen. Dabei werden wiederholte Messungen der Vorräte auf einem permanenten, systematischen Stichprobennetz über das gesamte Gebiet Deutschlands gemessen. Es wird immer zwischen verbleibenden Wald, Aufforstung und Entwaldung unterschieden und separat berechnet. Bei der BWI 2022 wurden ca. 521.000 Bäume auf etwa 80.000 Stichprobenpunkten aufgenommen. Aus den Vorräten werden die Vorratsveränderungen abgeleitet. Die Vorratsveränderung ist die Nettoveränderung zwischen den Vorräten der einzelnen Inventurjahre und umfasst den Zuwachs, die Holzernte und den Verlust durch natürliche Störungen wie beispielsweise Sturm und Mortalität. Um die Ergebnisse abzusichern, werden umfangreiche Qualitätskontrollen durchgeführt:

- Qualitätsprüfungen während der Feldaufnahmen
- Qualitätsprüfungen der erhobenen Datensätze
- Plausibilitätsprüfungen

Bezüglich der für die Bundeswaldinventur entwickelten Qualitätssicherung wird auf die Literatur zur Bundeswaldinventur (BMELV, 2005) und auf https://bundeswaldinventur.de und https://bwi.info verwiesen.

6.4.4.2 Streu und mineralische Böden

Um für die Auswertung der Probenahmen, die im Rahmen der BZE-Erhebungen durchgeführt wurden, einen einheitlichen Standard für die Laboranalytik zu erhalten, wurde eine Ringanalyse initiiert. Dabei wurden alle Labore einem Qualitätstest durch den Gutachterausschuss Forstliche Analytik unterzogen (Blum and Heinbach (2006), (Blum & Heinbach, 2007a)). Um die Vergleichbarkeit der Labormethoden zu gewährleisten, haben nur die an der Ringanalyse erfolgreich teilgenommenen Labore die Analytik durchgeführt. Deutschland beteiligte sich auch an einer entsprechenden europäischen Ringanalyse (Cools et al., 2006).

Für die Harmonisierung der Labormessungen und Geländeerhebungen wurden im Rahmen der BZE II für die beteiligten Labore Vorschriften für die Ermittlung der zu bestimmenden Parameter erstellt, um Abweichungen aufgrund der Verwendung unterschiedlicher Analysegeräte oder Analysemethoden zu vermeiden (König et al. (2005), Wellbrock et al. (2006)). Grundlage für die Zulassung der Analytiklabore waren vorangegangene Ringanalysen. Ähnliches wurde auch für die Außenaufnahmen durchgeführt. Aufgrund verschiedener Vorstudien wurden Methoden zur Probennahme zugelassen und in einem Handbuch für die Außenaufnahmen beschrieben (Wellbrock et al., 2006).

Weitere Informationen finden sich im Kapitel 6.4.2.5.3.7.

6.4.4.3 Vergleich mit Ergebnissen anderer Staaten

Der Vergleich mit Ergebnissen anderer Staaten kann eine grobe Einordnung der Verhältnisse in Deutschland geben. Gerade bei den Umwandlungskategorien zu Wald ist aber zu beachten, dass erhebliche methodische Unterschiede und unterschiedliche Verfahren zum Umgang mit der Übergangszeit („Transition Time“) bestehen, so dass die Ergebnisse nicht direkt miteinander vergleichbar sind.

Die folgenden Tabellen zeigen einen innereuropäischen Vergleich impliziter Emissionsfaktoren (IEF) für unterschiedliche Pools. Die Vergleichsdaten für die Kohlenstoffvorratsänderungen anderer Staaten kommen aus den Nationalen Inventurberichten der Nachbarstaaten Deutschlands. Die Emissionsfaktoren aus dem Jahr 2023 stammen aus der Submission 2025 des Klimasekretariats der Vereinten Nationen; für Deutschland 2024 aus der Submission 2026.

Tabelle 372: Kohlenstoffvorratsveränderung der lebenden Biomasse in Wäldern verschiedener Länder (Deutschland für 2023 & 2024, übrige Länder für 2023), in [t C ha^{-1} a^{-1}]

	4.A.1 - Forest Land remaining Forest Land	4.A.2 - Land converted to Forest Land	4.A.2.1. - Cropland converted to Forest Land	4.A.2.2. - Grassland converted to Forest Land	4.A.2.3. - Wetlands converted to Forest Land	4.A.2.4. - Settlements converted to Forest Land	4.A.2.5. - Other Land converted to Forest Land
Belgien	0,521	3,821	3,948	3,591	4,169	4,624	NO
Dänemark	1,257	2,501	2,494	2,575	2,725		
Frankreich	0,247	0,711	0,963	0,444	1,054	1,124	1,000
Großbritannien	0,738	0,736	0,758	0,733	NO	0,726	NO
Niederlande	1,042	3,474	3,681	3,289	3,822	3,906	3,780
Österreich	-0,252	1,080	1,078	1,080	1,081	1,079	1,079
Polen	1,026	0,907	0,742	1,461	NO	NO	NO
Schweiz	0,181	0,419	-0,247	0,443	0,025	-0,205	0,437
Tschechische Republik	0,272	2,349	2,494	2,575	2,725		
Deutschland 2023	-0,630	0,640	3,290	0,470	-1,730	2,450	4,160
Deutschland 2024	-0,062	0,790	2,620	0,590	-0,250	3,430	3,170

positiv: Kohlenstoffsenke; negativ: Kohlenstoffquelle; Quelle: (UNFCCC, 2023c)

Tabelle 373: Kohlenstoffvorratsveränderung des Totholzes in Wäldern verschiedener Länder (Deutschland für 2023 & 2024, übrige Länder für 2023), in [t C ha^{-1} a^{-1}]

	4.A.1 - Forest Land remaining Forest Land	4.A.2 - Land converted to Forest Land	4.A.2.1. - Cropland converted to Forest Land	4.A.2.2. - Grassland converted to Forest Land	4.A.2.3. - Wetlands converted to Forest Land	4.A.2.4. - Settlements converted to Forest Land	4.A.2.5. - Other Land converted to Forest Land
Belgien	NA	0,04	0,037	0,048	0,032	0,012	NO
Dänemark	0,029	0,002	0,002	0,002	0,002		
Frankreich	0,164	0,211	0,245	0,172	0,334	0,258	0,385
Großbritannien	0,295	0,022	0,023	0,022	NO	0,022	NO
Niederlande	0,099	0,13	0,132	0,129	0,128	0,137	0,123
Österreich	0,067	0,057	0,053	0,059	0,062	0,054	0,056
Polen	0,086	NA, NO	NA	NA	NO	NO	NO
Schweiz	-0,019	0,202	0,275	0,191	0,387	0,455	0,24
Tschechische Republik	-0,122	0,063	0,002	0,002	0,002		

	4.A.1 - Forest Land remaining Forest Land	4.A.2 - Land converted to Forest Land	4.A.2.1. - Cropland converted to Forest Land	4.A.2.2. - Grassland converted to Forest Land	4.A.2.3. - Wetlands converted to Forest Land	4.A.2.4. - Settlements converted to Forest Land	4.A.2.5. - Other Land converted to Forest Land
Deutschland 2023	0,26	0,09	0,09	0,08	0,09	0,09	0,07
Deutschland 2024	0,13	0,1	0,1	0,1	0,02	0,1	0,13

positiv: Kohlenstoffsenke; negativ: Kohlenstoffquelle; Quelle: (UNFCCC, 2023c)

Tabelle 374: Kohlenstoffvorratsveränderung der Streu in Wäldern verschiedener Länder (Deutschland für 2023 & 2024, übrige Länder für 2023), in [t C ha^{-1} a^{-1}]

	4.A.1 - Forest Land remaining Forest Land	4.A.2 - Land converted to Forest Land	4.A.2.1. - Cropland converted to Forest Land	4.A.2.2. - Grassland converted to Forest Land	4.A.2.3. - Wetlands converted to Forest Land	4.A.2.4. - Settlements converted to Forest Land	4.A.2.5. - Other Land converted to Forest Land
Belgien	NA	0,159	0,147	0,19	0,126	0,048	NO
Dänemark	0,123	0,512	0,506	0,566	0,618		
Frankreich	0,004	0,394	0,393	0,404	0,206	0,368	0,176
Großbritannien	0,044	0,032	0,022	0,034	NO	0,029	NO
Niederlande	0,055	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14
Österreich	IE, NA	1,214	1,15	1,256	0,951	1,238	1,222
Polen	NO	NA, NO	NA	NA	NO	NO	NO
Schweiz	-0,268	0,747	0,576	0,751	0,718	0,64	0,732
Tschechische Republik	-0,031	0,271	0,506	0,566	0,618		
Deutschland 2023	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE
Deutschland 2024	IE	IE	IE	IE	IE	IE	IE

positiv: Kohlenstoffsenke; negativ: Kohlenstoffquelle ; Quelle: (UNFCCC, 2023c)

Tabelle 375: Kohlenstoffvorratsveränderung der mineralischen Böden verschiedener Länder (Deutschland für 2023 & 2024, übrige Länder für 2023), in [t C ha^{-1} a^{-1}]

	4.A.1 - Forest Land remaining Forest Land	4.A.2 - Land converted to Forest Land	4.A.2.1. - Cropland converted to Forest Land	4.A.2.2. - Grassland converted to Forest Land	4.A.2.3. - Wetlands converted to Forest Land	4.A.2.4. - Settlements converted to Forest Land	4.A.2.5. - Other Land converted to Forest Land
Belgien	NA	0,795					
Dänemark	NA	0,155	0,212	0,167	NO		
Frankreich	0,005	0,537	1,073	0,001	0,188	1,48	0,205
Großbritannien	0,437	-0,886	-0,913	-0,896	NO	-0,887	NO
Niederlande	NA	0,26		-0,071			
Österreich	-0,276	0,658	0,989	-0,76	NO	2,717	2,203
Polen	0,072	0,469					
Schweiz	0,018	2,112					
Tschechische Republik	0,039	0,27	0,212	0,167	NO		
Deutschland 2023	0,003	0,483	1,156	0,323	-0,614	2,212	3,928
Deutschland 2024	-0,067	0,503	1,161	0,376	-0,417	1,29	3,75

positiv: Kohlenstoffsenke; negativ: Kohlenstoffquelle; Quelle: (UNFCCC, 2023c)

Tabelle 376: Kohlenstoffvorratsveränderung der organischen Böden verschiedener Länder (Deutschland für 2023 & 2024, übrige Länder für 2023), in [t C ha^{-1} a^{-1}]

	4.A.1 - Forest Land remaining Forest Land	4.A.2 - Land converted to Forest Land	4.A.2.1. - Cropland converted to Forest Land	4.A.2.2. - Grassland converted to Forest Land	4.A.2.3. - Wetlands converted to Forest Land	4.A.2.4. - Settlements converted to Forest Land	4.A.2.5. - Other Land converted to Forest Land
Belgien	NO	NO					
Dänemark	-1,357	-1,738	-1,378	-1,378	-1,378		
Frankreich	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Großbritannien	0,094	-2,145	-2,108	-2,147	NO	-2,153	NO
Niederlande	-0,875	-0,882	0	-0,884	0		
Österreich	IE,NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Polen	-0,68	-0,68					
Schweiz	-0,078	-0,078					
Tschechische Republik	NO	NO	-1,378	-1,378	-1,378		
Deutschland 2023	-2,89	-2,87	-2,86	-2,87	-2,88	-2,84	-2,89
Deutschland 2024	-2,88	-2,87	-2,91	-2,87	-2,87	-2,8	-2,89

positiv: Kohlenstoffsenke; negativ: Kohlenstoffquelle; Quelle: (UNFCCC, 2023c)

6.4.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (4.A)

Mit der diesjährigen Submission werden kategoriespezifische Rückrechnungen für den gesamten Berichtszeitraum von 1990-2024 vorgelegt. Ursache für die Neuberechnung der Emissionen waren neue und verbesserte Datenquellen, Methodenänderungen und Fehlerkorrekturen im Rahmen der Verbesserung des Inventars. Auswirkungen auf die Ergebnisse der Emissionsberechnungen für die Landnutzungskategorie „Wälder“ hatten in Kapitel 6.1.3.4.2, Tabelle 338 aufgeführten Maßnahmen:

Eine vergleichende Darstellung der Ergebnisse der aktuellen Rückrechnung mit denen der Vorjahressubmission findet sich für die Kategorie Wälder in Tabelle 377 (Flächen) und in Tabelle 378 (Emissionen).

Die geringen Unterschiede zwischen den Flächendaten der aktuellen und der Vorjahres-submission (< 1% über die gesamte Zeitreihe) sind im Wesentlichen auf Korrekturalgorithmen zurückzuführen. Diese bedingen sich in der Aktualisierung der Kartengrundlage zur Ermittlung der Aktivitätsdaten, durch Einarbeitung der neu hinzugekommen Daten des letzten Zeitreihen-jahres. Es wird davon ausgegangen, dass neueste Daten die beste Qualität haben und daher die vorangegangene Zeitreihe, falls notwendig, angepasst wird (s. auch Kapitel 6.3.1ff).

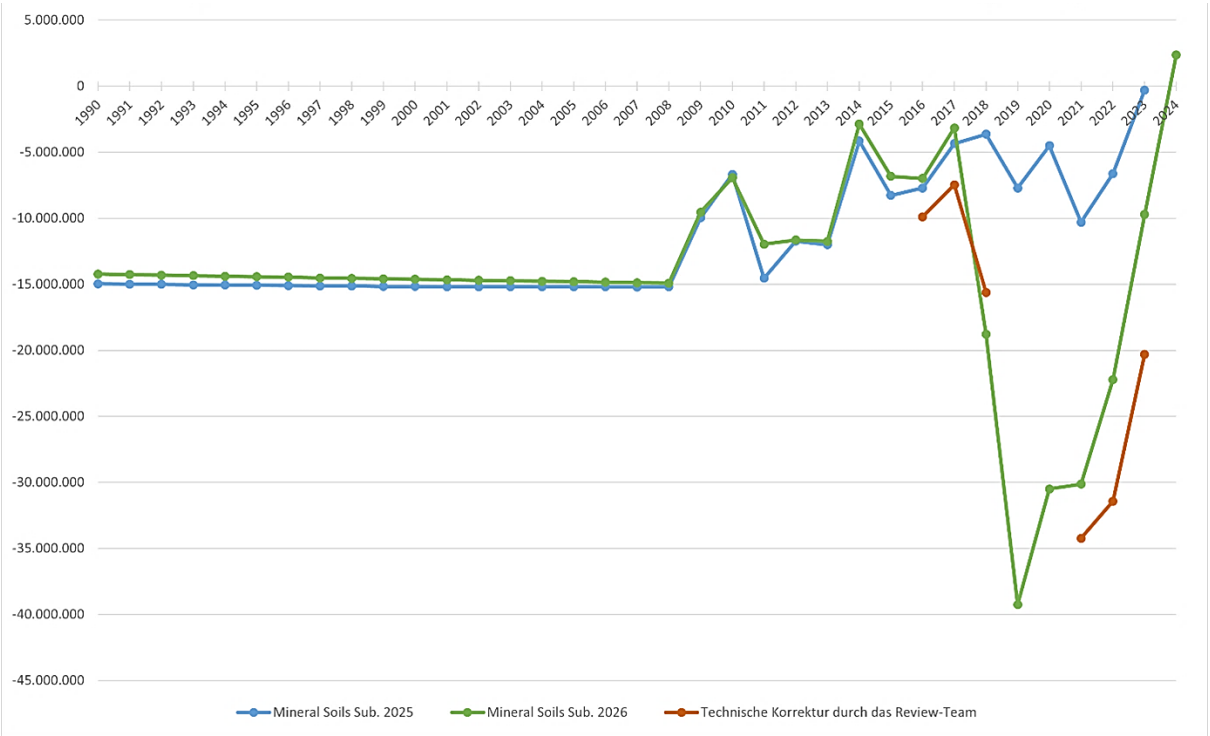
Die Unterschiede bezüglich der THG-Emissionen sind hauptsächlich auf Modifikation der Inputdaten für die Modellierung mit YASSO15 zur Berechnung der Emissionen aus Mineralböden inkl. der Streu zurückzuführen.

Bei der Prüfung des Inventars der Submission 2025 durch die Europäische Kommission wurde folgendes Problem identifiziert: " Die Veränderungen des mineralischen SOC-Bestands in 4A1 werden mit dem Yasso-Modell geschätzt. Um das Modell anzuwenden, schätzt das Land die jährlichen C-Einträge bis 2013 unter Berücksichtigung u. a. der Mortalität und der Ernte. Für die Jahre ab 2014 wurde ein konstanter Eintrag verwendet, der auf den durchschnittlichen Einträgen zwischen 2009 und 2013 basiert. Aufgrund der erheblichen Veränderungen in deutschen Wäldern in Bezug auf Mortalität und Ernte seit 2013 führt diese Extrapolation sehr wahrscheinlich zu einer Verzerrung der mineralischen Bestandsveränderungen in den letzten

Jahren." Durch das Review-Team wurde eine Technische Korrektur berechnet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 90 zu finden.

In dieser Submission wurden unsererseits die Inputdaten an die realen Entwicklungen der Ernte und Mortalität angepasst. Dies führt zu größeren Veränderungen bei der Emission des mineralischen Bodens und der Streu zur letzten Submission 2025. Die Ergebnisse sind ebenfalls in der Abbildung 90 dargestellt.

Abbildung 90: Vergleich der Emissionen des mineralischen Bodens inkl. der Streu für die Submission 2025 und 2026



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

Bei der Modellierung des organischen Bodenkohlenstoffs in Wäldern gab es wesentliche Veränderungen zum Vorjahr (1) bei der jährlichen Veränderung des organischen Inputs infolge von Waldmanagement und (2) bei der Betrachtung und Modellierung des Totholzes.

1. Anstatt die als Folge von Wald-Management ermittelten Erntefaktoren bis 2013 anzuwenden und danach Mittelwerte anzunehmen, wurde der Zeitraum der jährlichen Erntefaktoren bis 2024 verlängert. Dies äußert sich in einer erhöhten Kohlenstoffakkumulation im Simulationszeitraum 2018 – 2023, was in eine Phase hoher forstlicher Zwangsnutzungen aufgrund ökologischer Störungen fällt.
2. Bei der Modellierung mit Yasso15 wird nun Totholz bei der Initialisierung berücksichtigt und von den Simulationsergebnissen nachträglich wieder abgezogen. Auch dies äußert sich im Simulationszeitraum 2018 – 2023. Ohne Reduzierung der Totholzmenge würde ein deutlich stärkerer, unrealistischer Anstieg erfolgen. Zudem wird die Totholzmenge bereits gesondert betrachtet (Kapitel 6.4.2.3).

Tabelle 377: Gegenüberstellung der in Submission 2025 und 2026 berichteten Landnutzungsmatrix

Area [kha]	Submission	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
Forest Land	2025	10.680	10.732	10.785	10.793	10.813	10.824	10.864	10.871	10.877	10.884
	2026	10.631	10.676	10.720	10.763	10.807	10.818	10.857	10.863	10.869	10.875
	Differenz	-49	-57	-65	-29	-6	-6	-7	-8	-8	-9
	in %	-0,46%	-0,53%	-0,61%	-0,27%	-0,05%	-0,05%	-0,07%	-0,07%	-0,08%	-0,08%

Tabelle 378: Gegenüberstellung der in Submission 2025 und 2026 berichteten Emissionen [kt CO_2-Äq.)

CRF-Nr 4.A Forest Land				
CO_2	**Submission 2025**	**Submission 2026**	**Differenz**	**in %**
1990	-25.836,72	-26.920,55	-1.083,82	4%
1995	-68.584,44	-69.352,90	-768,46	1%
2000	-52.287,25	-53.251,16	-963,91	2%
2005	-33.495,41	-33.804,86	-309,45	1%
2010	-40.591,00	-40.167,48	423,51	-1%
2015	-47.836,64	-45.317,30	2.519,34	-5%
2020	23.796,03	-2.395,67	-26.191,70	-110%
2021	15.572,54	-4.723,27	-20.295,81	-130%
2022	18.319,81	2.207,91	-16.111,91	-88%
2023	20.478,91	7.117,72	-13.361,19	-65%
CH_4	**Submission 2025**	**Submission 2026**	**Differenz**	**in %**
1990	33,15	32,44	-0,71	-2,16%
1995	26,99	26,51	-0,48	-1,78%
2000	27,00	26,83	-0,17	-0,63%
2005	24,75	24,82	0,07	0,27%
2010	27,30	27,36	0,06	0,23%
2015	27,67	27,70	0,03	0,11%
2020	27,11	27,11	0,00	0,01%
2021	25,71	25,71	0,00	0,01%
2022	44,46	44,44	-0,02	-0,04%
2023	32,77	32,73	-0,05	-0,14%
N_2O	**Submission 2025**	**Submission 2026**	**Differenz**	**in %**
1990	440,81	435,49	-5,32	-1,21%
1995	430,81	414,81	-16,00	-3,71%
2000	436,13	426,03	-10,11	-2,32%
2005	430,24	419,82	-10,41	-2,42%
2010	381,16	379,89	-1,27	-0,33%

CRF-Nr 4.A Forest Land				
2015	371,52	391,96	20,45	5,50%
2020	378,51	374,41	-4,10	-1,08%
2021	346,44	342,31	-4,14	-1,19%
2022	386,79	393,42	6,63	1,71%
2023	414,47	334,17	-80,30	-19,37%

6.4.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (4.A)

Über die in Kapitel 6.1.2.1.9 angeführten geplantenMaßnahmen, sind derzeit keine weiteren spezifischen Maßnahmen zur Verbesserung der Methodik im Bereich Wälder geplant.

6.5 Ackerland (4.B)

6.5.1 Beschreibung der Kategorie (4.B)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
L/T	4 B, Cropland	0	CO_2	25789,59	2,00	16833,12	2,38	-34,73
-/-	4 B, Cropland	0	CH_4	413,90	0,04	312,23	0,05	-24,57
-/-/2	4 B, Cropland	0	N_2O	543,02	0,05	370,18	0,06	-31,83

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2	Tier 2/Tier 3	RS/NS	CS/D
N_2O	Tier 2	RS/NS	CS/D
CH_4	Tier 2/Tier 3	RS/NS	CS/D

Die Kategorie „Ackerland“ (CRF 4.B) setzt sich aus den sieben Unterkategorien „$Ackerland_{annuell}$, Hopfen, Wein, Obst, Baumschulen, Weihnachtsbaumkulturen und Kurzumtriebsplantagen“ zusammen (s. auch Kapitel 6.2.2, Kapitel 6.3.1.2.1, Tabelle 341). Der stratifizierte Einzelnachweis der Ergebnisse der Emissionsberechnungen für diese Subkategorien erfolgt in den CRF. Die Kategorie ist für CO_2-Emissionen eine Hauptkategorie nach der Emissionshöhe und dem Trend, sowie für die N_2O-Emissionen nach der Methode-2-Analyse.

In der Kategorie *„Ackerland“* wird über die Freisetzung/Einbindung von CO_2 aus mineralischen und organischen Böden sowie der ober- und unterirdischen Biomasse berichtet; außerdem über direkte und indirekte Lachgasemissionen durch Humusverluste aus Mineralböden nach Landnutzungsänderung zu Acker und über Methanemissionen aus organischen Böden und Entwässerungsgräben. Direkte und indirekte Lachgasemissionen aus der Düngemittelausbringung (Kunstdünger, Wirtschaftsdünger, Klärschlamm usw.), Ernteresten und der Drainage organischer Böden unter Ackernutzung sowie durch den Zersatz organischer Substanz werden gemäß der IPCC Richtlinien (IPCC, 2006a) unter Landwirtschaft berichtet (CRF 3.D) und daher, im Kapitel Ackerland, mit dem Schlüsselvermerk IE versehen. Das Abbrennen von Feldern und Ernterückständen ist in Deutschland per Gesetz verboten (Bundesanzeiger Verlag, 2004) und wird deshalb nicht berichtet (NO).

Die Emissionen aus der Landnutzungskategorie Ackerland (Summe aus „Ackerland$_{annuell}$, Hopfen, Wein, Obst, Baumschulen, Weihnachtsbaumkulturen“ und „Kurzumtriebsplantagen“) sind, getrennt nach Pools, in Tabelle 379 und im CRF-Werk in den Tabellen 4, 4.B, 4(II).B und 4(III).B dargestellt. Die Gesamtemissionen betrugen 2024 in Deutschland 17.515,5 kt CO_2-Äquivalente. Die Hauptquelle für die Emissionen aus dem Ackerland sind die Böden; so tragen ackerbaulich genutzte organische Böden mit 61,8 % und Mineralböden mit 32,7 % zur Emissionssumme bei, insbesondere durch Emissionen infolge von Bewirtschaftung des langjährigen Ackerlands. Die anthropogen bedingte Netto-Freisetzung von CO_2 aus der Biomasse (5,5 %) ist im Ackerlandsektor gering. Landnutzungsänderungen von Wald zu Ackerland fanden nicht statt, so dass Emissionen aus toter organischer Substanz nicht auftraten.

Der Anteil der perennierenden Ackerlandkulturen (1%) an den gesamten Emissionen aus dem Ackerland ist gegenüber dem annuellen Ackerland (99 %) sehr gering . Im Jahr 2024 fungierten alle Subkategorien des Ackerlandes als Nettoquellen (Tabelle 379).

Das dominierende Treibhausgas im Ackerlandsektor ist mit 16.833,1 kt CO_2-Äquivalenten das CO_2 (96,1 %); daran gemessen, sind die zu berichtenden Lachgasemissionen aus dem Zersatz organischer Bodensubstanz infolge Landnutzungsänderung zu Ackerland gering (insgesamt 370,2 kt CO_2-Äq. ≙ 2,1 % , zusammengesetzt aus direkten (257,1 kt CO_2-Äq. (CRF 4(III)) und indirekten Emissionen (113,1 kt CO_2-Äq. (CRF 4(III); dies gilt auch für die Methanemissionen (312,2 kt CO_2-Äq. ≙ 1,8 % (CRF 4(II).B)), aus der Nutzung organischer Böden.

Tabelle 379: CO_2-, N_2O- und CH_4-Emissionen [kt CO_2-Äq.] aus dem Ackerland 2024. Dargestellt sind Summen sowie obere und untere Schranke des 95 % - Konfidenzintervalls

Acker$_{annuell}$ Emissionen 2024						
Kategorie	**THG**	**[kt CO_2-Äq.]**			**[%]**	
		Emission	**2,5 %-Perz.**	**97,5 %-Perz.**	**2,5 %-Perz.**	**97,5 %-Perz.**
Acker$_{annuell}$ [1)]	∑	17.345,9	14.051,9	19.878,4	19,0	14,6
Mineralboden	CO_2 [2)]	5.263,5	4.510,3	6.016,7	14,3	14,3
	$N_2O_{indirekt}$ [3)]	111,5	0,1	345,4	99,9	209,7
	N_2O_{direkt} [3)]	253,4	46,7	460,1	81,6	81,6
Organischer Boden	CO_2 [2)]	10.363,8	7.171,1	12.524,1	30,8	20,9
	CH_4 [5)]	304,6	149,8	1.329,3	50,8	336,4
	N_2O [4)]	IE	IE	IE	IE	IE
Biomasse	CO_2 [2)]	1.049,1	923,7	1.222,2	12,0	16,5
Streu/Totholz	CO_2 [2)]	NO	NO	NO	NO	NO
Hopfen Emissionen 2024						
Kategorie	**THG**	**[kt CO_2-Äq.]**			**[%]**	
		Emission	**2,5 %-Perz.**	**97,5 %-Perz.**	**2,5 %-Perz.**	**97,5 %-Perz.**
Hopfen [1)]	∑	13,1	8,5	17,9	35,7	36,1
Mineralboden	CO_2 [2)]	1,8	1,4	2,3	24,0	24,0
	$N_2O_{indirekt}$ [3)]	0,0	0,0	0,1	99,9	194,3
	N_2O_{direkt} [3)]	0,1	0,0	0,2	81,9	81,9
Organischer Boden	CO_2 [2)]	8,4	3,7	12,8	56,5	53,2
	CH_4 [5)]	0,5	0,2	2,4	55,7	339,6
	N_2O [4)]	IE	IE	IE	IE	IE
Biomasse	CO_2 [2)]	2,3	0,0	4,7	99,9	108,7
Streu/Totholz	CO_2 [2)]	NO	NO	NO	NO	NO
Weinbau Emissionen 2024						

Kategorie	THG	[kt CO_2-Äq.]			[%]	
		Emission	2,5 %-Perz.	97,5 %-Perz.	2,5 %-Perz.	97,5 %-Perz.
Weinbau [1]	∑	66,3	56,9	76,6	14,3	15,4
Mineralboden	CO_2 [2]	36,4	32,3	40,5	11,3	11,3
	$N_2O_{indirekt}$ [3]	0,3	0,0	0,8	99,9	156,9
	N_2O_{direkt} [3]	0,7	0,3	1,2	62,7	62,7
Organischer Boden	CO_2 [2]	0,3	0,1	0,5	71,7	68,5
	CH_4 [5]	0,0	0,0	0,1	83,6	323,4
	N_2O [4]	IE	IE	IE	IE	IE
Biomasse	CO_2 [2]	28,5	20,6	37,2	27,9	30,6
Streu/Totholz	CO_2 [2]	NO	NO	NO	NO	NO

Obstbau Emissionen 2024

Kategorie	THG	[kt CO_2-Äq.]			[%]	
		Emission	2,5 %-Perz.	97,5 %-Perz.	2,5 %-Perz.	97,5 %-Perz.
Obstbau [1]	∑	21,0	18,8	23,2	10,5	10,7
Mineralboden	CO_2 [2]	-9,7	-8,8	-10,5	8,4	8,4
	$N_2O_{indirekt}$ [3]	0,3	0,0	0,9	99,9	199,1
	N_2O_{direkt} [3]	0,7	0,2	1,2	77,5	77,5
Organischer Boden	CO_2 [2]	56,0	36,3	73,6	35,3	31,4
	CH_4 [5]	3,5	1,9	13,6	47,5	286,6
	N_2O [4]	IE	IE	IE	IE	IE
Biomasse	CO_2 [2]	-29,9	-26,7	-33,3	10,8	11,2
Streu/Totholz	CO_2 [2]	NO	NO	NO	NO	NO

Baumschulen Emissionen 2024

Kategorie	THG	[kt CO_2-Äq.]			[%]	
		Emission	2,5 %-Perz.	97,5 %-Perz.	2,5 %-Perz.	97,5 %-Perz.
Baumschulen[1]	∑	39,3	35,4	43,0	10,0	9,5
Mineralboden	CO_2 [2]	61,4	53,8	68,9	12,3	12,3
	$N_2O_{indirekt}$ [3]	0,9	0,0	2,4	99,9	168,1
	N_2O_{direkt} [3]	2,0	0,7	3,4	65,5	65,5
Organischer Boden	CO_2 [2]	61,9	44,2	75,3	28,6	21,6
	CH_4 [5]	2,9	1,6	10,8	43,5	273,1
	N_2O [4]	IE	IE	IE	IE	IE
Biomasse	CO_2 [2]	-89,8	-78,0	-101,8	13,2	13,3
Streu/Totholz	CO_2 [2]	NO	NO	NO	NO	NO

Weihnachtbaumkulturen Emissionen 2024

Kategorie	THG	[kt CO_2-Äq.]			[%]	
		Emission	2,5 %-Perz.	97,5 %-Perz.	2,5 %-Perz.	97,5 %-Perz.
Weihnachtsbaumkulturen[1]	∑	6,2	4,0	8,0	34,7	30,0
Mineralboden	CO_2 [2]	0,9	0,8	1,0	11,3	11,3
	$N_2O_{indirekt}$ [3]	NO	NO	NO	NO	NO
	N_2O_{direkt} [3]	NO	NO	NO	NO	NO
Organischer Boden	CO_2 [2]	5,3	2,9	7,0	44,1	31,8
	CH_4 [5]	0,3	0,1	1,4	69,3	448,7
	N_2O [4]	IE	IE	IE	IE	IE
Biomasse	CO_2 [2]	-0,3	-0,2	-0,4	32,9	32,9

Streu/Totholz	CO_2 2)	NO	NO	NO	NO	NO
Kurzumtriebsplantagen Emissionen 2024						
Kategorie	**THG**	**[kt CO_2-Äq.]**			**[%]**	
		Emission	**2,5 %-Perz.**	**97,5 %-Perz.**	**2,5 %-Perz.**	**97,5 %-Perz.**
KUPs[1)]	∑	23,8	19,4	28,1	18,5	18,3
Mineralboden	CO_2 2)	0,5	0,3	0,6	29,7	30,6
	$N_2O_{indirekt}$ 3)	0,1	0,0	0,2	99,9	222,8
	N_2O_{direkt} 3)	0,1	0,0	0,2	95,5	95,5
Organischer Boden	CO_2 2)	12,2	5,6	18,4	54,4	51,0
	CH_4 5)	0,4	0,1	1,3	64,7	276,8
	N_2O[4)]	IE	IE	IE	IE	IE
Biomasse	CO_2 2)	10,6	8,2	13,1	23,0	23,2
Streu/Totholz	CO_2 2)	NO	NO	NO	NO	NO

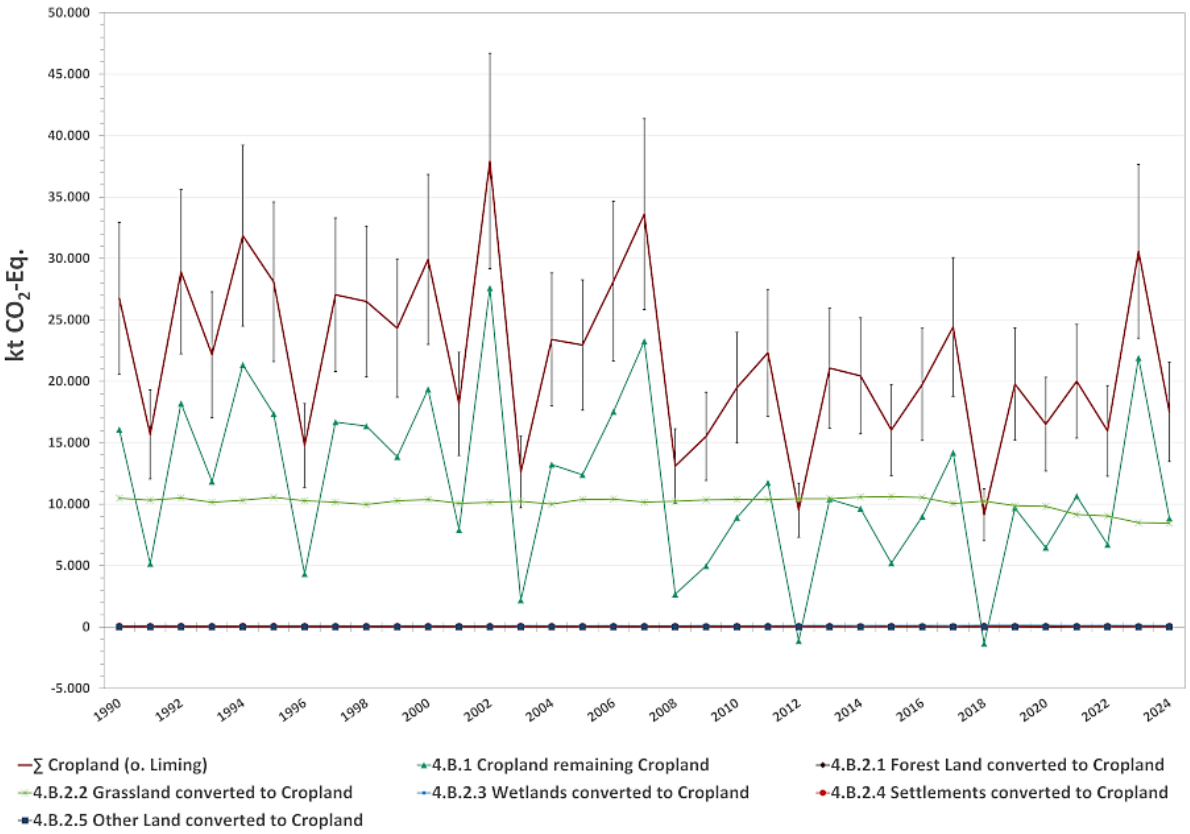
1) Summe der Emissionen aus den CRF 4.B, 4.(II) B und 4.(III) B.
2) CRF 4.B
3) CRF 4. (III) B
4) CRF 3.D.1.f
5) CRF 4.(II) B

Abbildung 91 und Abbildung 92 zeigen den Verlauf der Emissionen aus dem Ackerland über die Zeit. Die Gesamtemission war im Jahr 2024 um -9.231 kt CO_2-Äq ≙ -34,5 % geringer als im Basisjahr 1990. Der Verlauf der Emissionen zeichnet qualitativ im Wesentlichen den Verlauf der Emissionen aus den Mineralböden nach, die hauptsächlich witterungsbedingt deutliche jährliche Unterschiede aufweisen. Trotz der starken jährlichen Ausschläge der Emissionskurve, zeigt der Trend für die THG-Emissionen aus Mineralböden unter Ackerland durchschnittlich eine deutliche Abnahme zwischen dem Basisjahr 1990 und 2024 (ca. 62 %), zurückzuführen auf die Änderung der Witterungsbedingungen (zunehmende Trocknis), die Abnahme der Ackerlandfläche (> 10.000 km²-Äq ≙ -8 %), als auch auf die deutliche Abnahme des Grünlandumbruchs (Fläche: ca. -26 %). Die Emissionen aus den organischen Böden weisen zwischen 1990 und 2024 kaum Unterschiede bezüglich der absoluten Höhe auf. Allerdings sorgte die zunehmende Trockenheit, insbesondere in extremen Jahren (z.B. 2018), einhergehend mit entsprechend niedrigen Grundwasserständen, zu absolut extremen Emissionsereignissen. Der Amplitudenverlauf der Emissionskurve der organischen Böden ist folgerichtig gegenläufig gegenüber dem der Mineralböden. Insgesamt bedingen die bodenbürtigen Nettoemissionen 94,5 % der Treibhausgassumme des Ackerlandsektors (CRF 4.B.; 4.B.1; 4.B.2, inkl. aller Subkategorien). 50,5 % (≙ 8.843 kt CO_2-Äq.) der Emissionen des Ackerlandsektors stammen von dauerhaft bewirtschaftetem Ackerland (Verbleibkategorie), 48,3 % (≙ 8.459 kt CO_2-Äq.) aus Landnutzungsänderungen von Grünland i.e.S. zu Ackerland. Die Emissionen infolge Landnutzungsänderungen von Feuchtgebieten zu Ackerland sind gering (133,6 kt CO_2-Äq ≙ 0,8 %). Die Umwandlung von Siedlungsflächen führte 2024 zu Emissionen in Höhe von 70 kt CO_2-Äq. (≙ 0,4 %). Flächenübergänge von Sonstigem Land zu Ackerland waren 2024 vernachlässigbar gering, fungierten allerdings als marginale Senke (-1,2 kt CO_2-Äq. ≙ 0,01 %).

Die Kurvenverläufe der Zeitreihen, insbesondere deutliche Änderungen, haben ihre Ursache vor allem in den periodischen Erhebungsterminen der Flächendaten (siehe Kapitel 6.3.1.5). Der Erfassung von Landnutzungsänderungen anhand räumlich expliziter Daten lagen Datensätze aus den Jahren 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 und 2024 zugrunde (vergl. Kapitel 6.3.1). Landnutzungsänderungen, die zwischen diesen Jahren auftraten, wurden durch lineare Interpolation ermittelt, so dass die jährlichen Konversionsflächen zwischen den

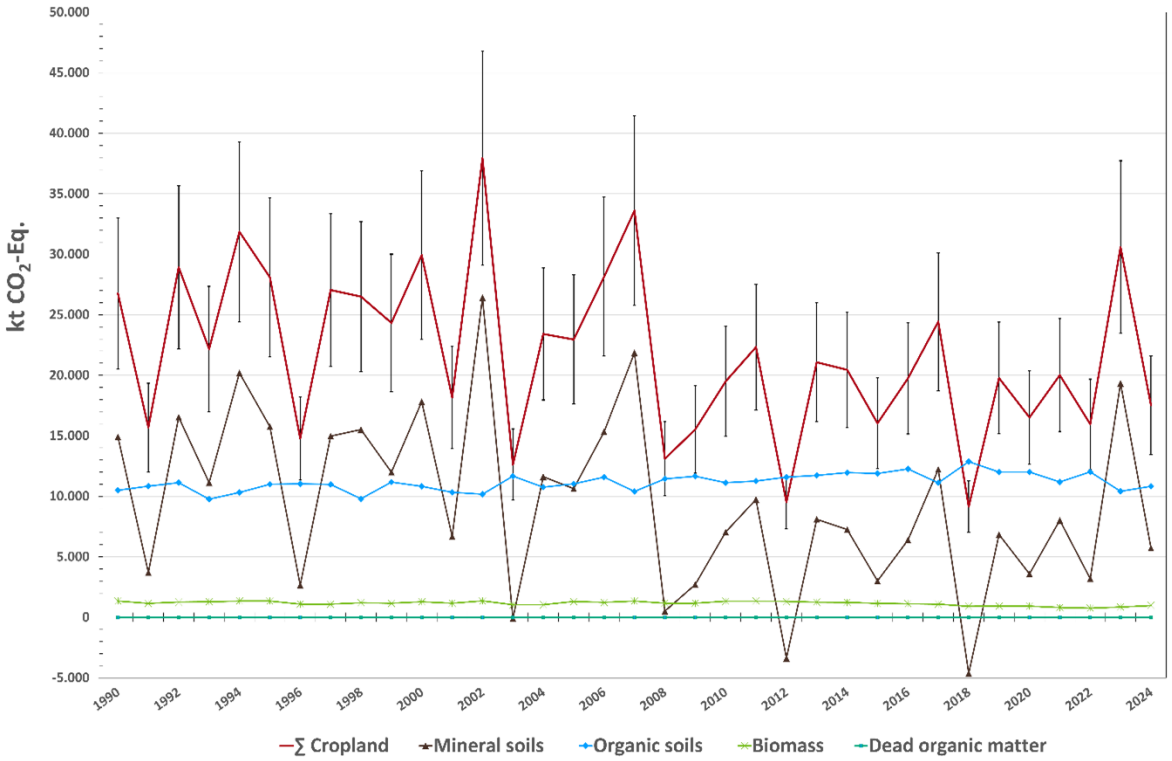
Erhebungszeitpunkten konstant sind. Die Landnutzung vor dem Jahr 2010 wurde durch Extrapolation mithilfe stochastischer Methoden ermittelt (Kapitel 6.3.1.2.2).

Abbildung 91: Treibhausgasemissionen (Summe aus CO_2, CH_4 und N_2O) [kt CO_2-Äq.] infolge Landnutzung und Landnutzungsänderung aus Ackerland von 1990-2024 nach Unterkategorien (Unsicherheitendarstellung nur für Gesamtsumme)



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

Abbildung 92: Treibhausgasemissionen (Summe aus CO_2, CH_4 und N_2O) [kt CO2-Äq.] infolge Landnutzung und Landnutzungsänderung aus Ackerland von 1990-2024 nach Pools (Unsicherheitendarstellung nur für Gesamtsumme)



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

6.5.2 Methodische Aspekte (4.B)

6.5.2.1 Datenquellen

Es wurden folgende Datenquellen/-sätze genutzt:

- Statistisches Bundesamt, Fachserie 3, Reihe 3, Land- und Forstwirtschaft, Fischerei, Landwirtschaftliche Bodennutzung und pflanzliche Erzeugung (Statistisches Bundesamt, FS 3, R 3);
- Statistisches Bundesamt, Fachserie 3, Reihe 3.2.1, Land- und Forstwirtschaft, Fischerei, Wachstum und Ernte – Feldfrüchte; (Statistisches Bundesamt, FS 3, R 3.2.1)
- Statistisches Bundesamt, Fachserie 3, Reihe 3.1.2, Land- und Forstwirtschaft, Fischerei, Bodennutzung der Betriebe (Landwirtschaftlich genutzte Flächen); (Statistisches Bundesamt, FS 3, R 3.1.2);
- 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 4 - Agriculture, Forestry and Other Land Use (IPCC, 2006a);
- „Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung –DüV)“ (Düngeverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 27. Februar 2007 (BGBl. I S. 221), die zuletzt durch Artikel 5 Absatz 36 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212) geändert worden ist) (Bundesgesetzblatt, 2012);

- Zwischenbericht Forschungsprojekt „Methodenentwicklung zur Erfassung der Biomasse mehrjährig verholzter Pflanzen außerhalb von Wäldern“ (Pöpken, 2011).
- (Jacobs et al., 2018): Landwirtschaftlich genutzte Böden in Deutschland - Ergebnisse der Bodenzustandserhebung; Johann Heinrich von Thünen-Institut, 316 S. Thünen Report 64; Braunschweig. DOI:10.3220/REP1542818391000.

6.5.2.2 Biomasse

In der Kategorie Ackerland wird der Pool Biomasse untergliedert nach Ausprägung der Pflanzen in (vergl. Kapitel 6.2.2 und Kapitel 6.3.1.2.1)

- krautige Pflanzen („$Ackerland_{annuell}$“)
- mehrjährige Gehölzkulturen („Hopfen-, Wein- und Obstanbauflächen, Baumschulen, Weihnachtsbaumkulturen“ und „Kurzumtriebsplantagen“).

Die Methoden und Unterstellungen zur Berechnung der Kohlenstoffvorratsänderungen in der ober- und unterirdischen Biomasse von Pflanzen sind in 6.1.2.4 ff beschrieben, die spezifischen Methoden und die Herleitung der Emissionsfaktoren für:

- krautige Pflanzen annueller Kulturen („$Ackerland_{annuell}$“) in Kapitel 6.1.2.3.3,
- „Hopfenanbauflächen“ in Kapitel 6.1.2.3.5.6,
- „Obstanbauflächen“ in Kapitel 6.1.2.3.5.1,
- „Weinanbauflächen“ in Kapitel 6.1.2.3.5.2,
- „Weihnachtsbaumkulturen“ in Kapitel 6.1.2.3.5.4,
- „Baumschulen“ in Kapitel 6.1.2.3.5.3,
- „Kurzumtriebsplantagen“ in Kapitel 6.1.2.3.5.5.

Die Emissionsfaktoren für krautige Pflanzen werden auf Bundeslandebene regionalisiert den Emissionsberechnungen zugrunde gelegt.

6.5.2.2.1 Landnutzungsänderung

Annuelle und perennierende Ackerkulturen werden differenziert nach den in Kapitel 6.5.2.2 angeführten Unterkategorien räumlich explizit und umfänglich nachgewiesen. Daher werden bei Landnutzungsänderungen von/zu Ackerland die in Kapitel 6.1.2.3.3 und Kapitel 6.1.2.3.4 aufgeführten Kohlenstoffvorräte in der ober- und unterirdischen Biomasse, nach den in Kapitel 6.1.2.3.1 ff. beschriebenen Methoden, als Ziel- bzw. Ausgangswert, den Berechnungen der CO_2-Einbindung/Emissionen in/aus dem Pool Ackerlandbiomasse zugrunde gelegt.

6.5.2.2.2 Verbleibkategorie

Während in den Verbleibkategorien „$Ackerland_{annuell}$“ und „Hopfenanbau“ einheitliche Vegetationsstrukturen auftreten, somit bezüglich der Biomasse ein dynamisches Gleichgewicht unterstellt werden kann (folglich keine Emissionen auftreten; die entsprechenden Felder im Tabellenwerk sind mit dem Notationsschlüssel NA versehen) (s. Kapitel 6.1.2.3.1), werden die C-Vorräte der pflanzlichen Biomasse in den Subkategorien „Wein- und Obstanbau, Baumschulen, Weihnachtsbaumkulturen“ und „Kurzumtriebsplantagen“ für jedes Berichtsjahr berechnet. Flächenumwidmungen zwischen den einzelnen Ackerland-Subkategorien werden wie Landnutzungsänderungen gehandhabt und in CRF 4.B explizit ausgewiesen. Die

Flächenänderungen zwischen annuellen und den ausgewiesenen perennierenden Ackerkulturen werden räumlich explizit und umfänglich nachgewiesen. Die Berechnung erfolgt nach der in Kapitel 6.1.2.3.1 ff beschriebenen Gain-Loss Methode (IPCC, 2006a).

6.5.2.3 Mineralische Böden

6.5.2.3.1 Landnutzungsänderung

Die Berechnung der CO_2-Emissionen infolge der Umwandlung von Landflächen in Ackerland ist in Kapitel 6.1.2.1, für die direkten N_2O-Emissionen in Kapitel 6.1.2.7 und für indirekte N_2O-Emissionen in Kapitel 6.1.2.8 beschrieben. Die Herleitung der Emissionsfaktoren ist in Kapitel 6.1.2.1 beschrieben, die Unsicherheiten sind in Kapitel 6.5.3 ausgewiesen. Die Ergebnisse für die Emissionen aus Mineralböden finden sich für die:

- CO_2-Emissionen in den CRF 4.B.2.a-4.B.2.e,
- direkten und indirekten N_2O-Emissionen in der CRF 4 (III).B.2

Die direkten und indirekten Lachgasemissionen infolge des Zersatzes organischer Substanz in Mineralböden der Verbleibkategorie Ackerland werden gemäß den 2006 IPCC Guidelines (IPCC, 2006a) im Tabellenwerk des Landwirtschaftssektors berichtet (CRF 3.D.1.e).

6.5.2.3.2 Verbleibkategorie

Für Flächen unter verbleibender Ackerlandnutzung werden mit dieser Submission erstmalig Emissionen hektargenau berichtet, durch Berechnung der Kohlenstoffvorratsänderung in Mineralböden mittels eines mathematischen Prozessmodells. Die Beschreibung des Modells sowie der Methodik findet sich in Kapitel 6.1.2.1.

"Nutzungsübergänge" zwischen den Subkategorien des Ackerlandes werden wie Landnutzungsänderungen behandelt, die daraus resultierenden Emissionen jedoch summarisch in der Verbleibkategorie zusammengefasst (Kapitel 6.1.2.1). Die Ergebnisse für die Emissionen aus den Verbleibkategorien von Mineralböden unter Ackerland finden sich für die

- CO_2-Emissionen in der CRF 4.B.1
- direkten und indirekten N_2O-Emissionen in den CRF 4(III)B.2.1 und 4(III)B.2.

6.5.2.4 Organische Böden

Die Berechnungen der CO_2-, N_2O- und CH_4-Emissionen aus organischen Böden infolge Landnutzung und Landnutzungsänderung sowie die Herleitung der entsprechenden Emissionsfaktoren sind in Kapitel 6.1.2.2 beschrieben und die Ermittlung der Flächen sowie Flächennutzung in Kapitel 6.3.1 ff. Die jährlichen Emissionen nach Landnutzungsänderung zu Ackerland werden wie die Emissionen aus verbleibender Ackernutzung berechnet, letztere werden in der CRF 4.B.1, die Emissionen infolge von Landnutzungsänderung in den CRF 4.B.2.a - 4.B.2.e ausgewiesen.

Die N_2O-Emissionen aus ackerbaulich genutzten organischen Böden werden im Sektor „Landwirtschaft“ unter Kapitel 3.D.1.f „Cultivation of Histosols“ berichtet.

Die im Sektor „Landwirtschaft“ unter Kapitel 3.D.1.f „Cultivation of Histosols“ berichteten Flächen unterscheiden sich nicht von denen, die im LULUCF-Sektor berichtet werden (siehe auch Kapitel 6.1.2.2.1).

Die Methanemissionen aus organischen Böden sowie aus Draingräben sind in der CRF 4(II).B.2 Cropland zu finden.

6.5.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (4.B)

Die Bestimmung der Unsicherheiten für Emissionsfaktoren und Aktivitätsdaten erfolgten gemäß der IPCC 2006 Guidelines (IPCC, 2006a). Nähere Erläuterungen hierzu finden sich in Kapitel 6.1.2.1. Tabelle 380 bis Tabelle 387 zeigen die Unsicherheiten der Emissionsfaktoren (EF) des Ackerlandsektors, unterschieden nach Pools und Unterkategorien.

Die Tabellen unterstreichen, dass Standardnormalverteilungen bzw. annähernd Normalverteilungen hauptsächlich die EF für die Biomasse aufweisen. Der Großteil der Unsicherheiten im Zusammenhang mit Böden ist lognormal verteilt, wogegen die CO_2-Emissionen aus organischen Böden eine Dreiecksverteilung aufweisen. Die größten Unsicherheiten weisen die N_2O- EF für Mineralböden auf, was im Wesentlichen auf die Nutzung der IPCC-Standardfaktoren zurückzuführen ist.

Im Rahmen der Gaußschen Berechnung der Unsicherheitenfortpflanzung, wurden für die untere Schranke des 95 %-Konfidenzintervalls vereinzelt Unsicherheiten > 100 % berechnet. Die angewandte Berechnungsmethode entspricht zwar dem Reglement, ist hier fachlich jedoch nicht zielführend, da bestimmte Prozesse nicht zu negativen Emissionen führen können, wie z.B. die direkten/indirekten N_2O-Emissionen aus Mineralböden infolge des Zersatzes der organischen Bodensubstanz. Daher wurde die Unsicherheit für die untere Schranke auf 99,9 % festgelegt.

Die große Unsicherheit der EF für Methan und Lachgas aus organischen Böden beruht auf deren extrem großer Variabilität bei den Geländemessungen und dem Umstand, dass beim Methan auch negative Emissionen auftreten können (s. Kapitel 6.1.2.2.2).

Die Unsicherheiten für die Aktivitätsdaten sind normalverteilt und die Hälfte des 95 % -Konfidenzintervalls beträgt im Ackerlandbereich zwischen 0,045 – 196 %. Beim Rasterpunktansatz ist der Stichprobenfehler systembedingt abhängig von der Stichprobengröße, somit vom Flächenanteil der jeweiligen Unterkategorie an der Gesamtfläche (vgl. Kapitel 6.3.1). So weisen lediglich die Unterkategorien im Ackerlandbereich größere Unsicherheiten auf (≥ 100 %) deren absolute Fläche ≤ 3 ha beträgt (0,0002 % der gesamten Ackerlandfläche). Eine flächengewichtete Ableitung einer Gesamtunsicherheit der Flächendaten in der Ackerlandkategorie ergibt über den gesamten Berichtszeitraum eine Unsicherheit von 0,045 % [Hälfte des 95-% Konfidenzintervalls].

Die Gesamtunsicherheit für die Landnutzungskategorie Ackerland beträgt für das Jahr 2024 18,3 % [2,5 % -Perzentil] bzw. 14,1 % [97,5 % -Perzentil]; den Hauptbeitrag hierzu leisten die CO_2-Emissionen aus den organischen Böden (94,2 %) gefolgt von den Mineralböden (5,6 %). Zur Unsicherheit des gesamten LULUCF-Inventars tragen lediglich die Emissionen aus den organischen Böden (5,2 %) einen merklichen Anteil bei.

Die nachfolgenden Tabellen zeigen die impliziten Emissionsfaktoren [t C ha^{-1} a^{-1}] zur Berechnung der THG-Emissionen aus den Ackerlandsubkategorien Deutschlands und die Unsicherheiten (2,5 %- und 97,5 %-Perzentil [%]) der sich aus den Emissionsberechnungen ergebenden impliziten Emissionsfaktoren, unterschieden nach Pools und Unterkategorien für das Jahr 2024.

Tabelle 380: Implizite Emissionsfaktoren [t C ha^{-1} a^{-1}] und ihre Unsicherheiten für THG-Emissionen aus annuellem Ackerland 2024

Ackerland$_{annuell}$		Implizite Emissionsfaktor	Schranken	
Landnutzung$_{vor}$	Landnutzung$_{nach}$		untere	obere
Mineralboden CO_2-C [1)]		**[t C ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Acker$_{annuell}$		-0,038	23,29	23,28
Wald		NO	NO	NO
Hopfen		-0,163	16,7	16,7
Weinanbau		0,321	22,97	22,97
Obstanbau		-0,632	14,16	14,16
Kurzumtriebsplantagen		NO	NO	NO
Baumschulen		-0,252	13,96	13,96
Weihnachtsbaumkulturen	Acker$_{annuell}$	NO	NO	NO
Grünland i.e.S.		-0,862	18,88	18,88
Gehölze		-0,987	19,37	19,36
Hecken		-0,96	23,91	23,91
Terr. Feuchtgebiete		-1	66,41	66,41
Siedlungen		-0,262	15,81	15,91
Photovoltaikflächen		NO	NO	NO
Sonstige Fläche		2	73,02	73,02
Mineralboden N_2O_{direkt} [2)]		**[kg N_2O ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Wald		NO	NO	NO
Grünland i.e.S.		0,804	85,91	85,91
Gehölze		0,909	86,02	86,02
Hecken	Acker$_{annuell}$	0,796	87,16	87,16
Terr. Feuchtgebiete		1,3687	99,9	107,75
Siedlungen		NO	NO	NO
Photovoltaikflächen		0,3654	89,66	88,82
Sonstige Fläche		NO	NO	NO
Mineralboden $N_2O_{indirekt}$ [2)]		**[kg N_2O ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Wald		NO	NO	NO
Grünland i.e.S.		0,354	99,9	220,94
Gehölze		0,4	99,9	220,98
Hecken	Acker$_{annuell}$	0,35	99,9	221,43
Terr. Feuchtgebiete		0,602	99,9	230,31
Siedlungen		0,161	99,9	247,44
Photovoltaikflächen		NO	NO	NO
Sonstige Fläche		NO	NO	NO
Biomasse [3)]		**[t C ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Wald		NO	NO	NO
Hopfen		0,008	14,6	14,6
Weinanbau		-0,072	21,21	21,21
Obstanbau		-0,628	13,39	13,39
Kurzumtriebsplantagen		NO	NO	NO
Baumschulen		-0,5	20,8	20,8
Weihnachtsbaumkulturen	Acker$_{annuell}$	NO	NO	NO
Grünland i.e.S.		-0,03	16,73	16,73
Gehölze		-5,373	16,4	22,91
Hecken		-26,755	21,47	26,77
Terr. Feuchtgebiete		-2,405	35,89	38,9
Torfabbau		0,352	19,43	19,43
Siedlung		-0,008	45,9	47,36
Photovoltiakfläche		NO	NO	NO

Ackerland$_{annuell}$		Implizite Emissionsfaktor	Schranken	
Landnutzung$_{vor}$	Landnutzung$_{nach}$		untere	obere
Sonstige Fläche		NO	NO	NO
Tote organische Substanz [3)]		**[t C ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Wald	Ackerannuell	NO	NO	NO

1) Berechnung über 20 Jahre; Vorratsänderung: positiv ≙ Senke; negativ ≙ Quelle

2) Berechnung über 20 Jahre; Emission: positiv ≙ Quelle; negativ ≙ Senke

3) Berechnung nur im ersten Jahr der Landnutzungsänderung; Vorratsänderung: positiv ≙ Senke; negativ ≙ Quelle

Tabelle 381: Implizite Emissionsfaktoren [t C ha^{-1} a^{-1}] und ihre Unsicherheiten für THG-Emissionen aus dem Hopfenanbau 2024

Hopfen		Implizite Emissionsfaktor	Schranken	
Landnutzung$_{vor}$	Landnutzung$_{nach}$		untere	obere
Mineralboden CO_2-C [1)]		**[t C ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Hopfen	Hopfen	-0,02	11,22	11,21
Wald		NO	NO	NO
Acker$_{annuell}$		0,041	16,7	16,7
Weinanbau		0,589	99,99	196,23
Obstanbau		-0,428	74,56	74,56
Kurzumtriebsplantagen		NO	NO	NO
Baumschulen		-0,096	99,9	196,16
Weihnachtsbaumkulturen		NO	NO	NO
Grünland i.e.S.		-0,655	38,48	38,48
Gehölze		-0,741	99,9	196,71
Hecken		-1,073	99,9	196,71
Terr. Feuchtgebiete		NO	NO	NO
Siedlungen		-0,141	99,99	139,1
Photovoltaikfläche		NO	NO	NO
Sonstige Fläche		NO	NO	NO
Mineralboden N_2O_{direkt} [2)]		**[kg N_2O ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Wald	Hopfen	NO	NO	NO
Grünland i.e.S.		0,472	92,23	92,23
Gehölze		0,647	99,9	213,83
Hecken		0,751	99,9	213,83
Terr. Feuchtgebiete		NO	NO	NO
Siedlungen		0,219	99,9	164,27
Photovoltaikfläche		NO	NO	NO
Sonstige Fläche		NO	NO	NO
Mineralboden $N_2O_{indirekt}$ [2)]		**[kg N_2O ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Wald	Hopfen	NO	NO	NO
Grünland i.e.S.		0,208	99,9	223,47
Gehölze		0,285	99,9	295,22
Hecken		0,331	99,9	295,22
Terr. Feuchtgebiete		NO	NO	NO
Siedlungen		0,096	99,9	221,83
Photovoltaikfläche		NO	NO	NO
Sonstige Fläche		NO	NO	NO
Biomasse [3)]		**[t C ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Wald	Hopfen	NO	NO	NO
Acker$_{annuell}$		-0,018	14,61	14,61
Weinanbau		-0,364	99,9	196,45
Obstanbau		-1,338	75,08	75,08

Hopfen		Implizite Emissionsfaktor	Schranken	
Landnutzung$_{vor}$	Landnutzung$_{nach}$		untere	obere
Kurzumtriebsplantagen		NO	NO	NO
Baumschulen		NO	NO	NO
Weihnachtsbaumkulturen		NO	NO	NO
Grünland i.e.S.		-0,067	37,82	37,82
Gehölze		-3,221	99,9	197,3
Hecken		NO	NO	NO
Terr. Feuchtgebiete		NO	NO	NO
Torfabbau		NO	NO	NO
Siedlungen		NO	NO	NO
Photovoltaikfläche		NO	NO	NO
Sonstige Fläche		NO	NO	NO
Tote organische Substanz [3)]		**[t C ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Wald	Hopfen	NO	NO	NO

1) Berechnung über 20 Jahre; Vorratsänderung: positiv ≙ Senke; negativ ≙ Quelle

2) Berechnung über 20 Jahre; Emission: positiv ≙ Quelle; negativ ≙ Senke

3) Berechnung nur im ersten Jahr der Landnutzungsänderung; Vorratsänderung: positiv ≙ Senke; negativ ≙ Quelle

Tabelle 382: Implizite Emissionsfaktoren [t C ha^{-1} a^{-1}] und ihre Unsicherheiten für THG-Emissionen aus dem Weinanbau 2024

Weinanbau		Implizite Emissionsfaktor	Schranken	
Landnutzung$_{vor}$	Landnutzung$_{nach}$		untere	obere
Mineralboden CO_2-C [1)]		**[t C ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Weinanbau		-0,02	16,13	16,12
Wald		NO	NO	NO
Acker$_{annuell}$		-0,397	19,72	19,71
Hopfen		-1,159	99,9	196,23
Obstanbau		-1,105	30,86	30,86
Kurzumtriebsplantagen		NO	NO	NO
Baumschulen		-0,712	99,9	138,91
Weihnachtsbaumkulturen	Weinanbau	NO	NO	NO
Grünland i.e.S.		-1,245	26,88	26,88
Gehölze		-1,199	36,15	36,15
		-1,528	99,9	139,84
Terr. Feuchtgebiete		-0,869	99,9	196,28
Siedlungen		-0,579	50,81	50,85
Photovoltaikfläche		NO	NO	NO
Sonstige Fläche		1,974	99,9	168,56
Mineralboden N_2O_{direkt} [2)]		**[kg N_2O ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Wald		NO	NO	NO
Grünland i.e.S.		0,823	88,02	88,02
Gehölze		0,803	91,28	91,28
Hecken	Weinanbau	1,104	99,9	163,03
Terr. Feuchtgebiete		0,705	99,9	213,83
Siedlungen		0,439	99,9	101,1
Photovoltaikfläche		NO	NO	NO
Sonstige Fläche		NO	NO	NO
Mineralboden $N2O_{indirekt}$ [2)]		**[kg N_2O ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Wald		NO	NO	NO
Grünland i.e.S.	Weinanbau	0,362	99,9	221,77
Gehölze		0,353	99,9	223,08
Hecken		0,486	99,9	260,79

Weinanbau		Implizite Emissionsfaktor	Schranken	
Landnutzung$_{vor}$	Landnutzung$_{nach}$		untere	obere
Terr. Feuchtgebiete		0,31	99,9	295,23
Siedlungen		0,193	99,9	227,28
Photovoltaikfläche		NO	NO	NO
Sonstige Fläche		NO	NO	NO
Biomasse [3]		**[t C ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Wald	Weinanbau	NO	NO	NO
Acker$_{annuell}$		0,085	17,77	17,77
Hopfen		0,163	99,9	196,45
Obstbau		-0,821	31,54	31,54
Kurzumtriebsplantagen		NO	NO	NO
Baumschulen		0,111	99,9	139,95
Weihnachtsbaumkulturen		NO	NO	NO
Grünland i.e.S.		0,037	25,95	25,95
Gehölze		-7,055	34,71	38,13
Hecken		0,132	99,9	140,36
Terr. Feuchtgebiete		0,132	99,9	197,09
Torfabbau		NO	NO	NO
Siedlungen		0,08	51,25	51,25
Photovoltaikflächen		NO	NO	NO
Sonstige Fläche		0,142	99,9	168,39
Tote organische Substanz [3]		**[t C ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Wald	Weinanbau	NO	NO	NO

1) Berechnung über 20 Jahre; Vorratsänderung: positiv ≙ Senke; negativ ≙ Quelle

2) Berechnung über 20 Jahre; Emission: positiv ≙ Quelle; negativ ≙ Senke

3) Berechnung nur im ersten Jahr der Landnutzungsänderung; Vorratsänderung: positiv ≙ Senke; negativ ≙ Quelle

Tabelle 383: Implizite Emissionsfaktoren [t C ha^{-1} a^{-1}] und ihre Unsicherheiten für THG-Emissionen aus dem Obstanbau 2024

Obstanbau		Implizite Emissionsfaktor	Schranken	
Landnutzung$_{vor}$	Landnutzung$_{nach}$		untere	obere
Mineralboden CO_2-C [1]		**[t C ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Obstanbau	Obstanbau	-0,02	12,57	12,57
Wald		NO	NO	NO
Acker$_{annuell}$		0,456	13,97	13,97
Hopfen		0,346	99,9	113,48
Weinanbau		0,962	44,94	44,94
Kurzumtriebsplantagen		NO	NO	NO
Baumschulen		0,334	19,17	19,16
Weihnachtsbaumkulturen		NO	NO	NO
Grünland i.e.S.		-0,579	18,89	18,88
Gehölze		-0,455	29,71	29,71
Hecken		-0,58	99,9	114,32
Terr. Feuchtgebiete		-1,641	99,9	196,23
Siedlungen		0,222	23,74	23,8
Photovoltaikflächen		NO	NO	NO
Sonstige Fläche		NO	NO	NO
Mineralboden N_2O_{direkt} [2]		**[kg N_2O ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Wald	Obstanbau	NO	NO	NO
Grünland i.e.S.		0,412	85,92	85,92
Gehölze		0,237	88,92	88,92
Hecken		0,306	99,9	141,75

Obstanbau		Implizite Emissionsfaktor	Schranken	
Landnutzung$_{vor}$	Landnutzung$_{nach}$		untere	obere
Terr. Feuchtgebiete		1,121	99,9	213,79
Siedlungen		0,045	91,39	90,57
Photovoltaikflächen		NO	NO	NO
Sonstige Fläche		NO	NO	NO
Mineralboden $N_2O_{indirekt}$ 2)		**[kg N_2O ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Wald	Obstanbau	NO	NO	NO
Grünland i.e.S.		0,181	99,9	220,94
Gehölze		0,104	99,9	222,13
Hecken		0,135	99,9	248,05
Terr. Feuchtgebiete		0,493	99,9	295,19
Siedlungen		0,02	99,9	222,79
Photovoltaikflächen		NO	NO	NO
Sonstige Fläche		NO	NO	NO
Biomasse 3)		**[t C ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Wald	Obstanbau	NO	NO	NO
Acker$_{annuell}$		0,047	13,19	13,19
Hopfen		0,662	99,9	113,82
Weinbau		-0,185	14,41	14,41
Kurzumtriebsplantagen		NO	NO	NO
Baumschulen		-0,759	22,5	22,5
Weihnachtsbaumkulturen		NO	NO	NO
Grünland i.e.S.		-0,168	16,17	16,17
Gehölze		-6,516	28,45	31,76
Hecken		0,159	99,9	114,91
Terr. Feuchtgebiete		1,04	99,9	168,19
Torfabbau		0,902	99,9	196,53
Siedlungen		-1,063	24,01	24,01
Photovoltaikfläche		NO	NO	NO
Sonstige Fläche		NO	NO	NO
Tote organische Substanz 3)		**[t C ha^{-1} a^{-1}]**	**[t C ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**
Wald	Obstanbau	NO	NO	NO

1) Berechnung über 20 Jahre; Vorratsänderung: positiv ≙ Senke; negativ ≙ Quelle

2) Berechnung über 20 Jahre; Emission: positiv ≙ Quelle; negativ ≙ Senke

3) Berechnung nur im ersten Jahr der Landnutzungsänderung; Vorratsänderung: positiv ≙ Senke; negativ ≙ Quelle

Tabelle 384: Implizite Emissionsfaktoren [t C ha^{-1} a^{-1}] und ihre Unsicherheiten für THG-Emissionen aus Baumschulen 2023

Baumschulen		Implizite Emissionsfaktor	Schranken	
Landnutzung$_{vor}$	Landnutzung$_{nach}$		untere	obere
Mineralboden CO_2-C 1)		**[t C ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Baumschulen	Baumschulen	-0,02	11,17	11,16
Wald		NO	NO	NO
Acker$_{annuell}$		-0,221	14,53	14,53
Hopfen		-0,021	99,9	196,16
Weinbau		0,613	99,9	138,91
Obstbau		-0,352	28,23	28,22
Kurzumtriebsplantagen		NO	NO	NO
Weihnachtsbaumkulturen		NO	NO	NO
Grünland i.e.S.		-1,084	21,48	21,48
Gehölze		-0,978	19,32	19,32
Hecken		-1,366	67,74	67,74

Baumschulen		Implizite Emissionsfaktor	Schranken	
$Landnutzung_{vor}$	**$Landnutzung_{nach}$**		**untere**	**obere**
Terr. Feuchtgebiete		-0,638	99,9	196,22
Siedlungen		1,000	38,85	38,88
Photovoltaikfläche		NO	NO	NO
Sonstige Fläche		NO	NO	NO
Mineralboden N_2O_{direkt} 2)		**[kg N_2O ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Wald	Baumschulen	NO	NO	NO
Grünland i.e.S.		0,554	86,52	86,52
Gehölze		0,57	86,01	86,01
Hecken		0,486	99,9	107,77
Terr. Feuchtgebiete		0,971	99,9	213,78
Siedlungen		0,114	96,43	95,64
Photovoltaikfläche		NO	NO	NO
Sonstige Fläche		NO	NO	NO
Mineralboden $N_2O_{indirekt}$ 2)		**[kg N_2O ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Wald	Baumschulen	NO	NO	NO
Grünland i.e.S.		0,244	99,9	221,18
Gehölze		0,251	99,9	220,98
Hecken		0,214	99,9	230,32
Terr. Feuchtgebiete		0,427	99,9	295,19
Siedlungen		0,05	99,9	224,9
Photovoltaikfläche		NO	NO	NO
Sonstige Fläche		NO	NO	NO
Biomasse 3)		**[t C ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Wald	Baumschulen	NO	NO	NO
$Acker_{annuell}$		1,753	21,2	21,2
Hopfen		2,372	99,9	197,06
Weinbau		3,081	99,9	139,95
Obstbau		1,157	30,58	30,58
Kurzumtriebsplantagen		NO	NO	NO
Weihnachtsbaumkulturen		NO	NO	NO
Grünland i.e.S.		1,844	23,72	23,72
Gehölze		-0,516	16,96	21,53
Hecken		-9,12	65,7	67,02
Terr. Feuchtgebiete		2,577	99,9	139,65
Torfabbau		NO	NO	NO
Siedlungen		2,197	40,73	40,73
Photovoltaikfläche		NO	NO	NO
Sonstige Fläche		NO	NO	NO
Tote organische Substanz 3)		**[t C ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Wald	Baumschulen	NO	NO	NO

1) Berechnung über 20 Jahre; Vorratsänderung: positiv ≙ Senke; negativ ≙ Quelle

2) Berechnung über 20 Jahre; Emission: positiv ≙ Quelle; negativ ≙ Senke

3) Berechnung nur im ersten Jahr der Landnutzungsänderung; Vorratsänderung: positiv ≙ Senke; negativ ≙ Quelle

Tabelle 385: Implizite Emissionsfaktoren [t C ha^{-1} a^{-1}] und ihre Unsicherheiten für THG-Emissionen aus Weihnachtsbaumkulturen 2024

Weihnachtbaumkulturen		Implizite Emissionsfaktor	Schranken	
$Landnutzung_{vor}$	$Landnutzung_{nach}$		untere	obere
Mineralboden CO_2-C [1)]		[t C ha^{-1} a^{-1}]	[%]	[%]
Weihnachtbaumkulturen	Weihnachtbaumkulturen	-0,0200	11,26	11,25
Wald		NO	NO	NO
$Acker_{annuell}$		NO	NO	NO
Hopfen		NO	NO	NO
Weinbau		NO	NO	NO
Obstbau		NO	NO	NO
Baumschulen		NO	NO	NO
Weihnachtsbaumkulturen		NO	NO	NO
Grünland i.e.S.		NO	NO	NO
Gehölze		NO	NO	NO
Hecken		NO	NO	NO
Terr. Feuchtgebiete		NO	NO	NO
Siedlungen		NO	NO	NO
Photovoltaikfläche		NO	NO	NO
Sonstige Fläche		NO	NO	NO
Mineralboden N_2O_{direkt} [2)]		[kg N_2O ha^{-1} a^{-1}]	[%]	[%]
Wald	Weihnachtbaumkulturen	NO	NO	NO
Grünland i.e.S.		NO	NO	NO
Gehölze		NO	NO	NO
Hecken		NO	NO	NO
Terr. Feuchtgebiete		NO	NO	NO
Siedlungen		NO	NO	NO
Photovoltaikfläche		NO	NO	NO
Sonstige Fläche		NO	NO	NO
Mineralboden $N_2O_{indirekt}$ [2)]		[kg N_2O ha^{-1} a^{-1}]	[%]	[%]
Wald	Weihnachtbaumkulturen	NO	NO	NO
Grünland i.e.S.		NO	NO	NO
Gehölze		NO	NO	NO
Hecken		NO	NO	NO
Terr. Feuchtgebiete		NO	NO	NO
Siedlungen		NO	NO	NO
Photovoltaikfläche		NO	NO	NO
Sonstige Fläche		NO	NO	NO
Biomasse [3)]		[t C ha^{-1} a^{-1}]	[%]	[%]
Wald	Weihnachtbaumkulturen	NO	NO	NO
$Acker_{annuell}$		NO	NO	NO
Hopfen		NO	NO	NO
Weinbau		NO	NO	NO
Obstbau		NO	NO	NO
Baumschulen		NO	NO	NO
Weihnachtsbaumkulturen		NO	NO	NO
Grünland i.e.S.		NO	NO	NO
Gehölze		NO	NO	NO
Hecken		NO	NO	NO
Terr. Feuchtgebiete		NO	NO	NO
Torfabbau		NO	NO	NO
Siedlungen		NO	NO	NO
Photovoltaikfläche		NO	NO	NO

Weihnachtbaumkulturen		Implizite Emissionsfaktor	Schranken	
Landnutzung$_{vor}$	Landnutzung$_{nach}$		untere	obere
Sonstige Fläche		NO	NO	NO
Tote organische Substanz [3]		**[t C ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Wald	Weihnachtbaumkulturen	NO	NO	NO

1) Berechnung über 20 Jahre; Vorratsänderung: positiv ≙ Senke; negativ ≙ Quelle

2) Berechnung über 20 Jahre; Emission: positiv ≙ Quelle; negativ ≙ Senke

3) Berechnung nur im ersten Jahr der Landnutzungsänderung; Vorratsänderung: positiv ≙ Senke; negativ ≙ Quelle

Tabelle 386: Implizite Emissionsfaktoren [t C ha^{-1} a^{-1}] und ihre Unsicherheiten für THG-Emissionen aus Kurzumtriebsplantagen 2024

Kurzumtriebsplantagen		Implizite Emissionsfaktor	Schranken	
Landnutzung$_{vor}$	Landnutzung$_{nach}$		untere	obere
Mineralboden CO_2-C [1]		**[t C ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Kurzumtriebsplantagen	Kurzumtriebsplantagen	-0,02	13,91	13,9
Wald		-1,238	83,44	87,94
Acker$_{annuell}$		0,37	31,33	31,32
Hopfen		NO	NO	NO
Weinbau		NO	NO	NO
Obstbau		-0,152	8,48	8,47
Baumschulen		NO	NO	NO
Weihnachtsbaumkulturen		NO	NO	NO
Grünland i.e.S.		-0,759	48,06	48,06
Gehölze		-0,648	99,9	196,71
Hecken		-0,838	99,9	196,71
Terr. Feuchtgebiete		NO	NO	NO
Siedlungen		-0,507	99,9	196,36
Photovoltaikfläche		NO	NO	NO
Sonstige Fläche		NO	NO	NO
Mineralboden N_2O_{direkt} [2]		**[kg N_2O ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Wald	Kurzumtriebsplantagen	NO	99,9	158,84
Grünland i.e.S.		0,449	96,62	96,62
Gehölze		0,463	99,9	213,83
Hecken		0,602	99,9	213,83
Terr. Feuchtgebiete		NO	NO	NO
Siedlungen		0,528	99,9	214,92
Photovoltaikfläche		NO	NO	NO
Sonstige Fläche		NO	NO	NO
Siedlungen		**Siedlungen**	**[%]**	**[%]**
Wald	Kurzumtriebsplantagen	NO	99,9	258,19
Grünland i.e.S.		0,197	99,9	225,32
Gehölze		0,204	99,9	295,22
Hecken		0,265	99,9	295,22
Terr. Feuchtgebiete		NO	NO	NO
Siedlungen		0,233	99,9	296,02
Photovoltaikfläche		NO	NO	NO
Sonstige Fläche		NO	NO	NO
Biomasse [3]		**[t C ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Wald	Kurzumtriebsplantagen	NO	NO	NO
Acker$_{annuell}$		-2,395	27,65	28,29
Hopfen		-0,951	7,77	9,83
Weinbau		NO	80,38	80,6
Obstbau		NO	35,92	36,28

Kurzumtriebsplantagen		Implizite Emissionsfaktor	Schranken	
Landnutzung$_{vor}$	Landnutzung$_{nach}$		untere	obere
Baumschulen		-0,87	99,9	138,93
Weihnachtsbaumkulturen		NO	9,36	10,62
Grünland i.e.S.		NO	23,95	24,68
Gehölze		2,997	99,9	196,5
Hecken		-1,577	99,9	196,5
Terr. Feuchtgebiete		4,075	8,08	11,05
Torfabbau		NO	NO	NO
Siedlungen		4,075	99,9	196,24
Photovoltaikfläche		NO	NO	NO
Sonstige Fläche		NO	NO	NO
Tote organische Substanz 3)		**[t C ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Wald	Kurzumtriebsplantagen	NO	NO	NO

1) Berechnung über 20 Jahre; Vorratsänderung: positiv ≙ Senke; negativ ≙ Quelle

2) Berechnung über 20 Jahre; Emission: positiv ≙ Quelle; negativ ≙ Senke

3) Berechnung nur im ersten Jahr der Landnutzungsänderung; Vorratsänderung: positiv ≙ Senke; negativ ≙ Quelle

Tabelle 387: Implizite Emissionsfaktoren für organischen Böden unter Ackerland [t CO_2-Äq. IPCC AR5 ha^{-1} a^{-1}] sowie deren Unsicherheiten (2,5 %- und 97,5%-Perzentil [%]) für das Jahr 2024

Landnutzung	Treibhausgas	Emissionsfaktor	Schranken	
			untere	obere
Organischer Boden 1)		**[t CO2-Äq. ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Acker$_{annuell}$	CO_2	31,59	30,81	20,85
	N_2O 2)	IE	IE	IE
	CH_4	1,14	50,81	336,35
Organischer Boden 1)		**[t CO_2-Äq. ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Hopfen	CO_2	27,58	56,49	53,19
	N_2O 2)	IE	IE	IE
	CH_4	1,67	55,72	339,6
Organischer Boden 1)		**[t CO_2-Äq. ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Weinanbau	CO_2	13,93	71,72	68,51
	N_2O 2)	IE	IE	IE
	CH_4	1,24	83,57	323,38
Organischer Boden 1)		**[t CO_2-Äq. ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Obstanbau	CO_2	25,27	35,31	31,37
	N_2O 2)	IE	IE	IE
	CH_4	1,51	47,48	286,63
Organischer Boden 1)		**[t CO_2-Äq. ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Baumschulen	CO_2	28,35	28,59	21,63
	N_2O 2)	IE	IE	IE
	CH_4	1,23	43,51	273,07
Organischer Boden 1)		**[t CO_2-Äq. ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Weihnachtsbaum-kulturen	CO_2	29,95	44,14	31,78
	N_2O 2)	IE	IE	IE
	CH_4	0,87	69,34	448,74
Organischer Boden 1)		**[t CO_2-Äq. ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**

Landnutzung	Treibhausgas	Emissionsfaktor	Schranken	
			untere	obere
Kurzumtriebsplantagen	CO_2	31,06	54,41	51
	N_2O [2)]	IE	IE	IE
	CH_4	0,65	64,71	276,83

1) Berechnung jährlich, Emission: positiv ≙ Quelle; negativ ≙ Senke

2) wird unter 3.D.1.f berichtet (Sektor Landwirtschaft)

Die Berechnungen sind für den gesamten Berichtszeitraum von 1990-2024 räumlich und zeitlich konsistent und vollständig.

6.5.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (4.B)

Details zu den diesjährigen Prüfungen finden sich in Kapitel 6.1.3.

Die zur Erstellung dieses Inventars verwendeten Datenquellen erfüllen die Prüfkriterien des QSE-Handbuchs für Datenquellen. Bezüglich der Qualitätssicherung der Eingangsdaten (ATKIS®, BÜK, Offizialstatistik, siehe Kapitel 6.3) wird auf die Datenhalter verwiesen (Dokumentationen finden sich in der Inventarbeschreibung).

Die Ergebnisse der Emissionsberechnung der aktuellen Berichterstattung können mit anderen Datenquellen für Deutschland nicht verglichen werden, da solche flächendeckend, umfassend und unabhängig von den hier aufgeführten Methoden und Datenquellen nicht existieren.

Die folgenden Tabellen zeigen einen innereuropäischen Vergleich impliziter Emissionsfaktoren (IEF) für unterschiedliche Pools. Für diesen Vergleich wurden Werte der Nachbarstaaten aus den Submissionen 2025 des Klimasekretariats verwendet (UNFCCC NID Submission 2025 - Inventurjahr 2023, (UNFCCC, 2021)). Werte für Deutschland 2024 stammen aus der aktuellen Submission 2026.

Der Vergleich ist von vornherein problematisch, da die zu vergleichenden Werte methodisch z.T auf sehr unterschiedliche Art erhoben werden und vorallem auch die Grenzen der Systeme mitunter deutlich divergieren. Angesichts dessen und unter Berücksichtigung der großen Unsicherheiten und Streuung der berichteten Werte (siehe Kapitel 6.5.3) zeigt der Vergleich für keinen der verglichenen Pools implizite Emissionsfaktoren (IEF), die einen eindeutigen Ausreißer darstellen. Die EF finden eine Entsprechung in absoluter Größe und Tendenz, mit denen diverser mitteleuropäischen Nachbarländer.

Tabelle 388: Kohlenstoffvorratsveränderung der lebenden Biomasse im Ackerland verschiedener Länder (Deutschland für 2023 & 2024, übrige Länder für 2023), in [t C ha^{-1} a^{-1}])

	4.B.1. - Cropland Remaining Cropland	4.B.2 - Land Converted To Cropland	4.B.2.1 - Forest Land Converted To Cropland	4.B.2.2 - Grassland Converted To Cropland	4.B.2.3 - Wetlands Converted To Cropland	4.B.2.4 - Settlements Converted To Cropland	4.B.2.5 - Other Land Converted To Cropland
Belgien	-0,006	-0,142	-3,671	-0,094	NO	NO	NO
Dänemark	0,007	-0,094	-1,906	0,162	-0,883	0	NA
Frankreich	-0,009	-0,666	-4,916	-0,064	0,012	0,011	NA
Großbritannien	0	0,074	IE, NO	0,072	NO	0,376	NO
Niederlande	NA	-0,21	-4,968	-0,183	0,428	0,373	0,307
Österreich	0,004	0,073	-2,051	0,153	NO	NO	NO
Polen	0,132	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Schweiz	-0,37	-0,246	-0,382	-0,248	-0,393	-0,194	-0,131
Tschechische Rep.	0,001	-0,229	-5,299	-0,211	0,299	0,402	NO
Deutschland 2024	0,0006	-0,345	NO	-0,308	-0,46	-1,265	0,049

	4.B.1. - Cropland Remaining Cropland	4.B.2 - Land Converted To Cropland	4.B.2.1 - Forest Land Converted To Cropland	4.B.2.2 - Grassland Converted To Cropland	4.B.2.3 - Wetlands Converted To Cropland	4.B.2.4 - Settlements Converted To Cropland	4.B.2.5 - Other Land Converted To Cropland
Deutschland 2025	0,0006	-0,203	-2,395	-0,208	-0,25	0,01	0,003

positiv: Kohlenstoffsenke; negativ: Kohlenstoffquelle; Quelle: (UNFCCC, 2023c)

Tabelle 389: Kohlenstoffvorratsveränderung der toten organischen Substanz im Ackerland verschiedener Länder (Deutschland für 2023 & 2024, übrige Länder für 2023), in [t C ha^{-1} a^{-1}]

	4.B.1. - Cropland Remaining Cropland	4.B.2 - Land Converted To Cropland	4.B.2.1 - Forest Land Converted To Cropland	4.B.2.2 - Grassland Converted To Cropland	4.B.2.3 - Wetlands Converted To Cropland	4.B.2.4 - Settlements Converted To Cropland	4.B.2.5 - Other Land Converted To Cropland
Belgien	NO	-0,001	-0,08	NO	NO	NO	NO
Dänemark	NA	-0,16	-1,292	IE, NA	IE, NA	0	NA
Frankreich	0	-0,088	-0,709	0	NA	NA	NA
Großbritannien	NO	IE, NO	NO	IE	NO	IE, NO	NO
Niederlande	NA	-0,015	-1,828	NA	NA	NA	NA
Österreich	NO	-0,032	-0,892	NO	NO	NO	NO
Polen	0,001	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Schweiz	NA, NO	NA, NO	NA	NO	NO	NO	NO
Tschechische Rep.	NO	-0,018	-0,355	NO	NO	NO	NO
Deutschland 2023	IE	NO	NO	IE	IE	IE	IE
Deutschland 2024	IE	NO	NO	IE	IE	IE	IE

positiv: Kohlenstoffsenke; negativ: Kohlenstoffquelle; Quelle (UNFCCC, 2023c)

Tabelle 390: Kohlenstoffvorratsveränderung der mineralischen Böden im Ackerland verschiedener Länder (Deutschland für 2023 & 2024, übrige Länder für 2023), in [t C ha^{-1} a^{-1}]

	4.B.1. - Cropland Remaining Cropland	4.B.2 - Land Converted To Cropland	4.B.2.1 - Forest Land Converted To Cropland	4.B.2.2 - Grassland Converted To Cropland	4.B.2.3 - Wetlands Converted To Cropland	4.B.2.4 - Settlements Converted To Cropland	4.B.2.5 - Other Land Converted To Cropland
Belgien	-0,092	-1,435					
Dänemark	-0,023	0	0	IE	-1,77	0	NA
Frankreich	0,003	-0,543	-0,726	-0,523	-0,093	0,457	0,583
Großbritannien	-0,326	-1,207	-2,952	-1,228	NO	2,731	NO
Niederlande	-0,194	-0,882	0	-0,893	0	0	0
Österreich	-0,011	-0,714	-0,738	-0,716	NO	NO	NO
Polen	-0,007	-0,173					
Schweiz	0,242	0,012					
Tschechische Rep.	0,001	-0,26	-0,26	-0,47		0,04	
Deutschland 2023	-0,139	-0,826	NO	-0,897	-1,364	0,791	2,267
Deutschland 2024	-0,038	-0,846	-1,238	-0,867	-1,269	-0,255	2,095

positiv: Kohlenstoffsenke; negativ: Kohlenstoffquelle; Quelle: (UNFCCC, 2025)

Tabelle 391: Kohlenstoffvorratsveränderung der organischen Böden im Ackerland verschiedener Länder (Deutschland für 2023 & 2024, übrige Länder für 2023), in [t C ha^{-1} a^{-1}]

	4.B.1. - Cropland Remaining Cropland	4.B.2 - Land Converted To Cropland	4.B.2.1 - Forest Land Converted To Cropland	4.B.2.2 - Grassland Converted To Cropland	4.B.2.3 - Wetlands Converted To Cropland	4.B.2.4 - Settlements Converted To Cropland	4.B.2.5 - Other Land Converted To Cropland
Belgien	-10,00	NO					
Dänemark	-7,247	IE, NA					
Frankreich	IE	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Großbritannien	-5,692	-5,058	-7,829	IE	NO	IE	NO

	4.B.1. - Cropland Remaining Cropland	4.B.2 - Land Converted To Cropland	4.B.2.1 - Forest Land Converted To Cropland	4.B.2.2 - Grassland Converted To Cropland	4.B.2.3 - Wetlands Converted To Cropland	4.B.2.4 - Settlements Converted To Cropland	4.B.2.5 - Other Land Converted To Cropland
Niederlande	-3,758	-3,779		-3,779			
Österreich	IE, NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Polen	-5,00	-5,00					
Schweiz	-9,52	-9,52					
Tschechische Rep.	NO	NO					
Deutschland 2023	-7,194	-6,543	NO	-7,249	-6,482	-6,142	-6,441
Deutschland 2024	-8,51	-8,787	-8,364	-8,767	-9,37	-8,55	-10,349

positiv: Kohlenstoffsenke; negativ: Kohlenstoffquelle; Quelle: (UNFCCC, 2023c)

6.5.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (4.B)

Mit der diesjährigen Submission werden kategoriespezifische Rückrechnungen für den gesamten Berichtszeitraum von 1990 – 2024 vorgelegt. Ursache für die Neuberechnung der Emissionen waren neue und verbesserte Datenquellen, Einführung neuer Methoden, Methodenänderungen und Fehlerkorrekturen im Rahmen der Verbesserung des Inventars. Die entsprechenden Maßnahmen sind in Kapitel 6.1.3.4.2 aufgeführt und zeitigten allesamt Auswirkungen auf die Ergebnisse der Emissionsberechnungen für die Landnutzungskategorie „Ackerland“.

Eine vergleichende Darstellung der Ergebnisse der aktuellen Rückrechnung mit denen der Vorjahressubmission findet sich für die Kategorie Ackerland in Tabelle 391 (Flächen) und Tabelle 393 (Emissionen).

Die geringen Unterschiede zwischen den Flächendaten der aktuellen und der Vorjahressubmission (Betrag < 1,3% über die gesamte Zeitreihe) sind im Wesentlichen auf Korrekturalgorithmen zurückzuführen. Diese bedingen sich in der Einführung der neuen Landnutzungssubkategorien sowie der Aktualisierung der Kartengrundlage zur Ermittlung der Aktivitätsdaten, durch Einarbeitung der neu hinzugekommen Daten des letzten Zeitreihenjahres. Es wird davon ausgegangen, dass neueste Daten die beste Qualität haben und daher die vorangegangene Zeitreihe, falls notwendig, angepasst wird (s. auch Kapitel 6.3.1 ff).

Die Unterschiede zwischen den THG-Emissionen der vorliegenden und der Vorjahressubmission sind bezüglich des CO_2 im Wesentlichen zurückzuführen auf

- die erstmalige, hektargenaue Erfassung der Emissionen aus der Verbleibkategorie der Mineralböden
- die Änderungen bezüglich der Berechnung der Kohlenstoffvorräte in Böden und Biomasse der Subkategorie „Gebäude- und Freiflächen“
- die Implementierung des modifizierten hydrologischen Modells zur Berechnung der Grundwasserstände in organischen Böden.

Letzteres gilt insbesondere auch für die Methanemissionen, die in der aktuellen Submission z.T. um einen Faktor 3 größer sind als in der vorherigen. Die Unterschiede bezüglich der Lachgasemissionen haben hauptsächlich in der erstmaligen, hektargenauen Erfassung der Emissionen aus den Mineralböden ihre Ursache.

Die deutlich geringeren N_2O-Emissionen der aktuellen Submission sind Flächeneffekten geschuldet, insbesondere infolge der Einführung der neuen Flächenkulissen für organische Böden und Hecken.

Tabelle 392: Vergleich der Flächendaten [kha] der aktuellen und der Vorjahressubmission der Ackerlandkategorie

Area [kha]	Submission	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
Cropland	2025	13.339,06	13.355,77	13.372,48	13.018,22	12.762,78	12.554,47	12.408,23	12.375,45	12.342,71	12.309,97
	2026	13.437,54	13.330,18	13.211,01	13.075,25	12.915,39	12.717,15	12.568,81	12.528,87	12.488,92	12.448,99
	Differenz absolut	98	-26	-161	57	153	163	161	153	146	139
	in %	0,73%	-0,19%	-1,22%	0,44%	1,18%	1,28%	1,28%	1,22%	1,17%	1,12%

Tabelle 393: Vergleich der Treibhausgasemissionen [kt CO_2-Äq.] aus der Kategorie Ackerland der aktuellen und der Vorjahressubmission

THG	Submission	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
CO_2	2025	20.381,76	20.320,77	19.965,46	22.007,12	19.708,91	20.736,35	21.938,82	20.791,45	21.581,02	19.195,91
	2026	25.789,59	27.291,70	29.090,34	22.155,00	18.688,38	15.189,25	15.922,47	19.302,68	15.449,12	29.580,56
	Differenz	5.407,83	6.970,93	9.124,88	147,88	-1.020,53	-5.547,10	-6.016,35	-1.488,77	-6.131,90	10.384,65
	in %	26,53%	34,30%	45,70%	0,67%	-5,18%	-26,75%	-27,42%	-7,16%	-28,41%	54,10%
CH_4	2025	338,95	253,47	272,6	254,57	361,51	455,42	173,61	289,14	140,27	535,51
	2026	413,9	281,81	321,26	308,78	316,97	374,94	165,74	296,08	114,08	620,83
	Differenz	74,95	28,34	48,65	54,2	-44,55	-80,49	-7,87	6,94	-26,2	85,33
	in %	22,11%	11,18%	17,85%	21,29%	-12,32%	-17,67%	-4,54%	2,40%	-18,68%	15,93%
N_2O	2025	135,82	136,08	137,49	204,18	219,09	315,61	348,14	339,13	331,02	323,64
	2026	543,02	521,14	505,7	491,17	480,1	469,3	425,9	412,01	398,05	384,27
	Differenz	407,2	385,06	368,21	286,99	261,01	153,69	77,76	72,88	67,03	60,63
	in %	2,998	282,98%	267,82%	140,56%	119,13%	48,70%	22,33%	21,49%	20,25%	18,73%

6.5.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (4.B)

Über die in Kapitel 6.1.2.1.9 bzw. Kapitel 6.1.4 angeführten geplanten, mittelfristigen Maßnahmen hinaus, sind derzeit keine weiteren spezifischen Maßnahmen zur Verbesserung der Methodik im Bereich Ackerland geplant.

6.6 Grünland (4.C)

6.6.1 Beschreibung der Kategorie (4.C)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
L/T	4 C, Grassland	0	CO_2	22519,9	2,38	21469,1	2,98	-28,2
L/T	4 C, Grassland	0	CH_4	2582,3	0,01	2657,3	0,02	-35,1
-/-	4 C, Grassland	0	N_2O	80,60	0,12	52,00	0,23	7,2

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2	Tier 2/Tier 3	RS/NS	CS/D
N_2O	Tier 2	RS/NS	CS/D
CH_4	Tier 2	RS/NS	CS/D

Die Kategorie „Grünland“ (4.C) ist für CO_2- und CH_4 Emissionen eine Hauptkategorie nach der Emissionshöhe und dem Trend.

Im Jahre 2024 betrugen die anthropogen bedingten THG-Nettoemissionen aus dem „Grünland" 24.178,4 kt CO_2-Eq (95 %-Konfidenzintervall: 19.189,6 kt CO2-Äq. (≙ -20,6) % - 29.063,9 kt CO2-Äq. (≙ 20,2 %)). Durch die Entwässerung organischer Grünlandböden wurden 26.282,8 kt CO_2, 2.657,3 kt CO2-Äq. Methan sowie 46,5 kt CO2-Äq. Lachgas freigesetzt. Die Mineralböden (-4.468,6 kt CO_2) fungieren im Grünlandsektor als Kohlenstoffsenke.

Diese Emissionen bilden die Summe aus den Unterkategorien „Grünland im engeren Sinne (i.e.S)", „Gehölze" und „Hecken", die sich bezüglich ihrer Emissionen sowohl quantitativ, wie auch qualitativ deutlich unterscheiden. So verdeutlichen Tabelle 394 und die Abbildung 93 und Abbildung 94, dass „Grünland i.e.S" eine deutliche CO_2-Quelle ist, deren absolute Größe von 28.995,1 kt CO2-Äq. von den Emissionen aus den organischen Böden dominiert wird (27.662,7 kt CO2-Äq.), wobei der Anteil der CO_2-Emissionen (90,9 %) den des Methan (9,1 %) bei weitem übertrifft. Während die Biomasse mit 5.509,5 kt CO2-Äq. ebenfalls als Quelle fungiert und einen Anteil von 16,6% zu den Brutto-Emissionen (33.172,2 kt CO2-Äq.) der Subkategorie „Grünland i.e.S" beiträgt, stellen die Mineralböden eine anhaltende Senke für Kohlenstoff dar. Sie reduzieren die Bruttoemissionen der Unterkategorie Grünland i.e.S. um 12,6 %.

Tabelle 394: CO_2-, N_2O- und CH_4-Emissionen [kt CO_2-Äq.] aus dem Grünland 2024, unterschieden nach Pools und Unterkategorien. Dargestellt sind Summen sowie obere und untere Schranke des 95 % - Konfidenzintervalls

Grünland i.e.S. Emissionen 2024						
Pool	**THG**	**[kt CO_2-Äq.]**			**[%]**	
		Emission	**2,5 %-Perz.**	**97,5 %-Perz.**	**2,5 %-Perz.**	**97,5 %-Perz.**
Grünland i.e.S.$_{total}$ [1)]		28.995,1	19.788,7	37.990,1	31,8	30,93
Mineralboden	CO_2 [2)]	-4.179,25	-3.516,5	-4.842	15,86	15,86
	$N_2O_{indirekt}$ [3)]	0,6	0,2	1,3	68,3	108,2
	N_2O_{direkt} [3)]	1,5	0,8	2,1	42,3	44,4
Organischer Boden	CO_2 [2)]	25.135	13.035,5	34.787,8	48,1	38,4
	CH_4 [5)]	2.527,7	1.260,27	3.050,4	50,14	268,17
	N_2O [4)]	IE	IE	IE	IE	IE
Biomasse	CO_2 [2)]	5.509,5	4.702	6.648,7	14,66	20,68
Tote organische Substanz	CO_2 [2)]	NO	NO	NO	NO	NO
Gehölze Emissionen 2024						
Pool	**THG**	**[kt CO_2-Äq.]**			**[%]**	
		Emission	**2,5 %-Perz.**	**97,5 %-Perz.**	**2,5 %-Perz.**	**97,5 %-Perz.**
Gehölze$_{total}$ [6)]		-5.379,30	-4.885,90	-6.064,90	9,17	12,75
Mineralboden	CO_2 [2)]	-304,41	-274,69	-334,15	9,76	9,77
	$N_2O_{indirekt}$ [3)]	0,68	0,05	1,66	92,63	145,51
	N_2O_{direkt} [3)]	1,54	0,65	2,43	57,66	58,17
Organischer Boden	CO_2 [2)]	615,17	382,4	801,1	37,83	30,23
	CH_4 [5)]	100	60,76	114,15	39,23	209,17
	N_2O [4)]	26,37	9,8	94,3	62,98	257,51
Biomasse	CO_2 [2)]	-5.818,58	-5.234,10	-6.643,70	10,05	14,18
Tote organische Substanz	CO_2 [2)]	NO	NO	NO	NO	NO
Hecken Emissionen 2024						
Pool	**THG**	**[kt CO_2-Äq.]**			**[%]**	
		Emission	**2,5 %-Perz.**	**97,5 %-Perz.**	**2,5 %-Perz.**	**97,5 %-Perz.**

Grünland i.e.S. Emissionen 2024						
$Hecken_{total}$ [6]		562,60	301,20	795,80	46,46	41,45
Mineralboden	CO_2 [2]	9,56	8,09	11,03	15,4	15,4
	$N_2O_{indirekt}$ [3]	0,36	0	1,16	99,9	220,64
	N_2O_{direkt} [3]	0,83	0,1	1,55	87,75	87,75
Organischer Boden	CO_2 [2]	532,67	238,06	767,75	55,31	44,13
	CH_4 [5]	29,61	12,38	121,73	58,19	311,15
	N_2O [4]	20,09	1,43	96,46	92,87	380,06
Biomasse	CO_2 [2]	-30,68	-24,40	-37,20	20,36	21,32
Tote organische Substanz	CO_2 [2]	0,14	0,03	0,25	81,28	81,28

1) Teilsummen der Emissionen aus den CRF 4.C, 4.(II).C, 4.(III).C

2) Teilsumme der Emissionen CRF 4.C

3) CRF 4.(III).C

4) CRF 3.D.1.f

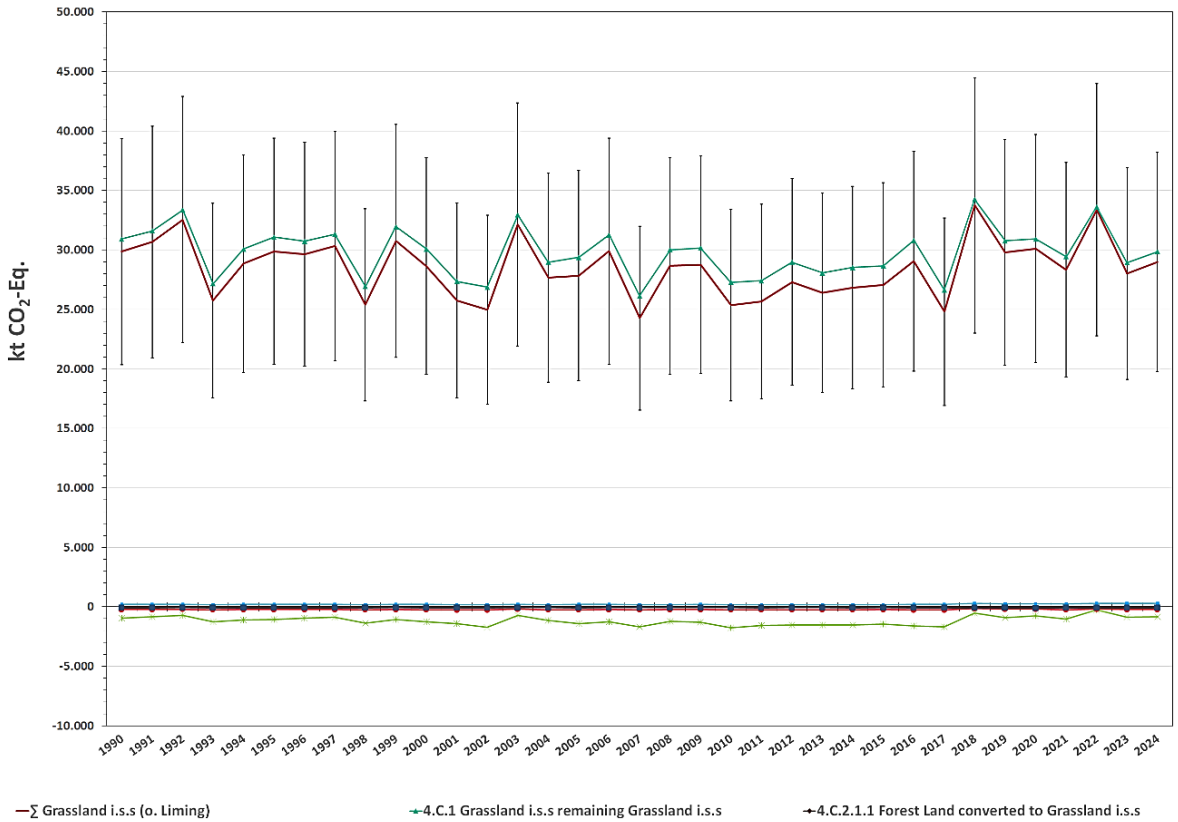
5) CRF 4. (II).C

6) Teilsummen der Emissionen aus den CRF 4.C, 4.(II).C, sowie Summe aus 4.(III).C

Der Verlauf der Zeitreihe der Gesamtemissionen von „Grünland i.e.S." weist 2024 Emissionen auf, die um -866,5 kt CO2-Äq. ≙ -2,9 % geringer sind als im Basisjahr 1990. Der Verlauf der Zeitreihe der Gesamtemissionen wird bezüglich der absoluten Höhe von den Emissionen aus den organischen Böden dominiert. Die Mineralböden wirken über den gesamten Berichtszeitraum als nahezu unveränderliche Senke (Zunahme der Senkenfunktion gegenüber 1990 4,1 %). Die Emissionen aus der Biomasse sind positiv und nehmen von 2010 an kontinuierlich zu (gegenüber 1990 +130,9 %), insbesondere durch verstärkte Landnutzungsänderung von „Gehölzflächen" zu „Grünland i.e.S.".

Die Kurvenverläufe der Zeitreihen, insbesondere deutliche Änderungen, haben ihre Ursache vor allem in den periodischen Erhebungsterminen der Flächendaten. Der Erfassung von Landnutzungsänderungen anhand räumlich expliziter Daten lagen Datensätze der Jahre 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 und 2023 zugrunde (vergl. Kapitel 6.3.1). Landnutzungsänderungen, die zwischen diesen Jahren auftraten, wurden durch lineare Interpolation ermittelt, so dass die jährlichen Konversionsflächen zwischen den Erhebungszeitpunkten konstant sind. Die Landnutzung vor dem Jahr 2010 wurde durch Extrapolation mithilfe stochastischer Methoden ermittelt (Kapitel 6.3.1.2.2).

Abbildung 93: Treibhausgasemissionen (Summe aus CO_2, CH_4 und N_2O) [kt CO2-Äq.] infolge Landnutzung und Landnutzungsänderung aus dem Grünland i.e.S. 1990-2024, dargestellt nach Unterkategorien

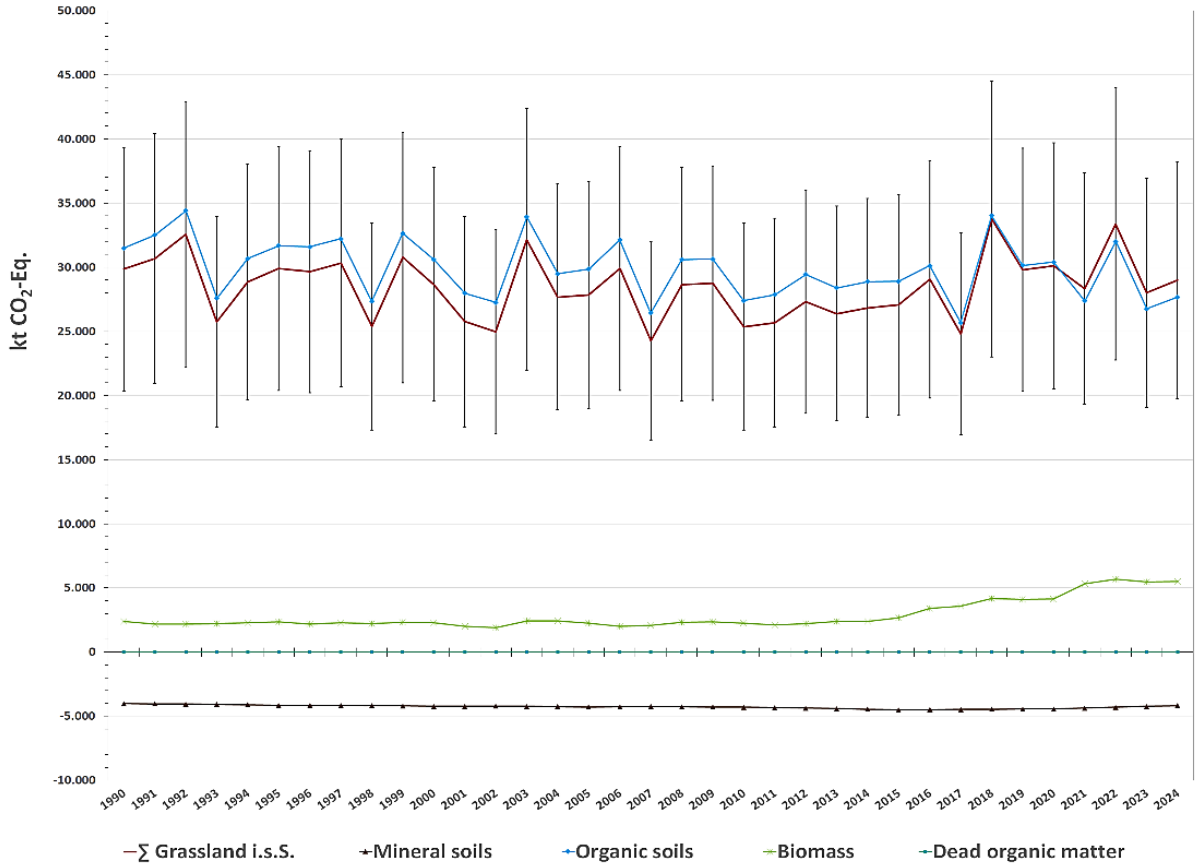


Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

In der Subkategorie „Gehölze“ werden die Nettoemissionen vom Pool Biomasse dominiert. Dieser fungierte 2024 mit -5.818,6 kt CO2-Äq. als Senke, genau wie der Pool Mineralböden (-302,2 kt CO2-Äq.). Diese überkompensieren die positiven Emissionen aus den organischen Böden (741,5 kt CO2-Äq.), sodass die Unterkategorie „Gehölze“ 2024 als Nettokohlenstoffsenke fungiert (-5.379,3 kt CO2-Äq. ; Tabelle 394 sowie Abbildung 94 und Abbildung 96).

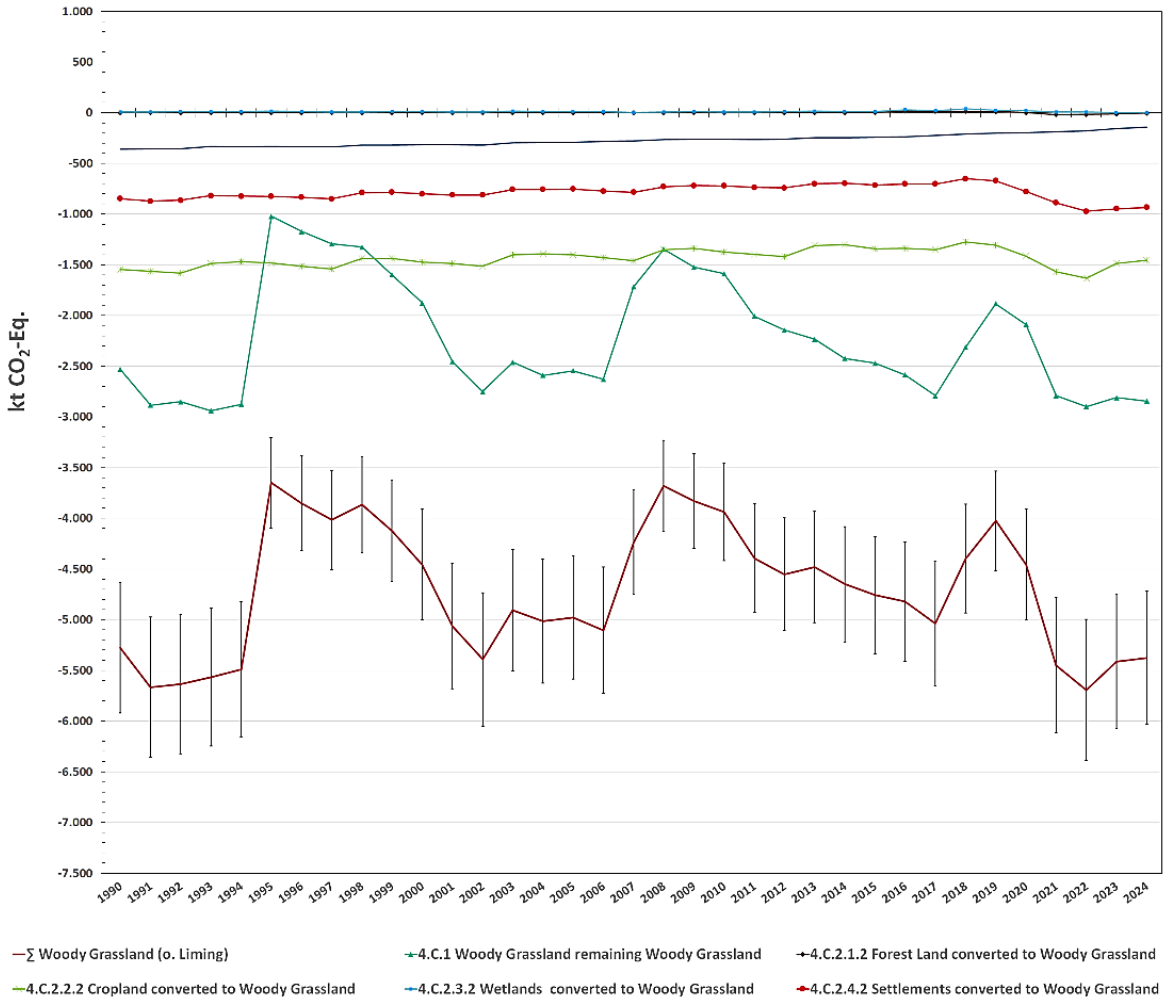
Die Kurvenverläufe der Zeitreihen in Abbildung 94 und Abbildung 96 verdeutlichen, dass aufgrund der andauernden Nutzung der Biomasse sowie aufgrund von Landnutzungs-änderungen von und zur Unterkategorie Gehölze, diese Subkategorie durch den erheblichen Kohlenstoffvorrat in der Biomasse sehr dynamisch ist und geprägt wird von der dem Modell zugrunde liegenden 12-jährigen Umtriebszeit für Hecken und Feldgehölze (vergl. Kapitel 6.1.2.3.6).

Abbildung 94: Treibhausgasemissionen (Summe aus CO_2, CH_4 und N_2O) [kt CO_2-Äq.] infolge Landnutzung und Landnutzungsänderung aus dem Grünland i.e.S. 1990-2024, dargestellt nach Pools



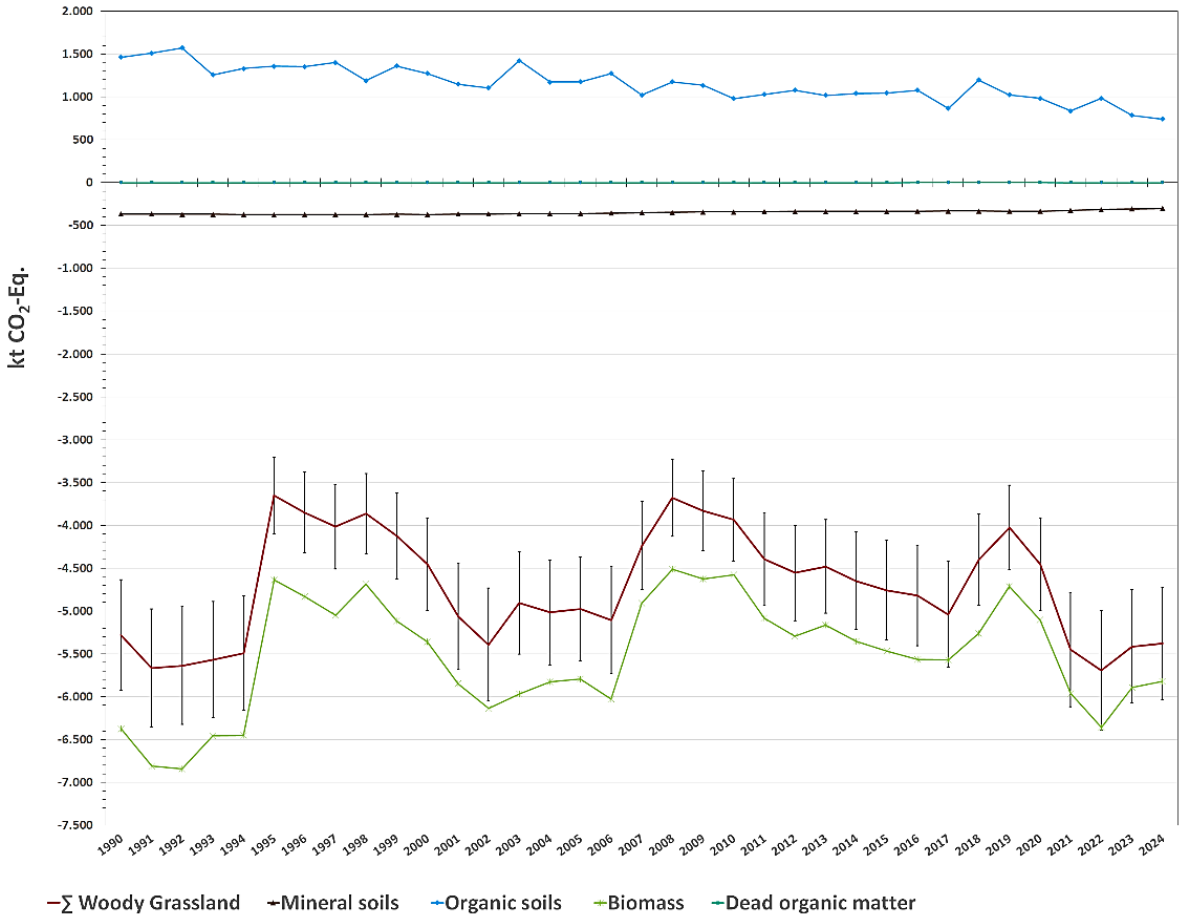
Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

Abbildung 95: Treibhausgasemissionen (Summe aus CO_2, CH_4 und N_2O) [kt CO_2-Äq.] infolge Landnutzung und Landnutzungsänderung aus Gehölzflächen und Hecken von 1990–2023, dargestellt nach Unterkategorien



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

Abbildung 96: Treibhausgasemissionen (Summe aus CO_2, CH_4 und N_2O) [kt CO_2-Äq.] infolge Landnutzung und Landnutzungsänderung aus Gehölzflächen und Hecken von 1990-2023, dargestellt nach Pools



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

Die Subkategorie „Hecken“ trug im Jahr 2024 mit Nettoemissionen 562,6 kt CO2-Äq. nur wenig zu den Nettoemissionen aus der Landnutzungskategorie „Grünland“ bei (1,9 %). Die Emissionen in der Kategorie „Hecken“ wird getragen von den auf anhaltend hohem Niveau emittierenden organischen Böden (2024: 582,4 kt CO2-Äq.); der Verlauf der Nettoemissionskurve in der Zeitreihe wird weiterhin geprägt von den extrem veränderlichen Emissionen aus der Biomasse, die sehr stark von der Altersverteilung und den Umtriebszeiten abhängen.

6.6.2 Methodische Aspekte (4.C)

6.6.2.1 Datenquellen

Es wurden folgende Datenquellen genutzt:

- Statistisches Bundesamt, Fachserie 3, Reihe 3.1.2, Land- und Forstwirtschaft, Fischerei, Bodennutzung der Betriebe (Landwirtschaftlich genutzte Flächen); (div. Jgg.)(Statistisches Bundesamt, FS 3, R 3),
- 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 4 - Agriculture, Forestry and Other Land Use (IPCC, 2006a),
- 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use (IPCC, 2019)

- „Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung –DüV)“ (Düngeverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 27. Februar 2007 (BGBl. I S. 221), die zuletzt durch Artikel 5 Absatz 36 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212) geändert worden ist)(Bundesgesetzblatt, 2012),
- Zwischenbericht Forschungsprojekt „Methodenentwicklung zur Erfassung der Biomasse mehrjährig verholzter Pflanzen außerhalb von Wäldern“ (Pöpken, 2011).
- (Drexler et al., 2021): Carbon sequestration in hedgerow biomass and soil in the temperate climate zone.Regional Environmental Change (2021) 21:74; https://doi.org/10.1007/s10113-021-01798-8; Springer
- (Jacobs et al., 2018): Landwirtschaftlich genutzte Böden in Deutschland - Ergebnisse der Bodenzustandserhebung; Johann Heinrich von Thünen-Institut, 316 S. Thünen Report 64; Braunschweig. DOI:10.3220/REP1542818391000

6.6.2.2 Biomasse

In der Kategorie Grünland wird der Pool Biomasse weiter untergliedert nach Ausprägung der Pflanzen in (vergl. Kapitel 6.2.3 und Tabelle 341 in Kapitel 6.3.1.2.1)

- krautige Pflanzen (Subkategorie „Grünland i.e.S.“)
- mehrjährige Gehölzpflanzen in Hecken und Feldgehölzen (Subkategorie „Gehölze“ und „Hecken“)

Zur Bestimmung der THG-Emissionen aus der pflanzlichen Biomasse mehrjähriger Hecken- und Feldgehölzpflanzen in den Subkategorien „Gehölze“ und „Hecken“ werden die Wachstumsstadien der Pflanzen in Abhängigkeit vom Alter der Kultur, deren Bewirtschaftungsform (Umtriebszeiten) zeitgenau modelliert, damit die Emissionen entsprechend der Vorgaben der IPCC Guidelines 2006 (IPCC, 2006a) in dem Jahr berichtet werden können, in dem sie anfallen. Die Methoden und Unterstellungen zur Berechnung der Kohlenstoffvorratsänderungen in der ober- und unterirdischen Biomasse der Gehölzpflanzen sind in 6.1.2.4 ff beschrieben, die spezifischen Methoden und die Herleitung der Emissionsfaktoren für die „Gehölze“ und „Hecken“ in Kapitel 6.1.2.3.6.

Für die Subkategorie „Grünland i.e.S.“ werden regionalisierte Kohlenstoffvorräte für die krautige Biomasse ermittelt (Kapitel 6.1.2.3.3), die allen diesbezüglichen Emissionsberechnungen in jährlicher Auflösung zugrunde liegen. In der Verbleibkategorie „Grünland i.e.S.“ wird ein dynamisches Gleichgewicht für die Phytomasse unterstellt; folglich treten keine Emissionen auf. Die entsprechenden Felder im Tabellenwerk sind mit dem Notationsschlüssel NA versehen (s. Kap. 6.1.2.3.1). Die pflanzliche Biomasse der Subkategorien „Gehölze“ und „Hecken“ wird für jedes Berichtsjahr berechnet (6.1.2.4ff). Flächenumwidmungen zwischen den einzelnen Grünland-Subkategorien werden wie Landnutzungsänderungen gehandhabt und in CRF- 4.C explizit ausgewiesen. Die Flächenänderungen zwischen annuellen und perennierenden Pflanzen können räumlich explizit und umfänglich nachgewiesen werden. Die Berechnung erfolgt nach der in Kapitel 6.1.2.3.1 und Kapitel 6.1.2.3.2 beschriebenen Gain-Loss Methode (IPCC, 2006a).

Felder für tote organische Substanz der Kategorie Grünland werden im Tabellenwerk mit IE gekennzeichnet, da im Modell jeweils die vollständige Biomasse verrechnet wird.

6.6.2.3 Mineralische Böden

Für gleichnamige Flächen der Grünlandkategorie, unter verbleibender Nutzung, wurden die Änderungen der Kohlenstoffvorräte in Mineralböden mittels eines mathematischen Prozessmodells errechnet und daraus die CO_2- und N_2O-Emissionen abgeleitet; Methodik, Kartengrundlagen und Modellbeschreibung sind in Kapitel 6.1.2.1 ff umrissen. Flächenübergänge zwischen den Subkategorien der Grünlandkategorie werden wie Landnutzungsänderungen behandelt.

Die Berechnung der CO_2-Emissionen infolge der Umwandlung von Landflächen in „Grünland i.e.S." bzw. „Gehölze" und „Hecken" ist in Kapitel 6.1.2.1, die Emissionsfaktoren und deren Unsicherheiten auch in den Tabellen Tabelle 395 bis Tabelle 400 in Kapitel 6.6.3 beschrieben.

Die Emissionen der Verbleibkategorien werden in der CRF 4.C.1, die Emissionen infolge von Landnutzungsänderung in den CRF 4.C.2.a-4.C.2.e ausgewiesen. Die Lachgasemissionen aus Mineralböden werden im Zahlenwerk in der CRF 4(III).C eingetragen.

6.6.2.4 Organische Böden

In der Landnutzungskategorie Grünland werden CO_2-, CH_4- und N_2O-Emissionen aus organischen Böden berichtet; Lachgasemissionen jedoch nur für die Subkategorien „Gehölze" und „Hecken". N_2O-Emissionen aus organischen Böden unter „Grünland i.e.S." werden im Sektor „Landwirtschaft" in der CRF 3.D.a.6 „Cultivation of Histosols berichtet (siehe Kapitel 6.5.2). Ausführungen zu den Flächenunterschieden bezüglich des Grünlands im LULUCF-Sektor und den in der CRF 3.D.1.f „Cultivation of Histosols" des Landwirtschaftssektors aufgeführten Werten finden sich in Kapitel 6.1.2.2.1. Die Methoden zur Berechnung der Emissionen aus organischen Böden sowie die Herleitung der Emissionsfaktoren sind in Kapitel 6.1.2.2 beschrieben.

Die jährlichen Emissionen nach Landnutzungsänderung zu „Grünland i.e.S." werden wie die Emissionen aus organischen Böden der Unterkategorie „Grünland i.e.S." unter verbleibender Nutzung berechnet. Gleiches gilt für die Emissionen aus organischen Böden nach Landnutzungsänderung zu „Gehölzen" und „Hecken". Die Emissionen der Verbleibkategorien werden in der CRF 4.C.1, die Emissionen infolge von Landnutzungsänderung in CRF 4.C.2.a-4.C.2.e ausgewiesen. Die Methanemissionen aus organischen Böden und aus Draingräben sowie die Lachgasemissionen aus der Unterkategorien „Gehölze" und „Hecken" werden in der CRF 4(II).C präsentiert.

6.6.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (4.C)

Die Unsicherheiten für die Aktivitätsdaten der Landnutzungskategorie „Grünland" sind normalverteilt, mit Werten für die Hälfte des 95 % - Konfidenzintervalls zwischen 0,07-196,0 %. Auch hier ist die Unsicherheit abhängig von der Stichprobengröße; je kleiner die Fläche, desto größer die Unsicherheit. Flächengewichtet beträgt die Gesamtunsicherheit der Aktivitätsdaten in der Grünlandkategorie 0,07%.

Die Gesamtunsicherheit für die Landnutzungskategorie „Grünland" beträgt 20,6 % [2,5 % -Perzentil] bzw. 20,2 % [97,5 % -Perzentil], die für die Subkategorien „Grünland i.e.S." 31,8 % [2,5 % -Perzentil] bzw. 30,9 % [97,5 % -Perzentil], für „Gehölze" 9,2 % [2,5 % -Perzentil] bzw. 12,8 % [97,5 % -Perzentil] und für „Hecken" 46,5 % [2,5 % -Perzentil] bzw. 41,5 % [97,5 % -Perzentil]. In der Subkategorie „Grünland i.e.S." leisten die CO_2-Emissionen aus den organischen Böden nicht nur den größten Beitrag zur Gesamtunsicherheit der Subkategorie; sie tragen auch am meisten zur Varianz des Gesamtinventars bei (vergl. Kapitel 6.1.2.10). Die Beiträge der Subkategorien „Gehölze" und „Hecken" zur Unsicherheit des Gesamtinventars sind marginal.

In Tabelle 395 bis Tabelle 400 sind die Unsicherheiten bezüglich der impliziten Emissionsfaktoren für die Unterkategorien „Grünland i.e.S., Gehölze“ und „Hecken“ dargestellt.

Tabelle 395: Emissionsfaktoren [t C ha-1 a-1] mit Unsicherheiten [% vom Lagemaß] zur Berechnung der THG- Emissionen 2024 aus Grünland i.e.S.

$Grünland_{i.e.S}$ $Landnutzung_{vor}$ Mineralboden CO_2-C [1)]	**$Landnutzung_{nach}$**	**implizite EF**	**Schranken**	
			obere	**untere**
		[t C ha^{-1} a^{-1}]	**[%]**	**[%]**
$Grünland_{i.e.S}$	$Grünland_{i.e.S}$	-0,02	19,50	19,50
Wald		NO	NO	NO
$Acker_{annuell}$		0,801	18,88	18,88
Hopfen		0,901	50,4	50,4
Weinbau		1,375	23,68	23,68
Obstbau		0,549	17,5	17,5
Kurzumtriebsplantagen		NO	NO	NO
Baumschulen		0,91	21,15	21,15
Weihnachtsbaumkulturen		NO	NO	NO
Gehölze		0,057	19,66	19,66
Hecken		-0,02	26,22	26,22
Terr. Feuchtgebiete		-0,684	26,54	26,54
Torfabbau		NO	NO	NO
Siedlungen		0,825	18,06	18,12
Photovoltaikflächen		NO	NO	NO
Sonstige Flächen		3,407	27,24	27,24
Mineralboden N_2O indirekt		**[kg N_2O ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Wald	$Grünland_{i.e.S}$	NO	NO	NO
$Acker_{annuell}$		0,0003	99,9	223,34
Hopfen		NO	NO	NO
Weinbau		0,00004	99,9	225,18
Obstbau		0,013	99,9	223,4
Kurzumtriebsplantagen		NO	NO	NO
Baumschulen		0,001	99,9	224,45
Weihnachtsbaumkulturen		NO	NO	NO
Gehölze		0,006	99,9	222,75
Hecken		0,006	99,9	223,42
Terr. Feuchtgebiete		0,335	99,9	223,5
Torfabbau		NO	NO	NO
Siedlungen		0,003	99,9	224,47
Photovoltaikflächen		NO	NO	NO
Sonstige Flächen		NO	NO	NO
Mineralboden N_2O direkt		**[kg N_2O ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Wald	$Grünland_{i.e.S}$	NO	NO	NO
$Acker_{annuell}$		0,001	85,86	91,9
Hopfen		NO	NO	NO
Weinbau		0,0001	89,47	96,3
Obstbau		0,03	86,81	92,04

Grünland$_{i.e.S}$		implizite EF	Schranken	
Kurzumtriebsplantagen		NO	NO	NO
Baumschulen		0,003	87,22	94,56
Weihnachtsbaumkulturen		NO	NO	NO
Gehölze		0,013	86,09	90,46
Hecken		0,015	87,82	92,11
Terr. Feuchtgebiete		0,762	88,91	92,29
Torfabbau		NO	NO	NO
Siedlungen		0,008	90,08	94,62
Photovoltaikflächen		NO	NO	NO
Sonstige Flächen		NO	NO	NO
Biomasse [2)]		**[t C ha-1 a-1]**	**[%]**	**[%]**
Wald		NO	NO	NO
Acker$_{annuell}$		0,048	16,73	16,73
Hopfen		0,126	50,92	50,92
Weinbau		-0,036	22,61	22,61
Obstbau		-0,55	14,56	14,56
Kurzumtriebsplantagen		NO	NO	NO
Baumschulen		-0,699	23,81	23,81
Weihnachtsbaumkulturen	Grünland$_{i.e.S}$	NO	NO	NO
Gehölze		-9,694	16	22,58
Hecken		-25,717	22,86	27,87
Terr. Feuchtgebiete		-5,784	19,21	24,31
Torfabbau		0,5	37,66	37,66
Siedlungen		0,04	18,67	18,67
Photovoltaikflächen		NO	NO	NO
Sonstige Flächen		0,26	31,86	31,86
Tote organische Substanz [2)]		**[t C ha^{-1} a^{-1}]**	**[t C ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**
Wald	Grünland$_{i.e.S}$	NO	NO	NO

Alle Faktoren sind jährlich variabel

1) Berechnung über 20 Jahre; Vorratsänderung: positiv ≙ Senke; negativ ≙ Quelle

2) Berechnung nur im ersten Jahr der Landnutzungsänderung; Vorratsänderung: positiv ≙ Senke; negativ ≙ Quelle

Tabelle 396: Unsicherheiten von Emissionsfaktoren [2,5 %- und 97,5%-Perzentil in % vom Lagemaß] aus organischen Böden für Grünland i. e. S. im Jahr 2024

Landnutzung	Treibhausgas	Emissionsfaktor	Schranken	
			untere	obere
Organischer Boden [1)]		[t CO_2-Äq. ha^{-1} a^{-1}]	[%]	[%]
Grünland i. e. S.	CO_2	28,69	48,14	38,40
Grünland i. e. S.	CH_4	2,35	50,14	268,17
Grünland i. e. S.	N_2O	IE	IE	IE

1) Berechnung jährlich; Emission: positiv ≙ Quelle; negativ ≙ Senke

Tabelle 397: Emissionsfaktoren [t C ha^{-1} a^{-1}] mit Unsicherheiten [% vom Lagemaß] zur Berechnung der THG- Emissionen 2024 aus Gehölzflächen

Gehölze Landnutzung$_{vor}$ Mineralboden CO_2-C [1)]	Landnutzung$_{nach}$	Emissionsfaktor [t C ha^{-1} a^{-1}]	Schranken obere [%]	 untere [%]
Gehölze	Gehölze	-0,02	19,50	19,50
Wald		0,158	32,22	40,04
Acker$_{annuell}$		0,933	19,23	19,23
Hopfen		NO	NO	NO
Weinbau		1,287	26,95	26,95
Obstbau		0,535	21,06	21,05
Kurzumtriebsplantagen		NO	NO	NO
Baumschulen		0,86	28,28	28,27
Weihnachtsbaumkulturen		NO	NO	NO
Grünland i. e. S.		0,105	19,61	19,61
Hecken		-0,02	42,19	42,19
Terr. Feuchtgebiete		-0,707	51,05	51,05
Torfabbau		NO	NO	NO
Siedlungen		0,749	18,48	18,54
Photovoltaikflächen		NO	NO	NO
Sonstige Flächen		3,814	27,14	27,14
Mineralboden N_2O_{direkt} [3)]		**[kg N_2O ha^{-1} a^{-1}]**	**[kg N_2O ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**
Wald	Gehölze	NO	NO	NO
Acker$_{annuell}$		0,001	85,93	91,98
Hopfen		NO	NO	NO
Weinbau		NO	NO	NO
Obstbau		0,026	87,59	92,79
Kurzumtriebsplantagen		NO	NO	NO
Baumschulen		0,004	89,22	96,41
Weihnachtsbaumplantagen		NO	NO	NO
Grünland i. e. S.		0,013	86,08	90,45
Hecken		0,016	93,84	97,86
Terr. Feuchtgebiete		0,73	99,03	102,08
Torfabbau		NO	NO	NO
Siedlungen		0,01	90,17	94,71
Photovoltaikflächen		NO	NO	NO
Sonstige Flächen		NO	NO	NO
Mineralboden $N_2O_{indirekt}$ [3)]		**[kg N_2O ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Wald	Gehölze	NO	NO	NO
Acker$_{annuell}$		0,001	99,9	223,37
Hopfen		NO	NO	NO
Weinbau		NO	NO	NO
Obstbau		0,011	99,9	223,7
Kurzumtriebsplantagen		NO	NO	NO
Baumschulen		0,002	99,9	225,23

Gehölze		Emissionsfaktor	Schranken	
Weihnachtsbaumplantagen		NO	NO	NO
Grünland i. e. S.		0,006	99,9	222,74
Hecken		0,007	NO	NO
Terr. Feuchtgebiete		0,321	99,9	225,85
Torfabbau		NO	NO	NO
Siedlungen		0,004	99,9	224,51
Photovoltaikflächen		NO	NO	NO
Sonstige Flächen		NO	NO	NO
Biomasse [2)]		**[t C ha^{-1} 1 a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Wald	Gehölze	23,42	25,55	28,61
$Acker_{annuell}$		7,488	16,24	22,8
Hopfen		10,697	196,64	197,3
Weinbau		9,149	24,99	29,56
Obstbau		9,768	19,41	24
Kurzumtriebsplantagen		NO	NO	NO
Baumschulen		8,851	26,22	29,38
Weihnachtsbaumkulturen		NO	NO	NO
Grünland i. e. S.		7,986	15,94	22,55
Hecken		-17,042	38,63	40,39
Terr. Feuchtgebiete		3,539	25,58	28,41
Torfabbau		12,182	71,24	73,17
Siedlungen		8,636	16,29	22,66
Photovoltaikflächen		NO	NO	NO
Sonstige Flächen		6,843	19,26	25,5
Tote organische Substanz [2)]		**[t C ha^{-1} 1 a^{-1}]**	**[t C ha^{-1} 1 a^{-1}]**	**[%]**
Wald	Gehölze	NO	NO	NO

Alle Faktoren sind jährlich variabel

1) Berechnung über 20 Jahre; Vorratsänderung: positiv ≙ Senke; negativ ≙ Quelle

2) Berechnung nur im ersten Jahr der Landnutzungsänderung; Vorratsänderung: positiv ≙ Senke; negativ ≙ Quelle

3) Berechnung über 20 Jahre; Emission: positiv ≙ Quelle; negativ ≙ Senke

Tabelle 398: Unsicherheiten von Emissionsfaktoren [2,5 %- und 97,5%-Perzentil in % vom Lagemaß] aus organischen Böden für Gehölze im Jahr 2024

Landnutzung	Treibhausgas	Emissionsfaktor	Schranken	
			untere	obere
Organischer Boden1)		[t CO_2-Äq. ha^{-1} a^{-1}]	[%]	[%]
Gehölze	CO_2	21,49	37,83	30,23
Gehölze	CH_4	3,425	39,23	209,17
Gehölze	N_2O	0,999	62,98	257,51

Berechnung jährlich, Emission: positiv ≙ Quelle; negativ ≙ Senke

Tabelle 399: Emissionsfaktoren [t C ha-1 a-1] mit Unsicherheiten [% vom Lagemaß] zur Berechnung der THG- Emissionen 2024 aus Hecken

Gehölze Landnutzung$_{vor}$ Mineralboden CO_2-C [1)]	Landnutzung$_{nach}$	Emissionsfaktor [t C ha^{-1} a^{-1}]	Schranken obere [%]	 untere [%]
Hecken	Hecken	-0,0200	15,55	16,13
Wald		-0,2271	74,62	74,65
Acker$_{annuell}$		0,9638	100,08	100,69
Hopfen		0,5594	138,96	138,98
Weinbau		1,0080	80,83	80,88
Obstbau		0,3929	37,80	37,87
Kurzumtriebsplantagen		0,9250	32,23	32,32
Baumschulen		0,1958	62,80	62,84
Weihnachtsbaumkulturen		0,5217	88,23	88,27
Grünland i. e. S.		0,2114	99,99	113,73
Gehölze		NO	NO	NO
Terr. Feuchtgebiete		NO	NO	NO
Torfabbau		NO	NO	NO
Siedlungen		NO	NO	NO
Photovoltaikflächen		1,7816	99,99	196,20
Sonstige Flächen		NO	NO	NO
Mineralboden N_2O_{direkt} [3)]		**[kg N_2O ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Wald	Hecken	NO	NO	NO
Acker$_{annuell}$		0,0025	99,99	132,55
Hopfen		NO	NO	NO
Weinbau		NO	NO	NO
Obstbau		0,0239	93,08	93,08
Kurzumtriebsplantagen		0,0036	92,66	93,50
Baumschulen		0,0033	99,99	107,92
Weihnachtsbaumkulturen		0,0001	99,99	124,45
Grünland i. e. S.		0,0113	99,99	142,58
Gehölze		NO	NO	NO
Terr. Feuchtgebiete		NO	NO	NO
Torfabbau		NO	NO	NO
Siedlungen		NO	NO	NO
Photovoltaikflächen		NO	NO	NO
Sonstige Flächen		NO	NO	NO
Mineralboden $N_2O_{indirekt}$ [3)]		**[kg N_2O ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Wald	Hecken	NO	NO	NO
Acker$_{annuell}$		0,0011	99,99	292,18
Hopfen		NO	NO	NO
Weinbau		NO	NO	NO
Obstbau		0,0105	99,99	276,52
Kurzumtriebsplantagen		0,0016	99,99	276,66
Baumschulen		0,0015	99,99	281,86
Weihnachtsbaumkulturen		NO	99,99	288,59

Gehölze		Emissionsfaktor	Schranken	
Grünland i. e. S.		0,0050	99,99	296,86
Gehölze		NO	NO	NO
Terr. Feuchtgebiete		NO	NO	NO
Torfabbau		NO	NO	NO
Siedlungen		NO	NO	NO
Photovoltaikflächen		NO	NO	NO
Sonstige Flächen		NO	NO	NO
Biomasse [2)]		**[t C ha^{-1} 1 a^{-1}]**	**[t C ha^{-1} 1 a^{-1}]**	**[%]**
Wald		-12,1656	75,42	76,52
$Acker_{annuell}$		-0,4399	89,07	90,50
Hopfen		0,9875	99,99	140,43
Weinbau		0,0051	81,53	83,04
Obstbau		-3,0187	38,47	40,98
Kurzumtriebsplantagen		-7,9020	30,87	32,40
Baumschulen		-0,5853	63,53	64,90
Weihnachtsbaumkulturen	Hecken	-0,6868	88,90	89,98
Grünland i. e. S.		0,2847	99,99	127,86
Gehölze		NO	NO	NO
Terr. Feuchtgebiete		2,5230	99,99	196,77
Torfabbau		NO	NO	NO
Siedlungen		NO	NO	NO
Photovoltaikflächen		-8,2559	99,99	196,94
Sonstige Flächen		NO	NO	NO
Tote organische Substanz [2)]		**[t C ha^{-1} 1 a^{-1}]**	**[t C ha^{-1} 1 a^{-1}]**	**[%]**
Wald	Hecken	-0,7190	90,68	90,68

Alle Faktoren sind jährlich variabel

1) Berechnung über 20 Jahre; Vorratsänderung: positiv ≙ Senke; negativ ≙ Quelle

2) Berechnung nur im ersten Jahr der Landnutzungsänderung; Vorratsänderung: positiv ≙ Senke; negativ ≙ Quelle

3) Berechnung über 20 Jahre; Emission: positiv ≙ Quelle; negativ ≙ Senke

Tabelle 400: Unsicherheiten von Emissionsfaktoren [2,5 %- und 97,5%-Perzentil in % vom Lagemaß] aus organischen Böden für Hecken im Jahr 2024

Landnutzung	Treibhausgas	Emissionsfaktor	Schranken	
			untere	obere
Organischer Boden		[t CO_2-Äq. ha^{-1} a^{-1}]	[%]	[%]
Hecken	CO_2	28,11	55,31	44,13
Hecken	CH_4	1,276	58,19	311,15
Hecken	N_2O	1,123	92,87	380,06

1) Berechnung jährlich, Emission: positiv ≙ Quelle; negativ ≙ Senke

Die Berechnungen sind sowohl für „Grünland i.e.S, Gehölze“ und „Hecken“ für den gesamten Berichtszeitraum von 1990-2024 räumlich und zeitlich konsistent und vollständig.

6.6.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (4.C)

Details zu den diesjährigen Prüfungen finden sich in Kapitel 6.1.3.

Die zur Erstellung dieses Inventars verwendeten Datenquellen erfüllen die Prüfkriterien des QSE-Handbuchs für Datenquellen. Bezüglich der Qualitätssicherung der Eingangsdaten (ATKIS®, BÜK, Offizialstatistik) wird auf die Datenhalter verwiesen (Dokumentation in Inventarbeschreibung).

Die Ergebnisse der Emissionsberechnung der aktuellen Berichterstattung können mit anderen Datenquellen für Deutschland nicht verglichen werden, da solche flächendeckend, umfassend und unabhängig von den hier aufgeführten Methoden und Datenquellen nicht existieren.

Die folgenden Tabellen 410 bis 413 zeigen einen innereuropäischen Vergleich impliziter Emissionsfaktoren (IEF) für unterschiedliche Pools. Für diesen Vergleich wurden Werte der Nachbarstaaten aus den Submissionen 2025 des Klimasekretariats verwendet (UNFCCC NID Submission 2025: Inventurjahr 2023, (UNFCCC, 2025)). Werte für Deutschland 2024 stammen aus der aktuellen Submission 2026.

Der Vergleich ist von vornherein problematisch, da die zu vergleichenden Werte methodisch z.T auf sehr unterschiedliche Art erhoben werden und vorallem auch die Grenzen der Systeme mitunter deutlich divergieren. Bei diesem Vergleich bedeutet Grünland in Deutschland immer die Summe aus den Subkategorien „Grünland i.e.S., Gehölze“ und „Hecken“. Diese Systemgrenzen werden in anderen Staaten unterschiedlich definiert, so dass die mittleren Emissionsfaktoren zwischen den Staaten oft nicht direkt vergleichbar sind. Angesichts dessen und unter Berücksichtigung der großen Unsicherheiten und Streuung der berichteten Werte (siehe Kapitel 6.6.3), zeigt der Vergleich für keinen der verglichenen Pools implizite Emissionsfaktoren (IEF), die einen eindeutigen Ausreißer darstellen. Die EF finden meist eine Entsprechung in absoluter Größe und Tendenz, mit denen diverser mitteleuropäischen Nachbarländer.

Tabelle 401: Kohlenstoffvorratsveränderung der lebenden Biomasse in Grünland verschiedener Länder (Deutschland für 2023 und 2024, übrige Länder für 2023), in [t C ha^{-1} a^{-1}])

	4.C.1. - Grassland Remaining Grassland	4.C.2 - Land Converted To Grassland	4.C.2.1 - Forest Land Converted To Grassland	4.C.2.2 - Cropland Converted To Grassland	4.C.2.3 - Wetlands Converted To Grassland	4.C.2.4 - Settlements Converted To Grassland	4.C.2.5 - Other Land Converted To Grassland
Belgien	NO	-0,73	-5,92	0,079	0,03	0,016	NO
Dänemark	NA	-0,111	-0,969	-0,096	-2,66	NA	NA,NO
Frankreich	0,01	0,035	-0,221	0,11	0,136	0,417	0,001
Großbritannien	-0,001	-0,118	-2,003	-0,073	NO	0,043	NO
Niederlande	0,002	0,034	-3,572	0,145	0,371	0,534	0,86
Österreich	NA	-0,855	-2,548	-0,097	NO	NO	NO
Polen	0,002	0,107	NO	0,134	IE, NO	IE, NO	NO
Schweiz	0,02	-0,58	-2,92	-0,105	0,532	0,099	0,406
Tschechische Rep.	NO	0,125	-5,212	0,125	0,416	0,591	NO
Deutschland 2023	-0,027	0,243	-12,166	0,283	-3,467	-0,232	0,937
Deutschland 2024	-0,116	0,395	8,974	0,281	-3,432	1,679	2,557

positiv: Kohlenstoffsenke; negativ: Kohlenstoffquelle; Quelle: (UNFCCC, 2023c)

Tabelle 402: Kohlenstoffvorratsveränderung der toten organ. Masse in Grünland verschiedener Länder (Deutschland für 2023 und 2024, übrige Länder für 2023), in [t C ha^{-1} a^{-1}]

	4.C.1. - Grassland Remaining Grassland	4.C.2 - Land Converted To Grassland	4.C.2.1 - Forest Land Converted To Grassland	4.C.2.2 - Cropland Converted To Grassland	4.C.2.3 - Wetlands Converted To Grassland	4.C.2.4 - Settlements Converted To Grassland	4.C.2.5 - Other Land Converted To Grassland
Belgien	NO	-0,10	-0,78	NO	NO	NO	NO
Dänemark	NA	-0,019	-1,137	NA	NA	NA	NA
Frankreich	0	-0,067	-0,293	0	0,001	0,019	NA

	4.C.1. - Grassland Remaining Grassland	4.C.2 - Land Converted To Grassland	4.C.2.1 - Forest Land Converted To Grassland	4.C.2.2 - Cropland Converted To Grassland	4.C.2.3 - Wetlands Converted To Grassland	4.C.2.4 - Settlements Converted To Grassland	4.C.2.5 - Other Land Converted To Grassland
Großbritannien	NO	-0,014	-0,582	IE	NO	IE, NO	NO
Niederlande	NA	-0,083	-1,764	NA	NA	NA	NA
Österreich	NO	-0,368	-1,189	NO	NO	NO	NO
Polen	0,001	-0,004	NO	NO	-0,07	NO	NO
Schweiz	NA, NE, NO	-0,18	-0,82	NA	NA	NA	NA
Tschechische Rep.	NO	-0,005	-0,35	NO	NO	NO	NO
Deutschland 2023	IE	-0,00001	-0,719	IE	IE	IE	IE
Deutschland 2024	IE	0,08	-0,399	IE	IE	IE	IE

positiv: Kohlenstoffsenke; negativ: Kohlenstoffquelle; Quelle: (UNFCCC, 2023c)

Tabelle 403: Kohlenstoffvorratsveränderung der mineral. Böden in Grünland verschiedener Länder (Deutschland für 2023 und 2024, übrige Länder für 2023), in [t C ha^{-1} a^{-1}]

	4.C.1. - Grassland Remaining Grassland	4.C.2 - Land Converted To Grassland	4.C.2.1 - Forest Land Converted To Grassland	4.C.2.2 - Cropland Converted To Grassland	4.C.2.3 - Wetlands Converted To Grassland	4.C.2.4 - Settlements Converted To Grassland	4.C.2.5 - Other Land Converted To Grassland
Belgien	-0,05	1,04	0,00	0	0	0	0
Dänemark	IE	0,047	2,738	IE	-1,624	NA	NA
Frankreich	0,024	0,584	-0,014	0,766	0,174	0,535	0,336
Großbritannien	0,135	0,705	-1,165	0,689	NO	2,757	NO
Niederlande	0,239	0,936	0,27	0,983	0,48	0,76	3,984
Österreich	NA	0,679	0,763	0,646	NO	NO	NO
Polen	0,005	0,965					
Schweiz	-0,05	-0,09					
Tschechische Rep.	0,118	0,443	-0,108	0,474	NO	0,347	0
Deutschland 2023	-0,012	0,868	-0,227	0,828	-0,008	1,929	3,526
Deutschland 2024	-0,014	0,177	-0,015	0,803	-0,689	0,811	3,55

positiv: Kohlenstoffsenke; negativ: Kohlenstoffquelle; Quelle: (UNFCCC, 2023c)

Tabelle 404: Kohlenstoffvorratsveränderung der organischen Böden in Grünland verschiedener Länder (Deutschland für 2023 und 2024, übrige Länder für 2023)

Land	4.C.1. - Grassland Remaining Grassland [t C ha^{-1} a^{-1}]	4.C.2 - Land Converted To Grassland [t C ha^{-1} a^{-1}]	4.C.2.1 - Forest Land Converted To Grassland [t C ha^{-1} a^{-1}]	4.C.2.2 - Cropland Converted To Grassland [t C ha^{-1} a^{-1}]	4.C.2.3 - Wetlands Converted To Grassland [t C ha^{-1} a^{-1}]	4.C.2.4 - Settlements Converted To Grassland [t C ha^{-1} a^{-1}]	4.C.2.5 - Other Land Converted To Grassland [t C ha^{-1} a^{-1}]
Belgien	NO	22,46	3,03	19,178	0,126	0,126	NO
Dänemark	-4,508	IE, NA	IE	IE	NA	NA	NA
Frankreich	IE	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Großbritannien	-0,512	-3,662	-3,662	NO	NO	NO	NO
Niederlande	-3,58	-3,561	-2,736	-3,631	-3,554	-3,646	-3,384
Österreich	IE	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Polen	-0,25	-0,25					
Schweiz	-9,08	-9,07					
Tschechische Rep.	NO	NO	NO	NO	NO	NO	
Deutschland 2023	-6,964	-7,136	NO	-7,136	-6,657	-7,555	-7,003
Deutschland 2024	-6,799	-6,436	NO	-6,409	-6,376	-7,16	-5,559

positiv: Kohlenstoffsenke; negativ: Kohlenstoffquelle; Quelle: (UNFCCC, 2023c)

6.6.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (4.C)

Mit der diesjährigen Submission werden kategoriespezifische Rückrechnungen für den gesamten Berichtszeitraum von 1990 – 2024 vorgelegt. Ursache für die Neuberechnung der Emissionen waren neue und verbesserte Datenquellen, Einführung neuer Methoden, Methodenänderungen und Fehlerkorrekturen im Rahmen der Verbesserung des Inventars. Die entsprechenden Maßnahmen sind in Kapitel 6.1.3.4.2 aufgeführt und zeitigten allesamt Auswirkungen auf die Ergebnisse der Emissionsberechnungen für die Landnutzungskategorie *Grünland.*

Eine vergleichende Darstellung der Ergebnisse der aktuellen Rückrechnung mit denen der Vorjahressubmission findet sich für die Kategorie *Grünland* in Tabelle 405 (Flächen) und Tabelle 406 (Emissionen).

Die geringen Unterschiede zwischen den Flächendaten der aktuellen und der Vorjahressubmission (< 2,5% über die gesamte Zeitreihe; Tabelle 406) sind im Wesentlichen auf Korrekturalgorithmen zurückzuführen. Diese bedingen sich in der Einführung der neuen Landnutzungssubkategorien, sowie der Aktualisierung der Kartengrundlage zur Ermittlung der Aktivitätsdaten und durch Einarbeitung der neu hinzugekommen Daten des letzten Zeitreihenjahres. Es wird davon ausgegangen, dass neueste Daten die beste Qualität haben und daher die vorangegangene Zeitreihe, falls notwendig, angepasst wird (s. auch Kapitel 6.3.1 ff).

Die Unterschiede zwischen den THG-Emissionen der aktuellen und der Vorjahressubmission (Tabelle 406) sind bezüglich des CO_2 im Wesentlichen zurückzuführen auf

- Modifikation des Prozessmodells RothC; die erstmalige, hektargenaue Erfassung der Emissionen aus der Verbleibkategorie der Mineralböden
- die Änderungen bezüglich der Berechnung der Kohlenstoffvorräte in Böden und Biomasse der Subkategorie „Gebäude- und Freiflächen“
- die Implementierung des modifizierten hydrologischen Modells zur Berechnung der Grundwasserstände in organischen Böden.

Die Unterschiede bezüglich der Methanemissionen, die in der aktuellen Submission deutlich größer sind als in der vorherigen (Tabelle 406), sind im Wesentlichen auf die Modifikation des hydrologischen Modells zur Erfassung der Grundwasserspiegel in organischen Böden zurückzuführen.

Die Auswirkungen der methodischen Änderungen auf die Lachgasemissionen nach der Rekalkulation sind sehr gering.

Tabelle 405: Vergleich der Flächendaten [kha] der aktuellen und der Vorjahressubmission der Grünlandkategorie

Area [kha]	Submission	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
Grassland	2025	6.847,1	6.768,5	6.690,0	6.804,9	6.873,9	6.855,4	6.838,2	6.837,7	6.837,1	6.836,5
	2026	6.999,8	6.929,5	6.857,2	6.785,9	6.720,5	6.694,1	6.681,2	6.686,4	6.691,7	6.696,9
	Differenz	152,7	161,0	167,2	-19,1	-153,5	-161,3	-157,0	-151,3	-145,4	-139,6
	in %	2,2	2,4	2,5	-0,3	-2,2	-2,4	-2,3	-2,2	-2,1	-2

Tabelle 406: Vergleich der Treibhausgasemissionen [kt CO_2-Äq.] aus der Kategorie Grünland der aktuellen und der Vorjahressubmission

	THG	Submission	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
Grassland	CO_2	2025	30.634,0	32.146,5	31.741,0	33.572,8	21.692,5	24.279,1	27.216,0	22.983,4	28.004,1	21.998,5
		2026	22.519,1	24.395,6	22.406,7	21.217,2	19.312,2	20.997,2	24.819,5	20.862,8	27.132,0	19.503,1
		Differenz	-8.115,0	-7.750,9	-9.334,3	-12.355,5	-2.380,4	-3.281,9	-2.396,6	-2.120,6	-872,1	-2.495,5
		in %	-26,5	-24,1	-29,4	-36,8	-11,0	-13,5	-8,8	-9,2	-3,1	-11,3
	CH_4	2025	1.521,6	1.245,2	1.276,9	1.262,3	1.510,2	1.217,1	815,6	1.391,0	728,1	1.631,1
		2026	2.582,3	2.390,5	2.324,9	2.173,2	2.643,0	1.834,2	1.425,0	2.468,7	1.061,8	3.508,2
		Differenz	1.060,8	1.145,3	1.048,0	910,9	1.132,7	617,1	609,4	1.077,6	333,7	1.877,2
		in %	69,7	92,0	82,1	72,2	75,0	50,7	74,7	77,5	45,8	115,1
	N_2O	2025	81,5	78,4	76,4	64,4	59,8	60,1	58,8	54,1	56,3	48,3
		2026	80,6	75,2	71,9	68,5	59,9	64,0	62,2	56,5	61,4	51,5
		Differenz	-0,9	-3,2	-4,5	4,1	0,0	3,9	3,4	2,4	5,1	3,2
		in %	-1,1	-4,1	-5,9	6,3	0,0	6,4	5,8	4,4	9,0	6,6

6.6.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (4.C)

Über die in Kapitel 6.1.2.1.9 angeführten geplanten, überwiegend mittelfristigen Maßnahmen die Böden betreffend hinaus, sind derzeit keine weiteren spezifischen Maßnahmen zur Verbesserung der Methodik im Bereich Grünland geplant.

6.7 Feuchtgebiete (4.D)

6.7.1 Beschreibung der Kategorie (4.D)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
L/T	4 D, Wetlands	0	CO_2	3586,67	0,28	3478,53	0,50	-3,01
L/T	4 D, Wetlands	0	CH_4	5368,71	0,42	5447,38	0,77	1,47
-/-	4 D, Wetlands	0	N_2O	26,27	0,01	26,76	0,01	1,86

Gas		Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2	Mineralboden	Tier 2	NS/M	CS
N_2O	Mineralboden	Tier 2	NS/M	CS/D
CH_4	Gewässer	Tier 2	NS/M	CS/D
CO_2	organischer Boden	Tier 3/M	NS/M	CS/M
N_2O	organischer Boden	Tier 2	NS/M	CS
CH_4	organischer Boden	Tier 3/M	NS/M	CS/M
CO_2	Biomasse	Tier 2/M	NS/M	CS/M
CO_2	Totholz	Tier 2/M	NS/M	CS/M

Die Kategorie „Wetlands (Feuchtgebiete)“ ist für CO_2 und CH_4 eine Hauptkategorie nach der Emissionshöhe und dem Trend.

In der Kategorie Feuchtgebiete finden sich für Deutschland im Wesentlichen die Moorstandorte und sonstigen Feuchtgebiete, die keiner der anderen Landnutzungskategorien zuzuordnen sind, im vorliegenden Bericht zusammengefasst unter dem Überbegriff „Terrestrische Feuchtgebiete“ (*other wetlands*), sowie „Natürliche Gewässer, Stehende künstliche Gewässer“ (wie z.B. Fischzuchtteiche und Stauseen), „Fließende künstliche Gewässer“ (wie Entwässerungsgräben

und Kanäle der Wasserwirtschaft), „Künstliche Schifffahrtsgewässer“ (wie Hafenbecken und Kanäle) als auch Flächen zum „Torfabbau“ (zur Gewinnung von Gartenbautorfen).

Die quantifizierte Flächenzuordnung zu den einzelnen Unterkategorien, sowie Ausführungen über die gemäß der 2006 IPCC Guidelines (IPCC, 2006a) und der 2013 IPCC Wetland Supplements (IPCC et al., 2014) und des 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (IPCC, 2019) zu berichtenden Pools und Treibhausgase aus den Verbleib- und Übergangskategorien finden sich in Kapitel 6.2.4.

Die Ergebnisse der Emissionsberechnungen für das Jahr 2024 sind in Tabelle 407 und der Verlauf der Emissionen in der Zeit, unterschieden nach Pools und Unterkategorien, in Abbildung 97und Abbildung 98 dargestellt.

Tabelle 407: CO_2-, N_2O- und CH_4-Emissionen [kt CO_2-Äq.] aus Feuchtgebieten 2024. Dargestellt sind Summen sowie obere und untere Schranken der 95 %-Konfidenzintervalle.

terrestrische Feuchtgebiete						
Pool	THG	[kt CO_2-Äq.]			[%]	
		Emission	2,5 %-Perz.	97,5 %-Perz.	2,5 %-Perz.	97,5 %-Perz.
Terrestrische Feuchtgebiete$_{total}$		1.902,6	1.371,7	2.708,7	27,9	42,4
Mineralboden	CO_2	-15,2	-12,3	-18,1	19,0	19,3
	$N_2O_{indirekt}$	0,0	0,0	0,0	99,9	205,6
	N_2O_{direkt}	0,0	0,0	0,0	80,4	85,2
Organischer Boden	CO_2	1.811,4	995,9	3.016,4	45,0	66,5
	CH_4	273,8	134,5	634,5	50,9	131,7
	N_2O	23,2	5,4	70,8	76,7	205,6
Biomasse	CO_2	-198,6	-178,4	-224,0	10,2	12,8
Streu/Totholz	CO_2	8,0	3,6	12,4	54,7	54,7
Torfabbau						
Pool	THG	[kt CO_2-Äq.]			[%]	
		Emission	2,5 %-Perz.	97,5 %-Perz.	2,5 %-Perz.	97,5 %-Perz.
Torfabbautotal		1.878,3	1.177,5	2.579,2	37,3	37,3
Mineralboden	CO_2	NO	NO	NO	NO	NO
	N_2O	NO	NO	NO	NO	NO
Organischer Boden	CO_2	1.845,7	1.144,9	2.546,5	38,0	38,0
	N_2O	1,8	0,9	2,7	51,8	50,9
	CH_4	3,6	2,0	5,2	44,4	44,4
Biomasse	CO_2	27,2	21,0	34,2	22,7	25,9
Streu/Totholz	CO_2	0,1	0,0	0,1	86,8	86,8
künstliche stehende Gewässer						
Pool	THG	[kt CO_2-Äq.]			[%]	
		Emission	2,5 %-Perz.	97,5 %-Perz.	2,5 %-Perz.	97,5 %-Perz.
künstliche stehende Gewässertotal		4.739,0	3.016,3	6.039,0	36,4	27,4
Mineralboden	CO_2	NA	NA	NA	NA	NA
	N_2O	NA	NA	NA	NA	NA
	CH_4	4.738,4	3.328,2	6.242,8	29,8	31,8
Organischer Boden	CO_2	NA	NA	NA	NA	NA
	N_2O	NA	NA	NA	NA	NA

terrestrische Feuchtgebiete						
	CH_4	0,6	0,4	0,9	41,1	42,5
Biomasse	CO_2	NA	NA	NA	NA	NA
Streu/Totholz	CO_2	NA	NA	NA	NA	NA
künstliche fließende Gewässer						
Pool	**THG**	**[kt CO_2-Äq.]**			**[%]**	
		Emission	**2,5 %-Perz.**	**97,5 %-Perz.**	**2,5 %-Perz.**	**97,5 %-Perz.**
künstliche fließende Gewässer total		240,1	149,4	386,1	37,8	60,8
Mineralboden	CO_2	NA	NA	NA	NA	NA
	N_2O	NA	NA	NA	NA	NA
	CH_4	240,1	149,4	386,1	37,8	60,8
Organischer Boden	CO_2	NA	NA	NA	NA	NA
	N_2O	NA	NA	NA	NA	NA
	CH_4	NA	NA	NA	NA	NA
Biomasse	CO_2	NA	NA	NA	NA	NA
Streu/Totholz	CO_2	NA	NA	NA	NA	NA
Künstliche Schifffahrtsgewässer						
Pool	**THG**	**[kt CO_2-Äq.]**			**[%]**	
		Emission	**2,5 %-Perz.**	**97,5 %-Perz.**	**2,5 %-Perz.**	**97,5 %-Perz.**
Schifffahrtsgewässer total		192,80	119,98	310,09	37,77	60,84
Mineralboden	CO_2	NO	NO	NO	NO	NO
	CH_4	192,80	119,98	310,09	37,77	60,84
	N_2O	NO	NO	NO	NO	NO
organischer Boden	CO_2	NO	NO	NO	NO	NO
	CH_4	NO	NO	NO	NO	NO
	N_2O	NO	NO	NO	NO	NO
Biomasse	CO_2	NO	NO	NO	NO	NO
DOM	CO_2	NO	NO	NO	NO	NO

1) ausschließlich Entwässerungsgräben

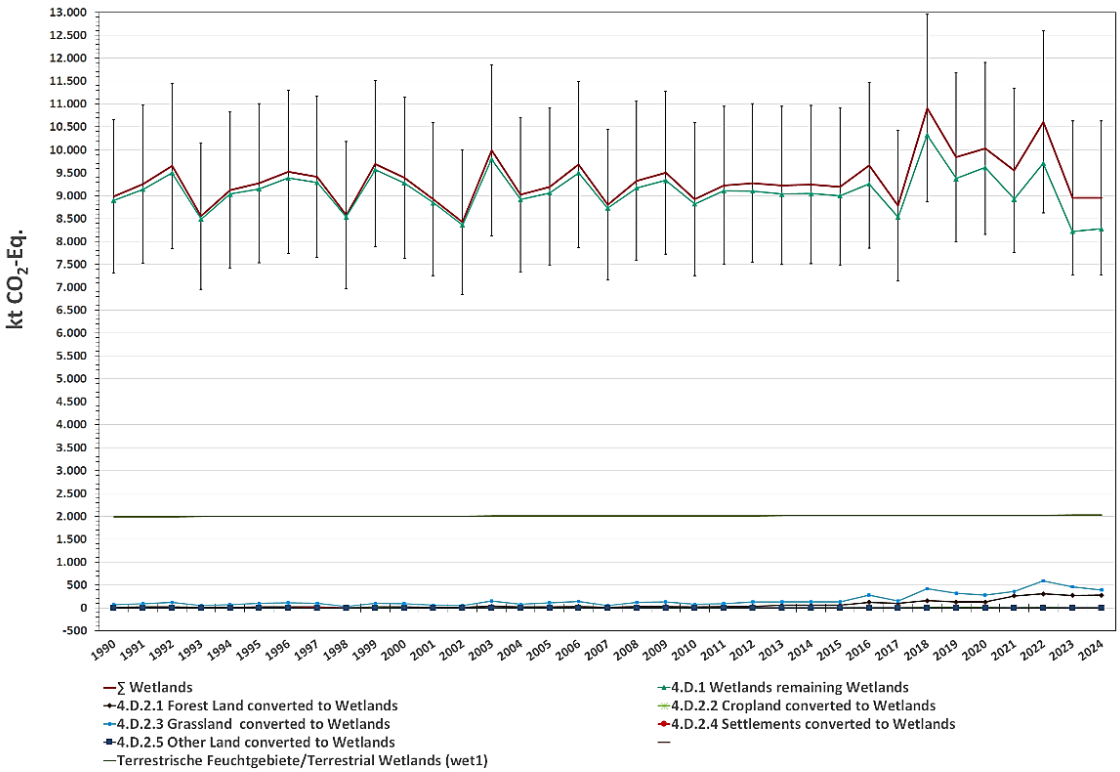
Aus „Feuchtgebieten“ wurden im Jahr 2024 8.952,7 kt CO2-Äq. (95 %-KI: 7.278,5 - 10.555,2 kt CO2-Äq.) freigesetzt. Tabelle 407 verdeutlicht, dass die Emissionen aus der Landnutzungskategorie „Feuchtgebiete“ im Wesentlichen auf die CO_2-Freisetzung aus organischen Böden (40,8 %) und Methanemissionen aus fließenden und stehenden künstlichen Gewässern (57,8 %) zurückzuführen sind. Die Brutto-Freisetzung von Kohlendioxid wird wiederum zu ähnlichen Teilen durch die CO_2-Freisetzung infolge des Torfabbaus (50,4 %) und der Entwässerung terrestrischer organischer Böden (49,4 %) verursacht. Die Freisetzung von Lachgas (26,8 kt CO2-Äq.) ist gemessen an der Summe der Gesamtemissionen gering. Die Emissionen aus Mineralböden (-11,4 kt CO2-Äq.) und der Biomasse (-171,4 kt CO2-Äq.) sind negativ und wirken folglich als sehr geringe Senke (Abbildung 98, Abbildung 99 und Abbildung 100).

Die Emissionen aus industriellem „Torfabbau“ unterteilen sich in Emissionen, die auf Abbauflächen während der Torfgewinnung entstehen (on-site-Emissionen) sowie denjenigen, welche durch Ausbringung der gewonnenen Torfprodukte freigesetzt werden (off-site-Emissionen). Die off-site-Emissionen betrugen 2024 1.786,7 ± 700,4 kt CO2-Äq. und waren demnach maßgeblich für die Höhe der Gesamtemissionen aus dem Torfabbau (95,1 %). Die on-site-Emissionen sind

mit 41,2 kt CO2-Äq. demgegenüber gering und werden dominiert vom CO_2 (91,7 %), gefolgt vom Lachgas (5,8 %) und Methan (2,5 %) .

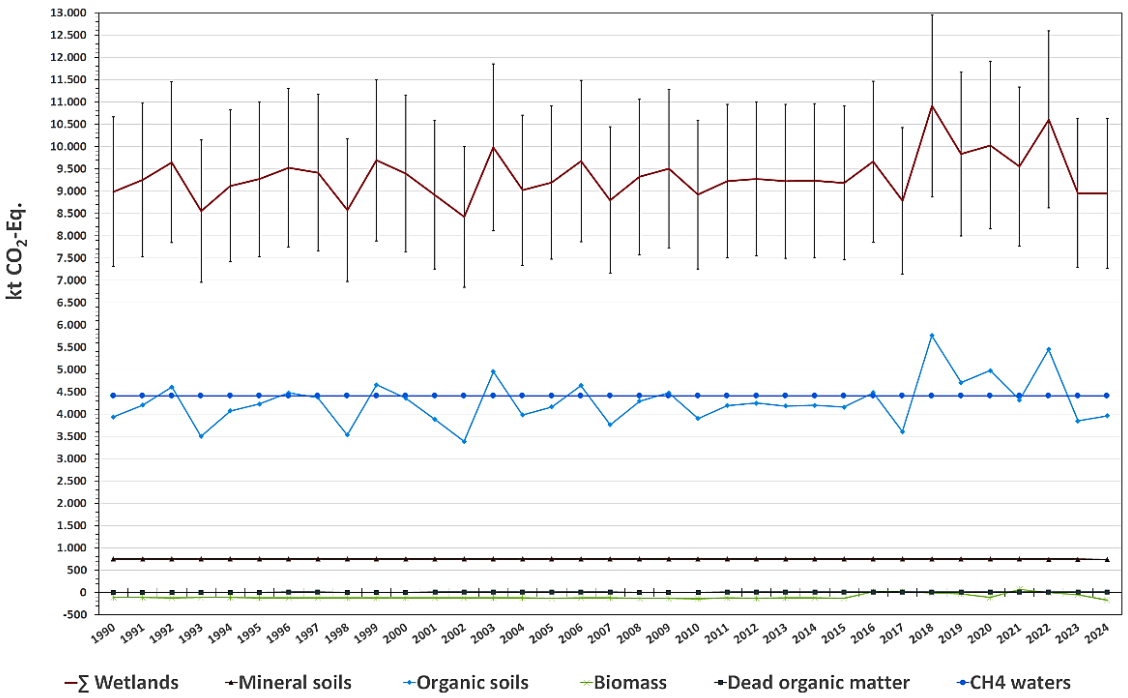
Die Verlaufskurven der Zeitreihen Abbildung 98, Abbildung 99 und Abbildung 100 verdeutlichen, dass die Gesamtemissionen aus der Kategorie „Feuchtgebiete“ über den gesamten Berichtszeitraum im Durchschnitt kaum Veränderungen zeigen. Die Methanemissionen sind nahezu konstant. Die geringen Veränderungen werden hauptsächlich durch Wasserstandsänderungen in den organischen Böden verursacht. Der Anteil der organischen Böden an den Methanemissionen beträgt allerdings nur 5,1 %, so dass die CH_4-Emissionen aus Gewässern die Verlaufskurve dominieren und glätten (Abbildung 99). Der Trendkurvenverlauf wird wesentlich durch die CO_2-Emissionen aus dem Torfabbau geprägt, insbesondere durch die off-site-Emissionen, die im Zeitverlauf zwar deutliche Amplituden, jedoch durchschnittlich nur eine geringe Abweichung vom Mittelwert aufweisen (Standardfehler: 2,2 %).

Abbildung 97: Treibhausgasemissionen (Summe aus CO_2, CH_4 und N_2O) [kt CO2-Äq.] infolge Landnutzung und Landnutzungsänderung aus Feuchtgebieten von 1990-2024, dargestellt nach Unterkategorien



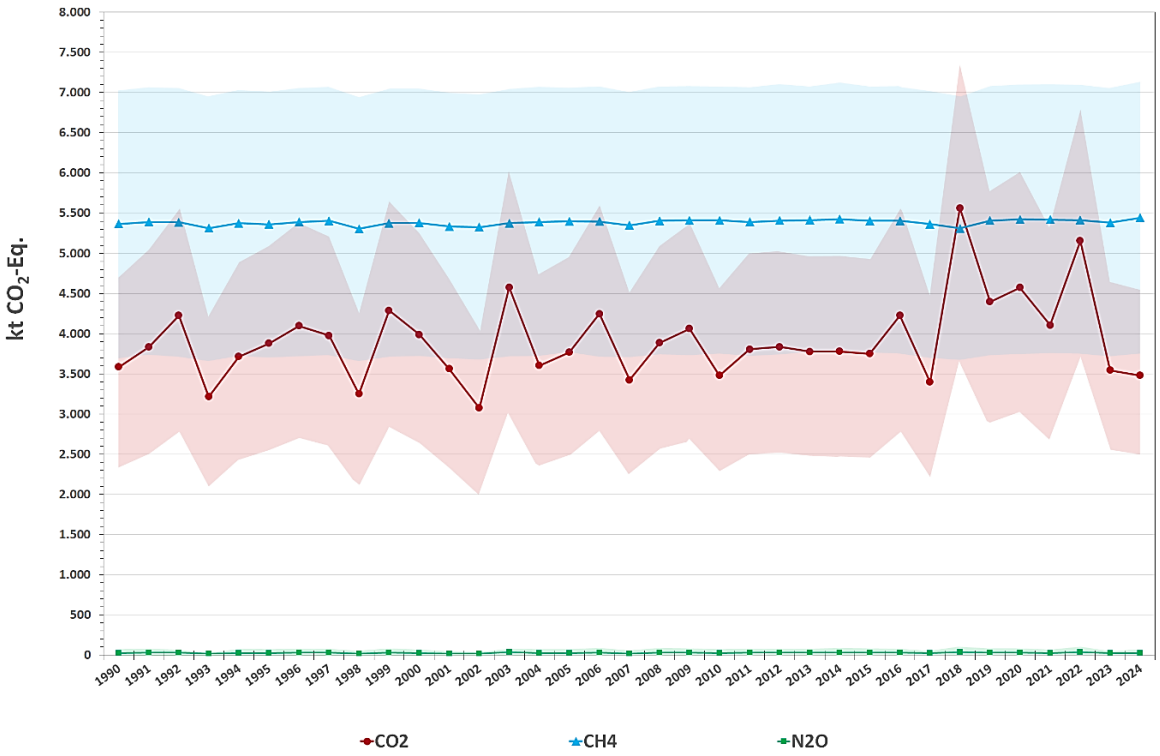
Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

Abbildung 98: Treibhausgasemissionen (Summe aus CO_2, CH_4 und N_2O) [kt CO_2-Äq.] infolge Landnutzung und Landnutzungsänderung aus den Feuchtgebieten von 1990-2024, dargestellt nach Pools



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

Abbildung 99: Treibhausgasemissionen (∑ CO_2, ∑ CH_4 und ∑ N_2O) [kt CO2-Äq.] infolge Landnutzung und Landnutzungsänderung aus den Feuchtgebieten von 1990–2024



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

6.7.2 Methodische Aspekte (4.D)

6.7.2.1 Datenquellen

Die Produktionsmengen für Torf aus industriellem Torfabbau entstammen der deutschen Offizialstatistik (Statistisches Bundesamt, FS 4, R 3.1).

Weitere Quellen siehe Kapitel 6.1.2 ff, Kapitel 6.2.4 und Kapitel 6.3.1.2.

6.7.2.2 Biomasse

Gewässerflächen sind vegetationslos, so dass der Kohlenstoffvorrat in der Biomasse Null ist und in den CRF immer mit NO (not occurring) ausgewiesen wird; das gleiche gilt für Torfabbauflächen.

Die Methode zur Berechnung der Biomasse auf Flächen der Subkategorie „Terrestrische Feuchtgebiete“ ist ausführlich in 6.1.2.4 ff beschrieben, spezifisch für Terrestrische Feuchtgebiete in Kapitel 6.1.2.3.7. Die Berechnung der Veränderungen im Kohlenstoffvorrat der Biomasse infolge von Landnutzungsänderungen erfolgt mittels der in Kapitel 6.1.2.4 ff beschriebenen Verfahren und Methoden.

Die impliziten Emissionsfaktoren mit Unsicherheiten sind in Kapitel 6.7.3 dargestellt.

6.7.2.3 Mineralböden

Bei Landnutzungsänderungen zu Gewässern werden keine Änderungen im Kohlenstoffvorrat von Mineralböden angenommen (NO in CRF 4.D.1). In den Verbleibkategorien von Terrestrischen Feuchtgebieten und Gewässern wird ein Gleichgewicht in den Mineralböden unterstellt, die entsprechenden Felder in den CRF daher mit NA versehen.

Für die Unterkategorie „Terrestrische Feuchtgebiete“ erfolgt die Berechnung der Veränderungen im Kohlenstoffvorrat der Mineralböden infolge von Landnutzungsänderungen mittels der in Kapitel 6.1.2.1 beschriebenen Verfahren und Methoden.

Die impliziten Emissionsfaktoren mit Unsicherheiten sind in Kapitel 6.7.3 zu finden.

6.7.2.4 Organische Böden

Die Emissionsberechnung erfolgt nach den in Kapitel 6.1.2.2 beschriebenen Methoden.

6.7.2.5 Torfabbau

Die Berechnung der Treibhausgasemissionen aus dem Torfabbau erfolgte gemäß den Vorgaben der 2006 IPCC Guidelines nach einem Tier-2-Ansatz. Berechnet werden die Gesamtemissionen aus den on-site- und off-site-Emissionen nach den Gleichungen 7.2 bis 7.5 der 2006 IPCC-Guidelines (IPCC, 2006a). In der Unterkategorie Torfabbau werden CO_2- (on-site: Emission und DOC, off-site: Produzierter und ausgebrachter Torf), CH_4- (Emission und Grabendrainung) und N_2O-Emissionen (on-site) berichtet; die Herleitung der Emissionsfaktoren ist in Kapitel 6.1.2.2 dargestellt. Als Aktivitätsdaten liegen der Abschätzung zugrunde:

- Berechnung der on-site-Emissionen: Die Ermittlung der industriellen Torfabbauflächen, sowie die Ermittlung der Flächenwanderung von und zu diesen, erfolgte mittels des Basis-DLM (siehe Kapitel 6.3.1). Diese Datensätze wurden erst vom Jahr 2008 an vollständig in das Basis-DLM übernommen. Daher wird die für 2008 ermittelten Torfabbauflächen für alle Jahre vor 2008 zur Berechnung der on-site-Emissionen herangezogen; von 2008 an, die jeweils für die Erhebungsstichjahre aktuellen Werte.

- Berechnung der off-site - Emissionen aus den jährlichen Produktionsmengen; diese entstammen der deutschen Offizialstatistik (Statistisches Bundesamt, FS 4, R 3.1).

Berechnung nach Gleichung 7.3 (IPCC, 2006a):

Gleichung 91:

$$CO_2\text{-Äq.}_{Torfabbau} = CO_2\text{- Äq.}_{on\text{-}site} + CO_2\text{- Äq.}_{off\text{-}site}$$

- $CO_2\text{- Äq.}_{Torfabbau}$ = THG-Emissionen aus dem Torfabbau [t C- Äq a^{-1}]
- $CO_2\text{- Äq.}_{on\text{-}site}$ = THG-Emissionen, die während der Produktion vor Ort entstehen [t C- Äq a^{-1}]
- $CO_2\text{- Äq.}_{off}$-site = THG-Emissionen durch produzierte, zu Gartenbauzwecken ausgebrachten Torfen [t C- Äq a^{-1}]

In Deutschland werden ausschließlich Hochmoortorfe abgebaut daher wurde Gleichung 7.4 (IPCC, 2006a) folgendermaßen modifiziert:

Gleichung 92:

$$CO_2\text{-Äq.}_{on\text{-}site} = A_{Torf\text{-}nährstoffarm} \times (EF_{Torf\text{-}nährstoffarm_CO2} + EF_{Torf\text{-}nährstoffarm_N2O} + EF_{Torf\text{-}nährstoffarm_CH4})$$

- $CO_2\text{-Äq.}_{on\text{-}site}$ = on-site-Emissionen, die während der Produktion vor Ort entstehen [t CO_2-Äq. a^{-1}]
- $A_{Torf\text{-}nährstoffarm}$ = Torfabbaufläche für Hochmoortorfe [ha]
- $EF_{Torf\text{-}nährstoffarm_(CO2, N2O, CH4)}$ = Landesspezifische Emissionsfaktoren für Hochmoortorfe im Abbau [t CO_2-Äq. ha^{-1} a^{-1}] (s.Kapitel 6.1.2.2)

Die Berechnung der off-site-Emissionen erfolgte nach Gleichung 7.5 (IPCC, 2006a):

Gleichung 93:

$$CO_2\text{-Äq.}_{off\text{-}site} = Vol_{Torf_trocken} \times Cfraction_{vol_Torf}$$

- $CO_{2off\text{-}site}$ = CO_2-Äq.-Emissionen durch produzierte, zu Gartenbauzwecken ausgebrachten Torfe [t CO_2-Äq. a^{-1}]
- $Vol_{Torf_trocken}$ = Volumen des lufttrockenen Torfes [m^3]
- $C_{fractionvol_Torf}$ = Kohlenstoffanteil bezogen auf das Volumen luftgetrockneten Torfs [0,2567 t CO_2-Äq. m^3 luftgetrockneter Torf (IPCC (2006a), Tab. 7.5)]

Die Emissionsfaktoren für die on-site Emissionen sind in Tabelle 410 (Kapitel 6.7.3) aufgeführt; die off-site Emissionen, berechnet aus den Torfproduktionsmengen, sowie die IEF für die off-site Emissionen in Tabelle 408.

Tabelle 408: Torfabbau: $IEF_{off\text{-}site}$ [t CO_2-Äq. ha^{-1} a^{-1}] und off-site Emissionen [kt CO_2-Äq.]

Torfabbau Jahr	IEF [t CO_2-Äq. ha^{-1} a^{-1}]	Off-site Emissionen [kt CO_2-Äq.]
1990	97,47	2.029,5 ± 795,6
1995	105,84	2.203,9 ± 863,9
2000	116,04	2.416,2 ± 947,2
2005	104,67	2.179,6 ± 854,4
2010	99,75	1.991,5 ± 780,7
2015	106,36	2.066,4 ± 810,0
2020	125,25	2.212.9 ± 867,5
2021	145,57	2.226,1 ± 896,6
2022	154,60	1.997,1 ± 782,9
2023	170,93	1.802,3 ± 706,5
2024	177,32	1.786,7 ± 700,4

6.7.2.6 Gewässer

Die Untergliederung der Landnutzungskategorie „Gewässer“, die Beschreibung der Subkategorien sowie die Methoden, Gewinnung der Aktivitätsdaten und Herleitung der Emissionsfaktoren sind in Kapitel 6.1.2.6 und Kapitel 6.2.4 beschrieben.

Gemäß des 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (IPCC, 2019) werden ausschließlich Methanemissionen berichtet. Diese werden für die Subkategorien „Stehende künstliche Gewässer, Fließende künstliche Gewässer“ und „Künstliche Schifffahrtsgewässer“ erfasst, die Ergebnisse in der CRF 4.(II). D festgehalten. Emissionen aus „Natürlichen Gewässern“ sind nicht berichtspflichtig; die entsprechenden Felder der CRT 4.(II). D werden daher mit dem Notation Key NO versehen.

Die Methanemissionen aus Entwässerungsgräben organischer Böden fallen gemäß der Berichtsregeln nicht unter die Landnutzungskategorie „Fließende künstliche Gewässer“. Sie werden entsprechend der aktuellen Nutzung des entwässerten Moores in der CRT 4.(II). A/B/C/D/E dokumentiert.

6.7.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (4.D)

Die Zeitreihen für die Aktivitätsdaten zum Torfabbau vom Statistischen Bundesamt sind konsistent und für die gesamte Berichtsperiode verfügbar. Die Unsicherheiten für diese Aktivitätsdaten sind laut Statistischem Bundesamt gleich Null, da es sich bei diesen Daten um eine Vollerhebung mit Auskunftspflicht handelt. Nichtsdestotrotz wird nach den 2006 IPCC Guidelines eine Unsicherheit von 20 % unterstellt, die im Wesentlichen auf der Unsicherheit der Umrechnung von Volumen- auf Masseeinheiten für Torfe beruht. Die in Tabelle 409 bis Tabelle 412 aufgeführten Unsicherheiten für den Torfabbau bis 40 % sind auf die Unsicherheitenfortpflanzung und insbesondere auf die großen Unsicherheiten der genutzten IPCC Standardwerte zurückzuführen. Bezüglich der Unsicherheiten der Emissionsfaktoren für Methan und Lachgas gelten die Ausführungen in den Kapiteln 6.5.3 und 6.6.3.

Die Aktivitäts- bzw. Flächendaten sind normalverteilt und weisen je nach Flächen- bzw. Stichprobengröße Unsicherheiten von 0,5 - 196 % auf. Die Gesamtunsicherheit für die Flächendaten der Kategorie Feuchtgebiete beträgt 0,22 %.

Die Gesamtunsicherheit für die Emissionen der Landnutzungskategorie „Feuchtgebiete“ beträgt -18,7 % / +17,9 % [95-% Perzentile], die für die Subkategorien „Terrestrische Feuchtgebiete“ -27,9 % / +42,37 %, „Gewässer“ -56,1 % / +56,1 %, „Torfabbau“ -37,3 % / +37,3 %, „Stehende künstliche Gewässer“ -36,4 % / +27,4 und „Fließende künstliche Gewässer“ und künstliche Schifffahrtsgewässer -37,8 % / +60,8 %. Der Beitrag der Kategorie „Feuchtgebiete“ zur Gesamtunsicherheit des LULUCF-Sektors ist mit 2,3 % gering. Nichtsdestotrotz sind die Werte im Zusammenhang mit Methanemissionen aus Gewässern und den Emissionen aus dem „Torfabbau“ und der organischen Böden aus der Subkategorie „Terrestrische Feuchtgebiete“ wahrnehmbar.

Tabelle 409: Implizite Emissionsfaktoren mit Unsicherheiten [in % vom Lagemaß] zur Berechnung der THG-Emissionen aus terrestrischen Feuchtgebieten 2024, unterschieden nach Pools und Unterkategorien

Feuchtgebiete$_{terrestrisch}$		implizite Emissionsfaktoren	Schranken	
Landnutzung$_{vor}$	Landnutzung$_{nach}$		untere	obere
Mineralboden CO_2-C[1]		**[t C ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Wald	Feuchtgebiete$_{terrestrisch}$	0,516	48,89	53,29
Acker$_{annuell}$		1,456	57,82	57,82
Hopfen		NO	NO	NO
Weinanbau		0	NO	NO
Obstanbau		1,608	99,9	167,56
Kurzumtriebsplantagen		NO	NO	NO
Baumschulen		2,207	99,9	196,22
Weihnachtsbaumkulturen		NO	NO	NO
Grünland$_{i.e.S.}$		0,868	24,52	24,52
Gehölze		0,888	49,65	49,65
Hecken		NO	NO	NO
Torfabbau		NO	NO	NO
Siedlungen		1,567	98,64	98,65
Photovoltaikflächen		NO	NO	NO
Sonstiges Land		3,622	99,9	196,53
Mineralboden N_2O_{direkt}[2]		**[kg N_2O ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Grünland$_{i.e.S.}$	Feuchtgebiete$_{terrestrisch}$	0,02	87,33	92,59
Gehölze		0,009	97,42	102,16
Mineralboden $N2O_{indirekt}$[2]		**[kg N_2O ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Grünland$_{i.e.S.}$	Feuchtgebiete$_{terrestrisch}$	0,009	99,9	223,62
Gehölze		0,004	99,9	227,75
Biomasse[3]		**[t C ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Wald	Feuchtgebiete$_{terrestrisch}$	-3,613	21,56	23,91
Acker$_{annuell}$		3,29	45,28	47,7
Hopfen		NO	NO	NO
Weinanbau		NO	NO	NO
Obstanbau		0,399	99,9	168,19
Kurzumtriebsplantagen		NO	NO	NO
Baumschulen		-0,358	99,9	168,17
Weihnachtsbaumkulturen		NO	NO	NO

Feuchtgebiete$_{terrestrisch}$		implizite Emissionsfaktoren	Schranken	
Grünland i.e.S.		3,661	17,2	22,76
Gehölze		-8,777	20,63	24,04
Hecken		-16,558	99,9	114,49
Feuchtgebiete$_{terrestrisch}$		NO	NO	NO
Torfabbau		3,945	21,87	27,28
Siedlungen		3,621	66,95	68,51
Photovoltaikflächen		NO	NO	NO
Sonstiges Land		5,57	99,9	197,34
Tote organische Substanz		**[t C ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Wald	Feuchtgebiete$_{terrestrisch}$	-0,266	54,74	54,74

positiv: Senke; negativ: Quelle

1) Berechnung über 20 Jahre, Vorratsänderung: positiv ≙ Senke; negativ ≙ Quelle

2) Berechnung über 20 Jahre Emission: positiv ≙ Quelle; negativ ≙ Senke

3) Berechnung nur im ersten Jahr der Landnutzungsänderung

Tabelle 410: Implizite Emissionsfaktoren mit Unsicherheiten [in % vom Lagemaß] zur Berechnung der THG-Emissionen aus Torfabbau 2023 für die Biomasse

Torfabbau		implizite Emissionsfaktoren	Schranken	
Landnutzung$_{vor}$	**Landnutzung$_{nach}$**		**obere**	**untere**
Biomasse*		**[t C ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Wald	Torfabbau	-6,146	74,44	74,44
Acker$_{annuell}$		-0,409	30,9	30,9
Hopfen		NO	NO	NO
Weinanbau		NO	NO	NO
Obstanbau		NO	NO	NO
Kurzumtriebsplantagen		NO	NO	NO
Baumschulen		NO	NO	NO
Weihnachtsbaumkulturen		NO	NO	NO
Grünland i.e.S.		-0,32	33,33	33,33
Gehölze		-6,299	99,9	197,4
Hecken		NO	NO	NO
Feuchtgebiete$_{terrestrisch}$		-6,504	27,32	31,81
Gewässer		NO	NO	NO
Siedlungen		-0,35	77,56	77,56
Sonstiges Land		NO	NO	NO
Tote organische Substanz		**[t C ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Wald	Torfabbau	-0,117	86,82	86,82

positiv: Senke; negativ: Quelle

* Berechnung nur im ersten Jahr der Landnutzungsänderung

Tabelle 411: Unsicherheiten von impliziten Emissionsfaktoren [2,5 %- und 97,5%-Perzentil in % vom Lagemaß] aus Gewässern im Jahr 2023

Landnutzung	Treibhausgas	Impliziter Emissionsfaktor	Schranken	
			obere	untere
		[t CO_2-Äq. ha^{-1} a^{-1}]	[%]	[%]
künstliche stehende Gewässer	CH_4	2.565	36,35	27,43
künstliche fließende Gewässer/ Häfen	CH_4	379	37,77	60,83

Tabelle 412: Unsicherheiten von impliziten Emissionsfaktoren [2,5 %- und 97,5%-Perzentil in % vom Lagemaß] aus organischen Böden für Feuchtgebiete und Torfabbau im Jahr 2023

Landnutzung	Treibhausgas	Emissionsfaktor	Schranken	
			untere	obere
Organischer Boden*		[t CO_2-Äq. ha^{-1} a^{-1}]	%	%
Feuchtgebiete$_{terrestrisch}$	CO_2	13,073	45,02	66,53
Feuchtgebiete$_{terrestrisch}$	N_2O	0,167	76,67	205,61
Feuchtgebiete$_{terrestrisch}$	CH_4	1,953	50,88	131,73
Torfabbau	CO_2	6,911	37,97	37,97
Torfabbau	N_2O	0,355	44,44	44,44
Torfabbau	CH_4	0,117	51,76	50,91

* Berechnung jährlich, Emission: positiv ≙ Quelle; negativ ≙ Senke

Die Berechnungen sind für den gesamten Berichtszeitraum von 1990 – 2024 räumlich und zeitlich konsistent und vollständig.

6.7.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (4.D)

Details zu den diesjährigen Prüfungen finden sich in Kapitel 6.1.3.

Die zur Erstellung dieses Inventars verwendeten Datenquellen erfüllen die Prüfkriterien des QSE-Handbuchs für Datenquellen. Bezüglich der Qualitätssicherung der Eingangsdaten (ATKIS®, BÜK, Offizialstatistik) wird auf die Datenhalter verwiesen (Dokumentation in der Inventarbeschreibung).

Die Ergebnisse der Emissionsberechnung der aktuellen Berichterstattung können mit anderen Datenquellen für Deutschland nicht verglichen werden, da solche flächendeckend, umfassend und unabhängig von den hier aufgeführten Methoden und Datenquellen nicht existieren.

Die Tabelle 413 zeigt einen innereuropäischen Vergleich impliziter Emissionsfaktoren (IEF) für unterschiedliche Pools der Kategorie *Feuchtgebiete*. Für diesen Vergleich wurden Werte der Nachbarstaaten aus den Submissionen 2025 des Klimasekretariats verwendet ((UNFCCC NID Submission 2025: Inventurjahr 2023, (UNFCCC, 2025)). Werte für Deutschland 2024 stammen aus der aktuellen Submission 2026.

Der Vergleich ist von vornherein problematisch, da die zu vergleichenden Werte methodisch z.T auf sehr unterschiedliche Art erhoben werden und vorallem auch die Grenzen der Systeme mitunter deutlich divergieren. *Feuchtgebiete* bedeutet in Deutschland bei diesem Vergleich die Summe aus den Subkategorien *Terrestrische Feuchtgebiete*, *Natürliche Gewässer*, *Stehende künstliche Gewässer*, *Fließende künstliche Gewässer, künstliche Schifffahrtsgewässer* und *Torfabbau*. Diese Zusammensetzung ist uneinheitlich zwischen den Staaten, was einen Vergleich der mittleren Emissionsfaktoren problematisch macht. Nichtsdestotrotz: Die meisten EF finden

eine Entsprechung in absoluter Größe und Tendenz, in denen diverser mitteleuropäischen Nachbarländer.

Tabelle 413: Kohlenstoffvorratsveränderung verschiedener Pools in Wetland verschiedener Länder (Deutschland für 2023 und 2024, übrige Länder für 2023)

Land	4.D.1. - Wetlands Remaining Wetlands			4.D.2 - Land Converted To Wetland			
	Biomasse	Tote Organische Masse	Organische Böden	Biomasse	Tote Organische Masse	Mineralische Böden	Organische Böden
	[t C ha^{-1} a^{-1}]	[t C ha^{-1} a^{-1}]	[t C ha^{-1} a^{-1}]	[t C ha^{-1} a^{-1}]	[t C ha^{-1} a^{-1}]	[t C ha^{-1} a^{-1}]	[t C ha^{-1} a^{-1}]
Belgien	NO	NO	NO	-1,197	-0,124	0,447	NO
Dänemark	NA, NE	NA, NE	-13,739	NE	NE	NE	NE
Frankreich	NA	NA	-42,896	NA	NA	NO	NA
Großbritannien	0	NA, NE, NO	-0,042	NO	NO	NO	-2,92
Niederlande	NA, NO	NA, NO	NO	NA	NA	NO	NO
Österreich	NA, NO	NA, NO	IE, NO	NO	NO	NO	NO
Polen	NO	NO	-0,29	-0,002	-8,616	NA, NO	-0,007
Schweiz	0	NA	-5,052	-0,807	-0,143	-0,586	-4,748
Tschechische Republik	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Deutschland 2023	0,038	IE	-2,267	0,203	-0,061	0,77	-4,234
Deutschland 2024	0,039	IE	-2,347	-0,335	-0,05	0,113	-4,218

positiv: Kohlenstoffsenke; negativ: Kohlenstoffquelle; Quelle: (UNFCCC, 2023c)

6.7.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (4.D)

Mit der diesjährigen Submission werden kategoriespezifische Rückrechnungen für den gesamten Berichtszeitraum von 1990 – 2024 vorgelegt. Ursache für die Neuberechnung der Emissionen waren neue und verbesserte Datenquellen, Einführung neuer Methoden , Methodenänderungen und Fehlerkorrekturen im Rahmen der Verbesserung des Inventars. Die entsprechenden Maßnahmen sind in Kapitel 6.1.3.4.2 aufgeführt und zeitigten allesamt Auswirkungen auf die Ergebnisse der Emissionsberechnungen für die Landnutzungskategorie *Feuchtgebiete*.

Eine vergleichende Darstellung der Ergebnisse der aktuellen Rückrechnung mit denen der Vorjahressubmission findet sich für die Kategorie Feuchtgebiete in Tabelle 414 (Flächen) und Tabelle 415 (Emissionen).

Die Unterschiede zwischen den Flächendaten der aktuellen und der Vorjahressubmission sind absolut und relativ sehr gering (Tabelle 414). Sie bedingen sich im Wesentlichen in der Einführung der neuen Landnutzungssubkategorien, sowie der Aktualisierung der Kartengrundlage zur Ermittlung der Aktivitätsdaten, durch Einarbeitung der neu hinzugekommenen Daten des letzten Zeitreihenjahres. Es wird davon ausgegangen, dass neueste Daten die beste Qualität haben und daher die vorangegangene Zeitreihe, falls notwendig, angepasst wird (s. auch Kapitel 6.3.1 ff).

Die überwiegend geringen Unterschiede zwischen den CO_2-, CH_4- und N_2O-Emissionen der vorliegenden und der Vorjahressubmission (

Tabelle 415) sind hauptsächlich auf die Einführung des modifizierten hydrologischen Modells zur Berechnung der Grundwasserstände in organischen Böden zurückzuführen.

Tabelle 414: Vergleich der Flächendaten [kha] der aktuellen und der Vorjahressubmission der Kategorie Feuchtgebiete

Area [kha]	Submission	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
Wetlands	2025	796,8	796,8	796,8	796,9	797,5	800,0	806,0	809,7	813,5	817,2
	2026	792,8	793,3	794,1	795,1	796,5	799,3	805,5	809,8	814,2	818,6
	Differenz	-4,0	-3,5	-2,7	-1,8	-1,0	-0,7	-0,5	0,1	0,7	1,4
	in %	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabelle 415: Vergleich der Treibhausgasemissionen [kt CO_2-Äq.] aus der Kategorie Feuchtgebiete der aktuellen und der Vorjahressubmission

	THG	Submission	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
Wetlands	CO_2	2025	3.696,4	4.075,5	4.199,9	3.924,0	3.776,3	3.785,2	4.725,0	4.119,1	5.014,8	3.298,4
		2026	3.586,7	3.879,4	3.988,1	3.766,4	3.480,1	3.750,5	4.572,6	4.104,5	5.153,8	3.544,3
		Differenz	-109,7	-196,0	-211,8	-157,5	-296,2	-34,7	-152,4	-14,7	139,0	245,9
		in %	-3,0	-4,8	-5,0	-4,0	-7,8	-0,9	-3,2	-0,4	2,8	7,5
	CH_4	2025	5.423,6	5.445,0	5.430,5	5.438,7	5.470,6	5.432,1	5.479,1	5.470,3	5.476,9	5.446,2
		2026	5.368,7	5.364,5	5.380,1	5.400,0	5.414,3	5.408,6	5.424,0	5.421,6	5.418,1	5.385,4
		Differenz	-54,9	-80,5	-50,4	-38,7	-56,3	-23,6	-55,1	-48,7	-58,8	-60,8
		in %	-1,0	-1,5	-0,9	-0,7	-1,0	-0,4	-1,0	-0,9	-1,1	-1,1
	N_2O	2025	26,3	29,1	27,5	27,6	29,0	26,9	35,5	26,9	37,7	22,7
		2026	26,3	27,0	26,6	27,6	27,5	28,3	33,9	26,4	38,2	24,1
		Differenz	-0,0	-2,0	-0,9	0,0	-1,5	1,5	-1,6	-0,6	0,5	1,4
		in %	-0,1	-7,0	-3,1	0,1	-5,1	5,5	-4,5	-2,1	1,3	6,3

6.7.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (4.D)

Über die in Kapitel 6.1.2.1.9 bzw. Kapitel 6.1.4 angeführten geplanten, mittelfristigen Maßnahmen hinaus, sind derzeit keine weiteren spezifischen Maßnahmen zur Verbesserung der Methodik in der Landnutzungskategorie *Feuchtgebiete* geplant.

6.8 Siedlungen (4.E)

6.8.1 Beschreibung der Kategorie (4.E)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
L/T	4 E, Settlements	0	CO_2	3141,45	0,25	4370,55	0,62	39,13
-/-	4 E, Settlements	0	CH_4	53,82	0,01	96,43	0,02	79,18
-/-/2	4 E, Settlements	0	N_2O	136,11	0,02	177,18	0,03	30,17

Gas	Pool	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2	Mineralboden	Tier 2	NS/M	CS/M
N_2O	Mineralboden	Tier 2	NS/M	CS/D
CO_2	organischer Boden	Tier 3/M	NS/M	CS/M
N_2O	organischer Boden	Tier 2	NS/M	CS
CH_4	organischer Boden	Tier 3/M	NS/M	CS/M
CO_2	Biomasse	Tier 2/M	NS/M	CS/M
CO_2	Totholz	Tier 2/M	NS/M	CS/M

Die Kategorie „Siedlungen“ ist für CO_2 eine Hauptkategorie nach der Emissionshöhe und dem Trend sowie nach Methode 2 für Lachgas.

Sie wird in die Subkategorien „Gebäude und Freiflächen, Straßen, Bahnkörper“ und „Flächen mit Photovoltaikanlagen“ unterteilt (Kapitel 6.2.5). Emissionen werden nur von „Gebäuden und Freiflächen“ sowie „Flächen mit Photovoltaikanlagen“ berichtet, da in den Subkategorien „Straßen und Bahnkörper“ ausschließlich vollversiegelte Flächen erfasst werden.

In der Landnutzungssubkategorie „Gebäude und Freiflächen“ wird über CO_2-Emissionen/-Festlegung der Pools Boden, Biomasse und tote organische Substanz von Flächen berichtet, die zu Siedlungs- und Verkehrszwecken ausgewiesen sind. Genaue Definitionen und Kategoriezuordnungen sind in Kapitel 6.2 aufgeführt. Die Ergebnisse der Abschätzung der Treibhausgasemissionen sind in Tabelle 416 und in Abbildung 100 und Abbildung 101 dargestellt.

Tabelle 416: CO_2-, N_2O- und CH_4-Emissionen [kt CO_2-Äq. nach IPCC AR5] aus Siedlungsflächen 2024 Dargestellt sind Summen sowie obere und untere Schranke des 95 % - Konfidenzintervalls

Siedlungen Emissionen 2024						
Kategorie	THG	[kt CO_2-Äq.]			[%]	
		Emission	2,5 %-Perz.	97,5 %-Perz.	2,5 %-Perz.	97,5 %-Perz.
Siedlungen$_{total}$ [1]		4.699,4	3.693,6	5.988,4	10,4	11,0
Mineralboden	CO_2 [2]	1.020,9	846,3	1.213,3	17,1	18,9
	$N_2O_{indirekt}$ [3]	24,1	4,1	55,3	82,8	130,0
	N_2O_{direkt} [3]	54,7	26,2	84,1	52,1	53,9
Organischer Boden	CO_2 [2]	1.720,1	1.252,2	2.068,9	27,2	20,3
	CH_4 [4]	95,6	49,5	295,0	48,2	208,8
	N_2O [4]	96,7	36,3	343,7	62,5	255,5
Biomasse	CO_2 [2]	1.643,4	1.458,2	1.860,8	11,3	13,2
Totholz	CO_2 [2]	44,1	21,0	67,3	52,4	52,4
Photovoltaikflächen Emissionen 2024						
Kategorie	THG	[kt CO_2-Äq.]			[%]	
		Emission	2,5 %-Perz.	97,5 %-Perz.	2,5 %-Perz.	97,5 %-Perz.
Photovoltaikflächen$_{total}$ [1]		-55,0	-56,8	-51,9	14,6	15,4
Mineralboden	CO_2 [2]	-100,8	-82,8	-120,8	17,9	19,8
	$N_2O_{indirekt}$ [3]	0,1	0,0	0,3	99,9	168,2
	N_2O_{direkt} [3]	0,3	0,1	0,5	68,4	70,1
Organischer Boden	CO_2 [2]	29,6	14,4	43,5	51,3	47,1
	CH_4 [4]	0,9	0,4	2,6	53,0	195,4
	N_2O [4]	1,7	0,6	5,8	67,6	231,8
Biomasse	CO_2 [2]	13,3	10,6	16,3	20,1	22,8
Totholz	CO_2 [2]	NO	NO	NO	NO	NO

1) Summe der Emissionen aus den CRF 4.E, 4.(II).E, 4.(III).E

2) CRF 4.E

3) CRF 4.(III).E

4) CRF 4.(II).E

Im Jahr 2024 betrugen die Netto-Treibhausgasemissionen aus den Siedlungs- und Verkehrsgebieten Deutschlands infolge von Landnutzung und Landnutzungsänderung 4.644,2 kt

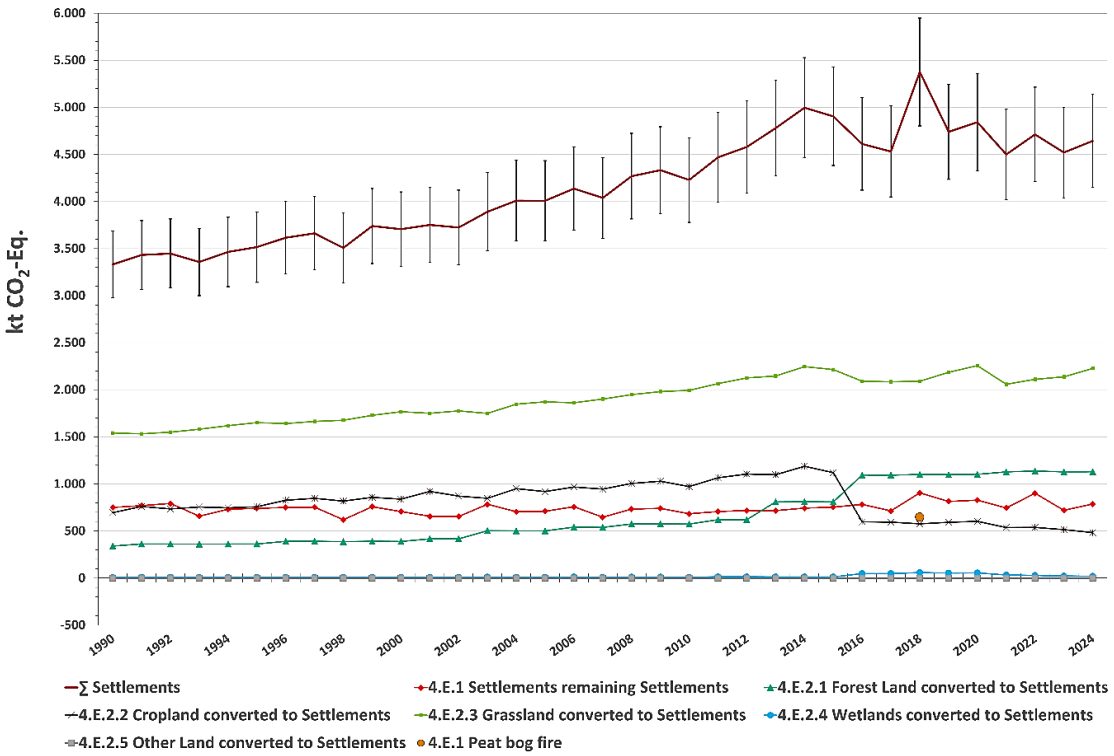
CO_2-Äq. (95 %-Konfidenzintervall: 3.670,2 kt CO_2-Äq. ≙ -10,1 % - 5.898,7 kt CO_2-Äq. ≙ 10,7 %). Dies ist die Summe aus den Subkategorien „Gebäude- und Freiflächen“, mit Emissionen in Höhe von 4.699,4 kt CO_2-Äq.) eine deutliche Quelle, und „Photovoltaikanlagen“, mit Emissionen von -54,9 kt CO_2-Äq. , eine schwache Senke (Tabelle 416). Gemessen an den Emissionen der Subkategorie „Gebäude- und Freiflächen“ sind die Emissionen von Flächen mit „Photovoltaikanlagen“ sehr gering, aufgrund der nur geringen Flächenbelegung (35 kha). In der Summe der gesamten Landnutzungskategorie wirken alle Pools über den gesamten Berichtszeitraum als Quellen für Treibhausgase. Lediglich der Mineralboden der Subkategorie „Photovoltaikflächen“ wirkt als Senke, die durch die Emissionen aus den Mineralböden der anderen Subkategorie bei weitem überkompensiert wird.

Gegenüber dem Basisjahr weisen die Emissionen der gesamten Siedlungskategorie im Jahr 2024 eine deutliche Zunahme (+1.312,8 kt CO_2-Äq. ≙ +39,4 %) auf (Abbildung 100, Abbildung 101). Die Zunahme der Siedlungsfläche betrug in diesem Zeitraum 28,3 %, eine wesentliche Ursache für die Zunahme der Emissionen. Diesen Trend zeigen die Emissionen aller Pools durchgängig, mit Ausnahme der Emissionen aus den Mineralböden. Diese folgen dem Trend bis 2015; dann gehen die Emissionen zurück, insbesondere infolge abnehmender Häufigkeit der Landnutzungsänderungen von Ackerland zu Siedlungen.

Die Kurvenverläufe der Zeitreihen, insbesondere deutliche Änderungen, haben ihre Ursache vor allem in den periodischen Erhebungsterminen der Flächendaten (siehe Kapitel 6.3.1.5). Der Erfassung von Landnutzungsänderungen anhand räumlich expliziter Daten lagen Datensätze aus den Jahren 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 und 2024 zugrunde (vergl. Kapitel 6.3.1). Landnutzungsänderungen, die zwischen diesen Jahren auftraten, wurden durch lineare Interpolation ermittelt, so dass die jährlichen Konversionsflächen zwischen den Erhebungszeitpunkten konstant sind. Die Landnutzung vor dem Jahr 2010 wurde durch Extrapolation mithilfe stochastischer Methoden ermittelt (Kapitel 6.3.1.2.2).

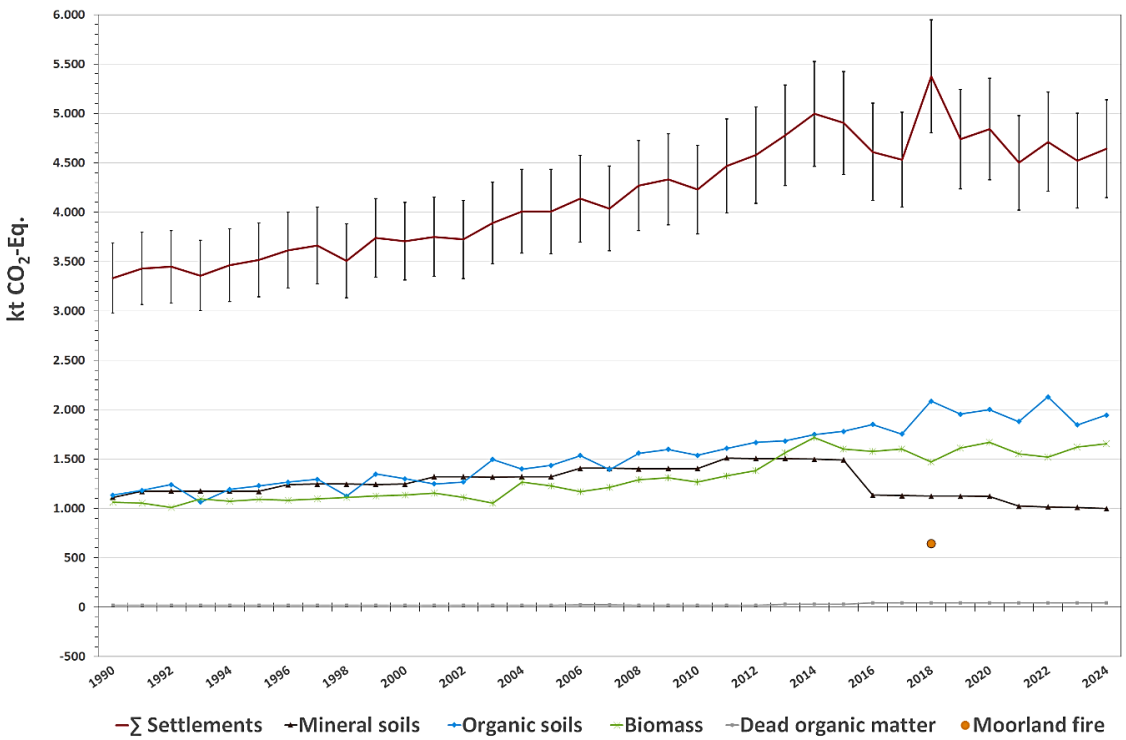
Außerdem zeigen sich deutlich die Auswirkungen der methodischen Änderungen in der Landnutzungskategorie, bezüglich der Biomasse, des Versiegelungsfaktors und des hydrologischen Modells.

Abbildung 100: THG-Emissionen [kt CO_2-Äq. nach IPCC AR5] infolge Landnutzung und Landnutzungs-änderung aus Siedlungen von 1990 – 2024, dargestellt nach Unterkategorien



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

Abbildung 101: THG-Emissionen [kt CO_2-Äq. nach IPCC AR5] infolge Landnutzung und Landnutzungs-änderung aus Siedlungen Deutschlands von 1990 – 2024, dargestellt nach Pools



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

6.8.2 Methodische Aspekte (4.E)

6.8.2.1 Datenquellen

Nähere Angaben zu Datenquellen sind unter Kapitel 6.3.1.2 zu finden.

6.8.2.2 Biomasse

Die Methode zur Berechnung der Biomasse ist ausführlich in Kapitel 6.3.1.2ff beschrieben, spezifisch für Siedlungsflächen in Kapitel 6.1.2.3.7.

Der Kohlenstoffvorrat von Totholz und Streu wird bei der lebeden Biomasse berücksichtigt. Die entsprechenden Felder der CRF sind mit IE versehen.

Emissionen für „Straßen“ und „Bahnkörper“ werden nicht angezeigt, da die Flächen der Subkategorien vegetationslos und statisch sind; die entsprechenden Felder in der CRF 4.E werden daher mit NO versehen.

6.8.2.3 Mineralische Böden

Bei verbleibenden Siedlungsflächen wird unterstellt, dass keine Kohlenstoffvorratsänderungen in Mineralböden auftreten; daher werden die entsprechenden Felder im Tabellenwerk mit NA versehen. Bei Landnutzungsänderungen zu „Gebäude und Freiflächen“ hingegen werden Kohlenstoffvorratsänderungen berichtet. Nähere Angaben zu den angewendeten Methoden sind unter Kapitel 6.1.2.1 zu finden. Die Herleitung und Verifizierung der Emissionsfaktoren unter Berücksichtigung der versiegelten Fläche sind in Kapitel 6.1.2.1.6 aufgeführt.

6.8.2.4 Organische Böden

Für organische Böden in Siedlungsgebieten wird davon ausgegangen, dass sie drainiert sind. Da über die Dränage von organischen Böden in Siedlungen keine spezifisch erhobenen Daten vorliegen, wird angenommen, dass die Böden wie Grünland drainiert und die entsprechenden Emissionsfaktoren bzw. Responsefunktionen verwendet werden (Kapitel 6.6.2.4). Eine detaillierte Analyse der Flächen mit organischen Böden im Siedlungsbereich ergab, dass diese durchschnittlich nur zu 15 % versiegelt sind. Daher werden die für „Gebäude und Freiflächen“ berechneten CO_2- und CH_4-Emissionen aus organischen Böden nur um 15 % reduziert, bzw. der Emissionsfaktor für Lachgas mit dem neuen Flächenfaktor auf 3,91 kg N_2O-N ha^{-1} korrigiert.

Bei Landnutzungsänderung zu „Gebäude und Freiflächen“ wird sofort der Wert für verbleibende „Gebäude und Freiflächen“ verwendet.

6.8.2.5 Flächenbrände

Anthropogen verursachte Flächenbrände, vergleichbar dem Moorbrand im Jahr 2018 (NIR (UBA et al., 2020), Kap. 6.8.2.5), traten im Jahr 2024 nicht auf (NO).

6.8.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (4.E)

Die Zeitreihenkonsistenz ist bezüglich der Aktivitätsdaten und Emissionsfaktoren gesichert.

Die Emissionsfaktoren und Unsicherheiten für die Landnutzungskategorien „Gebäude und Freiflächen“ sowie „Flächen mit Photovoltaikanlagen“ sind in den Tabelle 417 bis Tabelle 419 dargestellt.

Die Unsicherheiten betragen für die Aktivitätsdaten in Abhängigkeit von der Flächengröße für das Jahr 2024 0,1 - 196 %. Die Gesamtunsicherheit für die Aktivitätsdaten der Siedlungskategorie beträgt 0,09 %.

Die Gesamtunsicherheit für die Landnutzungskategorie „Siedlungen“ beträgt -10,1 % / +10,7% (95-% Perzentile). Den größten Beitrag zur Gesamtunsicherheit tragen die Emissionen aus den organischen Böden (68,2 %) bei, gefolgt von der Biomasse (23,4 %).

Tabelle 417: Implizite Emissionsfaktoren und Unsicherheiten der Emissionsfaktoren [in % vom Lagemaß] zur Berechnung der Treibhausgasemissionen aus Gebäude- und Freiflächen 2024, unterschieden nach Pools und Unterkategorien

Siedlungen $Landnutzung_{vor}$ Mineralboden CO_2-C_1	Fläche $Landnutzung_{nach}$	Emissionsfaktor [t C ha^{-1} a^{-1}]	Schranken untere [%]	 obere [%]
Wald	Gebäude und Freiflächen	-0,60	41,99	63,57
$Acker_{annuell}$		-0,22	26,56	26,55
Hopfen		-0,25	64,24	64,24
Weinanbau		-0,30	30,44	30,44
Obstanbau		-0,37	20,05	20,05
Kurzumtriebsplantagen		NO	NO	NO
Baumschulen		-0,29	23,82	19,23
Weihnachtsbaumkulturen		NO	NO	NO
Grünland i. e. S.		-0,41	30,40	30,40
Gehölze		-0,49	30,62	30,62
Hecken		-2,17	42,74	42,74
Terr. Feuchtgebiete		-0,66	67,86	67,86
Photovoltaikflächen		NO	NO	NO
Sonstige Flächen		NO	NO	NO
Mineralboden N_2O_{direkt} [1]		**[kg N_2O ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Wald	Gebäude und Freiflächen	0,12	99,90	244,71
$Acker_{annuell}$		0,07	99,90	223,34
Hopfen		0,10	99,90	231,87
Weinanbau		0,12	99,90	225,83
Obstanbau		0,14	99,90	223,48
Kurzumtriebsplantagen		NO	NO	NO
Baumschulen		0,11	99,90	224,70
Weihnachtsbaumkulturen		NO	NO	NO
Grünland i.e.S.		0,15	99,90	222,74
Gehölze		0,17	99,90	222,77
Hecken		0,69	99,90	224,76
Terr. Feuchtgebiete		0,22	99,90	231,78
Photovoltaikflächen		NO	NO	NO
Sonstige Flächen		0,00	99,90	242,55
Mineralboden $N_2O_{indirekt}$ [1]		**[kg N_2O ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Wald	Gebäude und Freiflächen	0,28	99,90	135,83
$Acker_{annuell}$		0,17	87,86	91,91
Hopfen		0,22	99,90	111,05
Weinanbau		0,27	91,49	97,80
Obstanbau		0,32	87,36	92,26
Kurzumtriebsplantagen		NO	NO	NO

Siedlungen	Fläche	Emissionsfaktor	Schranken	
Baumschulen		0,25	87,91	95,17
Weihnachtsbaumkulturen		NO	NO	NO
Grünland i.e.S.		0,33	89,16	90,44
Gehölze		0,39	89,23	90,51
Hecken		1,57	94,08	95,29
Terr. Feuchtgebiete		0,50	99,90	110,85
Photovoltaikflächen		NO	NO	NO
Sonstige Flächen		0,01	99,90	131,90
Biomasse[2]		**[kt C ha^{-1} a^{-1}]**		**[%]**
Wald	Gebäude und Freiflächen	-3,00	23,14	23,14
Acker$_{annuell}$		0,03	14,25	14,25
Hopfen		0,04	63,87	63,87
Weinanbau		-0,10	27,04	27,04
Obstanbau		-0,40	15,23	15,23
Kurzumtriebsplantagen		NO	NO	NO
Baumschulen		-0,38	25,47	25,47
Weihnachtsbaumkulturen		NO	NO	NO
Grünland i. e. S.		-0,06	18,57	18,57
Gehölze		-5,90	16,11	22,53
Hecken		-26,71	33,58	37,09
Terr. Feuchtgebiete		-3,60	48,45	50,60
Photovoltaikflächen		0,39	90,61	90,61
Torfabbau		NO	NO	NO
Sonstige Flächen		0,149	26,44	26,44
Tote organische Substanz[2]		**[kt C ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Wald	Gebäude und Freiflächen	-0,15	52,41	52,41

1 Berechnung über 20 Jahre, Emission: positiv ≙ Quelle; negativ ≙ Senke

2 Berechnung nur im ersten Jahr der Landnutzungsänderung, Vorratsänderung: positiv ≙ Senke; negativ ≙ Quelle

Tabelle 418: Implizite Emissionsfaktoren und Unsicherheiten der Emissionsfaktoren [in % vom Lagemaß] zur Berechnung der Treibhausgasemissionen aus „Photovoltaikflächen“ 2024, unterschieden nach Pools und Unterkategorien

Photovoltaikflächen Landnutzung$_{vor}$ Mineralboden CO_2-C[3]	Fläche Landnutzung$_{nach}$	Emissionsfaktor [t C ha^{-1} a^{-1}]	Schranken untere [%]	 obere [%]
Wald	Photovoltaikflächen	-0,6	42,0	63,6
Acker$_{annuell}$		-0,2	26,6	26,6
Hopfen		-0,3	64,2	64,2
Weinanbau		-0,3	30,4	30,4
Obstanbau		-0,4	20,1	20,1
Kurzumtriebsplantagen		NO	NO	NO
Baumschulen		-0,3	23,8	19,2
Weihnachtsbaumkulturen		NO	NO	NO
Grünland i. e. S.		-0,4	30,4	30,4
Gehölze		-0,5	30,6	30,6

Photovoltaikflächen	Fläche	Emissionsfaktor	Schranken	
Hecken		-2,2	42,7	42,7
Terr. Feuchtgebiete		-0,7	67,9	67,9
Gebäude und Freiflächen		NO	NO	NO
Sonstige Flächen		NO	NO	NO
Mineralboden N_2O_{direkt}[1]		**[kg N_2O ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Wald	Photovoltaikflächen	0,1	99,9	244,7
$Acker_{annuell}$		0,1	99,9	223,3
Hopfen		0,1	99,9	231,9
Weinanbau		0,1	99,9	225,8
Obstanbau		0,1	99,9	223,5
Kurzumtriebsplantagen		NO	NO	NO
Baumschulen		0,1	99,9	224,7
Weihnachtsbaumkulturen		NO	NO	NO
Grünland i.e.S.		0,1	99,9	222,7
Gehölze		0,2	99,9	222,8
Hecken		0,7	99,9	224,8
Terr. Feuchtgebiete		0,2	99,9	231,8
Gebäude und Freiflächen		NO	NO	NO
Sonstige Flächen		0,004	99,9	242,55
Mineralboden $N_2O_{indirekt}$[1]		**[kg N_2O ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Wald	Photovoltaikflächen	0,3	99,9	135,8
$Acker_{annuell}$		0,2	87,9	91,9
Hopfen		0,2	99,9	111,1
Weinanbau		0,3	91,5	97,8
Obstanbau		0,3	87,4	92,3
Kurzumtriebsplantagen		NO	NO	NO
Baumschulen		0,2	87,9	95,2
Weihnachtsbaumkulturen		NO	NO	NO
Grünland i.e.S.		0,3	89,2	90,4
Gehölze		0,4	89,2	90,5
Hecken		1,6	94,1	95,3
Terr. Feuchtgebiete		0,5	99,9	110,9
Gebäude und Freiflächen		NO	NO	NO
Sonstige Flächen		0,009	99,9	131,9
Biomasse[2]		**[kt C ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Wald	Photovoltaikflächen	-3,0	23,1	23,1
$Acker_{annuell}$		0,0	14,3	14,3
Hopfen		0,0	63,9	63,9
Weinanbau		-0,1	27,0	27,0
Obstanbau		-0,4	15,2	15,2
Kurzumtriebsplantagen		NO	NO	NO
Baumschulen		-0,4	25,5	25,5
Weihnachtsbaumkulturen		NO	NO	NO
Grünland i. e. S.		-0,1	18,6	18,6
Gehölze		-5,9	16,1	22,5

Photovoltaikflächen	Fläche	Emissionsfaktor	Schranken	
Hecken		-26,7	33,6	37,1
Terr. Feuchtgebiete		-3,6	48,5	50,6
Gebäude und Freiflächen		0,39	90,61	90,61
Torfabbau		NO	NO	NO
Sonstige Flächen		0,149	26,44	26,44
Tote organische Substanz[2]		**[kt C ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Wald	Photovoltaikflächen	-0,2	52,4	52,4

1 Berechnung über 20 Jahre, Emission: positiv ≙ Quelle; negativ ≙ Senke

2 Berechnung nur im ersten Jahr der Landnutzungsänderung, Vorratsänderung: positiv ≙ Senke; negativ ≙ Quelle

3 Berechnung über 20 Jahre, Vorratsänderung: positiv ≙ Senke; negativ ≙ Quelle

Tabelle 419: Unsicherheiten Unsicherheiten von Emissionsfaktoren [2,5 %- und 97,5%-Perzentil in % vom Lagemaß] aus organischen Böden für Siedlungen im Jahr 2024

Landnutzung	Treibhausgas	Emissionsfaktor	Schranken	
			untere	obere
Organischer Boden[1]		**[t CO_2-Äq. ha^{-1} a^{-1}]**	**[%]**	**[%]**
Gebäude und Freiflächen	CO_2	26,78	27,20	20,28
Gebäude und Freiflächen	CH_4	1,30	48,21	208,76
Gebäude und Freiflächen	N_2O	1,51	62,47	255,52
Photovoltaikflächen	CO_2	31,01	51,34	47,14
Photovoltaikflächen	CH_4	0,92	52,97	195,41
Photovoltaikflächen	N_2O	1,82	67,59	231,77

1 Berechnung jährlich, Emission: positiv ≙ Quelle; negativ ≙ Senke

6.8.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (4.E)

Details zu den diesjährigen Prüfungen finden sich in Kapitel 6.1.3.

Die zur Erstellung dieses Inventars verwendeten Datenquellen erfüllen die Prüfkriterien des QSE–Handbuchs für Datenquellen. Bezüglich der Qualitätssicherung der Eingangsdaten (ATKIS®, BÜK, Offizialstatistik) wird auf die Datenhalter verwiesen (Dokumentation in der Inventarbeschreibung).

Die Ergebnisse der Emissionsberechnung der aktuellen Berichterstattung können mit anderen Datenquellen für Deutschland nicht verglichen werden, da solche flächendeckend, umfassend und unabhängig von den hier aufgeführten Methoden und Datenquellen nicht existieren.

Die folgenden Tabellen vergleichen die Emissionsfaktoren der Kategorie Siedlungen mit denen europäischer Nachbarländer. Für diesen Vergleich wurden Werte der Nachbarstaaten aus den Submissionen 2025 des Klimasekretariats verwendet. Die Werte für Deutschland stammen aus den Submissionen 2025 und 2026.

Die IEF aller Pools sind gegenüber den Nachbarländern bezüglich Trend und Betrag unauffällig oder finden bei Randlage immer eine Entsprechung in mindestens einem anderen mitteleuropäischen Nachbarland.

Tabelle 420: Kohlenstoffvorratsveränderung der lebenden Biomasse in Siedlungen verschiedener Länder, in [t C ha^{-1} a^{-1}]

	4.E.1. - Settlements Remaining Settlements	4.E.2 - Land Converted To Settlements	4.E.2.1 - Forest Land Converted To Settlements	4.E.2.2 - Cropland Converted To Settlements	4.E.2.3 - Grasslands Converted To Settlements	4.E.2.4 - Wetlands Converted To Settlements	4.E.2.5 - Other Land Converted To Settlements
Belgien	NA	-0,652	-5,122	-0,009	-0,085	NO	NO
Dänemark	NA	-0,301	-4,378	-0,114	-0,03	-0,436	NO
Frankreich	-0,034	-0,863	-3,695	-0,121	-0,127	-0,052	0,007
Großbritannien	NA, NO	-0,594	-3,051	-0,187	-0,063	-1,404	NO
Niederlande	NA	-0,548	-2,902	-0,257	-0,41	NE, NO	NE, NO
Österreich	NA	-0,016	-2,444	0,281	0,159	NO	NO
Polen	0,048	-4,702	-42,25	-0,03	-0,149	NO	NO
Schweiz	0,003	-0,462	-4,009	-0,175	-0,107	-0,017	NA
Tschechische Rep.	NO	-0,703	-6,051	-0,236	-0,349	NO	NO
Deutschland 2023	NO	0,882	-1,099	1,312	0,87	0,306	0,68
Deutschland 2024	0,026	-0,648	-3,002	0,022	-0,893	-2,28	0,147

Deutschland: 2023 und 2024, übrige Länder: 2023

positiv: Kohlenstoffsenke; negativ: Kohlenstoffquelle; Quelle: (UNFCCC, 2023c)

Tabelle 421: Kohlenstoffvorratsveränderung der toten organischen Masse in Siedlungen verschiedener Länder, in [t C ha^{-1} a^{-1}]

	4.E.1. - Settlements Remaining Settlements	4.E.2 - Land Converted To Settlements	4.E.2.1 - Forest Land Converted To Settlements	4.E.2.2 - Cropland Converted To Settlements	4.E.2.3 - Grasslands Converted To Settlements	4.E.2.4 - Wetlands Converted To Settlements	4.E.2.5 - Other Land Converted To Settlements
Belgien	NA	-0,044	-0,373	NO	NO	NO	NO
Dänemark	NA	-0,013	-0,276	NA	NA	NA	NA
Frankreich	0	-0,093	-0,449	0	0	NA	NA
Großbritannien	NA, NO	-0,164	-0,993	IE, NA	IE, NA	-0,362	NO
Niederlande	NA	-0,077	-1,008	NA	NA	NA	NA
Österreich	NO	-0,098	-1,109	NO	NO	NO	NO
Polen	0,001	-0,073	-0,667	NO	NO	NO	NO
Schweiz	NA	-0,073	-0,843	NA	NA	NA	NA
Tschechische Rep.	NO	-0,032	-0,407	NO	NO	NO	NO
Deutschland 2023	IE	-0,013	-0,137	IE	IE	IE	IE
Deutschland 2024	IE	-0,013	-0,154	IE	IE	IE	IE

Deutschland: 2023 und 2024, übrige Länder: 2023

positiv: Kohlenstoffsenke; negativ: Kohlenstoffquelle; Quelle: (UNFCCC, 2023c)

Tabelle 422: Kohlenstoffvorratsveränderung der mineralischen Böden in Siedlungen verschiedener Länder, in [t C ha^{-1} a^{-1}]

	4.E.1. - Settlements Remaining Settlements	4.E.2 - Land Converted To Settlements	4.E.2.1 - Forest Land Converted To Settlements	4.E.2.2 - Cropland Converted To Settlements	4.E.2.3 - Grasslands Converted To Settlements	4.E.2.4 - Wetlands Converted To Settlements	4.E.2.5 - Other Land Converted To Settlements
Belgien	NA	-0,788					
Dänemark	NA	-0,638	2,978	-0,805	-0,955	0,001	NA
Frankreich	0	-1,097	-2,115	-0,781	-1,503	-0,065	0,708
Großbritannien	-0,237	-4,341	-8,329	-1,916	-4,818	NO	NO
Niederlande	NA	-0,343	0	0	-0,628		
Österreich	NA	-1,938	-2,867	-1,407	-2,276		
Polen	NO	-1,612	0	0	0		
Schweiz	0,067	-0,423	0	0	0		
Tschechische Rep.	NO	-0,135	-0,291	-0,056	-0,43	NO	0

	4.E.1. - Settlements Remaining Settlements	4.E.2 - Land Converted To Settlements	4.E.2.1 - Forest Land Converted To Settlements	4.E.2.2 - Cropland Converted To Settlements	4.E.2.3 - Grasslands Converted To Settlements	4.E.2.4 - Wetlands Converted To Settlements	4.E.2.5 - Other Land Converted To Settlements
Deutschland 2023	NO	-0,314	-0,501	-0,201	-0,397	-0,641	-0,012
Deutschland 2024	0,002	-0,057	-0,602	-0,17	-0,41	-0,658	0,035

Deutschland: 2023 und 2024, übrige Länder: 2023

positiv: Kohlenstoffsenke; negativ: Kohlenstoffquelle; Quelle: (UNFCCC, 2023c)

Tabelle 423: Kohlenstoffvorratsveränderung der organischen Böden in Siedlungen verschiedener Länder, in [t C ha^{-1} a^{-1}]

	4.E.1. - Settlements Remaining Settlements	4.E.2 - Land Converted To Settlements	4.E.2.1 - Forest Land Converted To Settlements	4.E.2.2 - Cropland Converted To Settlements	4.E.2.3 - Grasslands Converted To Settlements	4.E.2.4 - Wetlands Converted To Settlements	4.E.2.5 - Other Land Converted To Settlements
Belgien	NO	NO					
Dänemark	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Frankreich	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Großbritannien	-1,046	-1,685	-0,195	NO	NO	NO	NO
Niederlande	-3,9	-3,888	0	0	-3,891		
Österreich	IE	NO	NO	NO	NO		
Polen	-5	-5					
Schweiz	-2,84	-4,707					
Tschechische Rep.	NO	NO	NO	NO	NO	NO	0
Deutschland 2023	-5,144	-7,796	-7,322	-7,872	-7,832	-7,498	-8,032
Deutschland 2024	-4,578	-2,005	-6,318	-7,947	-6,976	-6,382	-7,908

Deutschland: 2023 und 2024, übrige Länder: 2023

positiv: Kohlenstoffsenke; negativ: Kohlenstoffquelle; Quelle: (UNFCCC, 2023c)

6.8.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (4.E)

Mit der diesjährigen Submission werden kategoriespezifische Rückrechnungen für den gesamten Berichtszeitraum von 1990 – 2024 vorgelegt. Ursache für die Neuberechnung der Emissionen waren neue und verbesserte Datenquellen, Einführung neuer Methoden, Methodenänderungen und Fehlerkorrekturen im Rahmen der Verbesserung des Inventars. Die entsprechenden Maßnahmen sind in Kapitel 6.1.3.4.2 aufgeführt und zeigten allesamt Auswirkungen auf die Ergebnisse der Emissionsberechnungen für die Landnutzungskategorie *„Siedlungen“*.

Eine vergleichende Darstellung der Ergebnisse der aktuellen Rückrechnung mit denen der Vorjahressubmission findet sich für die Kategorie Siedlungen in Tabelle 424 (Flächen) und Tabelle 425 (Emissionen).

Die sehr geringen Unterschiede zwischen den Flächendaten der aktuellen und der Vorjahressubmission sind im Wesentlichen auf zwei Umstände zurückzuführen:

- Der Einführung der neuen Landnutzungssubkategorien, insbesondere der unter *„Siedlungen“* zu berichtende Subkategorie *„Photovoltaikflächen“*
- Die Aktualisierung der Kartengrundlage zur Ermittlung der Aktivitätsdaten, durch Einarbeitung der neu hinzugekommenen Daten des letzten Zeitreihenjahres. Es wird davon ausgegangen, dass neueste Daten die beste Qualität haben und daher die vorangegangene Zeitreihe, falls notwendig, angepasst wird (s. auch Kapitel 6.3.1ff).

Die CO_2-Emissionen der Submission 2026 weisen gegenüber der Vorjahressubmission eine deutliche Zunahme auf, die zu einer Funktionsumkehr der Landnutzungskategorie führt, von

einer Senke zu einer Quelle. Zurückzuführen ist dies insbesondere auf die Methodenänderungen zur Bestimmung der Biomasse im Siedlungsbereich, sowie den geänderten Versiegelungsfaktor (Kapitel 6.1.2.3.7).

Die Unterschiede zwischen den Submissionen bezüglich der Methan und Lachgasemissionen haben ihre Ursache dagegen hauptsächlich in der Modifikation des hydrologischen Modells zur Bestimmung der Grundwasserstände in organischen Böden (Kapitel 6.1.2.2.2).

Tabelle 424: Vergleich der Flächendaten der aktuellen und der Vorjahressubmission der Kategorie Siedlungen (4.E), in [kha]

CRF	Submission	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
4.E	2025	4.062	4.076	4.091	4.331	4.502	4.717	4.836	4.859	4.882	4.905
	2026	3.845	3.985	4.139	4.307	4.494	4.711	4.835	4.859	4.884	4.908
	Differenz	-216	-91	48	-24	-8	-6	-2	0	2	3
	in %	-5,33	-2,24	1,17	-0,55	-0,17	-0,13	-0,03	0	0,03	0,06

Tabelle 425: Vergleich der Treibhausgasemissionen aus der Kategorie Siedlungen (4.E) der aktuellen und der Vorjahressubmission, in [kt CO_2-Äq.]

CRF	THG	Submission	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
4.E	CO_2	2025	324,2	325,0	295,7	2.227,2	-3.588,3	-1.648,4	-1.118,1	-996,1	-477,2	-472,7
		2026	3.141,5	3.314,4	3.493,6	3.785,6	3.989,9	4.652,3	4.609,5	4.242,2	4.493,5	4.223,3
		Differenz	2.817,3	2.989,4	3.198,0	1.558,4	7.578,2	6.300,7	5.727,6	5.238,2	4.970,6	4.696,0
		in %	869,0	919,8	1.081,6	70,0	-211,2	-382,2	-512,3	-525,9	-1.041,7	-993,5
	CH_4	2025	41,8	38,9	37,2	38,7	43,8	56,1	35,9	61,4	35,3	104,2
		2026	53,8	56,6	57,3	54,2	58,0	51,6	49,7	83,2	39,0	124,5
		Differenz	12,1	17,7	20,1	15,4	14,2	-4,5	13,8	21,9	3,7	20,3
		in %	28,9	45,5	54,2	39,8	32,5	-8,1	38,6	35,7	10,5	19,5
	N_2O	2025	91,3	90,8	90,3	238,8	190,8	201,4	183,9	176,3	179,7	173,1
		2026	136,1	144,9	155,5	167,6	180,9	200,4	183,0	174,4	180,5	172,7
		Differenz	44,8	54,1	65,3	-71,2	-10,0	-0,9	-0,9	-2,0	0,8	-0,4
		in %	49,1	59,6	72,3	-29,8	-5,2	-0,5	-0,5	-1,1	0,4	-0,2

6.8.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (4.E)

Über die in Kapitel 6.1.2.1.9 angeführten geplanten, überwiegend mittelfristigen Maßnahmen hinaus, sind derzeit keine weiteren spezifischen Maßnahmen zur Verbesserung der Methodik im Bereich Siedlungen geplant.

6.9 Sonstiges Land (4.F)

6.9.1 Beschreibung der Kategorie (4.F)

Da es sich bei den unter der Kategorie „Sonstiges Land“ geführten Flächen per Definition um vom Menschen nicht bewirtschaftetes Land handelt, werden nur die Flächengrößen zur Vervollständigung der Flächenmatrix aufgeführt. Emissionen im Sinne der IPCC-Richtlinien können nicht auftreten und damit nicht berichtet werden. Daher findet sich der Vermerk NO in allen Rubriken der CRF 4.F mit Ausnahme des Feldes für die Fläche der Verbleibkategorie.

6.9.2 Methodische Aspekte (4.F)

„Sonstiges Land“ wird nur als Ausgangskategorie von Landnutzungsänderungen zu anderen Kategorien in der Emissionsberechnung berücksichtigt. Rückumwandlungen zu „Sonstiges Land“ findet nicht statt, da definitionsgemäß einmal genutztes Land nicht mehr in eine ungenutzte Landnutzungskategorie überführt werden kann.

Die Kohlenstoffvorräte in den Kategorien Biomasse und toter organischer Substanz in der Kategorie „Sonstiges Land“ sind Null.

Die Kohlenstoffvorräte in Mineralböden in der Kategorie „Sonstiges Land“ sind in Kapitel 6.1.2 ausgewiesen.

Organische Böden in der Kategorie „Sonstiges Land“ sind nicht drainiert.

6.9.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (4.F)

Die Bestimmung der Unsicherheiten für die Aktivitätsdaten erfolgten gemäß der 2006 IPCC Guidelines (IPCC, 2006a). Nähere Erläuterungen hierzu finden sich in Kapitel 6.1.2.1. Die Gesamtunsicherheit bezüglich der Flächen der Landnutzungskategorie „Sonstiges Land“ beträgt für das Jahr 2024 etwa 1 %.

Die Zeitreihe ist vollständig und konsistent.

6.9.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (4.F)

Details zu den diesjährigen Prüfungen finden sich in Kapitel 6.1.3.

6.9.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (4.F)

Mit der diesjährigen Submission werden kategoriespezifische Rückrechnungen für den gesamten Berichtszeitraum von 1990 – 2024 vorgelegt. Ursache für die Neuberechnung der Emissionen waren neue und verbesserte Datenquellen, Einführung neuer Methoden, Methodenänderungen und Fehlerkorrekturen im Rahmen der Verbesserung des Inventars. Die entsprechenden Maßnahmen sind in Kapitel 6.1.3.4.2 aufgeführt und zeitigten nur betreffs der Flächendaten Auswirkungen auf die Ergebnisse der Emissionsberechnungen für die Landnutzungskategorie „Sonstiges Land“.

Die sehr geringen Unterschiede zwischen den Flächendaten der aktuellen und der Vorjahressubmission sind im Wesentlichen auf die Einführung der neuen Landnutzungs-kategorien sowie die Aktualisierung der Kartengrundlage zur Ermittlung der Aktivitätsdaten zurückzuführen, durch Einarbeitung der neu hinzugekommen Daten des letzten Zeitreihen-jahres. Es wird davon ausgegangen, dass neueste Daten die beste Qualität haben und daher die vorangegangene Zeitreihe, falls notwendig, angepasst wird (s. auch Kapitel 6.3.1 ff).

Eine vergleichende Darstellung der Ergebnisse der aktuellen Rückrechnung mit denen der Vorjahressubvention findet sich für die Flächen der Kategorie „Sonstiges Land“ in Tabelle 426.

Tabelle 426: Vergleich der Flächendaten der aktuellen und der Vorjahressubmission der Kategorie Sonstiges Land, in [kha]

CRF	Submission	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
4.F	2025	65,6	60,4	55,4	46,2	41,5	39,6	37,6	37,5	37,4	37,4
	2026	83,4	76,5	69,7	63,0	56,5	50,7	43,5	43,1	42,7	42,3
	Differenz	17,9	16,1	14,3	16,9	15,0	11,0	5,9	5,6	5,2	4,9
	in %	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1

6.9.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (4.F)

Entfällt, da in dieser Kategorie keine Treibhausgasquellen und -senken berichtet werden.

6.10 Holzprodukte (4.G)

6.10.1 Beschreibung der Kategorie (4.G)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
-/T	4 G, Harvested Wood Products		CO_2	-1294,86	-0,11	407,62	0,06	-131,48

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CO_2	CS/Tier 2	IS/NS	D

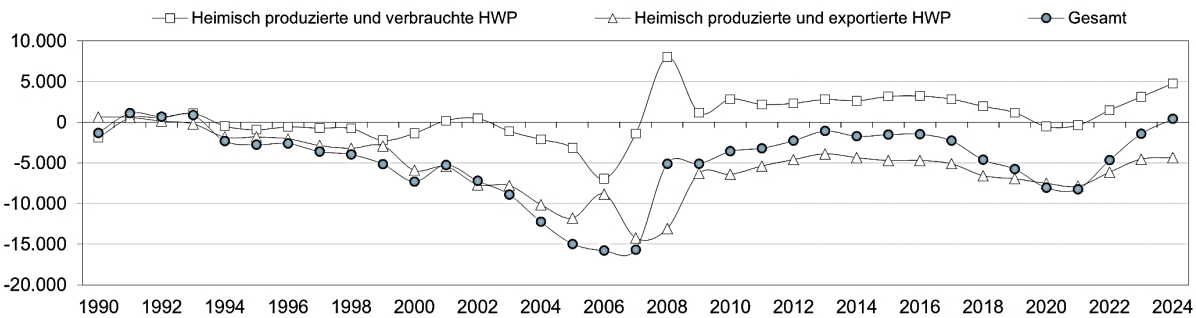
Die Kategorie Holzprodukte ist eine Hauptkategorie nach dem Trend.

Die Abschätzung des Beitrags von Holzprodukten in Deutschland zu den Emissionen nach Quellen und Einbindungen nach Senken von Treibhausgasen im Landnutzungssektor wird in dem Modell WoodCarbonMonitor (Rüter, 2017) auf Basis der Daten zur Produktion von Holzprodukten mit dem vorgegebenen Berechnungsansatz vorgenommen. Damit umfasst die Abschätzung alle in Deutschland produzierten Holzprodukte, deren Holz aus heimischem Einschlag stammt und die stofflich genutzt werden.

Die Berechnung folgt den methodischen Vorgaben des Kapitels 2.8 des 2013 IPCC KP Supplement (IPCC, 2014) und des Kapitels 12 des IPCC 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (IPCC, 2019) für den Produktionsansatz.

Um eine transparente Darstellung zu gewährleisten, werden die stofflich genutzten Holzprodukte gemäß Berichterstattungstabelle 4.Gs1 unterschieden in Produkte, welche nach ihrer Herstellung in Deutschland verbraucht werden, und in Produkte, die anschließend exportiert werden. Eine Kohlenstoffspeicherwirkung von Holz in Deponien wird nicht berücksichtigt. Die Biomasse aus Kurzumtriebsplantagen wird in Deutschland ausschließlich energetisch (siehe Kategorie 1.A, Kapitel 3.2) genutzt und deshalb nicht unter Holzprodukte (HWP) berichtet.

Abbildung 102: Netto CO_2-Emissionen und Einbindungen in Holzprodukten [kt CO_2]

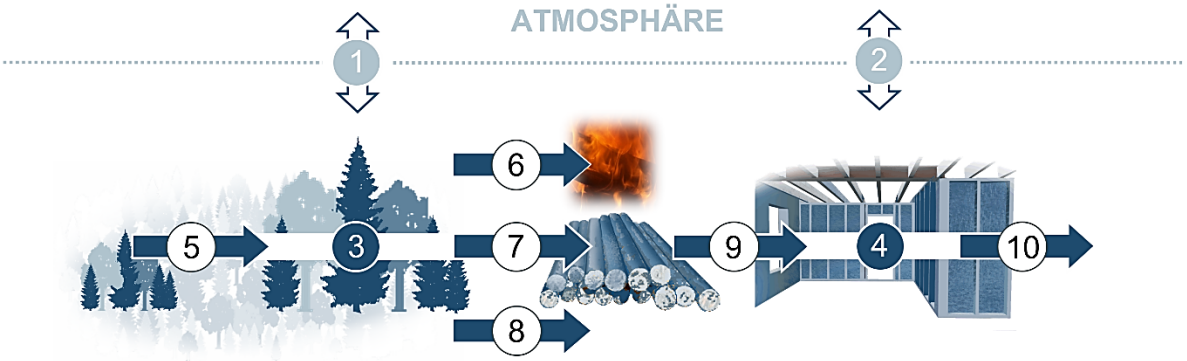


Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

Abbildung 103 zeigt eine Übersicht des Berichtsjahres 2024 über die mit der Wald- und Holznutzung verbundenen Kohlenstoffflüsse, die als Zu- und Abnahme („gains“ und „losses“) der definierten Kohlenstoffspeicher für Wald (hier: nur lebende Biomasse (3), s. Kapitel 6.4.2.2) und

Holzprodukte (4) berichtet werden. Über die Änderungen dieser definierten Speicher werden die atmosphärisch relevanten CO_2-Emissionen und deren Einbindungen ermittelt (lebende Biomasse 1 und Holzprodukte 2).

Abbildung 103: Kohlenstoffflüsse, Kohlenstoffspeicher und ihre CO_2-Emissionen und Einbindungen entlang der Forst- und Holzkette



CO_2-Emissionen und ihre Einbindung in den Kohlenstoffspeichern WALD[a] und HOLZPRODUKTE		[in kt CO_2e]
1	WALD[a]	1.773
2	HOLZPRODUKTE	408
Größe der definierten Kohlenstoffspeicher[e]		[in kt C]
3	WALD[af]	1.172.971
4	HOLZPRODUKTE[g]	293.462

Kohlenstoffflüsse[b] zu und aus den Kohlenstoffspeichern		[in kt C]
5	Zunahme (WALD)	14.067
6	Abnahme (WALD) *(Derbholz für vornehmlich energetische Nutzung[c])*	-7.236
7	Abnahme (WALD) *(Derbholz für vornehmlich stoffliche Nutzung[d])*	-13.025
8	Abnahme (WALD) (*restlicher Derbholzabgang*[e])	-8.762
9	Zunahme (HOLZPRODUKTE)	10.858
10	Abnahme (HOLZPRODUKTE)	-10.969

[a] hier nur lebende Biomasse
[b] während des Berichtsjahres (Zunahme positiv, Abnahme negativ)
[c] basierend auf Differenz zw. StBA-Holzeinschlagstatistik (Stamm- und Industrieholz) und kalibrierter Derbholznutzung in Erntefestmetern (m^3)
[d] basierend auf der StBA-Holzeinschlagstatistik (Stamm- und Industrieholz) in Erntefestmetern (m^3)
[e] basierend auf kalibriertem Derbholzabgang in Vorratsfestmetern (Vfm)
[f] basierend auf der Bundeswaldinventur 2022 (BWI2022), s. www.bwi.info
[g] hier am Ende des Berichtsjahres

WoodCarbonMonitor © S. Rüter, 2025

Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

Darüber hinaus wird neben der Zunahme (5) des lebenden Biomassevorrates im Wald (d.h. auf der bestehenden Waldfläche sowie auf den mit Landnutzungsänderungen verbundenen Waldflächen) auch seine Abnahme dargestellt. Die damit verbundenen Kohlenstoffflüsse unterscheiden zwischen der Nutzung von Derbholz, das vornehmlich auf eine energetische Nutzung (6) von Holz zurückzuführen ist, dem Einschlag von Rohholz für eine stoffliche Weiterverarbeitung zu Holzprodukten (7) und dem restlichen nicht genutzten Derbholzabgang (8) (vgl. auch Abbildung 94). Die Abschätzung der Kohlenstoffabnahme aufgrund der für eine stoffliche Nutzung entnommenen Rohholzmengen basiert auf den nach vier Hauptbaum- bzw. Holzartengruppen untergliederten Daten zur Stamm- und Industrieholzproduktion der Holzeinschlagstatistik (Statistisches Bundesamt, FS 3, R 3.3.1), die in Erntefestmetern ausgewiesen wird. Die vornehmlich einer energetischen Holznutzung zugeschriebene Kohlenstoffabnahme des lebenden Biomassespeichers im Wald, welche nicht unter der Kategorie Holzprodukte berichtet wird (Produktionsansatz), umfasst die übrige Derbholznutzung in Erntefestmetern sowie einen Teil der Rinde. Die Daten zum Abgang und zur Nutzung von Derbholz stammen aus den durchgeführten Waldinventuren (vgl. Kap. 6.4.2.1.1), die mit Hilfe der Zeitreihen der Einschlagstatistik nach Hauptbaumartengruppen, wie in Kapitel 6.10.2.1 beschrieben, kalibriert werden.

Die Berechnung der mit dem Kohlenstoffspeicher in Holzprodukten verbundenen Kohlenstoffflüsse (9 und 10) sowie die sich daraus ergebende Änderung des Speichers, die in CRF-Tabelle 4.Gs1 berichtet wird, wird im nachfolgenden Kapitel 6.10.2 erläutert.

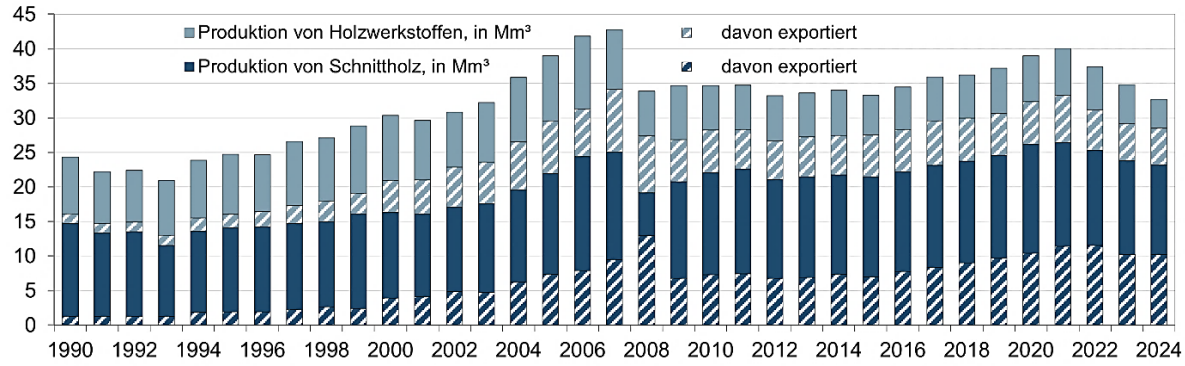
6.10.2 Methodische Aspekte (4.G)

6.10.2.1 Aktivitätsdaten

Abbildung 104 zeigt die Entwicklung der Produktionsmengen der Holzhalbwarengruppen Schnittholz und Holzwerkstoffe, getrennt nach den in Deutschland verbleibenden (Produktion abzüglich Export) und den exportierten Holzmengen (Export) seit 1990 nach den Daten der Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) (FAO, 2025). Diese Zeitreihen entsprechen den im 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines (IPCC, 2019) vorgeschlagenen Daten für die Abschätzung des Beitrags von Holzprodukten für den Produktionsansatz auf Basis einer Tier-1-Berechnung.

Da zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts (10/2025) gemäß des festgelegten Routineablaufs der Inventarerstellung (s. Kapitel 1.2.3) die für die Berechnung notwendigen Aktivitätsdaten für Holzprodukte für das Jahr 2024 jedoch noch nicht vorlagen (vgl. (FAO, 2022), wurden die fehlenden FAO- Daten zur Produktion von Holzprodukten für das Jahr 2024 entsprechend der Vorschläge des Technical Expert Review Teams (TERT) des 2025 Comprehensive Review of National GHG Inventory Data (EEA, 2025) zum Umgang mit fehlenden Aktivitätsdaten unter Anwendung eines „Trendextrapolationsansatzes“ geschätzt. Der Empfehlung folgend wurde für die Ableitung der fehlenden Datensätze der Holzhalbwarengruppen Schnittholz und Holzwerkstoffe der Trend der Zeitreihe der nationalen Holzeinschlagstatistik (Statistisches Bundesamt, FS 3, R 3.3.1) verwendet. Lediglich für die Produktgruppe Nadelschnittholz, für welche alle relevanten Meldenummern der nationalen Statistik zur Produktion im Verarbeitenden Gewerbe (Statistisches Bundesamt, 2025b) frei verfügbar sind und keiner Geheimhaltung unterliegen (vgl. Kapitel 6.10.6), wurden die detaillierten Daten der Jahre 2019 bis 2024 herangezogen. Die ebenfalls in der FAOSTAT-Datenbank fehlenden Daten zum Export im Jahr 2024 wurden hingegen aus dem Vorjahr fortgeschrieben. Für die Berechnung des Rohstofffaktors wurde für den Rohstoff Industrierohholz die Zeitreihe der nationalen Holzeinschlagstatistik von Stamm- und Industrieholz verwendet (s.u.). Die fehlenden Daten der für die Weiterverarbeitung zu Papier und Pappe außerdem verwendeten Rohstoffe Holzzellstoff und Altpapier (vgl. Abbildung 107) wurden aus den Informationen des Leistungsberichts Papier (Papierindustrie, 2025) abgeleitet. Hierfür wurden die Mengenänderung der Produktion bzw. des Aufkommens und des Außenhandels gegenüber dem Vorjahr übernommen und auf die FAO-Daten des Jahres 2023 angewandt. Ebenso wurde für Ermittlung der Produktionsmenge der Halbwarengruppe Papier und Pappe im Jahr 2024 verfahren.

Abbildung 104: In Deutschland produziertes Schnittholz und Holzwerkstoffe [Mm³] (FAO, 2022)



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

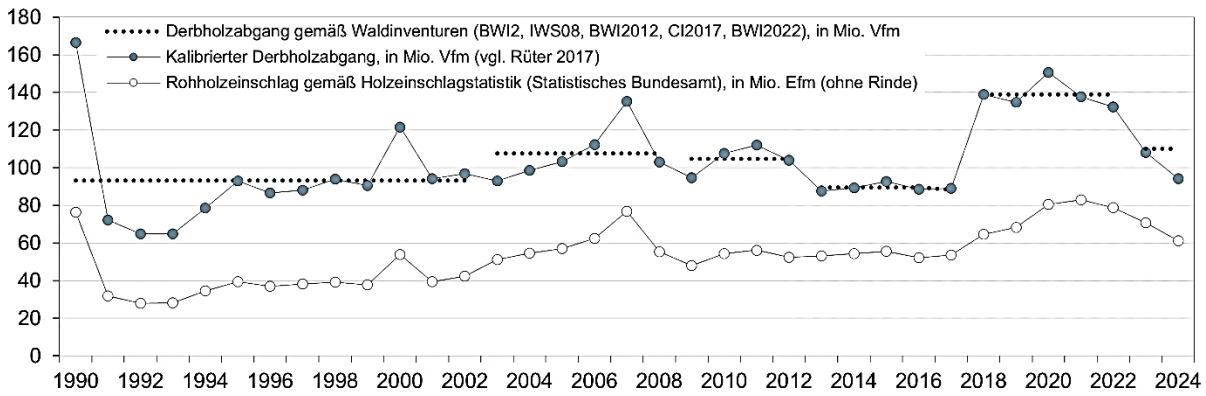
Ausgehend von den beschriebenen Zeitreihen zu Produktion und Außenhandel von Holzhalbwaren und den entsprechenden Holzrohstoffdaten, wurde gemäß der IPCC Leitlinien

für den Produktionsansatz zunächst der Rohstoffanteil der Holzprodukte aus heimischem Holzeinschlag auf bestehenden Waldflächen berechnet.

Dafür wurden in einem ersten Schritt die Daten aus den Waldinventuren über den Abgang von Derbholz aus den Wäldern (vgl. Kapitel 6.4.2.1.1) entsprechend den methodischen Vorgaben des (IPCC, 2014)mit den Daten der nationalen Holzeinschlagstatistik zu den vier geführten Holzartengruppen Buche, Eiche, Kiefer und Fichte (Statistisches Bundesamt, FS 3, R 3.3.1) kalibriert, um die jährlichen Schwankungen des gesamten Abgangs an Derbholz aus dem stehenden Bestand der lebenden Holzbiomasse innerhalb der Inventurzeiträume abzubilden (Abbildung 105). Dies ermöglicht zum einen eine Unterscheidung in die Holzmengen, die in den Totholzspeicher eingehen; zum anderen kann damit auch eine Quantifizierung des nicht verwerteten Derbholzes (NVD) und der Ernteverluste und Rinde als Bestandteil des in Vorratsfestmetern (Vfm) ausgewiesenen Abgangs vorgenommen werden Abbildung 106). Das genutzte Derbholz, das die Waldfläche verlässt, wird in Erntefestmetern (Efm), d.h. ohne Rinde, ausgewiesen und zeigt auf, dass die Statistik den jährlichen Rohholzeinschlag unterschätzt. Gründe für diese statistische Unterschätzung des Einschlags liegen vor allem in der Erzeugung von Brennholz z.B. durch private Haushalte (Selbstwerber), das zumeist statistisch nicht erfasst wird. Zudem wird der Einschlag von Energieholz erst seit 2006 statistisch erfasst (Statistisches Bundesamt, FS 3, R 3.3.1).

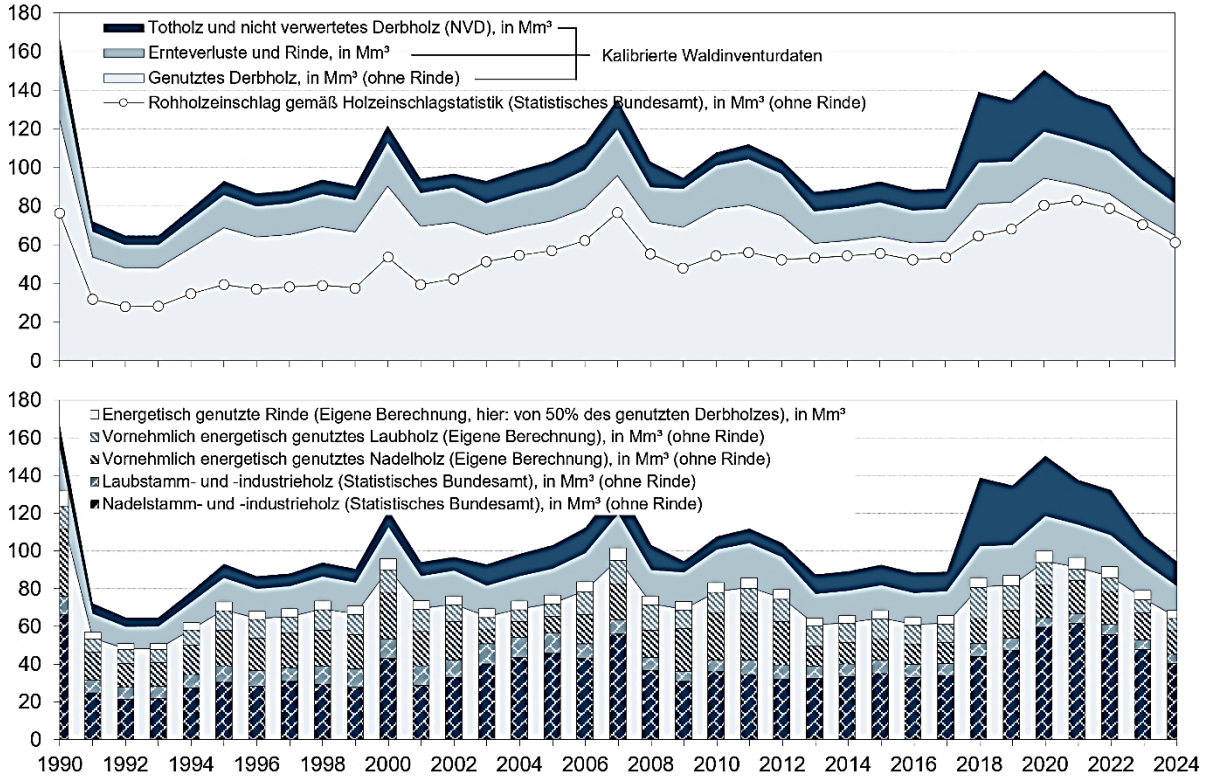
Für die Jahre 2023 und 2024, die von der letzten Inventur (BWI 2022) nicht erfasst sind, wurde der Derbholzabgang des gesamten Inventurzeitraums (2013 – 2022) fortgeschrieben und wiederum mit der Einschlagstatistik kalibriert.

Abbildung 105: Kalibrierung des Derbholzabgangs gemäß Waldinventurdaten mittels Holzeinschlagstatistik [Mio. Vfm]



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

Abbildung 106: Nicht genutzter und genutzter Derbholzabgang gemäß Waldinventurdaten und Einschlagstatistik [Mm³]



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

Neben der Abbildung der interannuellen Schwankungen der Derbholznutzung erlaubt die Kalibrierung der Waldinventurdaten die Zuordnung des in den Produkten enthaltenen Kohlenstoffs zu den jeweiligen Landnutzungsklassen, aus denen der Rohstoff stammt. Dies ist notwendig, um die eingeschlagenen Rohholzmengen einerseits der verbleibenden Waldfläche (Kategorie 4.A.1, Kapitel 6.2.1) und andererseits den Flächen, die einer Landnutzungsänderung von Wald in andere Kategorien unterliegen, zuzuordnen. Holz aus Flächen, die einer Landnutzungsänderung von Wald zu anderen Kategorien unterliegen, wird gemäß den Vorgaben der EU-Verordnung 2018/841[95] bzw. EU-Verordnung 2023/839[96] und den Ausführungen des IPCC auf Basis einer sofortigen Emission berücksichtigt (vgl. Kap. 2.8.3, IPCC (2014) und 12.4.1.2, IPCC, 2019), so dass sich im Ergebnis der aus den für Deutschland verfügbaren Inventurinformationen und der Gleichung 12.10 (IPCC (2014): 12.25) der jährliche Holzeinschlagsanteil aus bestehenden Waldflächen $f_{FLrFLM}(i)$ berechnet (s. Tabelle 427).

Tabelle 427: Jährlicher Anteil des genutzten Derbholzeinschlags aus verbleibender Waldfläche

Zeitraum	$f_{FLrFL}(i)$
1990 – 2002	0,9937

[95] VERORDNUNG (EU) 2018/841 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 30. Mai 2018 über die Einbeziehung der Emissionen und des Abbaus von Treibhausgasen aus Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft in den Rahmen für die Klima- und Energiepolitik bis 2030 und zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 525/2013 und des Beschlusses Nr. 529/2013/EU

[96] VERORDNUNG (EU) 2023/839 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 19. April 2023 zur Änderung der Verordnung (EU) 2018/841 hinsichtlich des Geltungsbereichs, der Vereinfachung der Berichterstattungs- und Compliance-Vorschriften und der Festlegung der Zielvorgaben der Mitgliedstaaten für 2030 sowie zur Änderung der Verordnung (EU) 2018/1999 hinsichtlich der Verbesserung der Überwachung, der Berichterstattung, der Verfolgung der Fortschritte und der Überprüfung. Amtsblatt der Europäischen Union L 107/1 vom 21. April 2023

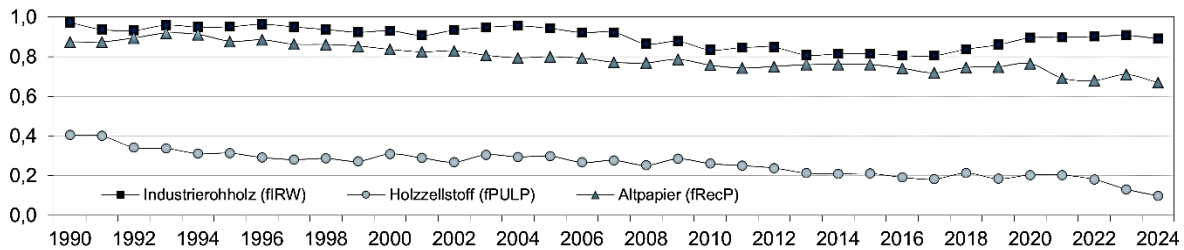
Zeitraum	$f_{FLrFL}(i)$
2003 – 2008	0,9914
2009 – 2012	0,9906
2013 – 2017	0,9860
2018 – 2022	0,9926

Auch wird mit dieser Kalibrierung die methodische Konsistenz zur projizierten Zeitreihe des gemeldeten FRL (Rock et al. (2021)) sichergestellt. Weitere Details über die Kalibrierung des Derbholzabgangs mit Hilfe der Zeitreihe zum Rohholzeinschlag gemäß den Bestimmungen des IPCC (2014) finden sich in Rüter (2017).

Zur Bestimmung des Kohlenstoffzuflusses für den Produktionsansatz gemäß Gleichung 12.7 des 2019 Refinement to the IPCC 2006 Guidelines (vgl. (IPCC, 2019): 12.23) wurden in einem zweiten Schritt die jeweiligen heimischen Rohstofffaktoren $f_R(i)$ auf Basis der Gleichung 12.8 (IPCC, 2019: 12.24) bestimmt, der für die Halbwarenkategorien Schnittholz und Holzwerkstoffe auf den oben beschriebenen Daten zur Holzrohstoffkategorie Industrierohholz (industrial roundwood) basiert. Für die Berechnung des aus heimischem Einschlag stammenden Anteils der Produktkategorie Papier und Pappe wurde neben der Rohstoffkategorie Holzzellstoff (wood pulp) auch die Verwendung von Altpapier bei der Papierherstellung berücksichtigt, da sich der Anteil von Altpapier in Papier und Pappe in Deutschland auf über 70% beläuft. Ebenso wie in den vorherigen Berichtsjahren wurde der Anteil *p* von Altpapier in Papierprodukten über das Verhältnis des rechnerischen Verbrauchs von Holzzellstoff und Altpapier in Deutschland ermittelt. Neben den Faktoren für Industrierohholz (f_{IRW}) und Holzzellstoff (f_{PULP}), die gemäß der Gleichungen 2.8.1 und 2.8.2 des IPCC KP Supplement berechnet wurden (IPCC (2014): 2.115), wurde auf Basis der gleichen Vorgehensweise mit Hilfe oben beschriebener Aktivitätsdaten ein weiterer Faktor für Altpapier (recovered paper) ermittelt (f_{RecP}) (Abbildung 107)

Aufgrund der der Verwendung der Zeitreihe zum Einschlag von Stamm- und Industrieholz der nationalen Holzeinschlagstatistik anstelle der entsprechenden Daten der FAO ergeben sich für alle Rohstofffaktoren $f_R(i)$ geringfügige Änderungen im Vergleich zum Vorjahr.

Abbildung 107: Entwicklung des heimischen Rohstofffaktors $f_R(i)$ der berücksichtigten Rohstoff-kategorien (FAO, 2022, 2025)



Quelle: eigene Darstellung, Thünen-Institut

6.10.2.2 Emissionsfaktoren

Für die Berechnung der Kohlenstoffabflüsse aus dem Kohlenstoffspeicher werden die in Tabelle 12.3 des 2019 Refinement to the IPCC 2006 Guidelines (IPCC, 2019) gelisteten Standardwerte verwendet.

6.10.2.3 Verwendete Berechnungsmethode

Für die Berechnung des Beitrags der stofflichen Holznutzung zur verzögerten Freisetzung von CO_2-Emissionen auf Basis von Kohlenstoffspeicheränderungen verwendet Deutschland die in den IPCC Leitlinien beschriebene exponentielle Zerfallsfunktion für die in Tabelle 12.1 der im IPCC 2019 Refinement beschriebenen Produktkategorien. Dies entspricht der in den IPCC Leitlinien beschriebenen Standardmethode (Gleichungen 12.1, 12.2 und 12.3, IPCC (2014):12.16-17). Für die Kohlenstoffumrechnung werden für die Produktkategorien „Holzwerkstoffe“ die detaillierten und für die Kategorie „Papier und Pappe“ der aggregierte Wert der in Tabelle 12.1 enthaltenen Faktoren verwendet (IPCC, 2014). Die Kohlenstoffmengen in den Produktkategorien ‚Laub- und Nadelschnittholz‘ werden auf Basis der in Rüter (2011) beschriebenen Faktoren berechnet (vgl. auch UNFCCC (2011b), um die in Deutschland typischerweise verwendeten Holzarten bei der Schnittholzherstellung abzubilden, die mit den Statistikdaten zum Holzeinschlag korrelieren (Statistisches Bundesamt, FS 3, R 3.3.1). Für Nadelschnittholz beträgt der Faktor 0,225 Mg C/m^3 und für Laubschnittholz 0,335 t C/m^3.

Da erst seit der Wiedervereinigung Deutschlands im Jahr 1990 Zeitreihen zu Holzprodukten und den verwendeten Rohstoffkategorien mit ausreichender Datenqualität vorliegen und um mit den Daten verbundene Unsicherheiten zu reduzieren, wird der Anfangswert des Kohlenstoffspeichers in Holzprodukten auf Basis der Gleichung 12.4 (IPCC, 2014) mit $C(t_0)$ = 1990 berechnet.

Weitergehende detaillierte Informationen zur verwendeten Methodik finden sich in Rüter (2017).

6.10.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (4.G)

Die Zeitreihen für die Aktivitätsdaten zu Holzprodukten aus der Datenbank der FAO sind konsistent. Allerdings lagen zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts (10/2025) gemäß des festgelegten Routineablaufs der Inventarerstellung (s. Kapitel 1.2.3) die für die Berechnung notwendigen Aktivitätsdaten für Holzprodukte wiederholt nicht rechtzeitig vor (vgl. (FAO, 2022), weshalb die Datensätze der Holzhalbwarengruppen Schnittholz, Holzwerkstoffe und Papier und Pappe sowie für Industrierohholz, Holzzellstoff und Altpapier wie in Kapitel 6.10.2.1 beschrieben, u.a. unter Anwendung eines „Trendextrapolationsansatzes“ geschätzt werden mussten (EEA, 2025). Wie der deutsche Expertenrat für Klimafragen festgestellt hat, sind die mit dieser veralteten Datenlage verbundenen Unsicherheiten bei der Modellierung groß (vgl. (ERK, 2024)). Um die Unsicherheiten zu reduzieren und Konsistenz der Berechnungen zu erhöhen, wurden einzelne Zeitreihen auf die Verwendung von Daten aus nationalen Statistiken umgestellt (vgl. Kapitel 6.10.2.1 und 6.10.6)

Ansonsten belaufen sich die Unsicherheiten dieser Zeitreihen nach Angaben des IPCC auf -25/+5 % (IPCC, 2014).

6.10.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (4.G)

Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Mit dem Berechnungsmodell WoodCarbonMonitor wurde bereits in 2011 der Beitrag von Holzprodukten zum Referenzwert für die zweite Verpflichtungsperiode unter dem Kyoto-Protokoll auch für weitere EU Mitgliedsstaaten ermittelt. Nach einem Abgleich mit nationalen Daten und z. T. vorhandenen Modellen, verwendeten 16 weitere Länder die Daten zur Submission an das Klimasekretariat (Belgien, Bulgarien, Dänemark, Estland, Frankreich, Griechenland, Italien, Lettland, Litauen, Niederlande, Polen, Rumänien, Slowakei, Spanien,

Tschechische Republik und Ungarn), wo sie in der Folge zusammen mit dem Modell und den zugrundeliegenden Annahmen von einem internationalen Expertenteam evaluiert wurden (Rüter (2011) und UNFCCC (2011b)).

Die in der Folge notwendige Anpassung der gemeldeten Zeitreihen an die beschlossenen Berechnungsregeln für Holzprodukte gemäß Entscheidung 2/CMP.7 wurde im Rahmen der Erstellung des Kapitels 2.8 'Harvested Wood Products' im 2013 IPCC KP Supplement (IPCC, 2014) ebenfalls mit dem Modell begleitet (Rüter, 2017), s. Kapitel 3.2.2, 4.4 und Anhang).

Im Rahmen der Evaluierung der Referenzwert-Projektionen der EU Mitgliedsstaaten gemäß VO 2018/841 (European Parliament (EP), 2018) wurde das Modell in 2019 wiederholt in Kombination mit dem Modell G4M verwendet, um im Auftrag der EU Kommission einen Abgleich der länderspezifischen Holzprodukte-Berechnungen inklusive der zugrundeliegenden Daten und Annahmen vornehmen zu können (Forsell et al. (2018) und Forsell et al. (2019)). Auch fand im Rahmen von EU Projekten wiederholt eine Überprüfung und Kalibrierung mit dem vom International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) betriebenen Gleichgewichtsmodells GLOBIOM statt (Rüter et al. 2016 und Rüter und Fulvio, 2025)

Weitere allgemeine Informationen zu der auch für Holzprodukte durchgeführten Qualitätskontrolle (QK) und Qualitätssicherung (QS) finden sich in Kapitel 6.1.3.

6.10.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (4.G)

Die für die Berechnung notwendigen Aktivitätsdaten für das Jahr 2023 zu Holzprodukten lagen zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts (10/2025) wiederholt noch nicht in der FAOSTAT-Datenbank (FAO, 2025) vor, so dass die Aktivitätsdaten für das Jahr 2024 entsprechend der Ausführungen in Kapitel 6.10.2.1 ermittelt wurden. Um die Konsistenz der Berechnungen zu erhöhen, wurde die Zeitreihe der nationalen Statistik zum Einschlag von Stamm- und Industrieholz, die mit dem Vorliegen der Daten aus der Bundeswaldinventur 2022 neu berechnet und für den gesamten Zeitraum baumartenspezifisch kalibriert wurde (vgl. Abbildung 105) und seit dem Berichtsjahr 2024 bereits für die Berechnung der aus bestehenden Waldflächen stammenden Rohholzmengen ($f_{FLrFL}(i)$) verwendet wird, erstmalig auch für die Berechnung der Rohstofffaktoren $f_R(i)$ zur Ermittlung der aus heimischem Einschlag stammenden Holzmengen zur Weiterverarbeitung zu Holzhalbwaren verwendet. Hierdurch ergeben sich Änderungen, die sich auf die gesamten Zeitreihen zu CO_2-Emissionen und Einbindungen der Kategorie Holzprodukte auswirken.

Tabelle 428: Gegenüberstellung der HWP CO_2-Emissionen und ihre Einbindungen der Submissionen 2025 und 2026

Netto-Emissionen [kt CO_2]		1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2023
Sub 2025	aus heimisch verbrauchtem Schnittholz	-1.697	2	160	-1.490	-492	24	-1.615	-256
	aus exportiertem Schnittholz	45	-411	-1.919	-4.443	-3.214	-2.603	-5.050	5.649
	aus heimisch verbrauchten Holzwerkstoffen	-600	-689	-1.075	-1.347	2.803	2.605	1.256	1.589
	aus exportierten Holzwerkstoffen	181	-371	-2.660	-5.120	-2.550	-1.712	-1.730	-1.355
	aus heimisch verbrauchtem Papier und Pappe	334	-189	-335	-349	262	399	151	218
	aus exportiertem Papier und Pappe	396	-1.022	-1.241	-2.184	-824	-487	-476	849
Sub 2026	aus heimisch verbrauchtem Schnittholz	-1.686	-33	84	-1.506	-321	132	-1.833	-271
	aus exportiertem Schnittholz	46	-416	-1.943	-4.450	-3.128	-2.551	-5.191	-4.781

Netto-Emissionen [kt CO_2]	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2023
aus heimisch verbrauchten Holzwerkstoffen	-593	-709	-1.110	-1.319	2.893	2.661	1.160	1.946
aus exportierten Holzwerkstoffen	182	-388	-2.726	-5.163	-2.475	-1.676	-1.846	-1.040
aus heimisch verbrauchtem Papier und Pappe	352	-183	-347	-347	266	393	143	1.449
aus exportiertem Papier und Pappe	404	-1.020	-1.254	-2.182	-816	-494	-489	1.282

In Folge dieser kategoriespezifischen Rückrechnung verringern sich die im Vorjahr berichteten CO_2-Emissionen und ihre Einbindungen in Holzprodukten für das Jahr 2023 in Höhe von -4.604 kt CO_2, die im Zuge des in 03/2025 durchgeführten Comprehensive Review of National GHG Inventory Data (EEA, 2025) aufgrund der zwischenzeitlichen Aktualisierung der FAO-Datenbank in 12/2024 auf -1.135 kt CO2 korrigiert worden waren (EEA 2025, S. 15), auf nunmehr -1.415 kt CO_2.

6.10.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (4.G)

In 2024 prüfte der Expertenrat für Klimafragen im Sektor LULUCF die CRF-Kategorie 4.A Wald und am Rande auch die CRF-Kategorie Holzprodukte (4.G). Hierbei wurde festgestellt, dass das Thünen-Institut für Holzforschung „auf Grund von rechtlichen Regelungen zur Geheimhaltung einzelner Meldenummern der Produktionsstatistik laut § 16 des Bundesstatistikgesetzes keinen Zugang zu vorhandenen Daten des Statistischen Bundesamtes zu Holzprodukten“ hat, die anstelle der Daten der FAO verwendet werden könnten. Dies resultiert in großen Unsicherheiten (vgl. Kapitel 6.10.5). „Eine Berechnung mit spezifischeren, nationalen Aktivitätsdaten, wie der IPCC es vorsieht (IPCC, 2014), sowie mit bereits [am Thünen-Institut für Holzforschung] vorliegenden, zugehörigen Umrechnungsfaktoren, ist also nicht möglich.“ (Expertenrat für Klimafragen, 2024). Die vom Expertenrat empfohlene „ generelle Überprüfung der rechtlichen Grundlage der Datenzugänge und -flüsse“, die „vom Gesetzgeber [daher] in Betracht zu ziehen“ sei, mit dem Ziel, „allen Bundesbehörden, die an den Emissionsberechnungen beteiligt sind, Zugang zu relevanten Daten [zu gewähren]“, wurde bislang nicht vorgenommen. Dennoch wird weiterhin angestrebt, die der Berechnung zugrundeliegende Datenbasis zu verbessern (vgl. Kapitel 6.10.2.1 und 6.10.3). Dies betrifft auch die Erfassung der zeitlichen Dynamik der Nutzung von Derbholz, das aufgrund Kalamitäten (z. B. im Jahr 1990) zwar abgängig ist, aber nicht bzw. noch nicht für eine Weiterverarbeitung zu einem stofflich genutzten Holzprodukt verwendet wurde (vgl. Anmerkungen im Rahmen des ESD-Reviews in 02/2024 bzw. (Rüter & Stümer, 2024).

Mit der neuerlichen Auswertung der letzten Waldinventurdaten konnte zunächst der Derbholzabgang weiter nach Baumartengruppen differenziert werden in die Derbholzmengen, die einerseits in den Totholzspeicher eingehen und andererseits vornehmlich energetisch genutzt oder für die stoffliche Weiterverarbeitung zu Holzprodukten zur Verfügung stehen. Um die Konsistenz der Zeitreihe einzuhalten, muss in einem weiteren Schritt der aktuelle Derbholzabgang, der für den Zeitraum nach der letzten Waldinventur nach oben beschriebenem Verfahren extrapoliert wird, auf Basis von Informationen über die Art der Kalamität differenziert werden, da kurzfristig anfallendes Schadholz nicht immer bzw. nur in Ausnahmefällen (vgl. 1990) aufgearbeitet und genutzt wird (vgl Abbildung 106). Zugleich ist zu beachten, dass Deutschland für die Berechnung der Kategorie die entsprechenden Kapitel des 2013 IPCC KP Supplement (IPCC, 2014) bzw. des 2019 Refinement (IPCC, 2019) als methodische Grundlage verwendet, um die geltenden rechtlichen Vorgaben zur Bilanzierung von Holzprodukten im Inventar einzuhalten (i.e. EU-Verordnung 2018/841 bzw. EU-Verordnung

2023/839[97]). Als Grundvoraussetzung für eine entsprechende Berechnung ist hier die Verfügbarkeit transparenter Daten genannt, nicht zuletzt um eines der Kernprinzipien im Umgang mit Maßnahmen in der Kategorie LULUCF einzuhalten: die Kohlenstoffbindung des Speichers nicht zu überschätzen und Emissionen nicht zu unterschätzen[98].

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen weitere geplante Verbesserungen in diesem Kapitel benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 473 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 472 abgebildet.

6.11 Andere Bereiche (4.H)

Unter 4.H werden behelfsmäßig N_2O-Emissionen, die durch die Bewirtschaftung organischer Böden verursacht werden, aus der Kategorie *Settlements* (108,8 kt CO_2 eq. nach IPCC AR5 für 2021) für Tabelle 4 (II) berichtet, da die CRF-Tabellen des CRF Reporters diese so nicht vorsehen. CO_2- und CH_4-Emissionen werden behelfsmäßig als included elsewere (IE) in Tabelle 4 E berichtet. Die Ergebnisse werden im vorliegenden NIR im Kapitel Siedlungen ausgeführt (Kapitel 6.8.1).

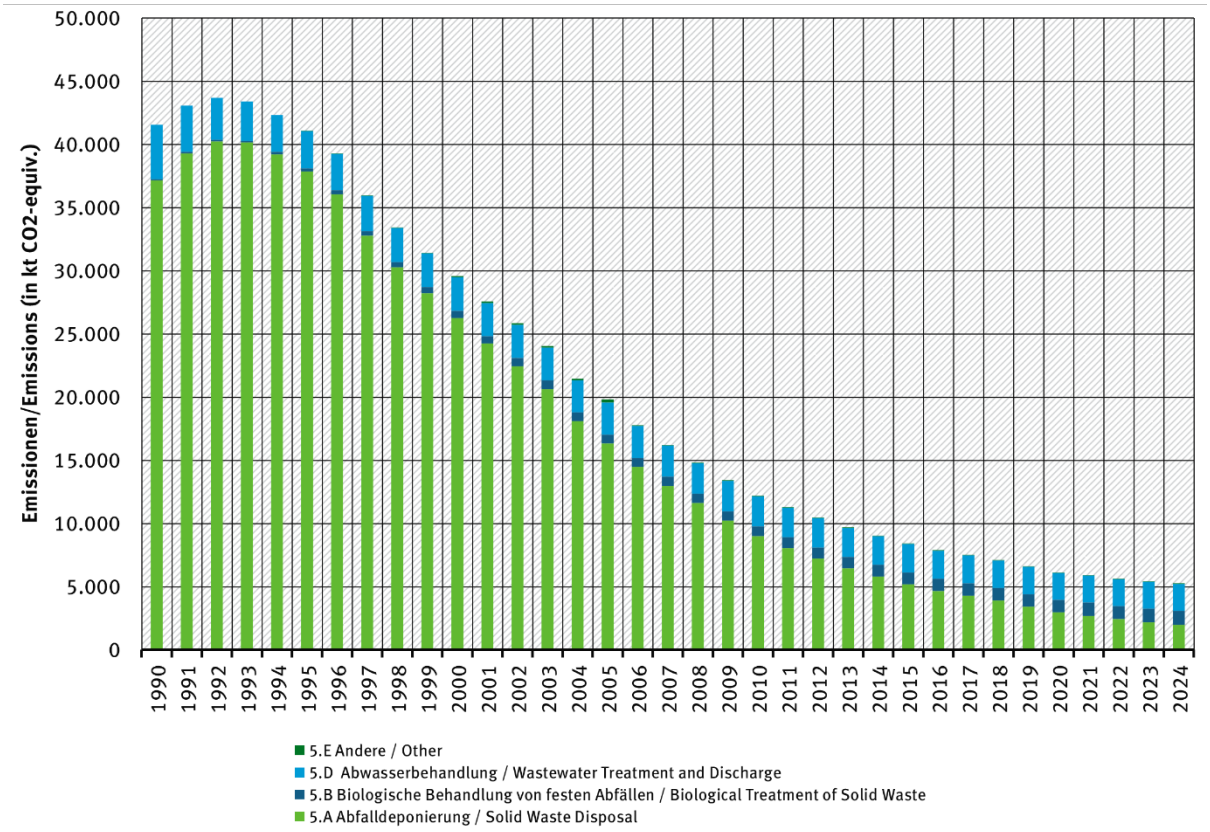
[97] VERORDNUNG (EU) 2023/839 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 19. April 2023 zur Änderung der Verordnung (EU) 2018/841 hinsichtlich des Geltungsbereichs, der Vereinfachung der Berichterstattungs- und Compliance-Vorschriften und der Festlegung der Zielvorgaben der Mitgliedstaaten für 2030 sowie zur Änderung der Verordnung (EU) 2018/1999 hinsichtlich der Verbesserung der Überwachung, der Berichterstattung, der Verfolgung der Fortschritte und der Überprüfung. Amtsblatt der Europäischen Union L 107/1 vom 21. April 2023

[98] UNFCCC (2002a) Report of the COP on its seventh Session, held at Marrakesh from 29 October to 10 November 2001. The Marrakesh Accords: Decision 11/CP.7 on Land use, land use change and forestry. Addendum, *FCCC/CP/2001/13/Add.1*.

7 Abfall und Abwasser (CRF-Sektor 5)

7.1 Übersicht (CRF Sektor 5)

Abbildung 108: Übersicht über die Treibhausgas-Emissionen des CRF-Sektors 5



Quelle: eigene Darstellung, UBA

7.2 Abfalldeponierung (5.A)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
L/T	5 A, Solid Waste Disposal		CH_4	37191,25	2,88	1997,16	0,29	-94,63

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CH_4	Tier 2	NS	CS

Die Kategorie „Abfalldeponierung“ ist für CH_4-Emissionen eine Hauptkategorie nach der Emissionshöhe und dem Trend.

Für die deutsche Emissionsberichterstattung unter CRF 5.A ist nur die geordnete Deponierung (5.A.1) von Relevanz. Die so genannte wilde Deponierung (CRF 5.A.2) ist in Deutschland gesetzlich verboten.

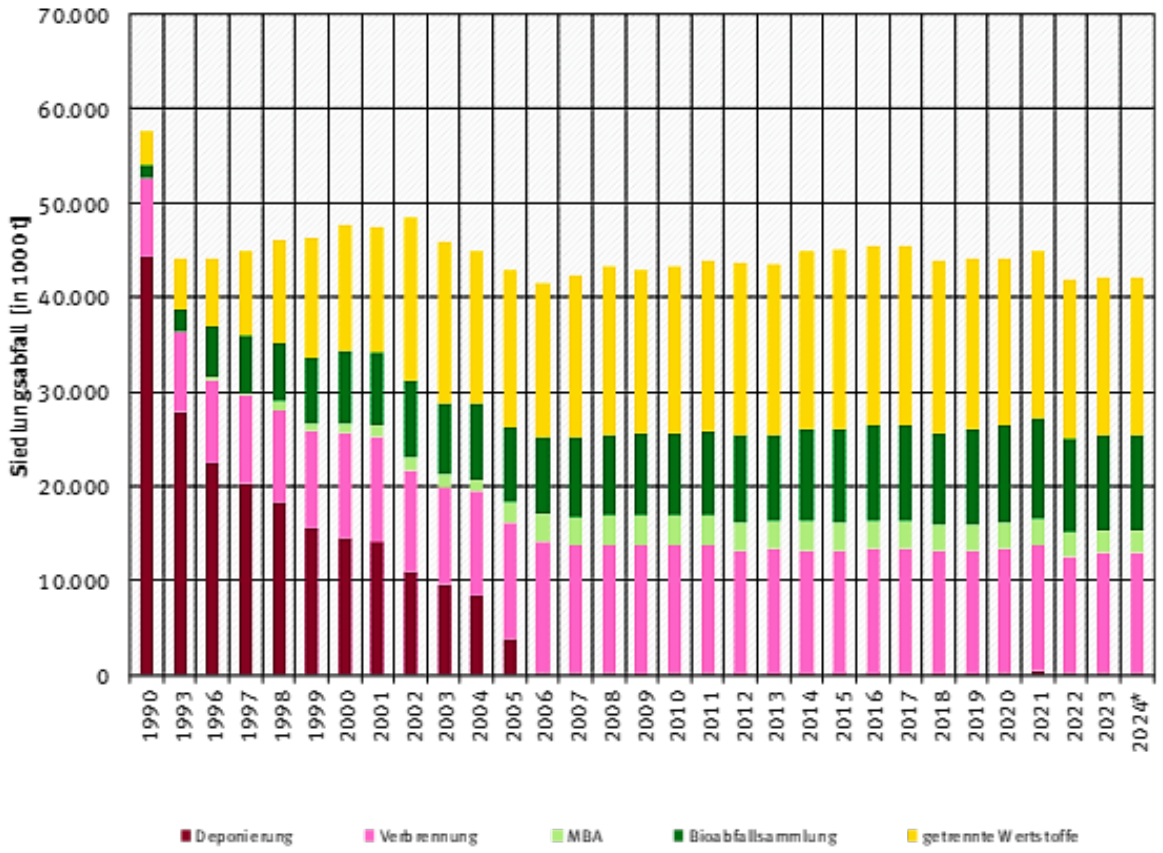
7.2.1 Geordnete Deponierung – Deponierung von Siedlungsabfällen (5.A.1)

7.2.1.1 Beschreibung der Kategorie (5.A.1)

Seit 1990 und auch schon davor wurden in der Abfallwirtschaft in Deutschland eine Reihe von gesetzlichen Regelungen erlassen und organisatorische Maßnahmen in die Wege geleitet, welche die Entwicklung der Emissionen aus der Abfalldeponierung stark beeinflusst haben. Hierzu gehören die verstärkte Sammlung von Bioabfällen aus Haushalten und Gewerbe, die verstärkte Sammlung von anderen Wertstoffen wie Glas, Papier/Pappe, Metalle und Kunststoffe und die getrennte Sammlung von Verpackungen und deren Verwertung. Daneben wurde die Verbrennung von Siedlungsabfällen ausgeweitet sowie die mechanisch-biologische Behandlung von Restabfällen eingeführt. Alle diese Maßnahmen hatten zur Folge, dass sich die Menge der deponierten Siedlungsabfälle von 1990 bis 2006 sehr stark reduziert hat (siehe Abbildung 97). Der Export von gemischten Siedlungsabfällen hatte nur einen geringen Einfluss auf diese Reduktion. Aus der Abbildung 97 wird deutlich, dass in Deutschland heute mehr als die Hälfte der anfallenden Siedlungsabfälle stofflich verwertet wird (getrennte Wertstoffe und Bioabfallsammlung) und nicht verbrannt oder deponiert werden. Bei den Emissionen aus der Deponierung hat diese Veränderung aber nur einen sehr geringfügigen Einfluss auf die Gesamtemissionen im jeweils aktuellen Berichtsjahr, da diese vor allem durch die in der Vergangenheit abgelagerten Abfälle bestimmt werden.

In der Bundesrepublik Deutschland wurden im Jahre 2004 etwa 330 Deponien für Siedlungsabfall betrieben. Strenge rechtliche Anforderungen verlangten bereits zu diesem Zeitpunkt technische Einrichtungen zur Fassung und Behandlung des Deponiegases und gewährleisteten eine weitgehende Minderung der Methanemissionen dieser Anlagen. Durch die neuen, weitergehenden Anforderungen der Abfallablagerungs- und der Deponieverordnung wurden bis Juni 2005 mehr als die Hälfte der Deponien geschlossen, so dass gegenwärtig nur noch etwa 150 Siedlungsabfall-deponien betrieben werden. Seit Juni 2005 ist zudem die Deponierung von biologisch abbaubaren Abfällen nicht mehr zugelassen, was bedeutet, dass eine Deponierung von Abfällen mit signifikanter Methanbildung seitdem nicht mehr erfolgt. Zur Einhaltung dieser Anforderungen ist eine Vorbehandlung der Siedlungsabfälle und anderer biologisch abbaubarer Abfälle durch thermische oder mechanisch-biologische Verfahren vorgeschrieben. Die seit 2006 neu hinzugekommenen Ablagerungen enthalten nur noch sehr geringe Mengen an Abfällen mit Methanbildungspotenzial (z.B. Behandlungsrückstände der MBA und geringe Holzgehalte aus aufbereitetem Bauschutt) und tragen somit kaum zur Deponiegasbildung bei. Mit dem Abklingen der Deponiegasbildung älterer Ablagerungen werden sich die Methanemissionen aus Deponien nochmals sehr weitgehend mindern und langfristig auf einem sehr niedrigen Niveau stabilisieren.

Abbildung 109: Veränderung der Entsorgungspfade der Siedlungsabfälle seit 1990



Quelle 2024: Schätzung aufgrund des Vorjahres
Quelle: StatBA, Fachserie 19, Reihe 1.1, 1990, Tabelle 4.1, (Statistisches Bundesamt, 1994)
Quelle: StatBA, Fachserie 19, Reihe 1, 1996-1998, Tabelle 4, (Statistisches Bundesamt, 2002)
Quellen 2003: StatBA, Fachserie 19, Reihe 1, 2003, Tabelle 1.2, (Statistisches Bundesamt, 2005)
Quellen ab 2022: StatBA, Abfallentsorgung: Deutschland, Jahre, Anlagenart - Direktübermittlung an UBA
Bildquelle: eigene Darstellung, UBA

Mit der Minderung der jährlichen Methanemissionen aus Deponien von rd. 1400 kt CH_4 Anfang der 1990er-Jahre auf rd. 80 kt im Jahr 2023 leistete die Abfallwirtschaft in Deutschland einen bedeutenden Beitrag zum Klimaschutz. Die Erfahrungen der deutschen Abfallwirtschaft zeigen, dass die Reduktion der abgelagerten Mengen biologisch abbaubarer Abfälle deutlich höhere Beiträge zum Klimaschutz erbringen kann als die Fassung und Behandlung des Deponiegases.

7.2.1.2 Methodische Aspekte (5.A.1)

In den *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* ((IPCC, 2006a): Kapitel 3.2.1.1) basiert die Berechnung der CH_4-Emissionen aus der Deponierung auf der sogenannten „First Order Decay Methode“ (kurz: FOD-Methode). Die in Deutschland angewendete Detaillierung liegt zwischen Tier 2 und Tier 3. Die Tier 3 Methode erfordert nationale Aktivitätsdaten, sowie landesspezifische Werte für DOC, DOC_F und Halbwertzeiten (k-Werte). Deutschland verwendet derzeit nationale Aktivitätsdaten. DOC-, DOC_F - und k-Werte sind in Teilen landesspezifische Werte. Der übrige Teil entspricht den Default-Werten der IPCC-Guidelines, wurde aber auch zusätzlich durch ein Forschungsvorhaben als die für Deutschland korrekten und geltenden Werte bestätigt.

Im Folgenden werden die FOD-Methode zur Bestimmung der Methanerzeugung auf Deponien und die verwendeten Parameter näher erläutert. Die FOD-Methode wird nach den folgenden Gleichungen berechnet:

Gleichung 94:(2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Kapitel 3.2.1.1, Gleichung 3.6)

$$CH_4\ erzeugt\ im\ Jahr\ t\ \left(\frac{kt}{Jahr}\right) = DDOCm\ decomp_t\ \times F \times 16/12$$

Mit:

- CH_4 erzeugt im Jahr t = Menge an CH_4, welche durch die biologisch abbaubaren Abfälle erzeugt wird.
- DDOCm $decomp_T$ = Masse des im Jahr T anaerob abgebauten abbaubaren DOC
- F = Anteil des CH_4 am Deponiegas
- 16/12 = stöchiometrische Umrechnung von C zu CH_4
- t = Inventarjahr

Dabei gilt:

Gleichung 95:(2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Kapitel 3.2.1.1, Gleichung 3.2)

$$DDOC_m = W \times DOC \times DOC_f \times MCF$$

Mit:

- DDOCm = Masse des anaerob abbaubaren und abgelagerten DOC, (kt)
- W = Masse des abgelagerten Abfalls, kt
- DOC = Anteil des abbaubaren organischen Kohlenstoffs im Jahr der Ablagerung (kt C/kt Abfall)
- DOCf = Anteil des DOC, der unter anaeroben Bedingungen biologisch abbaubar ist
- MCF = Methankorrekturfaktor für den Anteil des unter aeroben Bedingungen abgebauten DOC für das Jahr x

Nach den gesetzlichen Vorschriften ist in der alten Bundesrepublik seit 1972 nur noch eine geordnete Deponierung von Abfällen zulässig. Im Zuge der deutschen Wiedervereinigung wurden diese Standards 1989/90 auf die neuen Bundesländer übertragen. In der Inventarberechnung werden alle seit 1950 abgelagerten Abfälle berücksichtigt, unabhängig davon, ob diese auf bereits stillgelegten oder noch betriebenen Deponien liegen.

Für die Emissionsbeiträge aller Abfälle, die zwischen 1950 und 1972 abgelagert wurden, wird mit einem MCF von 0,6 gerechnet (Default-Wert für nicht zugeordnete Deponien, siehe Kapitel 7.2.1.2.3). Für den Zeitraum 1973-1989 wird für die neuen Bundesländer derselbe MCF von 0,6 und für die alten Bundesländer ein MCF von 1 angesetzt. Für die Emissionsberechnung im Inventar wird in diesem Zeitraum ein MCF ermittelt, der sich anhand der Gewichtung der

jeweiligen Abfallmengen für Gesamtdeutschland ergibt. Die Emissionen aus den Abfällen die seit 1990 abgelagert wurden werden mit einem MCF von 1 berechnet.

Deutschland verwendet das IPCC Waste Model, das auf Basis der Gleichungen 3.4 und 3.5 der 2006 IPCC Guidelines (IPCC, 2006a) entwickelt wurde. Dabei wird für jedes einzelne Jahr die Gesamtmenge an abbaubarem DOC in den Deponien berechnet, um daraus die Menge an DOC zu berechnen, die in jedem Jahr zu CH_4 und CO_2 abgebaut wird:

Gleichung 96:(2006 IPCC Guidelines, Kapitel 3.2.1.1, Gleichung)

$$DDOCma_t = DDOCmd_t + (DDOCma_{t-1} * e^{-k})$$

Mit:

- T = Inventarjahr
- DDOCmat = in der Deponie akkumulierte DDOCm am Ende des Jahres t, kt
- DDOCma t-1 = in der Deponie akkumulierte DDOCm am Ende des Jahres t-1, kt
- DDOCmdt = in der Deponie abgelagerte DDOCm im Jahr t, kt
- K = Reaktionskonstante - Abbaurate(1/Jahr) = ln(2)/t1/2 (Jahr -1)
- t1/2 = Halbwertszeit (Jahr)

Gleichung 97:(2006 IPCC Guidelines, Kapitel 3.2.1.1, Gleichung 3.5)

$$DDOCdecomp_t = DDOCma_{t-1} \times (1 - e^{-k})$$

Mit:

- t = Inventarjahr
- $DDOCdecomp_t$ = in der Deponie im Jahr t abgebauter DDOCm, kt

Es wurde ein Multi-Phasen-Modell verwendet, das für die einzelnen Abfallfraktionen mit verschiedenen Halbwertszeiten rechnet und anschließend summiert.

Vom Endergebnis der CH_4-Emissionen wird dann das gefasste und abgefackelte oder energetisch genutzte Methan abgezogen, außerdem wird ein Korrekturfaktor angewandt, der die Oxidierung des Methans in den Deckschichten der Deponien berücksichtigt, wie Gleichung 3.1 (IPCC, 2006a) widerspiegelt:

Gleichung 98:(2006 IPCC Guidelines, Kapitel 3.2.1.1, Gleichung 3.1):

CH_4 emittiert in Jahr t (kt/Jahr) = (CH_4 erzeugt in Jahr t – R(t)) • (1- OX)

Mit:

- R(t) = CH_4-Erfassung im Jahr t
- OX = Oxidationsfaktor (Anteil)

Im IPCC Waste Model können die Nutzer einen Zeitraum bestimmen, in welchem der abgelagerte Abfall zunächst noch nicht mit der Gasbildung beginnt, sondern erst nach dieser zeitlichen Verzögerung. Der in den 2006 IPCC Richtlinien (IPCC, 2006a) empfohlene Standardwert für diese Verzögerungszeit beträgt 6 Monate. Nach Diskussionen mit nationalen Abfallexperten und basierend auf Erfahrungen mit gemessener CH_4-Entstehung nach erfolgter Ablagerung wurde dieser Wert auf 3 Monate festgelegt. Die Emissionsberechnung wird hierdurch nur geringfügig beeinflusst.

Für die Berechnung müssen die Mengen an Siedlungsabfall (MSW_T) sowie der Anteil des deponierten Siedlungsabfalls (MSW_F) bestimmt werden. Für die FOD-Methode muss das Aufkommen an Siedlungsabfall für die letzten Dekaden ermittelt werden. Der deponierte Siedlungsabfall soll gemäß der 2006 IPCC Guidelines (ebd.) differenziert nach Abfallarten geschätzt werden, da die Emissionsberechnungen im Weiteren darauf basieren, dass die einzelnen Abfallarten unterschiedliche DOC,DOC_f und k-Werte aufweisen.

7.2.1.2.1 Deponierte Abfallmengen

Das FOD-Modell berechnet die Emissionen aus dem deponierten Siedlungsabfall, dem deponierten Industrieabfall und dem deponierten Klärschlamm.

Das Aufkommen dieser deponierten Abfälle wird den Statistiken des Statistischen Bundesamtes entnommen. Daten bis zum Jahr 2018 wurden vom Statistischen Bundesamt in der Fachserie 19, Reihe 1 veröffentlicht (Statistisches Bundesamt, jährlich - FS 19, R. 1). Die Veröffentlichung der FS 19, R1 wurde danach eingestellt. Die für die Berichterstattung erforderlichen Daten ab 2019 werden vom Statistischen Bundesamt in GENESIS-Online veröffentlicht und parallel dem Umweltbundesamt im unveränderten Tabellenformat für die Berichterstattung zur Verfügung gestellt. Hierfür findet eine Totalerhebung statt, die auf jährlichen Erhebungen der Art, Herkunft und Verbleib der Abfälle und auf zweijährigen Erhebungen bestimmter Ausstattungsmerkmale der befragten Abfallanlagen beruhen. Die Aktivitätsdaten für das jeweils aktuelle Berichtsjahr müssen allerdings geschätzt werden, da die offizielle Abfallstatistik mit einem Jahr Verzug erscheint. Zur Abschätzung werden die Daten der letzten zwei Vorjahre extrapoliert. Die Schätzung wird im jeweils folgenden Jahr durch die statistisch erhobene Zahl ersetzt. Regelmäßige Rückrechnungen sind daher jährlich für das vorvergangene Jahr erforderlich.

Die Erhebungen der deponierten Mengen an Siedlungsabfällen in den alten Bundesländern begannen auf Grundlage des Umweltstatistikgesetzes von 1974 im Jahr 1975. Die Abfallmengen für den Zeitraum von 1950 bis 1975 wurden von den Bevölkerungsdaten abgeleitet.

Für die neuen Bundesländer liegen für die Jahre 1990 und 1993 nach Bundesländern differenzierte Daten zu den deponierten Siedlungsabfallmengen vor. Für die 80er Jahre der DDR hat (Andreas, 2000) Daten vorgelegt, die Aufschluss über die deponierten Abfallmengen pro Kopf, die Abfallzusammensetzung, die Deponietypen und die Art der Ablagerung geben. Die deponierten Abfallmengen pro Kopf lagen mit 190 kg/Person in der ehemaligen DDR deutlich niedriger als in den alten Bundesländern (330 kg/Person, Jahr). Dies hängt mit einem hohen Verwertungsgrad der Abfälle in der ehemaligen DDR zusammen. 1990, im Jahr der Wiedervereinigung, stiegen die deponierten Abfallmengen in den neuen Bundesländern sehr stark und die Pro-Kopf-Mengen lagen sogar über den alten Bundesländern, weil in diesem Jahr einerseits die bestehenden Verwertungs-systeme zusammenbrachen, andererseits eine Flut neuer Produkte verfügbar war, die zu hohen Ersatzkäufen und zu einer stark erhöhten Menge an Verpackungsabfällen führte. Nach 1990 nähern sich dann die deponierten Abfallmengen pro Person in beiden Teilen Deutschlands langsam an.

In den Inventarberechnungen sind die abgelagerten Klärschlammengen der alten und neuen Bundesländer (frühere Bundesrepublik und ehemalige DDR) für den gesamten Zeitraum ab 1950 enthalten. Für die Ablagerungen in den neuen Bundesländern/DDR liegen keine statistischen Daten vor. Die Abfallzusammensetzung (auch der Klärschlammanteil) wurde aus Ergebnissen eines Forschungsprojektes abgeschätzt, in dem in den 1990er Jahren das Abfallinventar von DDR-Deponien untersucht wurde.

Die nicht verwerteten Abfallmengen wurden in der ehemaligen DDR vollständig deponiert.

Die deponierten Abfallmengen aus der Industrie zwischen 1975 und 1996 wurden auf Basis der gesamten deponierten Abfallmengen abgeleitet. Die Gesamtmengen umfassen die Industrieabfälle, weisen diese allerdings nicht gesondert aus. Seit 1996 veröffentlicht das Statistische Bundesamt differenzierte Daten zu deponierten Industrieabfällen. Im Inventar werden die deponierten Abfallmengen aus folgenden Industriebranchen berücksichtigt:

- Abfälle aus der Landwirtschaft, Gartenbau, Forstwirtschaft, Fischerei und der Verarbeitung von Nahrungsmitteln
- Abfälle aus der Holzverarbeitung
- Abfälle aus der Herstellung von Zellstoff, Papier und Karton
- Abfälle aus der Textilindustrie
- Verpackungsabfälle, Aufsaug- u. Filtermaterialien, Wischtücher und Schutzkleidung
- Die Holzanteile aus Bau- und Abbruchabfällen (Daten seit 1975)

Vergleiche zwischen Abfallaufkommen und Produktionsdaten der betroffenen Sektoren für den Zeitraum 1996 bis 2002 ergaben keine befriedigenden statistischen Zusammenhänge. Während die Produktionsdaten stiegen, sank das Abfallaufkommen teilweise deutlich, weil Veränderungen in den Produktionsprozessen stattfanden. Aufgrund des fehlenden statistischen Zusammenhanges wurden die Mengen an deponiertem Holz aus Bau- und Abbruchabfällen zwischen 1950 und 1975 konstant gehalten. Auf die Emissionen des Basisjahres wirken sich Veränderungen der Annahmen zu den industriellen Abfällen im Zeitraum 1950 bis 1970 nur sehr marginal aus.

Für den gesamten Zeitraum ab 1950 liegen damit für alle zu berücksichtigenden Abfälle, einschließlich Klärschlämme, vollständige und durchgängige Datenreihen vor, die auf den für die jeweiligen Zeiträume besten verfügbaren Grundlagen beruhen.

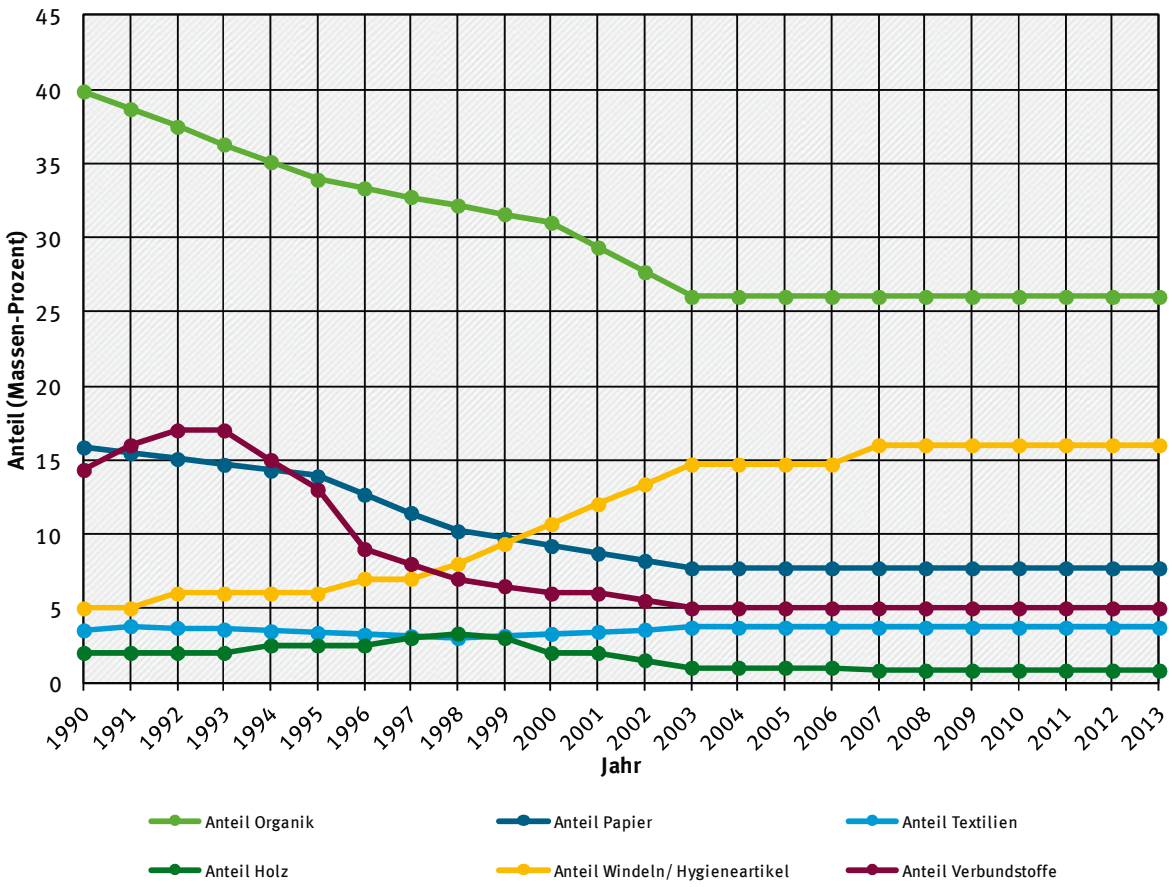
7.2.1.2.2 Abfallzusammensetzung

Die Inventarberechnungen gemäß FOD-Methode erfordern eine Aufteilung in die deponierten Abfallfraktionen Organik, Garten- und Parkabfälle, Papier, Holz, Windeln und Textilien, Verbundstoffe, Klärschlamm und MBA Output (siehe hierzu auch Kapitel 7.2.1.2). Diese sind teilweise separat in der Abfallstatistik ausgewiesen, allerdings enthält die Statistik auch eine deponierte Menge an gemischten Siedlungsabfällen, die für die Berechnungen in die oben genannten Fraktionen aufgeteilt werden muss. Zu diesem Zweck wurden zahlreiche Studien zur Abfallzusammensetzung der gemischten Siedlungsabfälle ausgewertet, um die Abfallfraktionen (Organik, Garten- und Parkabfälle, Papier, Holz, Windeln und Textilien, Verbundstoffe) im historischen Verlauf zu bestimmen. In den Jahren 1980 und 1985 wurde die Abfall-zusammensetzung der gemischten Abfälle für das gesamte Gebiet der ehemaligen Bundes-republik ermittelt (Barghorn et al., 1986; Greiner et al., 1983). Für den nachfolgenden Zeitraum gibt es eine sehr große Zahl an Studien einzelner Städte, Landkreise oder Bundesländer, die

teilweise bereits in übergreifenden Studien ausgewertet und zusammengefasst wurden. Durch die Auswertung dieser Studien konnten sowohl für Hausmüll als auch für hausmüllähnliche Gewerbeabfälle und Sperrmüll (diese werden in den nationalen Statistiken getrennt ausgewiesen) Zeitreihen der Abfallzusammensetzung zwischen 1980 und 2013 erstellt werden (siehe Abbildung 110). Im Jahr 2014 wurde die bisherige Auswertung der Studien zur Abfallzusammensetzung überprüft und sechs zusätzliche, neuere Studien über die Restmüll-zusammensetzung für den Zeitraum 2006 bis 2013 ausgewertet. Diese neueren Studien bestätigten die bisherigen Annahmen zur Zusammensetzung der gemischten Müllfraktionen, sodass diese ab 2014 konstant fortgeschrieben wurden. Aufgrund der weiter oben bereits geschilderten gesetzlichen Veränderungen ist die Deponierung von unbehandelten gemischten Siedlungsabfällen nach 2005 sehr stark zurückgegangen (von 5,8 Mio. Tonnen im Jahr 2004 auf 2000 Tonnen im Jahr 2013). Aus diesem Grund ist die genaue Zusammensetzung des Restmülls für den Zeitraum ab 2005 auch weniger relevant.

Für die Abfallzusammensetzung der neuen Bundesländer wurden die Angaben aus (Andreas, 2000) für die 80er Jahre der ehemaligen DDR übernommen (Zusammensetzung des Hausmülls: 28 % Vegetabilien, 14 % Papier/Pappe, 2,3 % Holz, Gummi, Verbundstoffe, 3 % Textilien; der Hausmüll machte aber nur 16 % der gesamten deponierten Abfallmengen aus). Die deponierten Siedlungsabfälle in der ehemaligen DDR sind durch einen geringeren Anteil an biologisch abbaubaren Materialien und durch hohe anorganische Fraktionen (vor allem Asche aus dem Hausbrand) charakterisiert. Nahrungsmittelabfälle wurden gesammelt und als Futtermittel verwertet, deren Verfügbarkeit während bestimmter Zeiträume knapp war. Papier wurde gesammelt und war ebenfalls eine knappe Ressource. Holz und Papier wurden häufig in Öfen zu Heiz- und Kochzwecken verfeuert. Das SERO-Verwertungssystem erfasste effizient den relativ geringen Anteil an Kunststoffverpackungen, Glas gab es in Pfandsystemen bzw. wurde ebenfalls gesammelt. Insgesamt war die Ökonomie der ehemaligen DDR vor allem durch die Knappheit von Ressourcen gekennzeichnet, was zu einer effizienten Abfallverwertung führte.

Abbildung 110: Trend in der Zusammensetzung des Hausmülls zwischen 1990 und 2013



Quelle: eigene Darstellung, UBA

Die auf Deponien abgelagerten Abfallmengen werden vom Statistischen Bundesamt getrennt nach Abfallschlüssel erfasst. Für die Emissionsberechnung werden alle Abfallarten, die zur Deponiegasbildung beitragen können, einbezogen und jede Abfallart getrennt auf die Abfallzusammensetzung beurteilt. In Tabelle 429 sind alle für die Deponiegasbildung relevanten Abfälle enthalten, für die Bau- und Abbruchabfälle sind die Holzfraktionen berücksichtigt. Die gefassten Deponiegasmengen beruhen auf Daten der offiziellen Statistik.

Seit dem 1. Juni 2005 dürfen in Deutschland nur noch Abfälle mit einem Gesamtkohlenstoff-gehalt ≤ 3 % und mechanisch-biologisch behandelte Siedlungsabfälle abgelagert werden. Die nach diesem Zeitpunkt abgelagerten Abfallmengen sind stark zurückgegangen und tragen nur noch in sehr geringem Maße zur Gasbildung bei. Tabelle 429 beschreibt die Entwicklung der Mengen der biologisch abbaubaren Abfälle, die deponiert wurden. Für das aktuelle Inventarjahr liegen regelmäßig noch keine Daten vor, weshalb die Entwicklung der Abfallmengen und -zusammensetzungen der letzen zwei Vorjahre linear extrapoliert und im folgenden Jahr rekalkuliert werden.

Tabelle 429: Mengen deponierte, biologisch abbaubare Abfälle, nach Abfallfraktionen, in [kt]

Abfallfraktion	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023	2024
Organik	16844	7515	3202	813	6	1	1	4	0	0	0
Garten- und Parkabfälle	0	0	54	26	0	0	0	0	0	0	0
Papier	9095	4372	1421	426	7	1	5	12	10	8	7

Abfallfraktion	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023	2024
Holz	2658	1889	1037	238	0	0	0	69	0	0	0
Windeln + Textilien	3572	2082	2241	519	5	2	1	10	2	1	1
Verbundstoffe	5587	2644	621	155	1	0	0	0	0	0	0
Klärschlamm	2494	1024	452	634	27	81	29	49	62	37	37
MBA-Output	0	0	370	1170	991	714	505	466	430	398	366

2011/12 wurden die Restgasemissionen aus der Ablagerung mechanisch- biologisch behandelter Abfälle in einem Sachverständigengutachten (Stegmann, 2012) quantifiziert. Das Gutachten bestätigt die in der Emissionsberechnung ermittelten geringen Emissionsbeiträge aus der Ablagerung der MBA-Abfälle und damit die in der Berechnung verwendeten nationalen Werte. Das Verfahren der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung (MBA) wird in Kapitel 7.6.1 beschrieben.

Entsprechend den Empfehlungen aus der Inventarüberprüfung 2010 (Paragraph 146, (UNFCCC, 2010a)) werden seit der Berichterstattung 2011 zusätzliche Informationen zur Verfügung gestellt. Tabelle 430 stellt die deponierte Siedlungsabfallmenge und Tabelle 431 das Gesamtaufkommen an Siedlungsabfällen, jeweils pro Kopf und Tag, ab 1990 dar.

In Deutschland hat die Deponierung von Siedlungsabfällen seit 2005 sehr stark abgenommen, da diese nahezu vollständig in Verbrennungsanlagen (Abfallverbrennungsanlagen oder Mitverbrennung in industriellen Feuerungsanlagen) und mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen (MBA) entsorgt werden. Dieser Trend spiegelt sich auch in der Pro-Kopf-Menge an deponierten Siedlungsabfällen wider. Die Pro-Kopf-Menge an erzeugten Siedlungsabfällen ist jedoch im Wesentlichen konstant geblieben.

Tabelle 430: Pro-Kopf-Mengen an deponiertem Siedlungsabfall, in [kg/Kopf/Tag]

1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023	2024
1,60	0,85	0,55	0,18	0,04	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02

Tabelle 431: Pro-Kopf Mengen an erzeugtem Siedlungsabfall, in [kg/Kopf/Tag]

1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023	2024
NA	1,71	1,78	1,57	1,68	1,72	1,68	1,70	1,61	1,62	1,63

7.2.1.2.3 MCF (Methankorrekturfaktor)

Abfälle wurden in der Bundesrepublik Deutschland bis zur Schaffung des ersten Abfallgesetzes 1972 zumeist auf ungeordnete Deponien verbracht, die nach 1972 geschlossen wurden. Nach 1972 wurden die Abfälle auf geordnete Deponien verbracht. Für den MCF wird daher bis 1972 für die ABL der Default-Wert von 0,6 für „nicht zugeordnete Deponien“ angenommen (Chap. 3.2.3, (IPCC, 2006a) nach 1972 der Default-Wert für geordnete anaerobe Deponien von 1 genutzt.

Für das Gebiet der ehemaligen DDR liegt eine Erhebung aus dem Jahre 1989 vor, nach der 120 geordnete Deponien, ca. 1000 kontrollierte Ablagerungen und ca. 10.000 wilde Müllkippen erfasst wurden ((Institut für Umweltschutz, 1990): S. 56, Tabelle 12). Für das Gebiet der ehemaligen DDR wurde daher für den Zeitraum von 1950 bis 1989 ein MCF von 0,6 (Default-

Wert für nicht zugeordnete Deponien; Chap. 3.2.3, (IPCC, 2006a), angenommen. Mit der Wiedervereinigung wurde das bundesdeutsche Abfallgesetz auf die Gebiete der Neuen Bundesländer ausgedehnt und Übergangsregelungen stellten sicher, dass sowohl stillgelegte als auch in Betrieb befindliche Anlagen, in denen Abfälle erzeugt oder entsorgt wurden bzw. werden, erfasst wurden und dass erforderliche Sanierungsmaßnahmen eingeleitet wurden ((BMU, 1990): S. 46). Wilde Mülldeponien wurden 1990 geschlossen, weiter zu betreibende Anlagen wurden gesichert, saniert und nach dem Standard des bundesdeutschen Abfallrechtes ausgebaut sowie neue Standorte für neu zu errichtende Anlagen gesucht.

Ab dem Jahr 1990 erfasst das Statistische Bundesamt beide Gebietsteile. Für die Berechnung wird nach 1990 ein MCF von 1 (Default-Wert für geordnete anaerobe Deponien) für das gesamte Bundesgebiet angenommen. Der IPCC Default Wert für geordnete anaerobe Deponien wird von den Experten des Umweltbundesamtes als geeigneter Wert für Deponien in Deutschland eingestuft.

7.2.1.2.4 DOC

Für DOC, den Anteil des abbaubaren organischen Kohlenstoffs im Abfall, werden nationale Daten sowie Default-Faktoren des IPCC verwendet. Alle DOC-Werte beziehen sich auf feuchten Abfall, da die statistischen Daten der abgelagerten Mengen in Deutschland für feuchte Abfälle erhoben werden. Eine Übersicht über die verwendeten DOC-Werte ist in Tabelle 432 enthalten.

Auf Basis von Reviewergebnissen aus dem ARR 2015/2016 und 2018 bemühte sich Deutschland intensiv darum, die Quellen für die in Tabelle 432 wiedergegebenen Daten zu eruieren:

- Für Garten- und Parkabfälle, Papier und Pappe, Holz und Stroh, Textilien und Windeln werden IPCC Default-Werte genutzt (Table 2.4, Chap. 2.3.1(IPCC, 2006a), Für diese Abfälle liegen keine ausreichend belastbaren nationalen Werte vor. Die Default-Werte werden von Experten des Ökoinstitutes und des Umweltbundesamtes in ihrer Größenordnung als realistisch beurteilt.

- Bis zur Berichterstattung 2022 wurde für den DOC für Organik ein nationaler Wert mit 18% (Wallmann, 1999) verwendet. Neuere Untersuchungen auf Deponien (Stegmann et al., 2023); S. 172 - 173) belegen, dass der Default-Wert mit 15% besser mit der realen Deponiegasbildung korreliert. Ab der Berichterstattung 2023 wird daher mit einem DOC von 15% gerechnet.

- Für Verbundstoffe enthalten die Guidelines keine Default-Werte. Der nationale Wert wurde in einem Forschungsprojekt zur Vorbereitung des ICR 2010 vom Forschungsnehmer (Öko-Institut) auf 10 % geschätzt und während des ICR vom zuständigen IPCC-Experten akzeptiert.

- Für Klärschlamm geben die 2006 IPCC Guidelines (Chap. 2.3.2, (IPCC, 2006a) bezogen auf die Trockenmasse einen Default DOC von 50% an. In Deutschland wurden zwischen den 1980er Jahren und 2005 nahezu ausschließlich mechanisch entwässerte Klärschlämme mit einem durchschnittlichen Trockenmassegehalt von etwa 30% abgelagert. Auf Basis dieses durchschnittlichen Trockenmassegehaltes der deponierten kommunalen und industriellen Klärschlämme und des Default-Wertes für trockenen Klärschlamm wurde ein DOC Mittelwert von 15% abgeleitet.

- Für mechanisch-biologisch behandelte Abfälle (MBA-Abfälle) enthalten die Guidelines keine Default-Werte. Eine vom Umweltbundesamt beauftragte Studie (Stegmann, 2012) zeigt, dass mit der mechanisch-biologischen Behandlung die DOC-Gehalte der Abfälle sehr weitgehend reduziert werden. Nach einer solchen Behandlung enthält die Deponiefraktion weniger als

10 % des ursprünglich in den behandelten Abfällen enthaltenen prozentualen DOC-Gehaltes. In MBA wird das gesamte Spektrum der Restsiedlungsabfälle und hausmüllähnlicher Gewerbeabfälle behandelt. Der durchnittliche DOC dieser Abfälle wird auf 23 % geschätzt, bei einer 90 % Reduktion im Behandlungsprozess ergibt sich ein nationaler DOC-Wert von 2,3 % in den abgelagerten MBA-Abfällen.

Aktuelle Forschungsergebnisse (Stegmann et al., 2023), S. 172 - 173) bestätigen die verwendeten DOC-Werte weitestgehend; eine Anpassung wird nur für die Organik-Fraktion empfohlen (siehe oben).

Tabelle 432: Verwendete DOC-Werte

Fraktion	DOC-Werte			Quelle
	IPPC 2006 Default (wet waste)	Verwendet bis NIR 2022	Verwendet ab NIR 2023	
Organik	15 %	18%	15%	(Wallmann, 1999) (Stegmann et al., 2023), S. 172 - 173)
Garten- und Parkabfälle	20 %	20%		Table 2.4, Chap. 2.3.1, (IPCC, 2006a)
Papier und Pappe	40 %	40%		Table 2.4, Chap. 2.3.1, (IPCC, 2006a)
Holz und Stroh	43 %	43%		Table 2.4, Chap. 2.3.1, (IPCC, 2006a)
Textilien	24 %	24%		Table 2.4, Chap. 2.3.1, (IPCC, 2006a)
Windeln	24 %	24%		Table 2.4, Chap. 2.3.1, (IPCC, 2006a)
Verbundstoffe	k.A.	10%		In Country Review 2010 (Öko-Institut)
Klärschlamm	50 % (trocken)	15%		Rechnerisch aus IPCC default für Klärschlamm, bezogen auf Trockenmasse, ermittelt.
MBA Abfälle	k.A.	2,3%		Nationaler Wert; (Stegmann, 2012)

7.2.1.2.5 DOC_f

DOC_f, der Anteil des in Deponiegas umwandelbaren DOC, wurde bis einschließlich der Berichterstattung 2022 für alle Abfallfraktionen mit 50 % angenommen. Dieser Wert lag im Rahmen der IPCC Defaults (Chap. 3.2.3, (IPCC, 2006a)).

Der DOC_f für die Fraktion Holz und Stroh wurde mit der Berichterstattung 2023 an den Default-Wert von 0,1 des 2019er Refinement der IPCC Guidelines (IPCC, 2019) angepasst. Auch in Deutschland durchgeführte Studien bestätigten diesen Wert (Stegmann et al., 2023). Die biologische Verfügbarkeit und der Kohlenstoffabbau unter anaeroben Milieubedingungen ist demnach derart gering, dass der DOC_f -Wert für Holz (die Masse an Stroh ist bei der Deponierung von untergeordneter Bedeutung) von 50 % auf 10 % abgesenkt werden musste (Stegmann et al., 2023), S. 26). Der DOC_f von 0,5 für Organik, Garten- und Parkabfälle, Papier und Pappe, Textilien, Windeln, Verbundstoffe, Klärschlamm und MBA-Abfälle wurde durch die Studie dagegen bestätigt.

Tabelle 433: Verwendete DOC_f-Werte

Fraktion	DOCf-Werte		Quelle
	IPPC 2006 Default (wet waste)	National verwendet	
Organik	0,5	0,5	(Wallmann, 1999)(Wallmann, 1999)(Wallmann, 1999)(Wallmann, 1999)(Wallmann, 1999)(Wallmann, 1999)(Wallmann, 1999)(Wallmann, 1999)(Wallmann, 1999)(Wallmann, 1999)(Wallmann, 1999)(Wallmann, 1999)(Wallmann, 1999)(Wallmann, 1999) (Stegmann et al., 2023), S. 172 - 173)
Garten- und Parkabfälle	0,5	0,5	Chap. 3.2.3, (IPCC, 2006a) und (Stegmann et al., 2023), S. 172 - 173)
Papier und Pappe	0,5	0,5	Chap. 3.2.3, (IPCC, 2006a) und (Stegmann et al., 2023), S. 172 - 173)
Holz und Stroh	0,5	0,1	(Stegmann et al., 2023), S. 172 - 173)
Textilien	0,5	0,5	Chap. 3.2.3, (IPCC, 2006a) und (Stegmann et al., 2023), S. 172 - 173)
Windeln	0,5	0,5	Chap. 3.2.3, (IPCC, 2006a) und (Stegmann et al., 2023), S. 172 - 173)
Verbundstoffe	0,5	0,5	Chap. 3.2.3, (IPCC, 2006a) und (Stegmann et al., 2023), S. 172 - 173)
Klärschlamm	0,5	0,5	Chap. 3.2.3, (IPCC, 2006a) und (Stegmann et al., 2023), S. 172 - 173)
MBA Abfälle	0,5	0,5	Chap. 3.2.3, (IPCC, 2006a) und (Stegmann et al., 2023), S. 172 - 173)

7.2.1.2.6 F = Anteil des CH_4 am gebildeten Deponiegas

Für F wird bei der Berechnung der Methanbildung der IPCC Default-Wert von 50% über die gesamte Zeitreihe verwendet. Es handelt sich dabei um den Methananteil im gebildeten Deponiegas, d.h. in dem Gas, welches beim anaeroben Abbau des organischen Kohlenstoffs entsteht. Biogas aus Restabfallvergärungsanlagen besteht im Durchschnitt zu 60% aus Methan. Dieser hohe Methangehalt ist dem Umstand geschuldet, dass der Wassergehalt im Bioreaktor sehr hoch ist und sich das beim Abbau entstehende CO2 teilweise im Wasser löst, woraufhin der Methananteil in der Gasphase ansteigt. Da der Wassergehalt in einer durchschnittlichen Deponie deutlich geringer ist als bei einem kontrollierten Prozess in einem Bioreaktor, muss der Methananteil F etwas nach unten korrigiert werden. 50% erscheinen aus fachlicher Sicht daher als plausibel.F ist nicht zu verwechseln mit dem Methananteil im abgesaugten Deponiegas. Dieser verändert sich mit der Zeit aufgrund externer Einflüsse, wie bspw. dem Eintrag von Umgebungsluft in den Deponiekörper (siehe Tabelle 435).

7.2.1.2.7 Halbwertszeit

Das Berechnungsmodell ist ein Multi-Phasen-Modell, das die unterschiedlichen Halbwertszeiten und die daraus abgeleiteten k-Werte (Abbauraten) der verschiedenen Abfallfraktionen berücksichtigt. Tabelle 434 dokumentiert die verwendeten Halbwertszeiten sowie die Abbauraten (k-Wert) für die Abfallfraktionen. Um der Empfehlung aus der Inventarüberprüfung in 2010 zu entsprechen (Paragraph 146, FCCC/ARR/2010/DEU), wurden für die Berichterstattung ab 2011 zusätzliche Informationen aufbereitet. Die konstanteHalbwertszeit, die eine Reaktion 1. Ordnung und somit die hier verwendete FOD-Methode kennzeichnet,

entspricht der Zeit, die für die Zersetzung des abbaubaren organischen Kohlenstoffs im Abfall ($DDOC_m$) auf die Hälfte seiner Ausgangsmasse benötig wird. Der mathematische Zusammenhang zwischen der Halbwertszeit und der Abbaurate ist in folgender Gleichung dargestellt.

Gleichung 99: (2006 IPCC Guidelines)

$$k = ln\,2 / t_{1/2}$$

Neue Untersuchungen und Auswertungen führten dazu, dass mit der Berichterstattung 2023 die Halbwertszeiten und resultierenden k-Werte für die Fraktion Papier / Pappe und Holz angepasst wurden (Stegmann et al., 2023), Kap. 8.3, S. 145). So wurde die Fraktion Papier in der Deponie in der Regel deutlich schneller biologisch abgebaut als es die Default-Halbwertszeit von 12 Jahren wiedergibt. Zahlreiche Untersuchungen an Deponien in Deutschland haben bestätigt, dass im Deponiekörper sehr viel weniger Papier vorhanden ist, als bei Annahme einer Halbwertszeit von 12 Jahren rechnerisch ermittelt. Zur Anpassung an die festgestellten Bedingungen im Deponiekörper wurde die Halbwertszeit für Papier von 12 auf 7 Jahre reduziert, was eine Veränderung des k-Werts von 0,058 auf 0,099 bedeutet (Stegmann et al., 2023).

Erkundungsbohrungen und Schürfe auf Deponien wie auch Laboruntersuchungen haben gezeigt, dass die Holzfraktion unter anaeroben Bedingungen kaum abgebaut wird, zumal wenn es sich um grob stückige Holzbestandteile handelt, die für die Mikroorganismen nicht zugänglich sind. Der biologische Abbau erstreckt sich nach den vorliegenden Ergebnissen wie auch ergänzenden Laboruntersuchungen zudem über einen deutlich längeren Zeitraum, als es mit der bisher angesetzten Halbwertszeit von 23 Jahren prognostiziert wurde. Holz ist - wenn überhaupt - unter anaeroben Milieubedingungen nur sehr langsam abbaubar. Daher wurde die Halbwertszeit von 23 auf 50 Jahre erhöht, was einer Veränderung des k-Werts von 0,030 auf 0,014 entspricht (Stegmann et al., 2023).

Zur Berechnung werden für Organik (Nahrungsmittelabfälle), Garten-/Parkabfälle, Textilien/Windeln und Klärschlamm über die gesamte Zeitreihe die IPCC-Default-Werte genutzt. Für Verbundstoffe und Abfälle aus der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung (MBA) werden nationale Werte angewandt, da die Guidelines keine Default Werte enthalten. Forschungsvorhaben (Stegmann et al., 2023) bestätigen diese nationalen Werte. Wegen mathematischer Ungenauigkeiten zwischen Halbwertzeiten und k-Werten (bei Organik und Klärschlamm) der IPCC-Richtlinien (sowohl 2006 als auch 2019 Refinements) begründen sich geringe Unterschiede zwischen einer Berechnung der Methanbildung auf Basis von k-Werten und Halbwertzeiten - die deutsche Vorgehensweise wurde im ARR 2022 als korrekt bestätigt.

Tabelle 434: Halbwertszeiten und Abbauraten der Abfallfraktionen

	Halbwertszeit (Jahre)			Abbaurate (k-Wert))		
	IPCC Default*	nationaler Wert		IPCC Default*	nationaler Wert	
		bis NIR 2022	ab NIR 2023		bis NIR 2022	ab NIR 2023
Organik	4	**4**		0.185	**0,173**	
Garten-/Parkabfälle	7	**7**		0,1	**0,099**	
Papier / Pappe	12	12	**7**	0,06	0,058	**0,099**
Holz	23	23	**50**	0,030	0,030	**0,013**
Textilien / Windeln	12	**12**		0,06	**0,058**	
Verbundstoffe	--	**12**		---	**0,058**	

	Halbwertszeit (Jahre)		Abbaurate (k-Wert))	
Klärschlamm	4	**4**	0,185	**0,173**
MBA-Abfälle	--	**12**	--	**0,058**

* für gemäßigte, feuchte Klimazone

7.2.1.2.8 Deponiegasnutzung

Mit der TA Siedlungsabfall von 1993[99] wurde die Gasfassung auf den Siedlungsabfalldeponien Teil der Genehmigungsvoraussetzung. In der Neufassung des Umweltstatistikgesetzes von 2005 wurde verankert, dass das Statistische Bundesamt künftig die Deponiegaserfassung in seinen Umfragen berücksichtigt und veröffentlicht. Für die Jahre 2004, 2006 und 2008 wurden in der Fachserie 19 vom 12.07.2012 nur Daten zur Deponiegasfassung und -nutzung auf Deponien in der Ablagerungs- und Stilllegungsphase veröffentlicht. Daten zur Gasfassung für den gesamten Deponiebestand (mit Ausnahme der Altablagerungen; diese sind über das Bundes-Bodenschutzgesetz geregelt), d.h. einschließlich der Deponien in der Nachsorgephase wurden erstmals für das Jahr 2010 erhoben. Für die Berechnung der gefassten Deponiegasmengen werden vom Statistischen Bundesamt das gefasste Deponiegasvolumen und der Methananteil in Vol.-% erhoben. Aus diesen Daten werden die gefassten Methangasmengen für die Klimaberichterstattung im NIR berechnet.

In den letzten Jahren sind die Methankonzentrationen im gefassten Deponiegas (Tabelle 435) rückläufig. Dieser Rückgang ist vermutlich auf Oxidationseffekte im Deponiekörper zurückzuführen, die durch das Einsaugen von Luftsauerstoff bei der Entgasung verursacht werden. Daneben führt auch das unbeabsichtigte Einsaugen von Luftstickstoff zu einer Verdünnung des abgesaugten Gasstroms. Diese beiden Effekte verstärken sich mit rückläufiger Gasbildung zunehmend.

Tabelle 435: Anteil von Methan am gefassten Deponiegas

	2006	2008	2010	2012	2014	2016	2018	2020	2022
Ablagerungs- und Stillegungsphase	50 %	49 %	48 %	48 %	47 %	45 %	42 %	41%	39%
Nachsorgephase	k.A.	k.A.	42 %	40 %	38 %	32 %	32 %	32%	27%

Quelle: (Statistisches Bundesamt, 2-Jährig)

In Deutschland müssen Deponiebetreiber aufgrund der Monitoring-Anforderungen der Deponieverordnung die gefassten Deponiegasmengen und die Methangehalte im Deponiegas messen und in Jahresberichten dokumentieren. Entsprechende Daten werden vom Statistischen Bundesamt auf Grundlage des Umweltstatistikgesetzes alle zwei Jahre erhoben.
Aus diesem Grund ist - zumindest seit 2010 - keine Rückrechnung des gefassten Deponiegases aus Energiedaten notwendig.

Bis einschließlich 2010 wurden bei der Ermittlung der gesamten gefassten Deponiegasmengen - aufgrund der oben beschriebenen Datenlücken - Daten aus dem Energiesektor und der Fachserie 19 zusammengeführt.

Die in Tabelle 436 gelisteten gefassten Methanmengen beinhalten die energetisch genutzten und die abgefackelten Deponiegasmengen.

[99] Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von >Siedlungsabfälle (Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz) vom 14. Mai 1993

Tabelle 436: Methanfassung auf Deponien, in Kilotonnen [kt]

	Methanbildung	GEFASSTE METHANMENGE			Erfassungsrate in %
		Ablagerungs- u. Stilllegungsphase	Nachsorgephase	Gesamtmenge	
1990	1567			91	5,8
1991	1662			101	6,1
1992	1709			111	6,5
1993	1714			120	7,0
1994	1685			129	7,7
1995	1640			138	8,4
1996	1581			150	9,5
1997	1507			206	13,6
1998	1423			221	15,5
1999	1343			222	16,6
2000	1265			223	17,6
2001	1183			221	18,7
2002	1109			218	19,7
2003	1035			215	20,8
2004	965	236	11	247	25,6
2005	897			247	27,6
2006	818	231	11	242	29,6
2007	735			220	30,0
2008	662	190	11	201	30,4
2009	597			191	32,0
2010	539	171	11	181	33,6
2011	487			167	34,3
2012	441	140	14	154	35,0
2013	401			143	35,9
2014	364	121	13	134	36,8
2015	332			126	37,9
2016	303	107	11	118	39,0
2017	277			107	38,6
2018	253	85	12	97	38,2
2019	232			96	41,4
2020	213	84	11	95	44,6
2021	196			89	45,6
2022	181	72	12	84	46,6
2023	167			79	47,6
2024	154	-	-	75	48,6

Quelle: (Statistisches Bundesamt, jährlich - FS 19, R. 1)

Da nur für einzelne Jahre offizielle statistische Daten vorliegen, mussten Datenlücken durch Inter-/Extrapolation und qualifizierte Schätzungen geschlossen werden.

Für die Jahre bis einschließlich 1998 wurden prozentuale Gaserfassungsraten aus früheren Schätzungen weiter verwendet (Quellen und Datenherleitung siehe NIR (UBA et al., 2012)) und

die gefasste Methanmenge aus der Methanbildung und der jeweiligen prozentualen Erfassungsrate berechnet.

Für die Jahre 1999 bis 2003 wurden die prozentualen Erfassungsraten zwischen den Werten aus 1998 (alter Ansatz) und 2004 interpoliert. Die gefasste Methanmenge wurde aus der gesamten Methanbildung und der jeweiligen prozentualen Erfassungsrate berechnet.

Für die Jahre 2004, 2006 und 2008 liegen Daten des Statistischen Bundesamts nur für Stilllegungsphase vor. Für die Ermittlung der gesamten gefassten Methanmengen aller Deponien wurden die für 2010 ermittelten Methanmengen aus Deponien der Nachsorgephase zu den Jahreswerten der Ablagerungs- und Stilllegungsphase für 2004, 2006 und 2008 addiert.

Für die geraden Jahre ab 2010 liegen vollständige Daten des Statistischen Bundesamtes für die Deponiegasfassung aller Deponien vor. Da die Datenerhebung durch das Statistische Bundesamt nur in jedem zweiten Jahr erfolgt, wurden die prozentualen Deponiegaserfassungsraten zwischen dem vorhergehenden und dem nachfolgenden Jahr interpoliert und die gefassten Gasmengen aus der Gasbildung und der prozentualen Erfassungsrate berechnet. Für das jeweils aktuelle Jahr wird die prozentuale Erfassungsrate aus den letzten beiden Vorjahren in der Regel extrapoliert. Sobald die zugrundeliegende Statistik aktualisiert wurde, wird der Wert rekalkuliert.

7.2.1.2.9 Fackeln

Im Jahr 2022 wurden mit dem Deponiegas 84 Gg Methan erfasst, von denen ein nicht für die energetische Nutzung geeigneter Anteil von rd 27 Gg in Fackeln verbrannt wurde. Für Deponiegasfackeln gelten in Deutschland über die TA-Luft aber sehr strenge Anforderungen: Verbrennung in einer isolierten Hochtemperaturfackel, Verweilzeit mindestens 0,3 Sekunden bei einer Verbrennungstemperatur von über 1000°C. Deponiegasfackeln erreichen daher einen sehr hohen Ausbrand und weisen entsprechend geringe Methanemissionen auf. Die Hersteller garantieren für diese Fackeln einen Ausbrand von über 99,9 %. Nach Einschätzung von Experten des Umweltbundesamtes ist aufgrund der hohen Temperaturen die Bildung von N_2O im Verbrennungsprozess nicht zu erwarten, die Emission von Stickstoff erfolgt unter diesen Reaktionsbedingungen als NO und NO2.

Da die Treibhausgas-Emissionen aus der Kategorie Deponiegas-Fackeln in 5.A weniger als 0,05 % des Gesamtinventars (ohne LULUCF) darstellen, 500 kt CO2-Äquivalente nicht überschreiten (Erfassungsuntergrenzen gemäß FCCC/SBSTA/2013/L.29/Add.1) und eine jährliche Erfassung nicht gewährleistet werden kann (gemäß FCCC/SBSTA/2013/L.29/Add.1, para 37), wird auf eine entsprechende Berichterstattung verzichtet (IPCC, 2006a). Eine einmalig durchgeführte quantitative Abschätzung der somit nicht im Inventar berücksichtigten Emissionen aus Deponiegas-Fackeln ergibt eine Menge von etwa 0,75 kt CO_2-äquivalent. Eine Zusammenstellung aller als not estimated erfasster Quellen erfolgt darüber hinaus in Kapitel 1.7.2 dieses Berichtes.

7.2.1.2.10 Oxidationsfaktor

Für den Faktor zur Bestimmung des Anteils an CH_4, der in der Deponiedeckschicht oxidiert wird, wurde der IPCC-Default-Wert von 0,1 für die gesamte Zeitreihe angenommen. Der IPCC-Default-Wert für den Oxidationsfaktor wird von den Experten des Umweltbundesamtes in seiner Größenordnung als realistisch beurteilt.

7.2.1.2.11 Methanemissionen

Die Methanemissionen aus Deponien sind in Deutschland seit den frühen 1990er Jahren stark rückläufig. Verwertbare Abfälle mussten zunehmend getrennt erfasst und nicht verwertbare

Restabfälle vor der Ablagerung thermisch oder mechanisch-biologisch behandelt werden. Aus diesem Grund hat sich die Ablagerung biologisch abbaubarer Abfälle kontinuierlich verringert; seit 2005 ist die Ablagerung dieser Abfälle nicht mehr zulässig.

7.2.1.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (5.A.1)

Über den langen Zeitraum von dreißig Jahren der Aktivitätsdaten entstehen zwangsläufig Inkonsistenzen der Zeitreihen, da im Laufe der Zeit mehrfach die Abfallkategorien und die Art der Befragung verändert wurde, weil die Gesetzgebung und die Abfallstatistik weiterentwickelt wurden. In Deutschland ergeben sich besondere Probleme vor allem durch die deutsche Wiedervereinigung und die Zusammenführung zweier verschiedener Wirtschafts- und statistischer Systeme. Daher mussten mit erheblichem Aufwand die Konsistenz der Daten und die Zuordnung zu den berichteten Kategorien überprüft werden, um einen möglichst konsistenten Zeitverlauf zu erhalten.

Unsicherheiten der gewählten Parameter zur Methanbildung

Aufgrund der umfangreichen länderspezifischen Auswertungen und der Anpassung der Parameter zur Methanbildung können die Unsicherheiten bezüglich der Gasbildung wie folgt abgeschätzt werden (Stegmann et al., 2023) , Kap. 9, S. 183):

- Unsicherheiten bezüglich DOC_f:
- ±20 % bei Default-Werten, ±10 % nach Anpassung der Werte
- Unsicherheiten bezüglich Methanbildungspotenzial DDOCM
- ±20 % bei Default-Werten, bis -40 % bei Holz, in Abhängigkeit der Holzart
- Unsicherheiten bezüglich MCF = 1 für die BRD nach 1972 und für das gesamte Bundesgebiet ab 1990: -38 %, +0 %
- Unsicherheiten bezüglich MCF = 0,6 für die BRD bis 1972 und für das gesamte Bundesgebiet bis 1989: ±25 %
- Unsicherheiten bezüglich Anteil Methan im Deponiegas F = 0,5: +30 %, -0 %
- Unsicherheiten bezüglich k-Wert:
  - Organik (food waste) sowie Klärschlamm (sewage sludge): +25 %, -0 %
  - Papier und Pappe (paper): +45 %, -0 %
  - Holz und Stroh (wood and straw): +45 %, -0 %
  - Textilien (textiles), Windeln (disposable nappies), Verbundmaterialien: +40 %, -0 %

Nach qualifizierter Schätzung des Experten des Umweltbundesamtes liegen die Unsicherheiten für die Gesamtemissionen von Methan aus Deponien bei ±20 %.

7.2.1.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (5.A.1)

Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Zur Verifizierung der Ergebnisse wurden die im GHG-Locator abgeleiteten impliziten Emissionsfaktoren (IEF) mit den Daten anderer Staaten verglichen. Im Ergebnis hat Deutschland

in der Berichterstattung 2022 mit 0,47 den zweithöchsten Wert im internationalen Vergleich. Dieser vergleichsweise hohe Wert erklärt sich durch die seit den 1990er Jahren stark rückläufigen abgelagerten Abfallmengen mit biologisch abbaubaren Anteilen und einer Gasbildung, die nahezu vollständig aus Abfällen erfolgt die vor 2005 auf Deponien abgelagert wurden (siehe Kapitel 7.2.1.2.2).

International ist die Ablagerung von biologisch abbaubaren Abfällen noch weitverbreitet. Eine mit Deutschland vergleichbare Veringerung der Ablagerung biologisch abbaubarer Abfälle erfolgte nur in sehr wenigen Ländern. Österreich und die Schweiz haben zeitgleich mit Deutschland ähnliche abfallrechtliche Anforderungen für Deponien erlassen. Österreich und Japan stehen im IEF-Vergleich dementsprechend an dritter bzw. vierter Stelle und weisen mit 0,28 bzw. 0,20 einen im Verhältnis ähnlich hohen Wert wie Deutschland auf.

7.2.1.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (5.A.1)

Regelmäßige Rückrechnungen sind jährlich für das vorvergangene Jahr erforderlich, da die Abfallstatistik des Statistischen Bundesamtes mit einem Jahr Verzug für die Daten für die abgelagerten Abfallmengen und -zusammensetzungen erscheint und Daten zu den gefassten Deponiegasmengen im zweijährigen Abstand erhoben werden, so dass das aktuelle Berichtsjahr deshalb geschätzt werden muss. Die Schätzung wird im jeweils folgenden Jahr mit den dann aktuellen Daten ersetzt.

Tabelle 437: Rekalkulation: Methan-Bildung in Deponien [kt]

Jahr	2023
NID 2026	166,857
NID 2025	166,839

Tabelle 438: Rekalkulierte Methan-Emissionen aus Deponien, in Kilotonnen [kt]

Jahr	2023
NID 2026	78,710
NID 2025	80,183

7.2.1.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (5.A.1)

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet. Darüber hinaus sind keine Verbesserungen geplant.

7.3 Biologische Abfallbehandlung (5.B)

In der Kategorie 5.B werden die Emissionen aus Kompostierungsanlagen (5.B.1) und aus der Vergärung von Bioabfall in Biogasanlagen (5.B.2) berichtet. Beide Anlagentypen in der Kategorie 5.B behandeln getrennt gesammelte Bioabfälle und stellen Kompost oder Gärrest her, der anschließend in der Landwirtschaft oder im Gartenbau verwertet wird. Dies ist der Unterschied zur mechanisch-biologischen Behandlung in der Kategorie 5.E. Diese Anlagen setzen gemischte Siedlungsabfälle (Restabfälle) ein. Die Rückstände aus diesen Anlagen werden deponiert oder verbrannt.

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
-/T	5 B, Biological Treatment of Solid Waste		CH_4	59,39	0,01	918,33	0,13	1446,32
-/-/2	5 B, Biological Treatment of Solid Waste		N_2O	19,67	0,01	194,29	0,03	887,61

Die Kategorie „Biologische Abfallbehandlung“ ist eine Hauptkategorie für CH_4-Emissionen nach dem Trend sowie für N_2O-Emissionen nach der Methode-2-Trend-Analyse.

7.3.1 Kompostierungsanlagen (5.B.1)

7.3.1.1 Beschreibung der Kategorie (5.B.1)

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CH_4	Tier 2	NS	CS
N_2O	Tier 2	NS	CS

In der Bundesrepublik werden biologisch abbaubare Abfälle getrennt gesammelt und behandelt. Die unter 5.B.1 berichteten Emissionen stammen aus Kompostierungsanlagen, die vor allem getrennt gesammelte Bioabfälle aus Haushalten sowie Garten und Parkabfälle kompostieren. Komposte, die aus diesen Abfällen erzeugt werden, werden anschließend in der Landwirtschaft oder im Gartenbau verwertet.

Neben der zentralen Kompostierung von getrennt gesammelten Bioabfällen gibt es auch die private Kompostierung im eigenen Garten (Eigenkompostierung). Hierzu liegen jedoch weder belastbare Daten zu den Mengen noch zu den verursachten Emissionen vor. Daher wird über diese Emissionen nicht berichtet.

7.3.1.2 Methodische Aspekte (5.B.1)

Über Lachgas- und Methanemissionen aus der Kompostierung von Küchen- und Grünabfällen wird gemäß den IPCC Guidelines 2006 (IPCC, 2006a) berichtet. Allerdings werden eigene nationale Emissionsfaktoren verwendet, die Ergebnisse eines Forschungsprojektes (Cuhls et al., 2015) sind.

Die Berechnung der Methan- und Lachgasemissionen erfolgt nach folgender Formel:

$$E = M * EF$$

- E = Emissionen in kg
- M = Masse Bioabfall [kt]
- EF = Emissionsfaktor [kg/kt]

Aktivitätsdaten

Die in Kompostierungsanlagen verwerteten Abfallmengen werden seit 1980 in unterschiedlicher Form vom Statistischen Bundesamt erhoben und veröffentlicht ((Statistisches

Bundesamt, 2-Jährig), GENESIS-Online, Tabelle 32111-0003)[100]. Hierfür findet eine Totalerhebung bei den Abfallbehandlungsanlagen statt. Zur Berechnung der in Kompostierungsanlagen behandelten Bioabfälle werden die Abfallmengen der Zeilen „Bioabfallkompostierungsanlagen", „Grünabfallkompostierungsanlagen" und Klärschlammkompostierungsanlagen" addiert. Zusätzlich wird der Anteil der in „sonstigen biologischen Behandlungsanlagen" kompostiert wird errechnet und hinzuaddiert. Für diese Berechnung wird der prozentuale Anteil der in diesen Anlagen erzeugten Komposte am Gesamtoutput der „sonstigen biologischen Behandlungsanlagen" (Komposte und Gärrückstände) aus Tabelle 7.3 (Statistisches Bundesamt, direkte Datenübermittlung) herangezogen und auf die eingesetzte Abfallmenge angewendet.

In den Jahren 1990 bis 2005 erfolgte die statistische Erfassung der Abfallmengen weniger detailliert als heute, nicht immer in derselben Art und Weise und in unterschiedlichen jährlichen Abständen. Aus diesem Grund mussten einzelne Werte teilweise unterschiedlich interpoliert bzw. in die Vergangenheit extrapoliert werden.

Die Aktivitätsdaten für das aktuelle Berichtsjahr müssen geschätzt werden, da die offizielle Abfallstatistik mit zwei Jahren Verzug erscheint. Aus diesem Grund wird die gesamte in Kompostierungsanlagen eingesetzte Abfallmenge auf Basis des Trends vorhergehender Jahre extrapoliert und im jeweils folgenden Jahr durch die statistisch erhobene Zahl ersetzt. Rückrechnungen sind daher jährlich erforderlich. Im Vorfeld der Entscheidung für dieses Vorgehen wurde auch untersucht, wie sich diese Extrapolationsmethode auswirkt, wenn sie bei jeder Behandlungsanlagenart getrennt durchgeführt wird. Im Ergebnis kann es hier aufgrund unklarer Trendverläufe zu teilweise starken Schwankungen der berechneten Aktivitätsdaten kommen, die fachlich als nicht valide eingestuft werden. Wird hingegen nur die addierte Abfallmenge extrapoliert, erzeugt dies einen Wert, der nach Experteneinschätzung, aller Voraussicht nach, näher am erwartbaren zukünftigen Wert liegt.

Emissionsfaktoren

Für die Kompostierung von Bioabfällen wurden im Rahmen eines Forschungsprojektes Emissionsfaktoren ermittelt (Cuhls et al., 2015). Im Rahmen dieses Projektes wurden sowohl für Methan als auch für Lachgas und Ammoniak Emissionsmessungen an 19 Kompostierungsanlagen durchgeführt. Aus den Messergebnissen und den Ergebnissen von Literaturrecherchen wurden aggregierte Emissionsfaktoren für den Anlagenbestand in Deutschland abgeleitet. Diese berücksichtigen sowohl die verschiedenen in Deutschland verwendeten Anlagentechniken als auch die unterschiedlichen als Einsatzstoffe verwendeten Bioabfälle. Bei einzelnen Anlagen gab es sehr hohe Emissionsmesswerte, die zu einem sehr hohen Mittelwert führten. An den meisten Anlagen gab es mehrere Messphasen, um unterschiedliche athmospärische/meteorolgische Bedingungen (Sommer/Winter) zu berücksichtigen bzw. als Ursache für besonders hohe oder niedrige Werte ausschließen zu können. Im Rahmen eines Peer-Reviews (Forschungsnehmer, UBA, Fachexperten) wurden die sehr hohen Werte schließlich als Ausreißer identifiziert und als nicht repräsentativ eingestuft. Aus diesem Grund wurde zusammen mit dem Forschungsnehmer (Cuhls et al.) beschlossen, die Medianwerte als Emissionsfaktoren zu verwenden. In die Ableitung der Medianwerte gingen alle gemessenen Emissionswerte ein. Die EF selbst wurden abgeleitet, indem zunächst EFs für jede Behandlungstechnologie ermittelt wurden. Anschließend wurde jede Behandlungstechnologie in Abhängigkeit von der Menge der Abfälle, die in den zugehörigen Anlagen in Deutschland behandelt werden, gewichtet (Cuhls et al., 2015) und die verschiedenen EF mit Hilfe der

[100] https://www-genesis.destatis.de/genesis//online?operation=table&code=32111-0003&bypass=true&levelindex=0&levelid=1630573034654#abreadcrumb

ermittelten Gewichtungsfaktoren zu den aktuell verwendeten EF zusammengefasst. Die folgende Tabelle aus (Cuhls et al., 2015) zeigt die Anteile der verschiedenen Behandlungstechniken bei der Bioabfallverwertung in Deutschland.

Tabelle 439: Anteile der verschiedenen Behandlungstechniken bei der Bioabfallverwertung in Deutschland

Technique:	KOA g	KOA g	KOA tg	KOA sM	KOA o	KOA o	VA	VA + NR g	VA + NR o	Summe
Input:	Bio + Grün	Bio + Grün	Bio + Grün	Bio + Grün	Bio + Grün	Grün	Bio + Grün	Bio + Grün	Bio + Grün	
Produkte:	FrischK	FertigK	FertigK	FertigK	FertigK	FertigK	Gärprod.	Gärprod. FertigK	Gärprod. FertigK	
	Mio. Mg/a	Mio. Mg/a	Mio. Mg/a	Mio. Mg/a	Mio. Mg/a	Mio. Mg/a	Mio. Mg/a	Mio. Mg/a	Mio. Mg/a	Mio. Mg/a
Amount of waste	2,00	0,95	0,63	0,13	1,47	2,40	0,17	0,60	0,26	8,61
Share	23,2 %	11,0 %	7,3 %	1,5 %	17,1 %	27,9 %	2,0 %	7,0 %	3,0 %	100 %
Verwertete Abfälle	Summe KOA: 7,58						Summe VA: 1,03			KOA + VA 8,61
Anteil an Summe	88 %						12 %			100 %
Products	1,20	0,38	0,25	0,06	0,59	1,20	0,17	0,24	0,10	4,19
Share	28,6 %	9,0 %	6,0 %	1,4 %	14,1 %	28,7 %	4,1 %	5,7 %	2,4 %	100 %

Quelle: Jährliche Mengen verwerteter Bio- und Grünabfälle sowie erzeugter Kompost- und Gärprodukte in Mio. Mg, jeweils bezogen auf das Input-Material im Anlieferzustand ((Cuhls et al., 2015); Tabelle 5-1, S. 75)
Die Abkürzungen haben folgende Bedeutungen:
KOAg = composting plant closed (in vessel)
KOAo = composting plant open
KOAtg = composting plant partly closed
KOAsM = composting plant with semipermeable membrane
VA = digestion plant
VA + NRg = digestion plant with closed post composting of the digestate
VA + NRo = digestion plant with open post composting of the digestate
Input Bio = biowaste from households
Input Grün = green waste
FrischK = fresh compost
FertigK = mature compost
Gärprod. = digestate
Gärprod. FertigK = post composted digestate

In der folgenden Tabelle sind die verschiedenen Kompostierungstechniken mit ihren durchschnittlichen Emissionsfaktoren dargestel

Tabelle 440: Vergleich der durchschnittlichen Emissionsfaktoren verschiedener Kompostierungstechniken

	Emissionsfaktoren					CO_2-Äq.
	Ges.-C g/Mg	CH_4 g/Mg	NMVOC g/Mg	NH_3 g/Mg	N_2O g/Mg	(AR4) kg/Mg
[1] Anlieferung und Aufbereitung (Anl + Aufb)						
Wertebereich (Min - Max)	47 - 290	18 - 240	34 - 150	3,8 - 7,4	1,4 - 31	0,86 - 15
Mittelwert	170	140	86	5,6	14	7,6

	Emissionsfaktoren					CO_2-Äq. (AR4)
	Ges.-C g/Mg	CH_4 g/Mg	NMVOC g/Mg	NH_3 g/Mg	N_2O g/Mg	kg/Mg
Median	170	150	78	5,6	12	7,1
Anzahl der Beispielanlagen	2	2	2	1	2	2
Anzahl der Messphasen	4	4	4	2	4	4
[2] Geschlossene Kompostierungsanlagen (Frischkompost) (KOA g (FrischK))						
Wertebereich (Min - Max)	110 - 1.200	150 - 1.500	2,5 - 110	15 - 120	18 - 200	9,2 - 88
Mittelwert	470	630	49	60	87	42
Median	440	450	56	42	79	35
Anzahl der Beispielanlagen	4	4	4	3	4	4
Anzahl der Messphasen	7	7	7	5	7	7
[3] Geschlossene Kompostierungsanlagen (Fertigkompost) (KOA g (FertigK))						
Wertebereich (Min - Max)	30 - 9.300	50 - 11.000	0,65 - 1.100	3,4 - 93	7,7 - 300	5,6 - 360
Mittelwert	2.300	2.500	390	32	77	86
Median	690	790	95	15	41	36
Anzahl der Beispielanlagen	3	3	3	3	3	3
Anzahl der Messphasen	6	6	6	4	6	6
[4] Teilgeschlossene Kompostierungsanlagen (Fertigkompost) (KOA tg (FertigK))						
Wertebereich (Min - Max)	720 - 4.400	830 - 4.800	100 - 750	16 - 61	43 - 150	38 - 170
Mittelwert	2.800	3.000	470	38	92	100
Median	1.000	1.200	140	23	62	54
Anzahl der Beispielanlagen	4	4	4	3	4	4
Anzahl der Messphasen	7	7	7	5	7	7
[5] Kompostierungsanlagen mit semipermeablen Membranen (KOA sM)						
Wertebereich (Min - Max)	250 - 770	200 - 500	100 - 400	5 - 50	10 - 50	8,0 - 27
Mittelwert	530	300	300	10	16	12
Median	530	300	300	10	16	12
Anzahl der Beispielanlagen	1	1	1	1	1	1
Anzahl der Messphasen	1	1	1	1	1	1
[6] Offene Kompostierungsanlagen mit Bio- und Grünabfallverwertung (KOA o (Bio+Grün))						
Wertebereich (Min - Max)	740 - 4.800	730 - 5.500	190 - 690	12 - 1.400	2,1 - 270	30 - 150
Mittelwert	2.400	2.700	370	450	79	91
Median	1.700	1.800	370	370	53	97
Anzahl der Beispielanlagen	5	5	5	5	5	5
Anzahl der Messphasen	11	11	11	11	11	11
[7] Offene Kompostierungsanlagen mit Grünabfallverwertung (KOA o (Grün)						
Wertebereich (Min - Max)	610 - 9.500	540 - 12.000	200 - 500	1,1 - 340	17 - 60	19 - 300
Mittelwert	3.700	4.300	490	170	31	120
Median	2.300	2.400	490	170	24	73
Anzahl der Beispielanlagen	4	4	4	3	4	4
Anzahl der Messphasen	4	4	4	3	4	4

Quelle: Ableitung von Emissionsfaktoren und Ermittlung der CO2-Äquivalente für Vergärungsanlagen in Abhängigkeit von der eingesetzten Behandlungstechnik - Emissionsfaktoren während des Behandlungsprozesses ((Cuhls et al., 2015); Tabelle 5-2, S. 81)

Für die Kompostierung von Bioabfall wurden die folgenden Emissionsfaktoren ermittelt (Cuhls et al., 2015), S. 136, english version page 142):

$EF\text{-}CH_4$ = 1.400 g CH_4/t Bioabfall

$EF\text{-}N_2O$ = 49 g N_2O/t Bioabfall

Hierbei ist anzumerken, dass ein weiteres Ergebniss der Studie ist, dass der Gehalt an C und N im Bioabfall keine relevante Rolle für die Emissionen von CH_4 und N_2O spielt. Zu Beginn der Studie wurden Garten- und Küchenabfälle aufgrund des unterschiedlichen Gehalts an C und N getrennt betrachtet. Die Studie zeigte jedoch, dass beide keine relevanten Faktoren sind. Wichtigste Treiber für die Emissionen sind die Behandlungsbedingungen in der Kompostieranlage. Für die Bildung von CH_4 und N_2O während des Kompostierungsprozesses sind die Belüftung und die Temperatur die Schlüsselfaktoren und der Feuchtigkeitsgehalt spielt eine Rolle. Im Forschungsprojekt wird daher folgerichtig nicht zwischen den verschiedenen Abfallarten, sondern zwischen den verschiedenen Behandlungstechnologien unterschieden. In einfachen Kompostieranlagen ohne intensivierter Belüftung findet aufgrund des hohen Feuchtigkeitsgehalts und des geringen Gehalts an strukturgebenden Bestandteilen keine alleinige Behandlung von Küchenabfällen statt. In diesen Anlagen werden meist Grünabfälle (aus Gärten und Parks) oder eine Mischung mit geringem Anteil an Küchenabfällen kompostiert. Küchenabfälle hingegen werden meist in geschlossenen Anlagen mit Zwangsbelüftung kompostiert.

Nach einer Umstellung im Rahmen der Berichterstattung 2023 sind in den nationalen Emissionsfaktoren nur noch die Emissionen aus der Behandlung in den Kompostierungsanlagen enthalten. Die Emissionen, die bei der Ausbringung der Komposte auftreten, werden seit dieser Umstellung in der Kategorie 3.D.a.2.c bzw. 3.D.b berichtet. Diese Änderung geht auf das Reviewergebnis A.8 (Table 5, ARR 2020) zurück, dass zu mehreren Fachgesprächen zwischen den zuständigen Experten aus der Landwirtschaft und der Kompostierung geführt hat. In deren Ergebnis wurde beschlossen, dass die Emissionen aus der Ausbringung des Kompostes aus fachlichen Gesichtspunkten in der Landwirtschaft zu berichten sind und nicht bei der Kompostierung. Der Emissionsfaktor für Methan ändert sich durch diese Umstellung nicht, da die Methanemissionen während und nach der Ausbringung des Kompostes generell vernachlässigbar sind. Der neue Emissionsfaktor für Lachgas gilt, wie oben beschrieben, nur für die Behandlung und reduziert sich dadurch deutlich gegenüber dem bisher verwendeten Faktor, der auch die Ausbringung der Komposte umfasste. Emisionen aus der Lagerung der Komposte auf dem Gelände der Behandlungsanlage sind in den hier verwendeten Emissionsfaktoren enthalten.

Nach Cuhls et al. liegt der N_2O-Emissionsfaktor für die Kompostierung von Bioabfällen bei 49 g N_2O/t Bioabfall und damit leicht unterhalb der Spanne des IPCC-Defaultfaktors von 60 - 600 g. Der IPCC-Defaultfaktor für die Kompostierung liegt bei 300 g N2O/t Bioabfall (Vol. 5, Kap. 4.1.3.1).

7.3.1.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (5.B.1)

Aktivitätsdaten

Die Unsicherheiten bei den kompostierten Abfallmengen werden als sehr gering (2 %) geschätzt, da es sich um eine Totalerhebung handelt.

Emissionsfaktoren

Die Unsicherheiten der Emissionsfaktoren sind hoch und hängen von der Art der Anlage der Zusammensetzung der Abfälle und der Wirkung der eingesetzten Biofilter ab. Die Angaben aus der Literatur und aus anderen Staaten schwanken sehr stark. Zur Bestimmung der Unsicherheiten wurden die Ergebnisse des o.g. Forschungsprojektes als Grundlage genutzt ((Cuhls et al., 2015) S. 120) aus denen eine Lognormal-Verteilung der Messergebnisse abgeleitet werden kann. Für CH_4 wurde eine Unsicherheit von +272 % bis -87 % und für N_2O von +123,5 % bis -64 % ermittelt.

7.3.1.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (5.B.1)

Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Für die Aktivitätsdaten werden Zahlen aus der Abfallstatistik des Bundes verwendet. Umfassendere oder genauere Daten sind nicht verfügbar.

Bei den Emissionsfaktoren wurde neben den durchgeführten Messungen auch eine Auswertung der vorhandenen Literatur durchgeführt und ist in die Ermittlung der Emissionsfaktoren eingeflossen. Auch eine von (Oonk & Lambert, 2017) durchgeführte Literaturrecherche hat keine neueren Daten zu Emissionen von Bioabfallbehandlungsanlagen ergeben und die von Deutschland verwendeten Emisionsfaktoren bestätigt. Eine zur Emissionsberichterstattung 2025 durchgeführte Prüfung ergab das derzeit offenbar keine neueren Studien zu Emissionsfaktoren vorliegen.

Der verwendete Emissionsfaktor für Methan liegt mit 1,4 g CH_4/kg Abfall unter dem Defaultwert von 4 g, er liegt jedoch innerhalb der Bandbreite des letzteren von 0,03 bis 8 g CH_4/kg Abfall. Auch der verwendete Emissionsfaktor für Lachgas liegt mit 0,049 g N_2O/kg Abfall unter dem Defaultwert von 0,3 g und auch leicht unterhalb der Bandbreite des letzteren von 0,06 bis 0,6 g N_2O/kg Abfall. Ein wichtiger Grund für den niedrigen ermittelten Emissionsfaktor sind wahrscheinlich die hohen technischen Standards bei den Behandlungsanlagen in Deutschland (aktive Belüftung, Temperaturüberwachung und Steuerung, regelmäßiges Umsetzen der Mieten).

Aus demselben Grund liegt auch der IEF für CH_4 und N_2O deutlich im unteren Drittel der berichtenden Staaten (GHG Locator 2023). Der IEF für Methan liegt in vergleichbarer Größenordnung wie der Wert aus Italien und Österreich und über dem Wert von Belgien und den Niederlanden. Der IEF für Lachgas ist der niedrigste der berichtenden Länder – die Gründe hierfür wurden im vorhergehenden Absatz dargelegt.

Ein für die Berichterstattung 2022 durchgeführter Vergleich der verwendeten Emissionsfaktoren (siehe Tabelle 441) mit technologisch vergleichbaren Ländern (Österreich, Belgien, der Schweiz und Italien) zeigt, dass der deutsche CH_4-EF im Mittelfeld liegt. Für Lachgas liegt der EF etwas niedriger als der von Belgien und der Schweiz aber ebenfalls in der gleichen Größenordnung.

Tabelle 441: Vergleich der Emissionsfaktoren für die Kompostierung, in [g/t]

	Deutschland	Österreich	Belgien	Schweiz	Italien
Methan CH_4	1.400	1.820	750	1.840	1.630
Lachgas N_2O	49	250	100	90	600

Quelle: aktuelle Berichterstattung für Deutschland, für andere Länder Berichterstattung 2022 (UNFCCC, 2020)

7.3.1.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (5.B.1)

Bei der Erarbeitung der jeweils aktuellen Inventardaten liegen statistische Daten für die eingesetzten Abfallmengen immer nur für das vorhergehende Berichtsjahr vor, da die Abfallstatistik des Statistischen Bundesamtes mit zwei Jahren Verzug erscheint. Das aktuelle Berichtsjahr wird daher, wie oben bereits beschrieben extrapoliert. Diese Extrapolation wird im jeweils folgenden Jahr durch die dann statistisch erhobenen Daten ersetzt. Aus diesem Grund sind jährliche Rückrechnungen für das vorvergangene Jahr erforderlich. Die Menge der kompostierten Abfälle ist im Jahr 2023 geringfügig niedriger ausgefallen als im Vorjahr. Der Rückgang war jedoch nicht so stark wie in der vergangenen Berichterstattung geschätzt. Damit fallen auch die Emissionen 2023 etwas höher aus als im letzten Jahr berichtet. Gleichzeitig findet bedingt durch politische Maßnahmen eine zunehmende Verlagerung von Bioabfallmengen von der reinen Kompostierung hin zu einer Vergärung mit Biogasgewinnung statt. Dies hat zu Folge, dass durch das erhöhte Abfallaufkommen die Abfallmengen in der Bioabfallvergärung 5.B.2 im Jahr 2023 deutlich angestiegen sind.

Tabelle 442: Rückrechnungen in CRF 5.B.1 für das Jahr 2023

Bezeichnung	Einheit	Submission	2023
eingesetzte Abfallmengen in Kompostierungsanlagen (GESAMT)	[kt]	2026	8.115
		2025	7.948
CH_4-Emissionen	[t]	2026	11.361
		2025	11.128
N_2O-Emissionen	[t]	2026	398
		2025	389

7.3.1.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (5.B.1)

Derzeit sind keine Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4 Verbesserungen des Inventars, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

7.3.2 Vergärungsanlagen (5.B.2)

7.3.2.1 Beschreibung der Kategorie (5.B.2)

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CH_4	Tier 2	NS	CS
N_2O	Tier 2	NS	CS

In der Bundesrepublik werden biologisch abbaubare Abfälle getrennt gesammelt und behandelt. Die unter 5.B.2 berichteten Emissionen stammen aus Vergärungsanlagen die vor allem getrennt gesammelte Bioabfälle aus Haushalten, Speiseabfälle aus Kantinen und Restaurants sowie Bioabfälle aus der Lebensmittelproduktion und -verarbeitung vergären. Die Klärschlammfaulung ist nicht enthalten. In einigen Bioabfallvergärungsanlagen werden auch Wirtschaftsdünger (vor allem Gülle) eingesetzt. Diese Mengen werden bei den eingesetzten Abfällen aber herausgerechnet, da deren Emissionen bereits unter der CRF-Kategorie 3 B erfasst werden.

Die Vergärung wird gezielt zur Biogasgewinnung und damit zur Erzeugung eines Energieträgers betrieben (im Gegensatz zur Kompostierung). Aus diesem Grund wird ein Großteil des erzeugten Biogases gefasst und energetisch verwertet und nur ein geringer Teil abgefackelt. Beide Gasmengen werden direkt an den Anlagen gemessen und alle zwei Jahre statistisch erhoben. Die Ergebnisse sind in der jährlichen Abfallstatistik dargestellt (Statistisches Bundesamt, direkte Datenübermittlung, Tabelle 1.5). Die Methanemissionen aus der Verbrennung des Biogases zur Energiegewinnung werden im Energiesektor unter 1.A.1.a berichtet.

Die erzeugten Gärreste, werden anschließend in der Landwirtschaft oder im Gartenbau verwertet. Die Vergärung von Bioabfällen in Biogasanlagen wird erst seit 1999 statistisch erfasst (Statistisches Bundesamt, ebd.). Berichtet wird allerdings seit 1998, aufbauend auf einer Expertenschätzung, nach der die AR halb so groß wie 1999 war. In den Jahren davor war die Bioabfallvergärung im Prinzip vernachlässigbar und gewann seitdem an Bedeutung. Seit dem NIR 2015 wird daher in Übereinstimmung mit den 2006 IPCC Guidelines auch über die Bioabfallvergärung in Biogasanlagen berichtet.

7.3.2.2 Methodische Aspekte (5.B.2)

Über Lachgas- und Methanemissionen aus der Vergärung von Bioabfällen wird entsprechend den 2006 IPCC-Guidelines berichtet. Allerdings werden eigene nationale Emissionsfaktoren verwendet, die Ergebnisse eines Forschungsprojektes (Cuhls et al., 2015) sind.

Die Berechnung der Methan- und Lachgasemissionen erfolgt nach folgender Formel:

$$EM = M \times EF$$

Mit:

- EM = Emissionen in [kg]
- M = Masse Bioabfall [kt]
- EF = Emissionsfaktor [kg/kt]

Daneben wird die aus der Bioabfallvergärung stammende energetisch genutzte Gasmenge und die abgefackelte Gasmenge berichtet, die seit 2004 alle zwei Jahre direkt in der Abfallstatistik erfasst wird (Statistisches Bundesamt, direkte Datenübermittlung, Tabelle 1.5).

Aktivitätsdaten

Die in Bioabfallvergärungsanlagen verwerteten Abfallmengen werden seit 1999 regelmäßig vom Statistischen Bundesamt erhoben und jährlich in unterschiedlicher Form veröffentlicht ((Statistisches Bundesamt, 2-Jährig), GENESIS-Online, Tabelle 32111-0003)[101]. Hierfür findet eine Totalerhebung bei den Abfallbehandlungsanlagen statt. Zur Berechnung der in Vergärungsanlagen behandelten Bioabfälle werden derzeit die Abfallmengen der Zeilen „Biogas- und Vergärungsanlagen“ und „Kombinierte Kompostierungs- und Vergärungsanlagen“ addiert. Zusätzlich wird der Anteil an den „sonstigen biologischen Behandlungsanlagen“, der vergoren wird, errechnet und hinzuaddiert. Für diese Berechnung wird der prozentuale Anteil der in diesen Anlagen erzeugten Gärrückstände am Gesamt-output der „sonstigen biologischen

[101] https://www-genesis.destatis.de/genesis//online?operation=table&code=32111-0003&bypass=true&levelindex=0&levelid=1630573034654#abreadcrumb

Behandlungsanlagen“ (Komposte und Gärrückstände) aus Tabelle 7.3 (Statistisches Bundesamt, direkte Datenübermittlung) herangezogen und auf die eingesetzte Abfallmenge angewendet.

Von den gesamten in Bioabfallvergärungsanlagen eingesetzten Abfällen wird die Menge an Wirtschaftsdünger (vor allem Gülle), die in diese Anlagen geht, abgezogen, da diese bereits in der CRF-Kategorie 3B erfasst wird. Hierfür wird die in der Abfallstatistik unter dem Abfallschlüssel 020106 erfasste Menge von der Gesamtmenge abgezogen. Diese Vorgehensweise ist zur Vermeidung einer Doppelzählung mit den Verantwortlichen für Kategorie 3 abgestimmt.

In den Jahren 1990 bis 2005 erfolgte die statistische Erfassung der Abfallmengen weniger detailliert als heute, nicht immer in derselben Art und Weise und in unterschiedlichen jährlichen Abständen. Aus diesem Grund mussten einzelne Werte teilweise unterschiedlich interpoliert bzw. in die Vergangenheit extrapoliert werden.

Die Aktivitätsdaten für das aktuelle Berichtsjahr müssen geschätzt werden, da die offizielle Abfall-statistik mit zwei Jahren Verzug erscheint. Zur Abschätzung wird die gesamte Abfallmenge, die in Vergärungsanlagen behandelt wird, auf Basis des Trends vorhergehender Jahre extrapoliert und im jeweils folgenden Jahr durch die statistisch erhobene Zahl ersetzt. Ebenso wird mit der gewonnenen und der abgefackelten Gasmenge verfahren. Rückrechnungen sind daher jährlich erforderlich.

Im Vorfeld der Entscheidung für dieses Vorgehen wurde auch untersucht, wie sich diese Extrapolationsmethode auswirkt, wenn sie bei jeder Behandlungsanlagenart getrennt durchgeführt wird. Im Ergebnis kann es hier aufgrund unklarer Trendverläufe zu teilweise starken Schwankungen der berechneten Aktivitätsdaten kommen, die fachlich als nicht valide eingestuft werden. Wird hingegen die addierte Abfallmenge extrapoliert, erzeugt dies einen Wert, der nach Experteneinschätzung, aller Voraussicht nach, näher am erwartbaren zukünftigen Wert liegt.

Emissionsfaktoren

Für die Vergärung von Bioabfällen wurden im Rahmen eines Forschungsprojektes Emissionsfaktoren ermittelt (Cuhls et al., 2015). Im Rahmen dieses Projektes wurden sowohl für Methan als auch für Lachgas und Ammoniak Emissionsmessungen an 16 Vergärungsanlagen durchgeführt. Aus den Messergebnissen und den Ergebnissen von Literaturrecherchen wurden aggregierte Emissionsfaktoren für den Anlagenbestand in Deutschland abgeleitet. Diese berücksichtigen sowohl die verschiedenen in Deutschland verwendeten Anlagentechniken als auch die unterschiedlichen als Einsatzstoffe verwendeten Bioabfälle. Bei einzelnen Anlagen gab es sehr hohe Emissionsmesswerte, die zu einem sehr hohen Mittelwert führten. An den meisten Anlagen gab es mehrere Messphasen, um unterschiedliche athmospärische/meteorolgische Bedingungen (Sommer/Winter) zu berücksichtigen bzw. als Ursache für besonders hohe oder niedrige Werte ausschließen zu können. Im Rahmen eines Peer-Reviews (Forschungsnehmer, UBA, Fachexperten) wurden die sehr hohen Werte schließlich als Ausreißer identifiziert und als nicht repräsentativ eingestuft. Deshalb wurde zusammen mit dem Forschungsnehmer (Cuhls et al., 2015) beschlossen, die Medianwerte als Emissionsfaktoren zu verwenden. In die Ableitung der Medianwerte gingen alle gemessenen Emissionswerte ein. Die EF selbst wurden abgeleitet, indem zunächst EFs für jede Behandlungstechnologie ermittelt wurden. Anschließend wurde jede Behandlungstechnologie in Abhängigkeit von der Menge der Abfälle, die in den zugehörigen Anlagen in Deutschland behandelt werden, gewichtet (Cuhls et al., 2015) und die verschiedenen EF mit Hilfe der ermittelten Gewichtungsfaktoren zu den aktuell verwendeten EF zusammengefasst. Die folgende Tabelle aus (Cuhls et al., 2015) zeigt die Anteile der verschiedenen Behandlungstechniken bei der Bioabfallverwertung in Deutschland.

Tabelle 443: Anteile der verschiedenen Behandlungstechniken bei der Bioabfallverwertung in Deutschland

Technique:	KOA g	KOA g	KOA tg	KOA sM	KOA o	KOA o	VA	VA + NR g	VA + NR o	Summe
Input:	Bio + Grün	Bio + Grün	Bio + Grün	Bio + Grün	Bio + Grün	Grün	Bio + Grün	Bio + Grün	Bio + Grün	
Produkte:	FrischK	FertigK	FertigK	FertigK	FertigK	FertigK	Gärprod.	Gärprod. FertigK	Gärprod. FertigK	
	Mio. Mg/a	Mio. Mg/a	Mio. Mg/a	Mio. Mg/a	Mio. Mg/a	Mio. Mg/a	Mio. Mg/a	Mio. Mg/a	Mio. Mg/a	Mio. Mg/a
Amount of waste	2,00	0,95	0,63	0,13	1,47	2,40	0,17	0,60	0,26	8,61
Share	23,2 %	11,0 %	7,3 %	1,5 %	17,1 %	27,9 %	2,0 %	7,0 %	3,0 %	100 %
Verwer-tete Abfälle	Summe KOA: 7,58						Summe VA: 1,03			KOA + VA 8,61
Anteil an Summe	88 %						12 %			100 %
Products	1,20	0,38	0,25	0,06	0,59	1,20	0,17	0,24	0,10	4,19
Share	28,6 %	9,0 %	6,0 %	1,4 %	14,1 %	28,7 %	4,1 %	5,7 %	2,4 %	100 %

Quelle: Jährliche Mengen verwerteter Bio- und Grünabfälle sowie erzeugter Kompost- und Gärprodukte in Mio. Mg, jeweils bezogen auf das Input-Material im Anlieferzustand ((Cuhls et al., 2015); Tabelle 5-1, S. 75)

Die Abkürzungen haben folgende Bedeutungen:

- KOAg = composting plant closed (in vessel)
- KOAo = composting plant open
- KOAtg = composting plant partly closed
- KOAsM = composting plant with semipermeable membrane
- VA = digestion plant
- VA + NRg = digestion plant with closed post composting of the digestate
- VA + NRo = digestion plant with open post composting of the digestate
- Input Bio = biowaste from households
- Input Grün = green waste
- FrischK = fresh compost
- FertigK = mature compost
- Gärprod. = digestate
- Gärprod. FertigK = post composted digestate

In der folgenden Tabelle sind die verschiedenen Vergärungstechniken mit ihren durchschnittlichen Emissionsfaktoren dargestellt.

Tabelle 444: Vergleich der durchschnittlichen Emissionsfaktoren verschiedener Vergärungstechniken

	Emissionsfaktoren					CO_2-Äq.
	Ges.-C g/Mg	CH_4 g/Mg	NMVOC g/Mg	NH_3 g/Mg	N_2O g/Mg	(AR4) kg/Mg
[8] Vergärungsanlagen (VA)						
Wertebereich (Min - Max)	60 - 3.800	63 - 3.200	0 - 1.700	2,6 - 10.000	0,84 - 69	1,8 - 90
Mittelwert	900	910	230	780	15	27
Median	520	460	98	18	9,7	16
Anzahl der Beispielanlagen	12	12	12	12	12	12
Anzahl der Messphasen	19	19	18	16	19	19
[9] Vergärungsanlagen mit geschlossener Nachrotte (VA + NR g)						
Wertebereich (Min - Max)	260 - 4.800	190 - 5.600	16 - 850	20 - 600	25 - 350	20 - 230
Mittelwert	2.300	2.600	340	140	66	84
Median	1.800	2.000	320	76	43	67
Anzahl der Beispielanlagen	6	6	6	6	6	6
Anzahl der Messphasen	13	14	13	13	14	14
[10] Vergärungsanlagen mit offener Nachrotte (VA + NR o)						
Wertebereich (Min - Max)	1.600 - 14.000	2.100 - 16.000	14 - 2.200	31 - 2.300	21 - 170	57 - 430
Mittelwert	6.100	7.400	510	480	75	210
Median	5.100	6.200	360	86	74	190
Vergärungsanlagen (VA):						
Anzahl der Beispielanlagen	11	11	11	11	11	11
Anzahl der Messphasen	17	17	16	14	17	17
Offene Nachrotte von Gärrückständen (NR o):						
Anzahl der Beispielanlagen	3	3	3	3	3	3
Anzahl der Messphasen	6	6	6	6	6	6

Quelle: Ableitung von Emissionsfaktoren und Ermittlung der CO2-Äquivalente für Vergärungsanlagen in Abhängigkeit von der eingesetzten Behandlungstechnik - Emissionsfaktoren während des Behandlungsprozesses ((Cuhls et al., 2015); Tabelle 5-3, S. 82)

Für die Vergärung von Bioabfall wurden die folgenden Emissionsfaktoren ermittelt (Cuhls et al., 2015), S. 136, english version page 142):

$EF\text{-}CH_4 = 2.800$ g CH_4/t Bioabfall

$EF\text{-}N_2O = 45$ g N_2O/t Bioabfall

Nach einer Umstellung im Rahmen der Berichterstattung 2023 sind in den nationalen Emissionsfaktoren nur noch die Emissionen aus der Behandlung in den Vergärungsanlagen enthalten. Die Emissionen, die bei der Ausbringung der Gärreste auftreten, werden seit dieser Umstellung in der Kategorie 3.D.a.2.c bzw. 3.D.b berichtet. Diese Änderung geht auf das Reviewergebnis A.8 (Table 5, ARR 2020) zurück, dass zu mehreren Fachgesprächen zwischen den zuständigen Experten aus der Landwirtschaft und der Vergärung geführt hat. In deren Ergebnis wurde beschlossen, dass die Emissionen aus der Ausbringung der Vergärungsreste aus fachlichen Gesichtspunkten in der Landwirtschaft zu berichten sind und nicht bei der Vergärung. Der Emissionsfaktor für Methan ändert sich durch diese Umstellung nicht, da die

Methanemissionen während und nach der Ausbringung des Gärrestes generell zu vernachlässigen sind. Der neue Emissionsfaktor für Lachgas gilt, wie oben beschrieben, nur für die Behandlung und reduziert sich deutlich gegenüber dem bisher verwendeten Faktor, der auch die Ausbringung der Gärreste umfasste. Emissionen aus der Lagerung der flüssigen und der kompostierten festen Gärreste auf dem Gelände der Behandlungsanlage sind in den hier verwendeten Emissionsfaktoren enthalten. Nach Cuhls et al. liegt der N_2O-Emissionsfaktor für die anaerobe Vergärung bei 45 g N2O/t Bioabfall.

Für die anaerobe Vergärung gibt es keinen IPCC-Defaultfaktor für N_2O, da dort angenommen wird, dass die N2O-Emissionen vernachlässigbar sind.

Informationen zu Emissionen aus der Vergärung von Energiepflanzen und Wirtschaftsdünger in der Landwirtschaft sind in den Kapiteln 5.1.3.6.5 (Kategorie 3.B) und 5.1.4 (Kategorien 3.D und 3.J) zu finden

7.3.2.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (5.B.2)

Aktivitätsdaten

Die Unsicherheiten bei den in Vergärungsanlagen behandelten Abfallmengen werden als sehr gering (2 %) geschätzt, da es sich um eine Totalerhebung handelt. Dies gilt auch für die statistisch erhobenen verwerteten und abgefackelten Gasmengen aus Bioabfallvergärungsanlagen.

Emissionsfaktoren

Die Unsicherheiten der Emissionsfaktoren sind hoch und hängen von der Art der Anlage der Zusammensetzung der Abfälle und der Wirkung der eingesetzten Biofilter ab. Die Angaben aus der Literatur und aus anderen Staaten schwanken sehr stark. Zur Bestimmung der Unsicherheiten wurden die Ergebnisse des o.g. Forschungsprojektes als Grundlage genutzt ((Cuhls et al., 2015) S. 120) aus denen eine Lognormal-Verteilung der Messergebnisse abgeleitet werden kann. Für CH_4 wurde eine Unsicherheit von +179 % bis -76 % und für N_2O von +185,5 % bis -77 % ermittelt.

7.3.2.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (5.B.2)

Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Bei den Aktivitätsdaten werden Zahlen aus der Abfallstatistik des Bundes verwendet. Umfassendere oder genauere Daten sind nicht verfügbar.

Bei den Emissionsfaktoren wurde neben den durchgeführten Messungen auch eine Auswertung der vorhandenen Literatur durchgeführt und ist in die Ermittlung der Emissionsfaktoren eingflossen. Auch eine von Oonk and Lambert (2017) durchgeführte Literaturrecherche hat keine neueren Daten zu Emissionen von Bioabfallbehandlungsanlagen ergeben und die von Deutschland verwendeten Emisionsfaktoren bestätigt. Eine zur Emissionsberichterstattung 2025 durchgeführte Prüfung ergab das dezeit offenbar keine neueren Studien zu Emissionsfaktoren vorliegen.

Die im Forschungsprojekt ermittelten Emissionsfaktoren für Methan und Lachgas umfassen neben der anaeroben Behandlung der Bioabfälle auch die aerobe Nachrotte der Gärreste. Daher ist der verwendete Wert für Methan mit 2,8 g CH_4/kg Abfall deutlich höher als der IPCC-Defaultwert von 1 g CH_4/kg Abfall, er liegt jedoch innerhalb der Bandbreite des letzteren von 0 –

8 g CH_4/kg Abfall. Für Lachgas geben die Guidelines gar keinen Emissionsfaktor an, weil vermutlich nur der anaerobe Prozess betrachtet wird.

Beim Vergleich des CH_4-IEF (*GHG Locator*) mit den IPCC-Default-Werten fällt auf, dass er deutlich über den letzteren liegt. Dies ist darin begründet, dass nach der im CRF angegebenen IEF-Berechnungsroutine der IEF wie folgt berechnet wird IEF = (CH_4-Emissionen + CH_4 gefasst + CH_4 abgefackelt)/Jahresabfallmenge in Vergärungsanlagen. Die für die THG-Berechnung relevanten CH_4-Emissionen basieren jedoch nahezu ausschließlich auf den Emissionen die während der Behandlung entstehen. Die Mengen an CH_4, die gefasst und abgefackelt werden, sind für die Emissionsberechnung nahezu irrelevant, da sie energetisch genutzt werden oder vernachlässigbar gering sind. Damit ist das IEF-Berechnungsverfahren des CRF irreführend, zumindest aber nicht hilfreich für einen Vergleich zwischen den Staaten, da Länder, die CH_4 gar nicht fassen und abfackeln die EF-Defaults erreichen. Länder die CH_4 fassen und energetisch nutzen erreichen die Defaults aber nicht. Sie überschreiten sie bei weitem, da die gefasste und abgefackelte Menge an CH_4 die Menge an diffus emittiertem CH_4 naturgemäß bei weitem überschreitet. Diesen Umstand bestätigt auch ein Blick auf die IEF der berichtenden Länder (GHG Locator 2023) - die Werte bewegen sich in einem extrem breiten Spektrum, Vergleichbarkeit ist nicht gegeben.

Ein für die Berichterstattung 2022 durchgeführter Vergleich der deutschen Emissionsfaktoren für Methanemissionen aus Bioabfallvergärungsanlagen mit technologisch vergleichbaren Ländern (Italien und Portugal) zeigt, dass diese mit Emissionsfaktoren von jeweils 2000 g pro Tonne Bioabfall leicht unterhalb von dem in Deutschland verwendeten Wert von 2800 g pro Tonne liegen.

Über Lachgasemissionen aus Vergärungsanlagen wird von keinem der Länder berichtet.

Tabelle 445: Vergleich der Emissionsfaktoren für die Vergärung, in [g/t]

	Deutschland	Italien	Portugal
Methan CH_4	2.800 (5,7%)	2.000	2.000
Lachgas N_2O	45	-	-

Quelle: aktuelle Berichterstattung für Deutschland, für andere Länder Submission 2022 (UNFCCC, 2020)

7.3.2.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (5.B.2)

Bei der Erarbeitung der jeweils aktuellen Inventardaten liegen statistische Daten für die eingesetzten Abfallmengen immer nur für das vorhergehende Berichtsjahr vor, da die Abfallstatistik des Statistischen Bundesamtes mit zwei Jahren Verzug erscheint. Das aktuelle Berichtsjahr wird daher, wie oben bereits beschrieben, extrapoliert. Diese Extrapolation wird im jeweils folgenden Jahr durch die dann statistisch erhobenen Daten ersetzt. Aus diesem Grund sind jährliche Rückrechnungen für das vorvergangene Jahr erforderlich. Die diesjährige Rückrechnung hat zu einer leichten Reduzierung der Abfallmengen in der Vergärung und entsprechend zu leicht niedrigeren THG-Emissionen geführt. Der ansteigende Trend bei der Bioabfallvergärung war also nicht ganz so stark wie in der vergangenen Berichterstattung angenommen wurde. Aufgrund politischer Maßnahmen zur Verbesserung der getrennten Sammlung ist zukünftig mit einem weiteren Anstieg der Bioabfallmengen zu rechnen. Weiterhin ist davon aiszugehen, dass die getrennt gesammelten Bioabfllmengen verstärkt in Vergärungsanlagen und weniger in reiner Kompostanlagen behandelt werden.

Tabelle 446: Rückrechnungen in CRF 5.B.2 für das Jahr 2023

Bezeichnung	Einheit	Submission	2023
Eingesetzte Abfallmengen in Biogas- und Vergärungsanlagen (GESAMT)	[kt]	2026	7.262
		2025	7.416
CH_4-Emissionen	[t]	2026	20.333
		2025	20.765
N_2O-Emissionen	[t]	2026	327
		2025	334

7.3.2.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (5.B.2)

Derzeit sind keine Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4 Verbesserungen des Inventars, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

7.4 Abfallverbrennung (5.C)

Die anlagenbasierte Abfallverbrennung erfolgt in Deutschland entweder vollständig unter energetischer Nutzung oder ist den Krematorien zuzuordnen. Die bei der Abfallverbrennung mit energetischer Nutzung entstehenden Emissionen werden zur Vermeidung von Doppelzählungen im Energieteil (CRF 1.A.1.a, Kapitel 3.2.4) berichtet . Unter 5.C werden lediglich die Emissionen an NO_X, SO_2, CO und NMVOC aus Krematorien (Anlagen) und NO_X, SO_2, CO und NMVOC aus Brauchtumsfeuern (offene Verbrennung) berichtet.

7.4.1 Krematorien

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
NO_X, SO_2, CO, NMVOC	Tier 1	AS	D

Die Daten zu Feuerbestattungen werden aus Angaben des Bundesverbandes Deutscher Bestatter e.V. und den offiziellen Sterbezahlen für Deutschland berechnet (Statistisches Bundesamt, 2025d). Wegen der insgesamt gesunkenen Sterbezahlen in 2024 bei gleichbleibendem Anteil an Feuerbestattungen (BDB, 2025) und damit leicht sinkender absoluter Anzahl (siehe Tabelle 447) werden ebenfalls leicht rückgängige Emissionen ausgewiesen. Da im CRF-Reporting-Tool für Aktivitätsdaten die fest vorgegebene Einheit „kt“ gefordert ist, findet sich in den CRT-Tabellen eine errechnete Angabe. Die Umrechnung wird aus Pietätsgründen hier nicht näher beschrieben, erfolgt aber vergleichbar zu anderen Veröffentlichungen.

Folgende Angaben geben einen Überblick über die tatsächliche Anzahl an Kremierungen:

Tabelle 447: Rechnerische Anzahl der Kremierungen in Deutschland, in [1000]

1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2024
169	316	328	365	427	574	710	762

Quelle: eigene Berechnungen

Rekalkulationen bei den Aktivitätsdaten waren nicht notwendig.

Emissionsberechnungen erfolgen nicht für Treibhausgase, berücksichtigt werden aber die Vorläufersubstanzen NO_X, SO_2, CO und NMVOC. Zur Berechnung dieser Emissionen werden die

EF aus dem EMEP-Guidebook verwendet (EMEP/EEA Guidebook 2023,2023).. Änderungen ergaben sich bei den EF für Pb, Cd, PCB und Hg, nicht jedoch in Bezug auf Treibhausgasemissionen.

7.4.2 Brauchtumsfeuer und ähnliche offene Verbrennungen

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
NO_x, SO_2, CO, NMVOC	Tier 1	M, Q	D

Aus der offenen Verbrennung von Holz und Grünschnitt zu Traditionszwecken, sogenanntem Brauchtum wie z.B. dem Entfachen von Osterfeuern werden neben biogenem Kohlendioxid Emissionen an NO_X, SO_2, CO und NMVOC berücksichtigt.

Die Erhebung der Anzahl an solchen Brauchtumsfeuern erfolgte durch ein Sachverständigenprojekt (Wagner & Steinmetzer, 2018) mit Befragung von Gemeinden und statistischen Hochrechnungen für Deutschland für das Jahr 2016. Auf Grund des Gutachtervotums wird eine sinkende Entwicklung für die gesamte betrachtete Zeit angenommen.

In Gegensatz zu Lagerfeuern im eher privaten Bereich sind davon vor allem die Osterfeuer im eher öffentlichen Bereich betroffen. Die Berechnungen werden separat betrachtet und die Lagerfeuer mit einem stetigen Rückgang modelliert. Die Osterfeuer folgen einem Ansatz über allgemeine prozentuale Abnahmen und zusätzlichen Abschlägen entsprechend aktueller Entwicklungen (z.B. hohe Waldbrandgefahr, seit 2022 wieder vermehrte Aktivitäten).

Rekalkulationen waren nicht notwendig.

Es sind keine weiteren Verbesserungen geplant.

7.5 Abwasserbehandlung (5.D)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
L/T	5 D 1, Domestic Wastewater	0	CH_4	3725,66	0,29	926,91	0,14	-75,12
-/T	5 D 1, Domestic Wastewater	0	N_2O	515,78	0,04	1131,75	0,16	119,42
-/-	5 D 2, Industrial Wastewater	0	CH_4	10,36	0,01	56,61	0,01	446,30
-/-	5 D 2, Industrial Wastewater	0	N_2O	28,09	0,01	24,01	0,01	0,00

Die Kategorie „Abwasserbehandlung - Kommunale Abwasserbehandlung“ ist für CH_4-Emissionen eine Hauptkategorie nach dem Level und Trend sowie für N_2O-Emissionen nach dem Trend. Aufgrund der seit 1990 sehr stark fallenden Emissionen und des dadurch erreichten sehr geringen Emissionsniveaus hat die Nationale Koordinierungsstelle aus Gründen der Ressourcenpriorisierung entschieden, die für Hauptkategorien vorgesehenen höheren Ansprüche an die Methodik für diese Kategorie nicht umzusetzen.

7.5.1 Kommunale Abwasserbehandlung (5.D.1)

Abwasser aus dem kommunalen Bereich in Deutschland wird, bezogen auf die angeschlossenen Einwohner, zu ca. 97% über öffentliche Kanalsysteme abgeleitet. Das so abgeleitete Abwasser wird zu ca. 99% (bezogen auf die Bevölkerungszahl) in zentralisierten Kläranlagen behandelt – der geringe Rest in Industrie- oder ausländischen zentralen Kläranlagen. Die restlichen 3 % der Bevölkerung werden mittels anderer Behandlungsformen (Kleinkläranlagen, abflusslose

Gruben) abgedeckt. Alle genannten Behandlungsformen (zentralisierte Kläranlagen, Kleinkläranlagen, abflusslose Gruben) fallen in den Bereich der kommunalen Abwasserbehandlung. Neben häuslichem Abwasser werden in kommunalen Kläranlagen auch Indirekteinleitungen aus Industrie und Gewerbe (ca. 30 % bezogen auf die angeschlossenen Einwohner- bzw. Einwohnergleichwerte) sowie Niederschlagswasser aus der Mischkanalisation behandelt.

In den meisten kommunalen Kläranlagen in Deutschland kommt das Belebtschlammverfahren zum Einsatz. Ca. 97 % der Abwassermenge in Deutschland wird in Anlagen behandelt, die mit einer Denitrifikation ausgestattet sind. Anfallender Primärschlamm aus der Vorklärung und Überschussschlamm aus dem Belebtschlammverfahren werden meist in Faultürmen direkt vor Ort stabilisiert oder zur Stabilisierung in andere Kläranlagen verbracht. Dort wird gezielt Klärgas produziert, welches energetisch genutzt wird. Der so entstehende Klärschlamm wird meist entwässert, getrocknet und anschließend verbrannt, um im besten Fall wertvolle Rohstoffe, wie z.B. Phosphor, zurück gewinnen zu können. Die bodenbezogene Verwertung des Klärschlamms, meist in der Landwirtschaft, ist rückläufig. In 2023 wurden 1,63 Millionen Tonnen Klärschlamm entsorgt, wovon 81 % verbrannt und 13 % als Düngemittel (Stoffliche Verwertung Landwirtschaft) verwendet wurden (siehe Tabelle 452).

Gemäß IPCC-Guidelines sind die relevanten Treibhausgase für die kommunale Abwasserbehandlung Methan und Lachgas. Bezogen auf Methan konnte die Schlammbehandlung, für Lachgas das Belebtschlammverfahren als Hauptquellen identifiziert werden. Die Datengrundlage stellt sich national, wie international allerdings als ausbaufähig dar.

Nur ein sehr geringer Anteil der Gesamtemissionen Deutschlands stammt aus der kommunalen Abwasserbehandlung. Die Emissionen des Sektors werden von einem abfallenden Trend geprägt. Bezogen auf das Jahr 1990 haben sich die Emissionen (CO_2-Äquivalente) bis zur THG-Inventarberichterstattung 2026 um ca. 52 % reduziert. Dies ist aus Sicht des Umweltbundesamts im Wesentlichen auf eine Erhöhung des Anschlussgrades an die kommunale Abwasserbehandlung und die Abschaffung der offenen Schlammfaulung zurückzuführen. Mit der THG-Inventarberichterstattung 2024 stieg der Anteil der Lachgasemissionen an den Gesamtemissionen im Zuge einer Anpassung der zugehörigen Emissionsfaktoren bei den aktuellen Jahren deutlich an, während er sich im Basisjahr deutlich reduzierte. In der Folge reduzierten sich die Gesamtemissionen der Kategorie, bezogen auf das Jahr 1990 von ursprünglich ca. 75 % auf den oben angegebenen Wert. Es bleibt bei einem, mittlerweile etwas weniger stark, abfallenden Trend.

Bis 1990 war Deutschland in die Bundesrepublik Deutschland und die Deutsche Demokratische Republik geteilt. Sich hieraus ergebende Besonderheiten und Unterschiede zwischen den beiden Staaten sind an den entsprechenden Stellen dieses Berichtes erläutert.

7.5.1.1 Methanemissionen der kommunalen Abwasserbehandlung (5.D.1 Abwasserbehandlung)

7.5.1.1.1 Beschreibung der Kategorie (5.D.1 Abwasserbehandlung)

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	genutzte Emissionsfaktoren
CH_4	D/CS	NS	D/CS
N_2O	D/CS	NS	D/CS

Die Kategorie „Abwasserbehandlung - Kommunale Abwasserbehandlung“ ist für CH_4-Emissionen eine Hauptkategorie nach dem Trend.

Das Abwasser von 97 % der Einwohner in Deutschland wird in zentralisierten kommunalen Kläranlagen behandelt (Statistisches Bundesamt, 2024b). Hierbei entsteht, durch anaerob ablaufende Stoffwechselprozesse innerhalb der Abwasserbehandlung, Methan. Zur Emission

tragen voraussichtlich alle Prozessschritte der Abwasserbehandlung bei, allerdings haben die Schlammfaulung und die Faulschlammstapelung die größten Anteile. In Abhängigkeit vom technischen Ausfaulgrad der Schlammfaulung und der Lagerzeit können somit auch bei der Faulschlammlagerung Emissionen entstehen. Bei gut ausgefaulten Schlämmen (z. B. bei einem guten technischen Abbaugrad in der Faulung von ca. 95 %), ist die weitere Emission von Methan gering. Deshalb ist es im Hinblick auf die Reduzierung entscheidend, den Abbaugrad während der Faulung möglichst weit zu erhöhen. So ist auch das Potenzial für eine weitere Emission von Methan in den der Schlammfaulung folgenden Verfahrensstufen Nacheindicker, Schlammstapelbehälter und Entwässerung erheblich vermindert (DWA, 2022).

Die übrige Abwassermenge wird in Kleinkläranlagen behandelt oder bis zum Abtransport in eine Kläranlage in abflusslosen Gruben gesammelt. In abflusslosen Gruben können Prozesse (teils aerob, teils anaerob) ablaufen, die zur Methanbildung führen.

Die organische Fracht, die in abflusslose Gruben geleitet wird, reduzierte sich seit 1990, da sich der Anschlussgrad an Kläranlagen durch die Anforderungen der Kommunalabwasserrichtlinie der Eropäischen Union (siehe Art. 3 & 7 der 91/271/EWG (BML, 1991)) stetig erhöht hat.

Bis Anfang der 1990er Jahre wurde in den Bundesländern der ehemaligen DDR zur Schlammstabilisierung die offene Schlammfaulung durchgeführte . Nach schrittweiser Reduzierung wurde diese 1994 eingestellt (siehe Kapitel 7.5.1.2.1). Aus dieser Konstellation resultiert ein stark abfallender Trend der CH_4-Emissionen dieses Sektors.

7.5.1.1.2 Methodische Aspekte (5.D.1 Abwasserbehandlung)

Die von IPCC empfohlene Gleichung 6.1 (IPCC (2006a): Vol. 5, Kapitel 6.2.2.) zur Berechnung von CH_4-Emissionen aus dem kommunalen Abwasser ist in Deutschland, wie im Folgenden erläutert, nicht anwendbar. Von den in Tabelle 6.5 der IPCC-Guidelines (ebd.) vorgestellten Anteilen der Bevölkerung (*fraction of population, U_i*) tragen zwei Gruppen (*rural und urban-high*) zu den Emissionen bei. Gleichzeitig wird der Primär- und Sekundärschlamm zur CH_4-Erzeugung in Faultürmen genutzt. Das entstehende Methan wird gefasst, wodurch die dabei produzierte CH_4-Gesamtmenge weit über den mittels Gleichung 6.1 berechneten CH_4-Emissionen liegen und damit auch der aus der IPCC-Gleichung entstehende Wert negativ wäre. Der Klärschlamm wird zudem erst nach der Klärgasgewinnung, also ausgefault, einer weitereren Verwertung zugeführt (zumeist in der thermischen Verwertung oder beodenbezogen in Landwirtschaft oder im Landschaftsbau), weshalb im Sinne der Guidelines nicht von *sludge removed* gesprochen werden kann, da der Klärschlamm ausgefault ist und angenommen wird, dass er keinen BSB_5 mehr enthält (siehe auch Kapitel 7.5.1.2.1). Darüber hinaus sind die in Deutschland vorliegenden Daten für die angeschlossenen Personen präziser, als die mit Tabelle 6.5 der IPCC-Guidelines ableitbaren Werte für U_i und $T_{i,j}$ (*degree of utilisation of treatment system*). Alles in allem ist die Guidelines-Methode von 2006 zu eingeschränkt für die in Deutschland real vorliegende Situation. Aus den beschriebenen Gründen wird anstelle der IPCC Gleichung aus 2006 nach der IPCC -Methode von 1996 verfahren, die allerdings um die Anforderungen der IPCC Guidelines aus 2006 ergänzt wurde.

Die Berechnung der Methanemissionen aus Kläranlagen beruhte bis einschließlich zum NIR 2023 auf einer begrenzten Anzahl von Messungen aus Becker et al. (2012). Aus dieser Veröffentlichung lässt sich ein Emissionsfaktor von 0,26 kg Methan pro Jahr und Einwohner ableiten. Die Studie umfasst eine sehr begrenzten Anzahl an Messungen. Daher war der EF allerdings eher als ein Ergebnis von Stichproben denn als repräsentativer Emissionsfaktor einzuordnen. Auf Grundlage internationaler Veröffentlichungen wurde nun ein Emissionsfaktor von 0,5 kg Methan pro Jahr und Einwohner abgeleitet (bisher nicht veröffentlicht), der die Situation in Deutschland nach aktueller Datenlage ausreichend gut darstellt. Aufgrund der nur

bedingt vergleichbaren Messungen an Einzelanlagen und den dabei angewendeten unterschieldichen Verfahren zur Probenahme und Detektion ist mit hohen Unsicherheiten zu rechnen.

Der bei weitem größte Abwasseranteil in Deutschland wird mit gleichen Behandlungszielen und, bezogen auf die biologische Abwasserbehandlung, mit überwiegend gleicher Austattung der kommunalen Kläranlagen aufbereitet.Daher wird oben genannter Emissionsfaktor auf alle Kläranlagen angewendet.

Da mit Stand 2022 so gut wie alle Einwohner (ca. 97 %) in Deutschland an eine der ca. 8700 (Statistisches Bundesamt, 2024a) Kläranlagen angeschlossen sind, wird die Gesamtbevölkerungszahl als Aktivitätsrate genutzt. Durch die Verwendung der Gesamteinwohnerzahl kommt es hier aufgrund der Mitberücksichtigung der Kleinkläranlagen und abflusslosen Gruben zu einem als konservativ einzustufenden Ergebnis. Von den Kleinkläranlagen und kleineren Kläranlagen wäre, aufgrund der meist nicht vorhandenen Schlammbehandlung, ein vermutlich geringerer Emissionsfaktor zu erwarten. Die Abwässer aus den abflusslosen Gruben werden zwar in die kommunalen Kläranlagen verbracht und müssen auch an dieser Stelle betrachtet werden, sind zu diesem Zeitpunkt allerdings schon teilweise ausgefault. Es kommt hier also zu einer Überschneidung der Emissionswerte aus den Kläranlagen und den abflusslosen Gruben, die sich mangels Daten nicht exakt beziffern lässt, gleichzeitig ist die Relevanz aber sehr gering und daher vernachlässigbar. Der der Trendentwicklung des Emissionsfaktors zugrundeliegende Verlauf ab 1990 beruht auf einem Fachbeitrag (Grün et al., 2013), dessen spezifische Betrachtungen für den Einzugsbereich des *Emschersystems* (Nordrhein-Westfalen) generalisiert und auf Basis von Expertenschätzungen der Studienautoren als auch für Deutschland repräsentativ eingestuft wurde. Dies wird aufgrund eines sehr ähnlichen Standes der Anlagentechnik und des Anlagenmanagements auf kommunalen Kläranlagen als plausibel angesehen. Der Fachbeitrag geht, basierend auf überwiegender Betrachtung der Schlammfaulung und Vorklärung, von einer Halbierung der Emissionen aufgrund von Verbesserungen der Anlagentechnik und des Anlagenmanagements im Zeitraum 1990 bis 2020 aus. Gemäß (Becker et al., 2012) werden 90 % der Methanemissionen aus der Schlammbehandlung emittiert. Der beschriebene Trend kann für die Methanemissionen also angewendet werden. Hierbei ist anzumerken, dass sich diese Entwicklung rein aus den zuvor genannten Verbesserungen der Kläranlagentechnik (z.B. optimierte Betriebsführung) ableitet und nicht die spezifische Reduktion der Emissionen aufgrund des Umbaus von zuvor offenen Kanalsystemen im Einzugsgebiet der Emscher miteinbezieht. Dies bedeutet, dass diese grundlegende Besonderheit des Emschersystems (im Vergleich zum Durchschnitt der deutschen Kläranlagen) nicht in die ermittelte Trendentwicklung eingeht. Zur Berechnung der einzelnen Emissionsfaktoren für die Jahre ab 1990 wird der oben beschriebene Emissionsfaktor für das Jahr 2011 als fester Ausgangswert verwendet. Die betrachteten Veröffentlichungen beziehen sich auf Messungen, die zwischen den Jahren 2007 bis 2019 durchgeführt wurden. Hierbei gibt es einen deutlichen Schwerpunkt zwischen 2010-2013. Es wurde daher festgelegt, den Ausgangswert beim Jahre 2011 zu belassen. Der Emissionsfaktor für 1990 wird mittels Geradengleichung und der Annahme, der Wert für 2020 sei halb so groß wie der Wert für 1990, bestimmt. Die Emissions-faktoren für die übrigen Jahre lassen sich durch lineare Interpolation ermitteln. Ab dem Jahr 2020 wird der verwendete Emissionsfaktor mit 0,385 kg pro Jahr und Einwohner fortgeschrieben, da eine unendliche Verbesserung durch Anlagenoptimierung auf Basis genannter Studie nicht als realistisch eingeschätzt wird. Aufgrund der hier beschriebenen Berechnungs-methode zur Ermittlung des Emissionsfaktors für Emissionen aus Kläranlagen, bei der reale Messwerte verwendet werden, ist die Verwendung eines Methankonversionsfaktors (MCF) nicht zielführend.

Die organische Fracht der abflusslosen Gruben wird entsprechend der IPCC-Methode ermittelt, indem die an Gruben angeschlossenen Personen (P) mit der durchschnittlichen organischen Fracht pro Einwohner multipliziert werden. Für die durchschnittliche tägliche organische Fracht wird 60 g BSB_5 pro Einwohner angenommen (Gujer, 2006). Dabei handelt es sich um den für Deutschland spezifischen Wert, der zusätzlich aber auch europaweit als statistischer Mittelwert verwendet wird (BML, 1991). Der IPCC Default Wert für Deutschland liegt mit 62 g in derselben Größenordnung (2006 IPCC Guidelines, (IPCC, 2006a): Vol. 5, Kapitel 6, Tabelle 6.4).

Die Methanemissionen aus abflusslosen Gruben werden ebenfalls entsprechend der IPCC Methode ermittelt. Es wird der IPCC Default-Wert für das Methanbildungspotenzial (0,6 kg CH_4/kg BSB_5) verwendet. Gemäß IPCC (IPCC (2006a): Vol. 5, Kapitel 6.1., Seite 6.7) ist die Höhe des Methankonversionsfaktors (MCF) temperarturabhängig. Bei Temperaturen unterhalb von 15°C findet demgemäß keine signifikante Methanproduktion statt.

Tabelle 448: Bodentemperatur [1m] in °C, Monatsmittelwerte für Deutschland

Monatsmittel [°C]	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni
2012-2017	5,4	4,2	5,6	8,4	12,1	15,7
2018-2023	5,8	5,1	5,8	8,7	12,4	16,7
Monatsmittel [°C]	**Juli**	**August**	**September**	**Oktober**	**November**	**Dezember**
2012-2017	17,9	18,5	16,8	13,5	10,0	6,9
2018-2023	18,8	19,4	17,6	14,0	10,5	7,0

Ausgehend von der langjährigen mittleren Bodentemperatur in Deutschland (DWD, 2024a) in 1 m Tiefe liegt in den Sommermonaten die gemittelte Bodentemperatur bei Werten zwischen 15 und nahezu 20° C. Eine Methanbildung ist in dieser Zeit somit möglich, da die Gruben in etwa dieser Tiefe liegen. Der MCF für diesen Zeitraum (4 Monate) wird in Anlehnung an (Gibbs & Woodbury, 1993) konservativ auf 0,35 geschätzt. Für den Rest des Jahres liegen die Temperaturen teilweise signifikant unter der 15° C-Grenze des IPCC. Sie sinken bis auf etwa 5° C. Der MCF für diesen Zeitraum (8 Monate) wird in Anlehnung an (Gibbs & Woodbury, 1993) konservativ auf 0,1 geschätzt (nach IPCC wäre ein MCF von 0 gerechtfertigt). Die Abwassertemperatur kann individuell stark unterschiedlich sein und ist abhängig von der Trinkwassertemperatur und den häuslichen Verwendungszwecken. Umfassende bzw. allgemeingültige Daten hierzu liegen nicht vor. Aufgrund der, im Vergleich zum Speichervolumen von abflusslosen Gruben, geringen Abwasserzuläufe, kann von einer schnellen Angleichung der Abwassertemperatur an die Bodentemperatur ausgegangen werden. Das Forschungsvorhaben zum Thema abflusslose Gruben kam zu keiner Veränderung bezüglich der hier beschriebenen Vorgehensweise zur Ermittlung des MCF für abflusslose Gruben (Lange et al., 2021). Da die Gruben zusätzlich regelmäßig zur Entsorgung des Abwassers in der Kläranlage geleert werden und demzufolge keine Schlammanreicherung stattfindet, wird davon ausgegangen, dass die verwendeten Werte realistisch bis konservativ einzuschätzen sind. Die Angaben aus Gibbs and Woodbury (1993) beziehen sich auf Untersuchungen zur Methanbildung von tierischem Wirtschafts-dünger (Gülle). Da entsprechende Daten für menschliche Ausscheidungen sowohl national als auch international nicht vorliegen und die diesbezüglichen IPCC-Default Werte in Deutschland nicht anwendbar sind, werden die dort (ebd.) ermittelten MCF-Werte für die Ermittlung des nationalen MCF als übertragbar angenommen. Der MCF beschreibt das Potential der angewendeten Technik zur Methanbildung. Bei der Güllelagerung handelt es sich um meist nicht durchmischte Systeme, die regelmäßig aber diskontinuierlich über einen Zulauf und eine Entnahme verfügen. Dies erscheint mit abflusslosen Gruben hinreichend vergleichbar. Auch der Einfluss des Substrates bezieht sich, bezüglich des MCF, rein

auf den technischen Aspekt. Da das Potential des Substrates zur Methan-bildung durch den B_o beschrieben wird, ist hier eine Vergleich der Trockensubstanz (Massenanteil) ausreichend. Dieser wird für Schweinegülle mit 5% und für Rindergülle mit 7,5% angenommen (Wendland & Attenberger, 2009). Für bereits eingedickten Primärschlamm aus der Abwasser-behandlung liegt diese bei ca. 5-10 % (DWA, 2007). Es kann davon ausgegangen werden, dass Rohabwasser, selbst im eher wassersparsameren Bereich ohne Anschluss an die öffentliche Kanalisation, deutlich unterhalb der eben genannten Werte und somit auch unterhalb der Trockensubstanz der Gülle liegt. Durch den Zufluss von Grauwasser und Toilettenspülwasser im Abwasserbereich und die Verwendung von Einstreu im Tierzuchtbereich erscheint dies zudem plausibel. Es ist also anzunehmen, dass sich aufgrund der dünneren Suspension (impliziert eine geringere Sauerstoffzehrung) erst später anaerobe Verhältnisse als bei der Güllelagerung einstellen und die Umsetzung zu Methan verzögert abläuft. Zudem verfügen abflusslose Gruben nur über eine Ventilationsöffnung, wohingegen Güllelagertanks oft komplett offen sind. Dies deutet auf einen eher konservativen Ansatz hin. Die Betrachtung des im Thünen-Report Nr. 77 (Haenel et al., 2020) berichteten MCF für die Lagerung von Schweinegülle (0,25) unterstreicht die Konservativität des hier gewählten MCF (0,35). Da keine spezifischen Daten zur Übertragbarkeit vorliegen, wurde hier eine Unsicherheit von 20 % (siehe Kapitel 7.5.1.1.3) geschätzt. Mittels eines in 2018 abgeschlossenen Forschungsprojektes (unveröffentlicht) wurde überprüft, ob national wie auch international bessere Daten für die Ableitung eines landesspezifischen MCF vorliegen. Hierfür wurde eine umfangreiche Literaturstudie durchgeführt und nationale Hersteller abflussloser Gruben, sowie nationale wissenschaftliche und unversitäre Einrichtungen dazu befragt, ob Messergebnisse über die Methan-bildung in abflusslosen Gruben vorliegen. Die Studie kommt zu dem Schluß, dass die sehr wenigen in der internationalen Literatur veröffentlichten Messergebnisse keine Rückschlüsse auf die Ableitung eines nationalen MCF zulassen. Zusätzlich liegen den Herstellern und auch den befragten Institutionen keine Informationen zur Methanbildung vor. Aus diesem Grund wird der hier vorgestellte MCF auch zukünftig, bzw. bis zum vorliegen verwertbarer Messergebnisse, genutzt werden. Auch das Forschungsvorhaben zu abflusslosen Gruben (Lange et al., 2021) brachte hierzu keine neuen Erkenntnisse hervor.

Die oben beschriebenen Verhältnisse und die Temperaturverteilung im Boden ergeben einen mathematisch gemittelten MCF für Deutschland von 0,183.

Der MCF wird wie folgt ermittelt:

MCF = (0,35 * 4 Monate + 0,1 * 8 Monate) / 12 Monate

0,35 Schätzung von (Gibbs and Woodbury 1993) für Temperaturen > 15° C und 0,1 für Temperaturen < 15° C

Die Emissionen werden folgendermaßen berechnet:

$$CH_4 = BSB_{5Jahr} \times B_o \times MCF$$

$$BSB_{5Y} = P_{Grube} \times BSB_5 \times 365 \times 0{,}001$$

Wobei:

- CH_4 = resultierende Methanemissionen in kg / Jahr
- MCF = Methankorrekturfaktor, 0,183
- Bo = Default – max. CH_4 Bildungskapazität, 0,6 kg CH_4 / kg BSB5
- P Grube = an Gruben angeschlossene Personen

- BSB5Jahr = BSB5 in g / Jahr
- BSB5 = 60 g / Tag x Person

Eine Berechnung mit höheren Anforderungen (höhere Tier-Stufe bzw. Hierarchiestufe), wie für Hauptkategorien gefordert, ist nicht möglich, da die Stoffströme der abflusslosen Gruben nicht separat erfasst werden.

Zur Verifikation des verwendeten MCF siehe Kapitel 7.5.1.1.4.

Die folgende Tabelle zeigt die Anzahl der Einwohner deutschlandweit und solche mit Anschluss an abflusslose Gruben. Die Werte wurden für die Jahre 1990-2015 im fünfjährigen Rhythmus und ab 2017 durchgehend dokumentiert und dienen der Nachvollziehbarkeit der in diesem Abschnitt beschriebenen Berechnungen.

Tabelle 449: Einwohner Deutschland gesamt und mit Anschluss an abflusslose Gruben

Jahr	Einwohner (1000 kpf)		Jahr	Einwohner (1000 kpf)	
	abflusslose Gruben	Deutschland gesamt		abflusslose Gruben	Deutschland gesamt
1990	8.234,425	79.753,227	2021	397,715	83.237,124
2000	1.266,667	81.456,617	2022	398,072	83.118,501
2010	575,000	80.284,071	2023	398,429	83.456,045
2020	397,357	83.155,031	2024	398,787	83.577,140

Die Gesamtemissionen an Methan aus dem Bereich der kommunalen Abwasserbehandlung ergeben sich durch Summenbildung der detailliert beschriebenen Emissionen aus Kläranlagen, abflusslosen Gruben und offener Schlammfaulung (siehe Kapitel 7.5.1.2.2.3).

7.5.1.1.3 Unsicherheit und Zeitreihenkonsistenz (5.D.1 Abwasserbehandlung)

Es werden folgende Unsicherheiten verwendet:

- EF CH_4 aus Kläranlagen (abgeleitet aus Schwankungsbreiten des zugrundeliegenden Forschungsvorhabens) = -90/+400 %
- MCF (Expertenschätzung) = ± 20 %
- P (Expertenschätzung) = ± 3 %
- P_{Grube} (Expertenschätzung) = ± 3 %
- BSB_5 (IPCC (2006a): Vol. 5, Tabelle 6.7) = ± 30 %
- B_0 (IPCC (2006a): Vol. 5, Tabelle 6.7) = ± 30 %

Die Aktivitätsraten der organischen Fracht in abflusslosen Gruben basieren auf Angaben des Statistischen Bundesamtes (Statistisches Bundesamt, 2024b). Die Anzahl der Einwohner, die nicht an die öffentliche Kanalisation angeschlossen sind und deren Abwasser über abflusslose Gruben entsorgt wird, wird vom Statistischen Bundesamt alle drei Jahre, ohne Angabe von Unsicherheiten, erhoben. Fehlende Jahre werden linear interpoliert, bzw. extrapoliert. Eine alternative Datenquelle existiert nicht. Die Ergebnisse dieser Erhebungen sind, da es sich um eine Totalerhebung handelt, als sehr genau einzustufen.

Der MCF wurde an die klimatischen Verhältnisse (langjährige mittlere Bodentemperatur in 1m Bodentiefe), wie unter 7.5.1.1.2 beschrieben, in Deutschland angepasst. Die Unsicherheit des

Wertes beträgt ±20 % (UBA-Expertenschätzung).Die Unsicherheiten für BSB_5 und B_0 wurden gemäß (IPCC (2006a): Vol. 5, Tabelle 6.7) festgelegt.

Bis zum Jahr 1995 wurden die Daten für die alten und neuen Bundesländer getrennt ermittelt, seither wird ein gesamtdeutscher Wert bestimmt. Dies hat auf die Zeitreihenkonsistenz keine Auswirkung.

7.5.1.1.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/ -kontrolle und Verifizierung (5.D.1 Abwasserbehandlung)

Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Für die Ableitung landesspezifischer Emissionsfaktoren (Anwendung ab NID 2024) für die direkten Methan- und Lachgasemissionen aus der Abwasserbehandlung wurde eine umfangreiche Betrachtung internationaler Publikationen zur Thematik durchgeführt, die Erkenntnisse in die für Deutschland geltenden Rahmenbedingungen eingeordnet und in einer eigenen Veröffentlichung (Veröffentlichung ausstehend) festgehalten.

Da es in dem oben beschriebenen Forschungsprojekt (unveröffentlicht, siehe Kapitel 7.5.1.1.2) nicht gelungen ist einen landesspezifischen MCF für die Berechnung der Emissionen aus den abflusslosen Gruben zu ermitteln und die derzeit verwendete Literaturquelle (Gibbs & Woodbury, 1993) unter wissenschaftlichen Gesichtspunkten problematisch erscheint, wurde der daraus abgeleitete nationale MCF einer mehrstufigen Verifikation unterzogen.

Die Verifikation erfolgte in einem ersten Ansatz anhand der in den, noch nicht in Kraft getretenen, IPCC Refinements (2019) (IPCC, 2019) wiedergegebenen Betrachtungen und Angaben, sowie der dort zitierten Literatur. Selbst bei Anwendung der dortigen Vorgaben bezüglich der Temperaturgrenze der biologischen Aktivität von 12 °C, der Verwendung der Lufttemperatur anstatt der Bodentemperatur und der Anwendung des MCF von 0,4 (unterer Wert für abflusslose Gruben), ergäbe sich für Deutschland ein nur wenig abweichender MCF von 0,225 (0,4*5 Monate + 0,1*7 Monate = 0,225). Die in den Refinements hierzu zitierte Studie (Leverenz & Tchobanoglous, 2011) ermittelte im Ergebnis einen MCF von 0,22. Dieser insgesamt nur leicht höhere Wert stützt die grundlegende Plausibilität des für Deutschland abgeleiteten MCF von 0,183. Zusätzlich gibt es in Deutschland einige ganz grundlegende Aspekte, die einen niedrigeren MCF, als den bei Leverenz ermittelten, zur Folge haben. Zum einen ist die leichte Abweichung mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit auf die abweichenden klimatischen Bedingungen zurückführen, da die durchschnittlichen jährlichen Lufttemperaturen in Deutschland insgesamt niedriger sind als die in San Francisco, Kalifornien. Darüber hinaus werden in Deutschland abflusslose Gruben unter der Erdoberfläche verbaut. Die Mindesteinbautiefe beträgt 0,5 m, was bedeutet, dass nur der Schornstein (direkt über der Bodenoberfläche gelegen) für den Gasausgleich mit der Atmosphäre in Kontakt steht - Luftströmungen von außen in das Innere des Behälters sind also nicht zu erwarten und die Beeinflussung durch evtl. eingetragenen Sauerstoff bleibt außerordentlich gering. Zusätzlich bleiben auch die Temperaturen im Inneren des Behälters von den im Sommer typischerweise hohen atmosphärischen Temperaturen völlig unbeeinflusst. Darüber hinaus sind die mittleren Bodentemperaturen in Deutschland im Sommer insgesamt niedriger als die Lufttemperaturen und somit auch noch einmal niedriger als die Lufttemperaturen in San Francisco. Der Eintrag von warmem Wasser wird als wenig relevant bewertet, da es insgesamt ein geringes Volumen hat und zudem die Kühlwirkung des umgebenden Erdreichs deutlich höher ist als bei umgebender Atmosphäre und wird UBA-intern als wenig relevant bewertet. Außerdem werden in der Studie von LEVERENZ et al (Leverenz & Tchobanoglous, 2011) Systeme mit

anschließender Bodenverrieselung betrachtet. In Deutschland handelt es sich hingegen um abflusslose Gruben, die entsprechend häufiger mittels Tankwagen entleert werden müssen. Dies zieht nach sich, wie auch in (Leverenz & Tchobanoglous, 2011) gezeigt, dass es mehrere Monate benötigt bis eine Methanogenese möglich wird und somit bei häufigerer Entleerung ein niedrigerer MCF zu erwarten ist.

Die Ergebnisse von (Leverenz & Tchobanoglous, 2011) wurden von (Diaz-Valbuena et al., 2011) bestätigt, wo die BSB_5-Belastung zusätzlich mit 85 bis 90 g BSB5/EW/d angegeben wurde. Der deutsche BSB_5-Wert beträgt 60 g BSB_5/EW/d, was bedeutet, das im Vergleich auch weniger organisches Material für die Methanogenese zur Verfügung steht. In der Gesamtschau der wiedergegebenen Berechnungen und Argumente betrachten wir den deutschen MCF als bestätigt.

Die Verifikation des MCF erfolgte in einem zweiten Ansatz anhand alternativer AR. Hierbei wurde anstelle einer Berechnung der organischen Jahresfracht mittels BSB_5=60 g/d*EW eine Berechnung über den spezifischen Abwasseranfall pro Einwohner im dezentralen Bereich (83 l/d*EW) und eine mittlere BSB_5-Zulaufkonzentration (750 mg/l) ermittelt (BDZ, 2017). Die alternativen AR wurden aus einer Studie zu Kleinkläranlagen entnommen. Da angenommen werden kann, dass, aufgrund der kostenpflichtigen Abholung des Abwassers aus abflusslosen Gruben, weniger Wasser als bei Nutzern von Kleinkläranlagen verbraucht wird, wurde der obere Wert für die BSB_5-Konzentration angenommen. Die so ermittelten Werte sind fast identisch zu den für die Berichterstattung ermittelten Werten.

Tabelle 450: Verifikation CH_4 aus abflusslosen Gruben, in Kilotonnen [kt]

CH_4 aus abflusslosen Gruben	2020	2021	2022	2023	2024
über BSB_5-Fracht / EW (Gujer)	0,955	0,956	0,957	0,958	0,959
über BSB_5-Konzentration & Abwasseranfall (BDZ)	0,991	0,992	0,993	0,994	0,995

Für die Ableitung des EF für Methanemissionen aus der zentralen Abwasserbehandlung wurden alle verfügbaren Datenquellen genutzt. Eine Verifizierung ist mangels alternativer Datenquellen nicht möglich.

Die Anwendung der IPCC Guideline für die Berechnung der Emissionen aus der zentralen Abwasserbehandlung ist nicht anwendbar. Der Vergleich mit der IPCC-Methodik und den Default-Werten ergibt für die abflusslosen Gruben ca. eine Verdreifachung der Emissionen. Die Vorgehens-weise wird aber, aufgrund der durch die Umgebungstemperatur eingeschränkten Methanogenese, als nicht anwendbar eingestuft, weshalb ein landesspezifischer MCF abgeleitet wurde. Auch hier kommt eine auf Deutschland bezogene Methode, basierend auf Messungen, zur Anwendung.

Die Verifikation des MCF von abflusslosen Gruben erfolgte in einem dritten Ansatz anhand eines generellen Vergleichs mit der Vorgehensweise anderer Länder. Dabei wird die gesamte Abwasserbehandlung betrachtet, der MCF (soweit in den betrachteten Berichten vorhanden) ist ein Teil dieser Betrachtung.

Ein Vergleich des IEF für Methanemissionen im Bereich kommunale Abwasserbehandlung für das Berichtsjahr 2021 mit internationalen IEF (GHG Locator 2023;(UNFCCC, 2023a); letzter verfügbarer Stand; laut Aussage UNFCCC inzwischen eingestellt) zeigt eine gute Übereinstimmung mit den meisten anderen Staaten. Die Werte liegen mit vergleichbaren Ländern, wie Österreich und Schweiz, in der gleichen Größenordnung. Mit der weiter landesspezifisch angepassten Methodik für Deutschland ab NID 2024 ist eine Erhöhung des IEF für Deutschland für kommende Vergleiche wahrscheinlich. Eine ähnliche Entwicklung kann sich

durch angepasste Methodiken für Österreich und Schweiz nach dem Berichtsjahr 2021 wiederum ausgleichend auf die Lage der IEF zueinander auswirken.

Die Methodik und resultierende Emissionsfaktoren wurde mit Ländern, die über einen ähnlichen Stand der Abwassertechnik verfügen, verglichen. Es wurde jeweils der NID 2024 betrachtet, wobei für Deutschland die für den NID 2025 berichtete Methode herangezogen wurde. Die Vergleichbarkeit der verwendeten Parameter ist insgesamt gut. Im Detail zeigte sich Folgendes:

- Österreich (Anderl et al., 2025): Mit dem NID 2025 wurde die Methodik für Österreich angepasst. Es werden nun neben den direkten Emissionen aus abflusslosen Gruben auch direkte Emissionen aus Abwasserbehandlungsanlagen und der Schlammbehandlung sowie indirekte Emissionen aus der Einleitung in Gewässer berichtet. Weiterhin wurde die Methodik für abflusslose Gruben geändert zu Default-EF der IPCC Refinements, bezogen auf die CSB-Fracht. Für Abwasserbehandlungen werden der Default-EF der IPCC Refinements und die organische Fracht auf Basis einer CSB-Bilanz herangezogen. Für Emissionen aus der Schlammbehandlung wird für anaerobe Schlammbehandlung ein EF von 10kg CH_4/kg Klärschlamm (Trockensubstanz) angesetzt. Bei den Berechnungen orientiert sich Österreich stark an den IPCC Refinements von 2019. Da die Refinements noch nicht verpflichtend anzuwenden und in Deutschland noch nicht umgesetzt sind, wird hier kein Methan aus dem Effluenten berichtet.Da sich die für Deutschland verwendete Methodik stark unterscheidet und die Emissionsfaktoren als Bezugsgröße die Einwohnerwerte heranziehen, ist ein direkter Vergleich nicht möglich. Ein überschlägiger Vergleich der Methanemissionen bezogen auf die Gesamteinwohnerzahlen zeigt, dass für Deutschland ca. 0,01 t CO2-eq/EW und für Österreich ca. 0,02 t CO2-eq/EW berichtet werden.
- Schweiz (Röthlisberger et al., 2025): Die Emissionen aus zentralen Kläranlagen werden zusammengefasst für kommunales und industrielles Abwasser betrachtet. Zur Berechnung werden die IPCC-Methodik und landesspezifische Emissionsfaktoren herangezogen. Methanemissionen werden auch für den Effluenten und für das Kanalsystem berücksichtigt. Für die zentrale Abwasserbehandlung (inkl. Schlammbehandlung) wird ein EF von 0,0094 kg CH_4/kg CSB angegeben. Dies ergibt mit einer Umrechnungüber 120g CSB/EW*d einen EF von 0,4 kg CH_4/EW*a. Der EF für den entsprechenden Bereich für Deutschland liegt nahe dieses Wertes.

7.5.1.1.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (5.D.1 Abwasserbehandlung)

Die statistisch erfassten Bevölkerungsdaten der Gesamtbevölkerung Deutschlands wurden für 2022 und 2023 angepasst und sind leicht gestiegen. Für 2022 wurde der zuvor extrapolierte Wert für Einwohner mit Anschluss an abflusslose Gruben gegen einen statistisch erhobenen Wert ausgetauscht. Aufgrund angepasster Inter- bzw. Extrapolation änderten sich somit die Zahl der Einwohner mit Anschluss an abflusslose Gruben ab dem Jahr 2020. Der sich zuvor abzeichnende leicht abfallende Trend dieses Wertes wurde durch die statistischen Daten nicht bestätigt. Die Einwohnerzahl mit Anschluss an abflusslose Gruben ist somit leicht gestiegen. Folglich kam es auch zu leichten Änderungen bei den errechneten Zwischenergebnissen sowie Hilfsgrößen mit dem Ergebnis, dass die Emissionen aus abflusslosen Gruben (für 2023 ca. 10%) und Kläranlagen und somit auch die Gesamtemissionen des Sektors (für 2023 ca. 1%) jeweils leicht höher liegen als letztjährig berechnet.

Tabelle 451: Rückrechnung der CH_4-Emissionen aufgrund angepasster Bevölkerungszahlen insgesamt und mit Anschluss an abflusslose Gruben

Bezeichnung	Einheit	NID	2020	2021	2022	2023
Einwohner Deutschland ges.	[kpf]	2026	83.155.031	83.237.124	83.118.501	83.456.045
		2025	83.155.031	83.237.124	82.711.282	82.711.282
Einwohner an abflusslosen Gruben	[kpf]	2026	397.357	397.715	398.072	398.429
		2025	386.533	376.067	365.600	355.133
Organische Fracht Deutschland gesamt	[kt/a]	2026	2.367,424	2.369,761	2.366,384	2.375,994
		2025	2.367,424	2.369,761	2.354,790	2.354,790
Organische Fracht abflusslosen Gruben	[kt/a]	2026	8,702	8,710	8,718	8,726
		2025	8,465	8,236	8,007	0,008
Impliziter Emissionsfaktor	[kg/kg]	2026	0,0004036005	0,0004035650	0,0004045041	0,0004032297
		2025	0,0003926064	0,0003815986	0,0003733365	0,0003626483
CH_4 aus abflusslosen Gruben	[kt]	2026	0,955	0,956	0,957	0,958
		2025	0,929	0,904	0,879	0,854
CH_4 aus Kläranlagen	[kt]	2026	31,983	32,014	31,969	32,098
		2025	31,983	32,014	31,812	31,812
CH_4 gesamt	[kt]	2026	32,938	32,971	32,926	33,057
		2025	32,912	32,919	32,691	32,666

7.5.1.1.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (5.D.1 Abwasserbehandlung)

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4 Verbesserungen des Inventars, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

7.5.1.2 Methanemissionen der kommunalen Schlammbehandlung (5.D.1 Schlammbehandlung)

7.5.1.2.1 Beschreibung der Kategorie (5.D.1 Schlammbehandlung)

Die Behandlung von kommunalem Schlamm besteht in aller Regel aus zwei Behandlungsschritten:

- Entwässerung: maschinelle Verfahren (Kammerfilterpresse, Zyklon), Verdunstung in Schlammentwässerungsbecken oder Trockenbeeten
- Stabilisierung: Aerobe Stabilisierung (offenes Becken mit Sauerstoffeinleitung) oder anaerobe Stabilisierung im Faulturm;
- (Bis 1993: Offene Schlammfaulung)

Der bei der Abwasserbehandlung entstehende Sekundär- bzw. Überschussschlamm sowie der Primärschlamm werden gemeinsam im Faulturm anaerob behandelt und damit anaerob stabilisiert. Dabei entsteht Faulschlamm, der i. d. R. nach weiterer Aufbereitung bzw. nach Abschluss der abwasserseitigen Behandlung die Abwasserbehandlungsanlage als Klärschlamm verlässt. Mit der Klärschlammfaulung ist sichergestellt, dass der Klärschlamm keine leicht biologisch abbaubaren Stoffe mehr enthält und ausgefault ist. Es wird davon ausgegangen, dass aus ausgefaultem Schlamm keine weiteren Methanemissionen entstehen. Die Emissionen aus

der Schlammbehandlung sind integraler Bestandteil des unter 7.5.1.1.2 beschriebenen Emissionsfaktors. Daher sind alle vom Klärschlamm ausgehenden Emissionen in 5.D.1 erfasst. Es wird angenommen, dass keine Emissioen in anderen Sektoren stattfinden. Angaben zu den Mengen des Schlammes vor der Faulung sind nicht verfügbar.

Die Schlammstabilisierung erfolgt, um eine unkontrollierte Faulung zu verhindern. Diese erfolgt bei größeren Anlagen anaerob und kann bei kleineren Anlagen aerob erfolgen. Alternativ wird der Klärschlamm zur anaeroben Stabilisierung zu größeren Anlagen transportiert, die mit einer Faulung ausgestattet sind [102]. Die Menge an bei der anaeroben Schlammstabilisierung entstehendem Faulgas hängt insbesondere von der Zusammensetzung des Schlamms, der Temperatur sowie den Reaktionsbedingungen ab. Das entstehende Gas wird in der Regel energetisch in Blockheizkraftwerken (BHKW) genutzt und unter 1.A.1 berichtet.

Bezogen auf die Einwohnerwerte stellt die maschinelle *Entwässerung* vor bzw. nach Behandlung im Faulturm derzeit das überwiegende Behandlungsverfahren dar (Ausnahme: kleine ländliche Kläranlagen). Dazu kommt, dass der Schlamm vor der weiteren Verwendung noch stabilisiert wird.

Noch bis Anfang der 90er Jahre wurde in den neuen Bundesländern die offene Schlammfaulung zur Schlammstabilisierung betrieben, die zur Emission von Methan führte. Die offene Schlammfaulung hat heutzutage keine Relevanz mehr. Sie wurde schrittweise reduziert und 1994 eingestellt. Die Emissionen aus der offenen Schlammfaulung sind jedoch auch heute noch der Grund, weshalb in den CRF unter diesem Punkt NO berichtet wird, anstelle von IE (für die energetische Nutzung unter 1.A.1 – siehe oben), denn bis einschließlich 1993 gab es diese Technik und die damit verbundenen Emissionen.

Der Klärschlamm sowie das behandelte Abwasser sind die Endprodukte der Abwasserbehandlung.

Der nach der biologischen Abwasserbehandlung anfallende Klärschlamm wird in Deutschland, ggf. nach der Entwässerung und Stabilisierung zumeist zunächst einer Trocknung (maschinelle Trocknung, Solartrocknung u. ä. und anschließend den folgenden Entsorgungswegen zugeführt:

- Thermische Verwertung: Es entstehen dem Sektor keine Methanemissionen. Die thermische Verwertung erfolgt unter energetischer Nutzung und geht daher in CRF 1 ein.
- Stoffliche Verwertung: Zur stofflichen Verwertung des Klärschlamms zählen insbesondere die Verwertung als Sekundärrohstoffdünger in der Landwirtschaft laut Klärschlammverordnung sowie Düngemittelverordnung sowie die Nutzung bei landschaftsbaulichen Maßnahmen und in weiteren Einsatzbereichen, die vernachlässigbar sind.

Tabelle 452: Verwertung von ausgefaultem Klärschlamm (Trockenmasse), in [t]

Klärschlamm (Trockenmasse TM [t])	2020	2021	2022	2023	2024
Gesamtmenge	1.740.556	1.717.803	1.667.083	1.629.897	1.629.897
Thermische Verwertung	1.334.994	1.364.890	1.336.621	1.320.434	1.320.434
- Monoverbrennung	507.929	525.763	583.780	656.344	656.344

[102] Im Jahr 2023 wurde in 1.276 Abwasserbehandlungsanlagen Faulgas gewonnen Statistisches Bundesamt. (2017). Persönliche Mitteilung von Herrn Kaiser; E 207: Deutschland - Erhebung über Gewinnung, Verwendung und Abgabe von Klärgas. In, Statistisches Bundesamt. (ab 2012). Persönliche Mitteilung von DESTATIS-Mitarbeitern aus FG E 207: Deutschland - Erhebung über Gewinnung, Verwendung und Abgabe von Klärgas; jährlich. In..

Klärschlamm (Trockenmasse TM [t])	2020	2021	2022	2023	2024
- Mitverbrennung	795.819	810.977	725.634	622.229	622.229
- unbekannt	31.246	28.150	27.207	41.861	41.861
Deponie	0	0	0	0	0
Stoffliche Verwertung	388.886	335.641	322.861	296.930	296.930
- Landwirtschaft	259.851	226.747	231.112	212.899	212.899
- Landschaftsbauliche Maßnahmen	25.181	17.576	13.278	12.801	12.801
- Kompostierung & Vererdung	0	0	78.471	71.230	71.230
- Sonstiges	103.854	91.318	0	0	0
sonstige direkte Verwertung/andere Entsorgung	16.676	17.272	7.601	12.533	12.533

Die Aktivitätsraten der Klärschlammverwertung basieren auf Angaben des Statistischen Bundesamtes (Statistisches Bundesamt, jährlich). Dieser Bericht erschien bisher 3-jährlich, ab 2023 allerdings jährlich. Für die Zwischenjahre wurde bisher auf die Veröffentlichung „Wasserwirtschaft Öffentliche Abwasserentsorgung Klärschlammentsorgung aus der biologischen Abwasserbehandlung“ (Statistisches Bundesamt, ab 2013) zurückgegriffen. Für die Zeit vor 1998 und die Jahre 1999-2000, 2002-2003 sowie 2005 existieren keine Daten. Eine Interpolation ist nicht möglich, da eine Summenbildung auf 100% aufgrund einer statistischen Umstellung ab 2007 nicht möglich ist (Roskosch et al., 2018). Zahlen für das aktuelle Inventarjahr liegen nicht vor, weshalb an dieser Stelle nur die Daten der Vorjahre aufgeführt werden können. Für 2013 berichtete das Statistische Bundesamt zum ersten Mal unter „sonstige direkte Verwertung“ [103].

7.5.1.2.2 Methodische Aspekte (5.D.1 Schlammbehandlung)

7.5.1.2.2.1 Faulgas

Wie oben beschrieben, wird das bei der Faulung in Kläranlagen entstehende Faulgas gefasst und zur Energieerzeugung verwendet. Der Gehalt an Methan im Faulgas beträgt annähernd 65 % (Schön et al., 1993).

Die Ermittlung der Methanmenge im Rohgasvolumen (Statistisches Bundesamt, ab 2012) erfolgt auf folgende Weise:

$$M_{Methan} = V_{Rohgas} \times 0{,}65 \times \sigma \times 0{,}000001$$

Mit:

- M_{Methan} = Masse des durch Faulung erzeugten Methans in [kt]
- V_{Rohgas} = Volumen erzeugtes Faulgas in [m^3]
- 0,65 = Umrechnungsfaktor Gehalt Methan im Faulgas
- σ = Dichte Methan (0,717 kg/m^3) (Synowietz, 1974)

[103] Hierzu zählt auch die Abgabe an Trocknungsanlagen, wenn die weitere Entsorgung nicht bekannt ist.

7.5.1.2.2.2 Faulgasverluste

Die Daten zur Faulgasgewinnung und zur Klärschlammverwendung werden auf Grundlage des Energiestatistikgesetzes jährlich durch die Betreiber an das Statistische Bundesamt berichtet. Eigene Rückfragen bei einigen Abwasserbehandlungsanlagen mit Faulgasgewinnung ergaben, dass die Verluste bezogen auf die potentielle energetische Verwertung der Anlagen bei 5 % angenommen werden können. Dies bestätigen auch die Angaben des Statistischen Bundesamtes (Statistisches Bundesamt, ab 2012). Verluste entstehen bei der Gasfassung durch technische Schwierigkeiten, Havarien und Instandhaltungsmaßnahmen. Ein weiterer Grund für die berichteten Verluste können die unterschiedlichen Messgenauigkeiten zwischen den Messungen an den Gasanfall- und den Verbrauchsstellen sein. Gasfackeln werden auf Kläranlagen in der Regel als Notfalleinrichtung installiert und sind dementsprechend selten in Betrieb. Daher werden sie so ausgelegt, dass sie im Notfall das gesamte anfallende Gas verbrennen können und sind mit einer automatischen Zündung ausgerüstet. Methan-Emissionen durch unverbranntes Faulgas können unter Umständen durch Fehler bei der Zündung der Flamme entstehen. Um dies zu vermeiden, sind in den entsprechenden Regelwerken wie dem DWA-M 305 „Gasfackeln auf Biogasanlagen“ eine automatische Zündung und Flammenüberwachung vorgeschrieben. Eine gesonderte Messung des über die Fackel geführten Gases erfolgt i.d.R. nicht, so dass an dieser Stelle keine genauere Aussage über die Art der Verluste getroffen werden kann. Relevante Methan-Emissionen an Gasfackeln lassen sich betrieblich durch entsprechende Wartungs- und Instandsetzungsintervalle weitestgehend reduzieren. Für den Sektor relevante Methan-Emissionen durch Gasfackeln können somit ausgeschlossen werden.

Ggf. auftretende Verluste auf den Anlagen werden durch die unter 7.5.1.1.2 beschriebenen Berechnungen abgedeckt, da der Bereich der Schlammbehandlung bei der Ermittlung des Emissionsfaktors mit einbezogen wurde.

7.5.1.2.2.3 Offene Schlammfaulung

Die offene Schlammfaulung wird in Deutschland heute nicht mehr angewendet. Die Daten wurden für die Jahre 1990 – 1994 zuletzt im NIR (UBA et al., 2015) berichtet. Für die offene Schlammfaulung in den neuen Bundesländern wird ein Emissionsfaktor von 210 kg CH_4/t TS angesetzt, basierend auf Ergebnissen der Studie Schön et al. (1993)[104]. Die Aktivitätsraten für die Jahre 1990 bis 1992 wurden dem Umweltbundesamt persönlich durch den damaligen Hauptinspekteur der Wasseraufbereitungsbetriebe der DDR mitgeteilt.

Vor dem Hintergrund, dass in der Bundesrepublik Deutschland die offene Schlammfaulung bereits verboten war, wurde diese Art der Behandlung in den neuen Bundesländern schrittweise abgeschafft und ab dem Jahr 1994 komplett eingestellt.

7.5.1.2.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (5.D.1 Schlammbehandlung)

7.5.1.2.3.1 Faulgas

Die Unsicherheiten bei der Ermittlung und Berechnung der Methanmenge werden wie folgt eingeschätzt (UBA-Expertenschätzung):

Erzeugtes Faulgasvolumen = ±5 %

Unsicherheiten liegen in der Messungenauigkeit der Messgeräte begründet

Methangehalt im Faulgas = ±15 %

[104] Der Emissionsfaktor wurde ermittelt, indem die Differenz aus den Methanemissionen der psychrophilen Schlammstabilisierung in den neuen Bundesländern und der anfallenden Klärschlammenge gebildet wurde.

variiert mit der Zusammensetzung des jeweiligen Abwassers und damit des Schlammes

Dichte von Methan = ±30 %

die Angaben zur Dichte von Methan in der Literatur variieren (abhängig von Temperatur usw.)

Die Angabe der erzeugten Faulgasmenge beruht auf Angaben des statistischen Bundesamtes. Die Zeitreihen sind in sich konsistent. Die Erhebungen erfolgen jährlich. Die Ergebnisse dieser Erhebungen sind als genau einzustufen.

7.5.1.2.3.2 Offene Schlammfaulung

Die Unsicherheiten der offenen Schlammfaulung wurden nicht abgeschätzt, weshalb auf die Default-Werte (Konservative Faktoren) der UNFCCC Decision 20/CMP.1 (UNFCCC, 2006) zurückgegriffen wird. Die Aktivitätsraten zwischen 1990 und 1992 basieren auf einer persönlichen Mitteilung des damaligen Hauptinspekteurs der Wasseraufbereitungsbetriebe der DDR, die für 1993 hingegen auf einer Abschätzung des Umweltbundesamtes.

7.5.1.2.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (5.D.1 Schlammbehandlung)

Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Der für die Ermittlung des Methangehalts im Klärgas verwendete durchschnittliche Methangehalt von Klärgas von 65 % (Schön et al., 1993) wurde mit Daten des Statistischen Bundesamts verglichen (Statistisches Bundesamt, ab 2012). Für 2015 wurde eine durchschnittlicher Methangehalt inKlärgas von 63,17 % aus den Daten des Statistischen Bundesamtes entnommen. Der verwendete Wert gilt damit als verifiziert. Eine Überprüfung der Werte für 2023 ergab einen druchschnittlichen Methangehalt von 62,38 %. Die Verifikation kann somit weiterhin bestätigt werden.

Vergleichbare Emissionsdaten für Deutschland oder alternative Daten zur Methangewinnung aus Kläranlagen sind nicht bekannt.

7.5.1.2.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (5.D.1 Schlammbehandlung)

Die Werte für Klärschlammgewinnung und Verluste sind bis einschließlich 2022 verfügbar. Die Werte für 2023 wurden mittels der Werte für 2022 fortgeschrieben.

7.5.1.2.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (5.D.1 Schlammbehandlung)

Zurzeit erscheinen Verbesserungen als nicht notwendig oder möglich, da keine weiteren Aktivitätsdaten verfügbar sind.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4 Verbesserungen des Inventars, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

7.5.1.3 Lachgasemissionen aus dem kommunalen Abwasser (5.D.1 Lachgas kommunal)

7.5.1.3.1 Beschreibung der Kategorie (5.D.1 Lachgas kommunal)

Kommunales Abwasser enthält eine Vielzahl Stickstoffverbindungen. Im Verlauf bakterieller Abbauprozesse wird ein Teil des organisch verfügbaren Stickstoffs wieder in Biomasse umgewandelt.

Direkte Emissionen: Um den verbleibenden Stickstoff im Abwasser weitestgehend zu eliminieren, werden in Deutschland, ergänzend zur biologischen Abwasserbehandlung, nahezu alle kommunalen Kläranlagen mit einer zusätzlichen Nitrifikations- und Denitrifikationsstufe betrieben. Bei der Nitrifikation werden unter aeroben Bedingungen die im Abwasser enthaltenen Stickstoffverbindungen in Nitrat und bei der Denitrifikation wird der im Nitrat gebundene Stickstoff zu molekularem Stickstoff und Stickoxiden umgewandelt. Unter ungünstigen Bedingungen (siehe auch Kapitel 7.5.2.2.1) kann dabei auch Lachgas (N_2O) als Nebenprodukt/Zwischenprodukt bei beiden Prozessen entstehen, wobei die Denitrifikation als Quelle zu dominieren scheint (IPCC (2006a): Vol. 5, Kapitel 6.1 Seite 6.8).

Indirekte Emissionen: Der nach Abschluss der Abwasserbehandlung im Abwasser verbleibende Stickstoff gelangt in die Gewässer. Dort können unter Umständen mikrobielle Abbauprozesse stattfinden, in deren Verlauf u.a. Lachgas gebildet und emittiert werden kann.

Für die Ermittlung der Gesamtemissionen an Lachgas, die aus dem kommunalen Abwasser entstehen, werden die direkten Lachgasemissionen (N_2O_{PLANTS}) und die indirekten Lachgasemissionen ($N_2O_{Effluent}$) bestimmt.

Die Gesamtemission ergibt sich wie folgt:

$$N_2O_{Gesamt} = N_2O_{PLANTS} + N_2O_{EFFLUENT}$$

Der Trend der Emissionen war aufgrund des starken Ausbaus der Denitrifikationstechnik in den Abwasserbehandlungsanlagen im Zeitraum von 1990 bis etwa 2001 stark fallend. Ursache hierfür war die Umsetzung der Kommunalabwasserrichtline der EU (BML, 1991), die Anfang der 1990er Jahre die Nährstoffelimination in Kläranlagen zum Stand der Technik machte. Mit dem erreichten hohen Niveau dieser Technologie seit etwa 2005 hat sich der Trend der Emissionen als leicht fallend etabliert.

7.5.1.3.2 Methodische Aspekte (5.D.1 Lachgas kommunal)

Direkte Emissionen

Gemäß 2006 IPCC Guidelines sind direkte Emissionen nur von Ländern zu berichten, die über fortschrittliche Abwasserbehandlungsanlagen verfügen. Diese sind durch Nitrifikations- und Denitrifikationsstufen charakterisiert. Wie oben beschrieben entstehen Lachgasemissionen gemäß IPCC (ebd.) überwiegend bei der Denitrifikation. Aus diesem Grund wird im Folgenden der Grad der Ausstattung der deutschen Kläranlagen mit Denitrifikationstechnologien zur Berechnung herangezogen (T_{Plant}) und nicht der Nitrifikationstechnologien. 99 % der Abwassermenge wird in Kläranlagen mit einer Nitrifikation und 97 % in Kläranlagen mit einer Denitrifikation behandelt (Statistisches Bundesamt, 2024a). Für die Berechnung der Lachgasemissionen werden kommunale Kläranlagen berücksichtigt, die mit einer Denitrifikation ausgestattet sind.

Gemäß 2006 IPCC Guidelines IPCC (2006a): Vol. 5, Kapitel 6.3.1.3, Gleichung 6.9) werden die Lachgasemissionen wie folgt berechnet:

$$N_2O_{PLANTS} = P \times T_{PLANT\,DENI} \times F_{IND-COM} \times EF_{PLANT}$$

Mit:

- N_2O_{PLANTS} = gesamte jährliche N_2O Emission der Anlagen in [kg N_2O/a]
- P = Bevölkerung

- $T_{PLANT\ DENI}$ = Grad der Nutzung moderner Kläranlagen mit Denitrifikation in [%/100] (d.h. bezogen auf die gesamte Abwasserfracht in Deutschland)
- $F_{IND\text{-}COM}$ = Anteil des industriellen / kommerziellen Abwassers, landesspezifisch angepasster Wert = 1.3
- EF_{PLANT} = landesspezifisch abgeleiteter Emissionsfaktor, 35 g N_2O/Person x Jahr

Für den Emissionsfaktor wurde auf Grundlage internationaler Veröffentlichungen nun ein Wert von 0,035 kg Lachgas pro Jahr und Einwohner abgeleitet (bisher nicht veröffentlicht), der die Situation in Deutschland nach aktueller Datenlage ausreichend gut darstellt. Aufgrund der nur bedingt vergleichbaren Messungen an Einzelanlagen und den dabei angewendeten unterschiedlichen Verfahren zur Probenahme und Detektion ist mit hohen Unsicherheiten zu rechnen. Die Zahl der Einwohner (P = Bevölkerung), der Grad der Nutzung moderner zentralisierter Abwasser-behandlungsanlagen mit Denitrifikation ($T_{PLANT\ DENI}$) und der Anteil des über kommunale Anlagen entsorgten Abwassers aus Industriebetrieben (Indirekteinleitungen) und Betrieben des produzierenden Gewerbes ($F_{IND\text{-}COM}$)sind landesspezifisch ermittelte Werte. $F_{IND\text{-}COM}$ muss berücksichtigt werden, da der Berechnungsansatz ansonsten nur die angeschlossenen Einwohner (EW) und keine Einwohnergleichwerte (EWG) der Indirekteinleitungen brücksichtigen würde.

Aufgrund des Anteils von gewerblichen bzw. industriellen Abwässern (2016: 38.478.100 Einwohner-gleichwerte, EWG = 32,8 %) an der Gesamtfracht des in kommunalen Kläranlagen (2016: 117.448.800 Einwohnerwerte gesamt, EW = 100 %) (Statistisches Bundesamt, 2024b) behandelten Abwassers von ca. 30% , wurde $F_{IND\text{-}COMM}$ auf 1,3 festgelegt.

Indirekte Emissionen

Gemäß der in der 2006 IPCC Guidelines vorgeschlagenen Vorgehensweise wird zunächst die Jahresgesamtmenge Stickstoff im Abwasserablauf ermittelt.

Dies erfolgt auf Grundlage folgender für Deutschland angewendeter Formel:

$$N_{EFFLUENT} = V_{Abw} \times N_{ges} \times F_N$$

Mit:

- $N_{EFFLUENT}$ = Jahresgesamtmenge Stickstoff im Abwasserablauf in [kg N/a]
- V_{Abw} = Gesamtmenge Abwasser
- N_{ges} = mittlere Stickstoff-Konzentration im Kläranlagenablauf für Deutschland in [mg/l]
- F_N = Umrechnungsfaktor N_{ges} in Gesamt-N

Die Gesamtmenge des in Deutschland behandelten Abwassers und die Stickstoffkonzentration werden von Destatis (Statistisches Bundesamt, 2024a) bezogen. Nicht berichtete Werte werden hierbei inter- bzw. extrapoliert. Vereinfachend wird bzgl. der Jahresabwassermenge der Kläranlagenzulauf dem Kläranlagenablauf gleichgesetzt. Da die Stickstoffkonzentration als klassischer Abwasserparameter Nges berichtet wird und dieser nur die Summe der anorganischen Stickstoffparameter umfasst, muss an dieser Stelle eine Umrechnung in den Gesamtstickstoffgehalt erfolgen. Hierfür wurde aus den in (DWA, seit 1988)zur Verfügung stehenden Daten ein Umrechnungsfaktor von 1,21 ermittelt.

Die Lachgasemissionen werden gemäß IPCC- wie folgt ermittelt:

$$N_2O = N_{EFFLUENT} \times EF_{EFFLUENT} \times \frac{44}{28}$$

Mit:

- N_2O = N_2O Emissionen in [kg N_2O/a]
- $N_{EFFLUENT}$ = Stickstoff, der in die aquatische Umwelt ausgetragen wird in [kg N/a]
- $EF_{EFFLUENT}$ = Emissionsfaktor für ins Abwasser ausgetrages N_2O in [kg N_2O-N/kg N] (Default = 0,005)
- 44/28 = Umrechnungsfaktor von N_2O-N in N_2O

Die Gesamtemissionen an Lachgas aus dem Bereich der kommunalen Abwasserbehandlung ergeben sich durch Summenbildung der detailliert beschriebenen direkten und indirekten Emissionen.

7.5.1.3.3 Unsicherheit und Zeitreihenkonsistenz (5.D.1 Lachgas kommunal)

Es werden folgende Unsicherheiten verwendet:

- P (Expertenschätzung) = ±3 %
- $T_{PLANT\ DENI}$ (Expertenschätzung) = ±5 %
- $F_{IND\text{-}COM}$ (Expertenschätzung) = ±25 %
- EF_{Plant} (abgeleitet aus Schwankungsbreiten des zugrundeliegenden Forschungsvorhaben) = -100/+500 %
- V_{Abw} (Expertenschätzung) = ±5 %
- N_{ges} (Expertenschätzung) = ±5 %
- F_N (Expertenschätzung) = ±10 %
- $EF_{EFFLUENT}$ (IPCC (2006a): Vol. 5, Tabelle 6.11) = -90/+4900 %

Die Aktivitätsraten basieren auf Angaben des Statistischen Bundesamtes. Die Bevölkerungszahl (P) in Deutschland wird jährlich, die Menge des in Kläranlagen mit Denitrifikation behandelten Abwassers (resultiert in TPLANT DENI), die gesamte Jahresabwassermenge (VAbw) und die durchschnittliche Stickstoffkonzentration im Kläranlagenablauf (Nges)alle drei Jahre (ohne Angabe von Unsicherheiten) erhoben. Die Ergebnisse der Erhebungen sind, da es sich um Totalerhebungen handelt, als sehr genau einzustufen. Werte für die Jahre vor 1998 wurden extrapoliert und sind plausibel, da mit Beginn der 1990er Jahre in Deutschland die Stickstoffelimination in Kläranlagen ausgebaut wurde. Alle fehlenden Daten werden linear interpoliert oder extrapoliert.

Die Unsicherheit für den EF_{Plant} ergibt sich aus der Ableitung des neuen landesspezifischen EF (noch nicht veröffentlicht), bzw. des zugrundeliegenden Forschungsvorhabens.

Der für die Umrechnung von N_{ges} in Gesamt-N benötigte Faktor wurde auf Grundlage komplementärer Daten aus (DWA, seit 1988) ermittelt. Ca. 87% der Jahresabwassermenge für Deutschland wird in Anlagen behandelt, die der DWA zugehörig sind. Es ist daher eine hinreichende Deckung vorhanden, um einen durchschnittlichen Wert für das Verhältnis der beiden Parameter zueinander ableiten zu können.

Die Unsicherheiten für den EFEFFLUENT werden den (IPCC (2006a): Vol. 5, Tabelle 6.11) entnommen. Der Wertebereich liegt bei 0,005-0,25 kg N2O-N/kg N.

7.5.1.3.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/ -kontrolle und Verifizierung (5.D.1 Lachgas kommunal)

Eine allgemeine und kategoriespezifische Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Für die Ableitung landesspezifischer Emissionsfaktoren (Anwendung ab NID 2024) für die direkten Methan- und Lachgasemissionen aus der Abwasserbehandlung wurde eine umfangreiche Betrachtung internationaler Publikationen zur Thematik durchgeführt, die Erkenntnisse in die für Deutschland geltenden Rahmenbedingungen eingeordnet und in einer eigenen Veröffentlichung (Veröffentlichung ausstehend) festgehalten.

Für die Berechnung der Lachgasemissionen wurden alle verfügbaren Datenquellen genutzt. Eine Verifizierung ist mangels alternativer Datenquellen nicht möglich.

Die IPCC-Methodik zur Ermittlung der Lachgasemissionen ist, wie beschrieben, nur teilweise anwendbar, da es durch die Nichtberücksichtigung der durch die Denitrifikation eliminierten Stickstofffracht zu einem deutlich überschätzten Ergebnis kommt. Daher wird eine angepasste Methodik angewandt. Die EF der 2006 IPCC Guidelines werden als Default-Wert nur noch für die Berechnungen der indirekten Emissionen herangezogen. Gemäß der derzeit nicht anzuwendenden Refinements zu den IPCC Guidelines von 2019 ist der aktuell angewendete Default-Wert nur für mit Nährstoffen unbelastete Gewässer anzuwenden. Für vorbelastete Gewässer wäre demnach ein höherer Emissionsfaktor anzusetzen. Da die Gewässer in Deutschland nicht durchgehend als nicht vorbelastet und in einem guten Zustand befindlich eingestuft werden können, muss diese Vorgehens-weise künftig geprüft und ggf. ein für Deutschland spezifischer Emissionsfaktor abgeleitet werden.

Ein Vergleich des IEF für Lachgasemissionen im Bereich kommunale Abwasserbehandlung für das Berichtsjahr 2021 mit internationalen IEF (GHG Locator (UNFCCC, 2023a); letzter verfügbarer Stand; laut Aussage UNFCCC inzwischen eingestellt) zeigt eine gute Übereinstimmung mit den meisten anderen Staaten. Dies wird auf die bisherige Anwendung der Berechnungsmethode gemäß IPCC-Guidelines zurückgeführt. Erkennbar höhere IEF können am Beispiel Österreich und Schweiz mit der Verwendung einer landesspezifischen Methode in Verbindung gebracht werden. Mit der Anwendung einer landesspezifisch angepassten Methodik für Deutschland ab NID 2024 ist eine Annäherung der Werte für kommende IEF Vergleiche wahrscheinlich.

Die für Deutschland angewandte Methodik und resultierende Emissionsfaktoren konnten mit Ländern, die über einen ähnlichen Stand der Abwassertechnik verfügen, verglichen werden. Es wurde jeweils der NID 2024 betrachtet, wobei für Deutschland die hier berichtete Methodik des NID 2025 zugrundeliegend ist. Hierbei zeigte sich Folgendes:

- Österreich (Anderl et al., 2025): Die Berechnung erfolgt analog den IPCC-Guidelines. Es kann auf gemessene Stickstoffwerte zurückgegriffen werden. Für die Berechnung der Emissionen aus der zentralen Abwasserbehandlung wird ein landesspezifischer, auf Messungen beruhender, EF verwendet. Dieser liegt mit 43 g N_2O/EW*a nahe an dem für Deutschland abgeleiteten Wert von 35 g N_2O/EW*a. Für die Ermittlung der Emissionen aus dem Effluenten wird, wie auch für Deutschland, der Default-Wert (0,005 kg N_2O-N/kg N) genutzt.
- Schweiz (Röthlisberger et al., 2025): Die Berechnungen für Emissionen aus der Abwasserbehandlung und dem Effluenten erfolgen gemäß IPCC-Guideline. Zur Berücksichtigung der entfernten N-Fracht kann auf landesspezifische Daten für Zulauf und Ablauf zurückgegriffen werden. Für die Emissionen aus dem Effluenten wird, wie auch für Deutschland, der EF entsprechend der Default-Werte angewandt. Der EF für die direkten Emissionen ist nach einem Stufenmodell entsprechend der Art und Umfang der Stickstoffentfernung durch die Kläranlage mittels landesspezifischer EF abgebildet.

7.5.1.3.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (5.D.1 Lachgas kommunal)

Die statistisch erfassten Bevölkerungsdaten der Gesamtbevölkerung Deutschlands wurden für 2022 und 2023 angepasst und sind leicht gestiegen. Für 2022 wurden die zuvor extrapolierte Werte für Jahresabwassermenge gesamt, Jahresabwassermenge mit Denitrifikation behandelt und die Konzentration an N_{ges} im Kläranlagenablauf gegen statistisch erhobene Werte ausgetauscht. Aufgrund angepasster Inter- bzw. Extrapolation änderten sich somit die Werte ab dem Jahr 2020, inkl. der daraus ermittelten Hilfsgrößen Gesamtstickstoff und Splittingfaktor. Die Gesamtbevölkerung stieg imk Vergleich zu den zuvor berichteten Daten leicht an. Die Jahresabwassermengen sowie die Konzentration an Nges im Ablauf gingen leicht zurück. Dies resultierte aufgrund der methodischen Zusammenhänge im Vergleich zur letztjährigen Berechnung in einer Reduktion der indirekten (für 2023 ca. 10%) und einen leichten Anstieg der direkten Emissionen (für 2023 ca. 1%). Im Ergebnis sanken die Gesamtemissionen sehr leicht (für 2023 ca. 0,5%).

Tabelle 453: Rückrechnung der N_2O-Emissionen

Bezeichnung	Einheit	NID	2020	2021	2022	2023
Einwohner Deutschland gesamt	[kpf] in 1000	2026	83.155.031	83.237.124	83.118.501	83.456.045
		2025	83.155.031	83.237.124	82.711.282	82.711.282
Jahresabwassermenge gesamt	[m³] in 1000	2026	8.808.439,667	8.568.937,333	8.329.435,000	8.089.932,667
		2025	8.870.238,667	8.692.535,333	8.514.832,000	8.337.128,667
Jahresabwassermenge (Denitrifikation)	[m³] in 1000	2026	8.482.148,667	8.288.413,333	8.094.678,000	7.900.942,667
		2025	8.539.662,333	8.403.440,667	8.267.219,000	8.130.997,333
Nges Durchnschnitt (N anorg.)	[mg/l]	2026	7,60	7,50	7,40	7,30
		2025	7,73	7,77	7,80	7,83
N_2O Emissionen Indirekt	[kt]	2026	0,636	0,611	0,586	0,562
		2025	0,652	0,642	0,631	0,621
N_2O Emissionen Direkt	[kt]	2026	3,643	3,663	3,675	3,709
		2025	3,643	3,661	3,654	3,670
N_2O Emissionen Gesamt	[kt]	2026	4,280	4,274	4,261	4,270
		2025	4,295	4,303	4,285	4,291

7.5.1.3.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (5.D.1 Lachgas kommunal)

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4 Verbesserungen des Inventars, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

7.5.2 Industrielle Abwasserbehandlung (5.D.2)

7.5.2.1 Methanemissionen der industriellen Abwasserbehandlung (5.D.2)

7.5.2.1.1 Beschreibung der Kategorie (5.D.2 CH_4)

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	Emissionsfaktoren
CH_4	Tier2/CS	NS	CS
N_2O	Tier 2/CS	NS	CS

Die Emissionen der industriellen Abwasserbehandlung sind keine Hauptkategorie.

Die hier berichteten CH_4-Emissionen beziehen sich gemäß (IPCC, 2006a) ausschließlich auf den Teil des Abwassers, der in industriellen Abwasserbehandlungsanlagen behandelt wird. Der Teil des industriellen Abwassers, der kommunalen Anlagen zugeleitet wird, wird unter 5.D.1 (Kommunale Abwasserbehandlung) mitberücksichtigt.

Die Grundlagen für die Berechnungen für CH_4 aus der industriellen Abwasserbehandlung werden im zugrunde liegenden Forschungsbericht (Austermann-Haun & Witte, 2014) ausführlich beschrieben.

Die biologische Stufe der industriellen Abwasserbehandlung wird in Deutschland teils aerob teils anaerob betrieben. Beim anaeroben Abbau der organischen Abwasserinhaltsstoffe entsteht Faulgas, welches größtenteils aus CO_2 und CH_4 besteht.

In Deutschland werden heutzutage Industrieabwässer in vielen Branchen, vor allem in der Lebensmittelindustrie, anaerob behandelt. Daten zur Anlagentechnik werden in Deutschland nicht systematisch erhoben. Eine Auswertung von (Austermann-Haun & Witte, 2014) ergibt allerdings, dass derzeit in Deutschland 184 Anaerobanlagen bei 136 Betrieben in 26 Wirtschaftszweigen von der Gemüseverarbeitung über Zucker- und Papierherstellung bis hin zur Herstellung von Reinigungsmitteln in Betrieb sind. Die größten CSB-Frachten, die anaerob behandelt werden, stammen aus der Papier- und Zellstoffherstellung, der Zuckerherstellung und aus den Brauereien.

Zur anaeroben Industrieabwasserbehandlung kommen vor allen Dingen Schlammbettreaktoren (UASB- und EGSB-Reaktoren) sowie das anaerobe Belebungsverfahren zum Einsatz. Alle Anlagen verfügen vorschriftsgemäß über eine Gasfackel mit automatischer Zündung. Lediglich ein einziger (relativ kleiner) Betrieb der Zuckerherstellung behandelt sein Abwasser in anaeroben Teichen.

Das entstehende Faulgas wird nahezu vollständig gefasst, im Betrieb verfeuert und substituiert somit Stadtgas oder es wird zur Stromerzeugung verwendet. Die energetische Nutzung wird unter CRF 1.A.1 berichtet. Die vom Statistischen Bundesamt veröffentlichten Daten zur Klärgasmenge beinhalten sowohl das in dieser Kategorie entstehende Faulgas, als auch das der kommunalen Anlagen (Telefonat UBA-Fachexperte mit DESTATIS, 23.8.2016).

Für Deutschland existieren daher lediglich die CH_4-Emissionen, die durch ungewollte Verluste entstehen. Diese ungewollten Verluste können sein:

- CH_4, welches im Ablauf der Methanreaktoren in der Flüssigphase enthalten ist (die Löslichkeit von Methan ist temperaturabhängig, siehe Abschnitt „Methodische Aspekte“),
- Verluste in Gasspeichern,
- Verluste über den abgezogenen Schlamm in Pelletspeichern (Speicher für den granulierten Schlamm von Schlammbettreaktoren),
- Gas, welches in einer nicht belüfteten Teichanlage der Zuckerindustrie entsteht,
- Gas, welches in Versäuerungsreaktoren entsteht,
- Verluste aus Leckagen/Störfällen/Fackelverlusten.

Gasfackeln sind ausschließlich als Notfackeln im Einsatz, für den Fall, dass beispielsweise Wartungsarbeiten am BHKW vorgenommen werden müssen. Die Gasfackeln werden so ausgelegt, dass sie im Notfall das gesamte anfallende Gas verbrennen können. Die Gasmenge, die über die Gasfackeln geht, wird nicht erfasst. Die Fackeln werden als Notfackeln verwendet, die verbrannte Gasmenge liegt in diesem Anwendungsbereich nahe Null. Gasfackeln sind mit einer automatischen Zündung ausgerüstet, um in Störfällen sicher das anfallende Gas zu verbrennen. Während der Anfahr- und Abfahrphase von Vergärungsanlagen wird das entstehende Methan auf Grund zu geringer Methankonzentrationen auch über die Gasfackeln verbrannt, bei Kampagnenbetrieben also jeweils zum Kampagnenbeginn und -ende. Methanemissionen aus Hochleistungsfackeln werden in Fachkreisen mit Null bewertet.

Störfälle, die mit Gasverlusten einhergehen, sind nach Expertenschätzung (Austermann-Haun & Witte, 2014) in den letzten Jahrzehnten auf dem Gebiet der anaeroben Industrieabwasser-behandlung zweimal in Form von Undichtigkeiten des Methanreaktors im Gasraum aufgetreten. Wegen der mit Leckagen verbundenen Gerüche, werden Leckagen schnell gesucht, gefunden und beseitigt. Im Jahr 1992 wurde durch Geruchsprobleme auf der Kläranlage ein Leck in der GFK-Abdeckung (GFK; Glasfaserverstärkter Kunststoff; glass-fibre reinforced plastic) des Methanreaktors gefunden. Ein zweiter Fall einer Undichtigkeit trat 2013 im Dach eines Methanreaktors aus Stahl auf. Aufgrund der wenigen Störfälle (2 in 30 Jahren bei Betrieb von nunmehr 184 Methanreaktoren), werden die Methanemissionen aus Störfällen als vernachlässigbar eingestuft.

Andere Störfälle, die z.B. zu einer Hemmung der Methanbakterien führen, führen zu keinen Methanemissionen.

7.5.2.1.2 Methodische Aspekte (5.D.2 CH_4)

Die gewählte Berechnungsmethode entspricht Tier 2.

Für 20 der 26 relevanten Wirtschaftszweige wurde gemäß folgender Formel ((IPCC, 2006a): Vol. 5, Kapitel 6.2.3.3, Gleichung 6.6) die CSB-Jahresfracht des Wirtschaftszweigs errechnet. Hierzu wurde für jeden Wirtschaftszweig die Produktionsmenge des Jahres 2013 sowie der spezifische Abwasseranfall aus der Bundesstatistik (Statistisches Bundesamt, jährlich - FS 4, R. 3.1)) ermittelt und mit dem im Forschungsbericht benannten spezifischen CSB-Gehalt des Rohabwassers verrechnet. Zu beachten ist hierbei, dass die Abwasserstatistik nur alle drei Jahre aktualisiert wird. Aus diesem Grunde werden die Zwischenjahre interpoliert, die Folgejahre werden jeweils bis zur nächsten Aktualisierung konstant fortgeschrieben und im Nachgang

rekalkuliert.[105] Von 6 Wirtschaftszweigen (Mahl- und Schälmühlen (WZ 10.61), Herstellung von Fertiggerichten (WZ 10.85), Herstellung von sonstigen organischen Grundstoffen und Chemikalien (WZ 20.14), Herstellung von Düngemitteln und Stickstoffverbindungen (WZ 20.15), Herstellung von Kunststoffen (WZ 20.16) und Herstellung von Seifen, Wasch-, Reinigungs- und Poliermitteln (WZ 20.41)) waren in der Literatur keine Daten zum spezifischen Abwasseranfall verfügbar, daher konnte dort nicht die CSB-Jahresfracht errechnet werden.

Gleichung 100:

$$TOW_i = P_i \cdot W_i \cdot COD_i$$

Mit:

- TOW_i = gesamte organisch abbaubare Substanz im Abwasser des Wirtschaftszweigs i (CSB-Jahresfracht), kg CSB/a (total organically degradable material in wastewater for industry i, kg COD/yr)
- I = Wirtschaftszweig (industrial sector)
- P_i = gesamte jährliche Produktionsmenge im Wirtschaftszweig i, t/a (total industrial product for industrial sector i, t/yr)
- Wi = spez. Abwasseranfall im Wirtschaftszweig i, m³/t (wastewater generated, m³/t product)
- COD_i = chemischer Sauerstoffbedarf, kg CSB/m³ (chemical oxygen demand (industrial degradable organic component in wastewater), kg COD/m³)

Da es gute Praxis ist, mit länderspezifischen Daten zu rechnen und für Deutschland spezifische Daten vorliegen, wird für die Kalkulation der gesamten Methan-Emissionen vom Berechnungsansatz des IPCC ((IPCC, 2006a): Vol. 5, Kapitel 6.2.3.1, Gleichung 6.4) abgewichen und ein eigener Ansatz erarbeitet. Die gesamten Methan-Emissionen aus der Industrieabwasserreinigung errechnen sich nach folgender Formel.

Gleichung 101:

$$CH_4\ Emissions = \sum_i \left[\left(TOW_i \cdot \omega_{ANR,i} \cdot \omega_{CSB,i} \cdot EF_{CH4,gelöst,i}\right) + E_{CH4,GS,i} + E_{CH4,PS,i} + E_{CH4,AT,i}\right]$$

Mit:

- $CH_4\ Emissions$ = CH_4-Emissionen im Inventarjahr in kg CH_4/a
- TOW_i = gesamte organisch abbaubare Substanz im Abwasser des Wirtschaftszweigs i (CSB-Jahresfracht), kg CSB/a
- i = Wirtschaftszweig
- $\omega_{ANR,i}$ = prozentualer Anteil der anaeroben Reinigung im Wirtschaftszweig i
- $\omega_{CSB,i}$ = CSB-Abbaugrad in der anaeroben Reinigung im Wirtschaftszweig i

[105] Auf die berichteten Methanemissionen haben diese Änderungen keinen EInfluss, da diese, wie im Folgenden beschrieben, auf anderem Wege berechnet werden. Die Aktualisierung der Abwasserstatistik wird generell erst nach Redaktionsschluss des NIR durch das Statistische Bundesamt bereitgestellt.

- $EF_{CH4,gelöst,i}$ = Emissionsfaktor für das im Wasser gelöste CH_4 im Wirtschaftszweig i in kg CH_4/kg $CSB_{eliminiert}$
- $E_{CH4,GS,i}$ = CH_4-Emissionen aus den Gasspeichern im Wirtschaftszweig i, in kg CH_4/a
- $E_{CH4,PS,i}$ = CH_4-Emissionen aus den Pelletspeichern im Wirtschaftszweig i, in kg CH_4/a
- $E_{CH4,AT,i}$ = CH_4-Emissionen aus den Abwasserteichen im Wirtschaftszweig i, in kg CH_4/a

Die spezifischen Emissionsfaktoren $EF_{CH4,gelöst,i}$ des in der Wasserphase gelösten Methans errechnen sich auf Grundlage des Henry-Dalton-Gesetzes und werden im Forschungsbericht benannt. Es wird ein Druck von 1,043 bar zu Grunde gelegt. Die Temperatur ist jeweils branchenspezifisch und liegt zwischen 32°C und 37°C.

Die Emissionen aus den Gasspeichern haben als Grundlage die zulässigen Leckageraten aus Gasspeichern. Auf dieser Basis wurden pro Gasspeicher CH_4-Emissionen von 20 m^3 CH_4/a errechnet.

Die Emissionen aus den Pelletspeichern (Speicher für den anaeroben granulierten Schlamm) wurden gleich 0 kg CH_4/a gesetzt, da die Emissionen aus diesem Bereich als vernachlässigbar angesehen werden Expertenschätzung (Austermann-Haun & Witte, 2014). Ebenso werden die CH_4-Emissionen aus Störfällen zu 0 kg CH_4/a angesetzt.

Auf Grund ungünstiger Methanbildungsbedinungen sind die Methanemissionen aus Versäuerungsreaktoren vernachlässigbar und mit 0 kg CH_4/a angesetzt.

Der Emissionsfaktor aus den Abwasserteichen wurde nach Formel 6.5 und Tabelle 6.8 aus ((IPCC, 2006a): Vol. 5, Kapitel 6) ermittelt, wobei für Bo der IPCC Default Wert angenommen wird und der MCF mit 0,2 bei einer Teichtiefe von maximal 2 Metern angesetzt wird.

Die Zeitreihe ab 1990 wurde anhand der Entwicklung der anaeroben Industrieabwasserreinigung im Bezug auf die Kapazitäten zur Behandlung von CSB-Frachten ermittelt. Die vollständige Zeitreihe von 1990 bis 2013 ist im NIR 2015 veröffentlicht. Bis zur nächsten Aktualisierung der Datengrundlage werden die Daten ab 2014 mit einem Wachstum von 2 Prozent pro Jahr fortgeschrieben - unter der Annahme, dass ein moderater Zubau an Anaerobanlagen erfolgen wird (Expertenschätzung). Eine Übersicht über die Zeitreihe ist in der folgenden Tabelle gegeben. Die dargestellten Prozentwerte geben die Änderungen im Vergleich zum Bezugsjahr 2013 an. In der Tabelle sind zusätzlich die der Berechnung zu Grunde gelegten CSB Jahresfrachten dargestellt. Hieraus ergibt sich ein impliziter Emissionsfaktor von 1,86 kg CH_4 / t CSB.

Tabelle 454: Zeitreihe der CH_4-Emissionen aus der Industrieabwasserreinigung

	anaerob behandelte CSB-Jahresfrachten [t/a]	CH_4-Emission im Vergleich zu 2013 [%]
1990	198.477	22 %
1995	332.950	37 %
2000	493.357	56 %
2005	744.371	84 %
2010	854.374	96 %
2013	888.757	100 %
2014	906.532	102 %

	anaerob behandelte CSB-Jahresfrachten [t/a]	CH_4-Emission im Vergleich zu 2013 [%]
2015	924.307	104 %
2016	942.083	106 %
2017	959.857	108 %
2018	977.632	110 %
2019	995.407	112 %
2020	1.013.183	114 %
2021	1.030.958	116%
2022	1.048.733	118%
2023	1.066.508	120 %
2024	1.084.283	122 %

Der TOW der einzelnen betrachteten Unterbranchen ist in (Austermann-Haun & Witte, 2014)/ Tabelle 9 dokumentiert. Für die chemische Industrie, die Nahrungsmittelindustrie, sowie die Papier- und Zellstoffindustrie wurde auf Basis eines mittleren CSB-Gehaltes und der absoluten Abwasser-menge zusätzlich der Gesamt-TOW ermittelt (Tabelle 456). Bis 2016 wurde die zu Grunde gelegte Abwasserstatistik alle drei Jahre aktualisiert. 2019 erfolgte erstmals keine Aktualisierung. Aus diesem Grunde werden die Daten ab 2017 extrapoliert, hierbei wird für die chemische Industrie eine jährliche Minderung der Abwassermenge um 1 % angenommen und für die Papier- und Pappe-Herstellung um 1,5 %. Für die Nahrungsmittelindustrie wird der Wert weiterhin als konstant angenommen. Die vorgenommene Extrapolation (Expertenschätzung) erfolgt auf Basis der Entwicklung der Vorjahre. Allerdings wird dieser Gesamt-TOW nach der Formel $TOW_i = P_i \cdot W_i \cdot COD_i$ für die Berechnung der CH_4-Emissionen nicht genutzt, weil diese wie oben beschrieben nach einer länderspezifischen Methode auf Basis der subbranchenspezifischen TOW_i berechnet wurden. Im länderspezifischen Ansatz wurde gemäß des oben angegebenen Formelterms $TOW_i \cdot \omega_{ANR,i} \cdot \omega_{CSB,i} \cdot EF_{CH4,gelöst,i}$ jeweils der Anteil des in den einzelnen Branchen bzw. Unterbranchen anaerob behandelten Abwassers $\omega_{ANR,i}$ berücksichtigt und der branchenspezifische erzielbare Abbaugrad $\omega_{CSB,i}$ sowie der temperatur- und branchenabhängige Anteil des gelösten Methans $EF_{CH4,gelöst,i}$ auf den branchenspezifischen TOW_i angewendet. Die branchenspezifischen Parameter sind in der folgenden Tabelle 455 aufgeführt (siehe auch Tabelle 12 in (Austermann-Haun & Witte, 2014)).

In den verschiedenen Unterbranchen werden unterschiedliche Anteile des Abwassers (vgl. $\omega_{ANR,i}$ in Tabelle 455) und damit des gesamt TOW in anaeroben Anlagen behandelt. Nur diese behandelte TOW-Menge kann zu Methan-Emissionen führen. Bei der Ableitung des IEF ist allerdings die gesamte TOW-Menge der Kategorie und nicht nur die anaerob behandelte TOW Menge die Bezugsgröße. Dies führt im Vergleich zu sehr geringen IEF.

Tabelle 455: Verwendete Parameter zur Bestimmung der Emissionen des gelösten Methans aus der anaeroben Behandlung von Industriellem Abwasser (Bezugsjahr 2013)

WZ Code	TOWi [t CSB/a] (gerundet)	$\omega_{ANR,i}$ [%]	$\omega_{CSB,i}$ [$EF_{CH4,gelöst,i}$]	[kg CH_4/kg CSB_{eli}]%]
10.20 Fischverarbeitung	12.000	9,0	77,5	0,00455
10.31 Kartoffelverarbeitung	47.000	35,6	85	0,00244

WZ Code	TOWi [t CSB/a] (gerundet)	$\omega_{ANR,i}$ [%]	$\omega_{CSB,i}$ [$EF_{CH4,gelöst,i}$]	[kg CH_4/kg CSB_{eli}]%]
10.32 Herstellung von Frucht- u. Gemüsesäften	12.000	96,3	80	0,00838
10.39 Sonstige Verarbeitung von Obst u. Gemüse	80.000	8,7	85	0,00097
10.51 Milchverarbeitung	109.000	7,3	77,5	0,00615
10.52 Herstellung von Speiseeis	17.000	8,2	80	0,00196
10.61 Mahl- und Schälmühlen	k.D.	k.D.	80	k.D.
10.62 Herstellung von Stärke und Stärkeerzeugnissen:				
- Kartoffelstärke	1.000	94,0	75	0,00087
- Weizenstärke	18.000	36,0	75	0,00087
10.71 Herstellung von Backwaren	268.000	0,2	80	0,00093
10.81 Herstellung von Zucker	64.000	95,1	95	0,00085
10.82 Herstellung von Süßwaren	43.000	10,1	95	0,00165
10.83 Verarbeitung von Kaffee und Tee, Herstellung von Kaffee-Ersatz	49.000	2,1	75	0,00067
10.84 Herstellung von Würzmitteln u. Soßen	12.000	0,2	80	0,00395
10.85 Herstellung von Fertiggerichten	k.D.	k.D.	80	k.D.
10.89 Herstellung von sonstigen Nahrungsmitteln				
- Backhefen	2.000	86,2	90	0,00223
- Andere Hefen	7.000	32,1	90	0,00223
10.9 Herstellung von Futtermitteln	24.000	3,5	70	0,00258
11.02 Herstellung von Traubenwein	18.000	1,0	90	0,00177
11.05 Herstellung von Bier	88.000	28,0	85	0,00748
11.06 Herstellung von Malz	4.000	1,1	80	0,01236
11.07 Herstellung von Erfrischungsgetränken; Gewinnung natürlicher Mineralwässer	21.000	5,2	80	0,00656
17.1 Herstellung von Holz- und Zellstoff, Papier, Karton und Pappe	759.000	39,1	70	0,00578
20.14 Herstellung von sonstigen organischen Grundstoffen und Chemikalien	k.D.	k.D.	80	k.D.
20.15 Herstellung von Düngemitteln und Stickstoffverbindungen	k.D.	k.D.	80	k.D.
20.16 Herstellung von Kunststoffen	k.D.	k.D.	72	k.D.
20.41 Herstellung von Seifen, Wasch-, Reinigungs- und Poliermitteln	k.D.	k.D.	80	k.D.
Summe (gerundet)	1.653.000			

k.D.: Es liegen keine Daten vor.

Für weitere Branchen konnten keine durchschnittlichen CSB-Mengen ermittelt werden. In den 2006 IPCC Guidelines werden zusätzlich zu bisher berücksichtigten Branchen auch Default Werte für „Organic Chemicals“, „Plastic & Resins“ sowie „Soap & Detergents“ benannt. In der deutschen Statistik werden diese Quellen anders zusammengefasst: Unter der Überschrift „Chemische Erzeugnisse“ werden in der Abwasserstatistik Erzeugnisse mit dem WZ 2008 Code 20 zusammengefasst. Hierunter fallen auch die organische Chemie (WZ 2008 Code 20.14), Kunststoffe und Harze (Code 20.1) sowie Seife und Reinigungsmittel (Code 20.4). Im Unterschied zu Code 20.4 in welchem Vorprodukte berichtet werden, werden unter Code 22 Kunststoff- und Gummiwaren (Endprodukte) gelistet. Der in IPPC 2006 berichtete Default Wert ((IPCC, 2006a): Vol. 5, Kapitel 6) bezieht sich auf die Vorprodukte. Somit enthält die bisherige

Berichterstattung bereits die geforderten zusätzlichen Produktkategorien. (IPCC, 2006a) merkt an, dass die Default-Werte mit Vorsicht zu nutzen sind, da sie industrie-, prozess- und landesspezifisch sind.

Tabelle 456: Berechnung des TOW für das Jahr 2024, Direkteinleiter

Industriebereich	Mittlerer CSB [kg/m³]	Abwassermenge [m³]	TOW [t CSB/Jahr]
Chemische Industrie	3 [1)]	237.112.797	711.338
Nahrungsmittelindustrie	3 [2)]	59.802.282	179.407
Papier- und Zellstoffindustrie	2 [2)]	177.220.171	354.440
SUMME			1.245.186

1) 2006 IPCC Guidelines, (IPCC, 2006a): Vol. 5, Kapitel 6, Table 6.9

2) Expertenschätzung UBA

7.5.2.1.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (5.D.2 CH_4)

Die Unsicherheit der gesamten Methanemissionen wird u.a. aufgrund fehlender Daten für einige Wirtschaftszweige, unterschiedlichen Betriebsdrücken der Methanreaktoren, unterschiedlichen Membranen bei den Gasspeichern und der nicht bekannten Zahl von Gasspeichern mit ±50 % als Expertenschätzung bewertet.

7.5.2.1.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/ -kontrolle und Verifizierung (5.D.2 CH_4)

Eine allgemeine Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Die zu Grunde liegenden Forschungsberichte wurden im Rahmen der Abnahme durch die Fachbegleiter des UBA geprüft und qualitätsgesichert.

Ein Vergleich der Ergebnisse nach der gewählten landesspezifischen Methode mit Ergebnissen nach der Methode beschrieben in (IPCC, 2006a) ist nicht möglich, da auf Grund der technischen Realität (siehe „Beschreibung der Kategorie“) und der vorliegenden Datensituation nur der gewählte Ansatz durchführbar ist. Ein Abgleich der Ergebnisse mit Daten aus dem ETS ist nicht möglich, da die beschriebenen Anlagen nicht dem Emissionshandel unterliegen.

Zusätzlich wurde versucht Vergleichsdaten aus den Inventarberichten anderer Länder zur Plausibilisierung heranzuziehen. Hierzu wurden für den Inventarbericht 2021 aus den Inventarberichten 2020, verschiedene Länder mit ähnlichen klimatischen, sowie strukturell/technischen Rahmenbedingungen wie in Deutschland ausgewählt.:

- In Österreich wurde die Methodik im NIR 2020 geändert. Die Methan-Emissionen aus der industriellen Abwasserreinigung werden nun mit 1 % der in Anaerobanlagen erzeugten CH_4 Menge angenommen.
- In den Niederlanden werden die Methan-Emissionen auf Basis der IPCC-Default-Werte in Verbindung mit landesspezifischen Daten zum TOW und weiteren spezifischen Anpassungen berichtet. Es liegen keine aktuellen Informationen zur in industriellen Abwasseranlagen behandelten CSB Menge vor. Somit ist auch hier die Datenverfügbarkeit der limitierende Faktor. Ein direkter Datenvergleich ist nicht möglich. Es wurden keine methodischen Änderungen im Vergleich zu den Vorjahren vorgenommen.
- In Dänemark wird nicht zwischen industriellen und kommunalen Anlagen unterschieden. Die Methode folgt dem IPCC Handbuch.

Beim Vergleich der IEF für Methan mit den Berichten anderer Länder (GHG-Locator 2023) fällt auf, dass der hier beschriebene IEF teilweise deutlich geringer ausfällt als in anderen Ländern. Dies ist darauf zurück zu führen, dass eine landesspezifische Methode zur Ermittlung der Methan-Emissionen verwendet wird und wie oben beschrieben nur der in anaerob-Anlagen behandelte TOW zu Methan-Emissionen führen kann.

Eine weitergehende Verifizierung ist nicht möglich, da keine weiteren spezifischen Daten dieser Kategorie für Deutschland verfügbar sind.

7.5.2.1.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (5.D.2 CH_4)

Rückrechnungen sind nicht erforderlich.

7.5.2.1.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (5.D.2 CH_4)

Derzeit sind keine neuen Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4 Verbesserungen des Inventars, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

7.5.2.2 Lachgasemissionen der industriellen Abwasserbehandlung (5.D.2 N_2O)

7.5.2.2.1 Beschreibung der Kategorie (5.D.2 N_2O)

Lachgasemissionen können als Nebenprodukt bei der biologischen Abwasserreinigung mit gezielter Stickstoffelimination, hauptsächlich bei der Denitrifikation, aber vermutlich auch bei der Nitrifikation, entstehen. (vgl. (IPCC, 2006a), Vol. 5, Kapitel 6.1, Seite 6.8) Es wird vermutet, dass der Reduktionsschritt von N_2O zu N_2 durch verschiedene Einflussfaktoren, wie z.B. freiem Sauerstoff, hohen Nitrit-, Ammonium- und/oder Sulfidgehalten, gehemmt wird und dadurch N_2O entsteht ((Austermann-Haun & Carozzi, 2011): Seite 2-12 ff).

Der überwiegende Teil des industriellen Abwassers wird in kommunalen Kläranlagen gereinigt und entsprechend in 5.D.1 berücksichtigt. Unter 5.D.2 werden aus diesem Grunde nur die industriellen Direkteinleiter betrachtet.

7.5.2.2.2 Methodische Aspekte (5.D.2 N_2O industriell)

Seitens der 2006 IPCC Guidelines gibt es keine Vorschrift und auch keine Pflicht zur Berechnung der N_2O-Emissionen des industriellen Bereichs ((IPCC, 2006a): Vol. 5, Kapitel 6.3.4). Es existiert kein decision tree und auch keine höheren Tier-Berechnungsmethoden. Die Einordnung der im Folgenden vorgestellten Berechnungsmethodik erfolgt daher in Anlehnung an den decision tree und die Tier Klassifizierung für CH_4 (industriell). Der hier verwendete Ansatz entspricht demgemäß einer Tier 2 Berechnungsmethode.

Für den Inventarbericht wurden die statistischen Eingangsdaten für 2020 eingepflegt. Wegen der außerordentlich geringen Relevanz der Kategorie, aus Ressourcengründen und aufgrund der Vielzahl der verwendeten Datenquellen, können die statistischen Eingangsdaten allgemein nur in unregelmäßigen Abständen aktualisiert werden. In allen anderen Jahren erfolgen daher Fortschreibungen auf Basis des letzten aktualisierten Jahres.

Zur Ermittlung der Lachgasemissionen aus der industriellen Abwasserbehandlung wurden im Rahmen eines Forschungsprojektes Daten zum produktspezifischen Abwasseranfall, zur Stickstoffkonzentration und zum CSB-Gehalt (Chemischer Sauerstoffbedarf) aller Industriebereiche zusammengetragen und anhand der Jahresproduktionszahlen jährliche Stickstofffrachten errechnet. Die zu Grunde liegenden Stickstofffrachten entstammen aus

Merkblättern der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) und stellen den anerkannten Stand der Wissenschaft dar. Die verwendeten statistischen Daten werden von DESTATIS jährlich veröffentlicht und sind in der UBA-internen Berechnungsgrundlage dokumentiert. Bis auf wenige Ausnahmen werden die Aktivitätsdaten direkt durch das Statistische Bundesamt per Datenlieferung zur Verfügung gestellt. Ergänzend werden Abfragen über das Internetportal Genesis-Online des Statistischen Bundesamtes gestellt. Zudem werden Statistiken zur Brauwirtschaft herangezogen und Informationen zur Milchverarbeitung und Zuckererzeugung bei der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung abgerufen. Daten zur Verarbeitung tierischer Nebenprodukte werden bei der Servicegesellschaft Tierische Nebenprodukte mbH abgerufen.

Die genaue Vorgehensweise zur Berechnung der Lachgasemissionen ist in (Austermann-Haun & Carozzi, 2011) dokumentiert. Ein CSB:N-Verhältnis <40 war das Entscheidungskriterium dafür, einen Stickstoffüberschuss im Abwasser der Branche anzunehmen, der in der anschließenden biologischen Abwasserbehandlung Lachgasemissionen verursachen kann. Erst wenn so viel Stickstoff im Abwasser vorliegt, dass nach Einbau in die Biomasse noch ein Rest vorhanden ist, der durch die biologische Stickstoffelimination entfernt werden muss, kann davon ausgegangen werden, dass möglicherweise Lachgas bei der biologischen Abwasserreinigung emittiert wird. Ähnliche Werte werden im ATV-DVKK-Arbeitsblatt A 131 für die Auslegung der Denitrifikation angegeben. Dabei wird die Stickstofffracht vereinfacht mit 2 bis 2,5 % der CSB-Konzentration berücksichtigt (2,5 % entspricht einem CSB:N-Verhältnis von 40:1). Durch die Zusammenstellung der Daten konnten die 6 relevantesten Industriebereiche identifiziert werden, die gemeinsam ca. 75 % der Stickstofffracht aus der industriellen Abwasserbehandlung liefern (Austermann-Haun & Carozzi, 2011). Diese sind:

- Schlachten und Fleischverarbeitung,
- Milchverarbeitung,
- Verarbeitung tierischer Nebenprodukte,
- Herstellung von Bier,
- Zuckerherstellung,
- Weizenstärkeherstellung.

Auf die Aufnahme der Textilindustrie (7,5 % an Gesamtstickstofffracht) und Kartoffelverarbeitung (2,6 % Anteil an der Gesamtstickstofffracht) wurde verzichtet, da das Abwasser ein CSB:N Verhältnis größer als 40 aufweist und somit eine Lachgasbildung gemäß den Ergebnissen des Forschungsberichtes nicht erfolgt. Die Herstellung von Kartoffelstärke wird als nicht Lachgas-relevant angesehen – der Anteil an der Gesamtstickstofffracht im Abwasser liegt bei unter 0,4 %. Die verbleibenden rund 15 % der Gesamtstickstofffracht verteilen sich auf viele Einzelbranchen mit unklarer Datensituation (insbesondere CSB:N-Verhältnis). Ein großer Teil dieser Branchen leitet als Indirekteinleiter die Stickstofffracht in kommunale Kläranlagen ein und wird bereits über die Emissionsberichterstattung unter 5.D.1 berücksichtigt.

Auf Basis der mittleren produktspezifischen Stickstofffracht der 6 genannten Industriebereiche und anhand der jährlichen Produktionszahlen wird die Jahresstickstofffracht ermittelt, die ins Rohwasser emittiert wird. Dabei wird angenommen, dass auf Grund von organisatorischen und technischen Maßnahmen eine schrittweise Reduktion auf den Stand von 2010 erfolgte und die ins Abwasser abgegebene Stickstoffmenge im Jahr 1990 um 30 % höher lag (Expertenschätzung). Dabei wird für die Jahre von 1990 bis 2000 eine jährliche Reduktion der

Stickstofffracht um 2 Prozentpunkte angenommen, von 2000 bis 2010 um einen Prozentpunkt (Expertenschätzung). Ab 2010 wird die Stickstofffracht pro Kubikmeter Abwasser als konstant angenommen (Expertenschätzung).

Die Berechnung der Aktivitätsrate AD erfolgte folgendermaßen:

Gleichung 102:

$$AD = \sum_B [NF_B \times PZ_B \times 10^{-6}]$$

Wobei:

- AD = Gesamt-Aktivitätsrate [t N_Z/a] = mittlere N-Fracht im Zulauf = N_Z
- NF_B = mittlere spez. N-Fracht der Branche [g N pro Einheit]
- PZ_B = Produktionszahlen für das Jahr 2010 der Branche [Anzahl Einheiten/a]
- 10^{-6} = Faktor zur Umrechnung von g in t

Zur Ermittlung des N_2O-Emissionsfaktors wurden im oben genannten Forschungsprojekt verschiedene Daten aus der Literatur ausgewertet. Aus den dort angegebenen Daten wurde ein gewichteter Mittelwert gebildet. Das Ergebnis war, dass 1 % der Stickstofffracht in einer Kläranlage als N_2O-N emittiert wird (siehe auch Kapitel 7.5.2.2.4).

Gleichung 103:

$$N_2O = EF \times AD \times 44/28$$

Wobei:

- N_2O = N_2O Emissionen in t N_2O/a
- EF= Emissionsfaktor 0,01 t N_2O-N/t N
- 44/28 = Stöchiometrischer Umrechnungsfaktor N_2O-N in N_2O

Zusätzlich wurde für die einzelnen Branchen der Anteil der Direkteinleiter ermittelt und in der Berechnung berücksichtigt.

Aus der oben genannten Formel ergibt sich der IEF:

Gleichung 104:

IEF[N_2O-N]: EF x 44/28 = 0,01 x 44/28 kg N_2O/kg N = 0,0157 kg N_2O/kg N

Die Lachgasbildungsrate in den betrachteten Branchen unterscheidet sich signifikant von der Bildungsrate in kommunalen Kläranlagen, sie liegt in den industriellen Kläranlagen um den Faktor 100 über dem von kommunalen Kläranlagen. Dies ist auf das oben bereits beschriebene CSB:N Verhältnis und die daraus resultierenden besseren N_2O Bildungsbedingungen zurück zu führen.

7.5.2.2.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (5.D.2 N_2O)

Die Unsicherheiten der Produktionszahlen entstammen der Bundesstatistik bzw. anderen Statistiken, denen eine Vollerhebung zugrunde liegt. Die Daten sind somit voraussichtlich mit sehr geringen Unsicherheiten behaftet. Die Produktionsstatistiken werden jährlich aktualisiert, die Abwasserstatistiken alle drei Jahre. Die Abwasserstatistik mit Daten für das aktuelle Berichtsjahr erscheint erst nach Redaktionsschluss des NIR.

Der N_2O-Emissionsfaktor wurde durch Expertenschätzung im Rahmen des oben genannten Forschungsprojektes mit einer sehr hohen Unsicherheit von -90 %/+310 % bewertet.

Die mittleren spezifischen Stickstofffrachten der verschiedenen Branchen besitzen nachfolgende Unsicherheiten (Tabelle 457), die durch Expertenschätzung ermittelt wurden. Als Unsicherheit für die Gesamtstickstofffracht (Aktivitätsrate) werden unter konservativen Gesichtspunkten -50 %/+50 % angenommen (Expertenschätzung).

Tabelle 457: Unsicherheiten der mittleren spezifischen Stickstofffracht der relevantesten Industriebereiche

Mittlere spez. N-Fracht des Industriebereichs	obere Schranke	untere Schranke
Schlachtung von Schweinen	40	40
Schlachtung von Schafen	50	50
Schlachtung von Ziegen	50	50
Schlachtung von Rindern	40	40
Schlachtung von Pferden	50	50
Schlachtung von Geflügel	40	40
Fleischverarbeitung	40	40
Verarbeitung tierischer Nebenprodukte	20	20
Milchverarbeitung	15	15
Herstellung von Bier	30	30
Herstellung von Zucker	30	30
Herstellung von Weizenstärke	30	30

7.5.2.2.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/ -kontrolle und Verifizierung (5.D.2 N_2O)

Eine allgemeine Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle wurden gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt.

Die zu Grunde liegenden Forschungsberichte wurden im Rahmen der Abnahme durch die Fachbegleiter des UBA geprüft und qualitätsgesichert.

Die Aktivitätsdaten stammen im Wesentlichen aus der nationalen Statistik und wurden auf auffällige Änderungen im Vergleich zum Vorjahr überprüft. Größere Abweichungen sind durch klimatische Effekte (Auswirkungen auf die Ernte) und strukturelle Änderungen erklärbar.

Beim Vergleich des im Zuge nationaler Berechnungen ermittelten N_2O-IEF (siehe Kapitel 7.5.2.2.2) mit denen der anderen berichtenden Staaten (GHG Locator (UNFCCC, 2023a)) fällt auf, dass er mit 0,0157 kg N_2O/kg N klar innerhalb der Bandbreite der berichtenden Staaten liegt.

Ein Abgleich der Ergebnisse mit Daten aus dem ETS ist nicht möglich, da die beschriebenen Anlagen nicht dem Emissionshandel unterliegen. Die beschriebenen Aktivitätsdaten

entstammen der öffentlichen Statistik des Statistischen Bundesamtes bzw. im Falle der Verarbeitung tierischer Nebenprodukte dem Bericht der „Servicegesellschaft tierische Nebenprodukte“. Weitere Aktivitäts-daten zur Plausibilisierung liegen nicht vor.

Zusätzlich wurde versucht Vergleichsdaten aus den Inventarberichten anderer Länder zur Plausibilisierung heranzuziehen. Hierzu wurden, für den Inventarbericht 2021, aus den Inventarberichten 2020, Länder mit ähnlichen klimatischen, sowie strukturell/technischen Rahmenbedingungen wie in Deutschland ausgewählt:

- In Österreich werden N2O-Emissionen der industriellen Abwasserreinigung erstmalig auf Basis einer landesspezirischen Methode ermittelt. Ein detaillierter Vergleich ist nicht möglich, da die Methode in einem unveröffentlichten Bericht aus dem Jahr 2019 beschrieben wird.
- In den Niederlanden wurden die N_2O-Emissionen aus der industriellen Abwasserreinigung hingegen als irrelevant im Vergleich zu den N_2O-Emissionen aus der kommunalen Abwasserreinigung eingestuft und daher nicht berichtet, somit war ein Vergleich nicht möglich.
- In Dänemark wird die industrielle Abwasserreinigung mit einer landesspezifischen Methode betrachtet. Die Methode ähnelt der in Deutschland angewendeten Vorgehensweise. Es wurde ein Emissionsfaktor EF_{N20} direkt von 0.0032 verwendet.

In (Austermann-Haun & Carozzi, 2011) wurde eine Literaturstudie zu Lachgasemissionen aus der Abwasserreinigung durchgeführt. Die hier verwendeten Emissionsfaktoren wurden aus dieser Literaturstudie abgeleitet.

Eine weitergehende Verifizierung ist nicht möglich, da keine weiteren spezifischen Daten dieser Kategorie für Deutschland verfügbar sind.

Der verwendete Ansatz unterscheidet sich vom IPCC Default in (IPCC, 2006a), Vol. 5, Kapitel 6.3.1.2, Seite 6.25. IPPC gibt dort eine Wertespanne von 0.0005 – 0.25 kg N_2O-N/kg –N (Default 0,005 kg N_2O-N/kg –N) an. Im Ergebnis des weiter oben beschriebenen Forschungsprojekts wurde ein länderspezifischer Emissionsfaktor von 0,01 kg N_2O-N/kg –N ermittelt und für die Emissionsberichterstattung verwendet. Der verwendete Emissionsfaktor liegt somit um Faktor zwei höher als der Default-Wert, aber immer noch in der angegebenen Bandbreite.

7.5.2.2.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (5.D.2 N_2O)

Rückrechnungen sind nicht erforderlich.

7.5.2.2.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (5.D.2 N_2O)

Derzeit sind keine neuen Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4 Verbesserungen des Inventars, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

7.6 Andere Bereiche (5.E)

KC	Category	Activity	EM of	1990 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	2024 (kt CO_2-e.)	Fraction [%]	Trend [%] 1990-2024
-/-	5 E, Other		CH_4	0,00	0,00	2,36	0,01	0,00
-/-	5 E, Other		N_2O	0,00	0,00	25,90	0,01	0,00

Die Kategorie 5.E – „Weitere“ ist keine Hauptkategorie.

In der Kategorie 5.E Other werden derzeit ausschließlich die Emissionen aus der Mechanisch-Biologischen Abfallbehandlung berichtet.

Weiterhin sind dieser Kategorie die Emissionen aus unbeabsichtigten Bränden von Gebäuden und Fahrzeugen zugeordnet, was aber derzeit für die Treibhausgase keine Relevanz hat, da die Emissionen aus unbeabsichtigten Bränden von Gebäuden und Fahrzeugen weniger als 0,05 % des Gesamtinventars (ohne LULUCF) betragen. Zudem unterschreiten sie eine Menge von 500 kt CO_2-Äquivalente deutlich, und zusätzlich kann eine jährliche Erfassung nicht gewährleistet werden (UNFCCC, 2013). Die sich theoretisch ergebende Zeitreihe liegt unterhalb 100 kt CO_2-Äquivalente pro Jahr unter der Annahme, dass weniger als 20 Prozent des verbrannten Materials fossilen Ursprungs sind (Expertenschätzung ohne geeignete Aktivitätsdaten). Eine methodische Beschreibung zur Berechnung von Staubemissionen und weiterer Schadstoffe ist im Inventarbericht für die Genfer Luftreinhaltekonvention[106] hinterlegt.

7.6.1 Andere Bereiche - Mechanisch-biologische Abfallbehandlung (MBA) (5.E Other MBA)

7.6.1.1 Beschreibung der Kategorie (5.E Other MBA)

Gas	Angewandte Methode	Quelle der Aktivitätsdaten	Emissionsfaktoren
CH_4	Tier 2	NS	CS
N_2O	Tier 2	NS	CS

In Deutschland wird unterschieden in die biologische Behandlung von getrennt gesammelten Bioabfällen (siehe 7.3) und die von Restabfällen. Die Behandlung von Bioabfällen dient der Erzeugung eines Kompostes (siehe 7.3.1) oder Gärrestes (siehe 7.3.2) zur Anwendung als Dünger. Die biologische Behandlung von Restabfall, der in der Regel einen hohen Organikanteil aufweist, erfolgt in mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen (MBA) und dient der Vorbehandlung vor der Deponierung oder der energetischen Verwertung. Für die Behandlung von Restabfällen bestehen höhere Anforderungen an den Emissionsschutz als für die Bioabfallbehandlung. Daher liegen die Emissionsfaktoren für die MBA deutlich unter denen der Kompostierung oder Vergärung für Bioabfälle. Die jeweiligen Abfallströme werden in der Bundesstatistik gesondert erfasst.

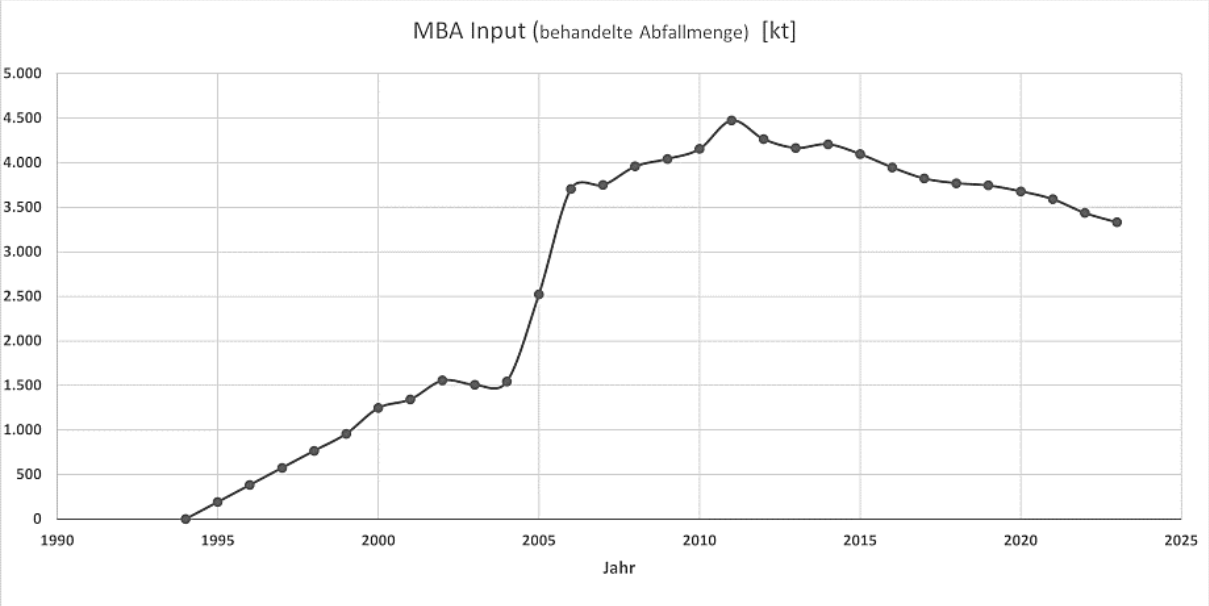
Seit den 90er Jahren werden in Deutschland mechanisch-biologische Verfahren im größeren Umfang zur Restabfallbehandlung eingesetzt. Anfangs dominierten technisch einfache Anlagenkonzepte ohne Abgasfassung und -behandlung. Im Zuge verfahrenstechnischer Weiterentwicklungen setzten sich jedoch verstärkt geschlossene Anlagen mit Biofilter als Abgasreinigung durch. Diese Abgasreinigungsverfahren konnten die Geruchsemissionen der Anlagen deutlich reduzieren, führten aber zu keiner Minderung der Treibhausgasemissionen.

Seit dem 1. Juni 2005 ist die Ablagerung von organischen und biologisch abbaubaren Abfällen in der Bundesrepublik nicht mehr zulässig. Restsiedlungsabfälle und ähnlich zusammengesetzte Abfälle können daher nur nach einer Vorbehandlung abgelagert werden. Neben den thermischen Abfallbehandlungsverfahren (Müllverbrennung) kommen hierbei auch mechanisch-biologische Verfahren zum Einsatz, deren Kapazitäten mit der Beendigung der

[106] Informative Inventory Report (IIR): www.iir.umweltbundesamt.de

Ablagerung unbehandelter Abfälle im Jahr 2005 deutlich ausgebaut wurden (siehe Abbildung 111).

Abbildung 111: Entwicklung der Input-Mengen von mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland



Quelle: eigene Darstellung, UBA

Nach den Vorgaben der 30. Verordnung zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (BFJ & BMJ, 2017) müssen MBA-Neuanlagen seit dem 1. März 2001 strenge technische Anforderungen erfüllen und anspruchsvolle Grenzwerte einhalten. Die Übergangsregelungen für Altanlagen forderten eine Nachrüstung bis spätestens zum 1. März 2006. Die Emissionswerte der 30. BImSchV können nach dem aktuellen Stand der Technik nur mit thermischen Abgasbehandlungsverfahren (z.B. regenerativ thermische Oxidation – RTO) sicher eingehalten werden.

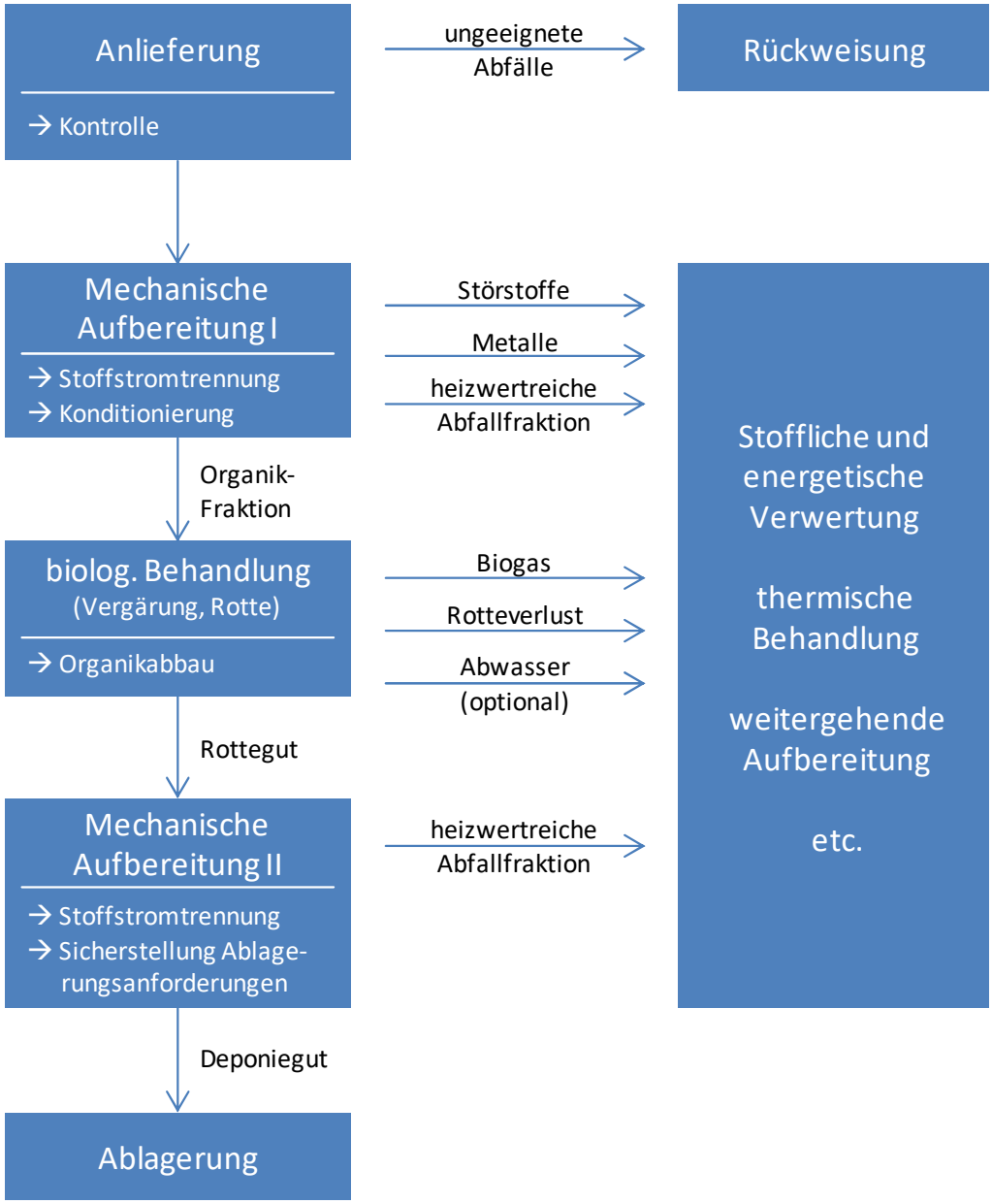
Für die MBA begrenzt die 30. BImSchV die Emissionsfrachten von organischem Gesamtkohlenstoff auf 55 g pro Tonne behandelter Abfälle und für N_2O auf 100 g pro Tonne behandelter Abfälle. Mehrere Überprüfungen haben ergeben, dass die Emissionsbegrenzungen von allen deutschen Anlagen sicher eingehalten werden, bei vielen Anlagen sogar deutlich unterschritten werden (vgl. Tabelle 458). Die Emissionsbegrenzungen und die Emissionsfaktoren beziehen sich auf die Feucht-substanz, die Abfallmengen werden bei der Anlieferung an die Anlagen demgemäß erfasst.

Nahezu alle Neuanlagen wurden im Laufe des Jahres 2005 in Betrieb genommen. Aufgrund von Erweiterungen und Anpassungen der Aufbereitungstechnik wurden auch nahezu alle Altanlagen bereits im Jahr 2005 an die Anforderungen der 30. BImSchV angepasst. Da in der Umbruchsituation im Jahr 2005 eine Zuordnung der Abfallmengen zu den unterschiedlichen Anlagentechniken nicht möglich war, war auch eine differenzierte Zuordnung der Emissionen nicht möglich. Aus diesem Grund erfolgt die Emissionsberechnung bis einschließlich 2005 vollständig mit den höheren Emissionsfaktoren der alten Abgasreinigungstechnik. Die Berechnung der Emissionen ab dem Jahr 2006 erfolgt mit den niedrigeren Emissionsfaktoren der neuen bzw. modernisierten Anlagen.

In Deutschland wurden in 2023 rund 3,3 Mio. t Abfälle in mechanisch-biologischen Abfallbehandlungsanlagen entsorgt. Bei der Behandlung fallen rund 2,9 Mio. t Rückstände an, wovon 0,78 Mio. t als Abfälle zur Beseitigung (hoher Anteil Ablagerung auf Deponien) und 1,9 Mio. t als

Abfälle zur Verwertung (weitgehend Ersatzbrennstoffe) und 0,04 Mio. t als sonstige Rückstände (z.B. Sekundärrohstoffe und Produkte) deklariert werden (alle Daten: (Statistisches Bundesamt); GENESIS-ONLINE; Tabelle 32111-0003). Zudem kommt es während des Behandlungsprozesses durch biologischen Abbau organischer Bestandteile und Verdunstung oder Ausschleusung (Abwasser) des im Abfall enthaltenen Wassers zu Masseverlusten von insgesamt 0,4 Mio t.

Abbildung 112: Stoffstromschema Mechanisch-Biologische Abfallbehandlung[107]



Quelle: eigene Darstellung, UBA

[107] Quelle: VDI 3475 Blatt 3, Emissionsminderung - Anlagen zur mechanisch-biologischen Behandlung von Siedlungsabfällen, 2006-12 (verändert)

7.6.1.2 Methodische Aspekte (5.E Other: MBA)

Die Berechnungsmethodik entspricht der Standardberechnungsmethode:
AR x EF = Emission

Aktivitätsdaten (AR)

MBA werden in Deutschland erst seit 1995 betrieben. Für die Berichterstattung werden die Daten des Statistischen Bundesamtes genutzt, das diese seit 1995 regelmäßig erhebt. Bis einschließlich 2019 wurden die Daten vom Statistischen Bundesamt als Fachserie 19, Reihe 1 (Statistisches Bundesamt, 2019) veröffentlicht, seit 2020 ist die Veröffentlichung eingestellt und die Aktivitäts-daten werden vom Statistischen Bundesamt über GENESIS-ONLINE ((Statistisches Bundesamt), Tabelle 32111-0003) bereitgestellt.

Emissionsfaktoren (EF)

In den 90er Jahren wurden die Emissionen der mechanisch-biologischen Behandlung mit Förderung des BMBF in einem umfangreichen Verbundforschungsvorhaben untersucht. In einem Vorhaben im Jahre 2003 wurden vom Institut für Energie und Umwelt (Detzel et al., 2003) die Emissionsfaktoren des Verbundvorhabens weiterentwickelt. Dabei wurde zwischen offenen (keine Abgasfassung und -behandlung) und geschlossenen (Abgasfassung mit Behandlung im Biofilter) MBA-Verfahren differenziert. Bei Methan wurden die Emissionsfaktoren für beide Varianten in gleicher Höhe angesetzt, da Methan im Biofilter praktisch nicht abgebaut wird. Der Emissionsfaktor für N_2O wurde bei geschlossenen Anlagen höher als bei offenen Anlagen angesetzt, da auch im Biofilter N_2O durch die Oxidation von Ammoniumstickstoff gebildet wird.

Für die offene MBA ergaben sich folgende Emissionsfaktoren:
EF-N_2O = 190 g N_2O/t Abfall
EF-CH_4 = 150 g CH_4/t Abfall

Für die geschlossenen MBA mit Biofilter ermittelt die gleiche Studie für den Zeitraum vor 2005 die folgenden Emissionsfaktoren:
EF-N_2O = 375 g N_2O/t Abfall
EF-CH_4 = 150 g CH_4/t Abfall

Seit Juni 2005 werden aufgrund neuer rechtlicher Anforderungen (BFJ & BMJ, 2017) nur noch geschlossene MBA betrieben, die mit effektiveren Abgasreinigungsverfahren ausgestattet sind, was naturgemäß zu niedrigeren Emissionsfaktoren führt. Die 30. BImSchV fordert für organische Stoffe sowie N_2O eine kontinuierliche Emissionsmessung und begrenzt die zulässigen Emissionsfrachten. Die Emissionsfrachten werden hierbei aus dem Monatsmittel der als Habstundenmittelwerte gemessenen Konzentrationen und der im entsprechenden Monatszeitraum behandelten Abfallmenge ermittelt.

Zur Abschätzung dieser neuen Situation wurden die im Rahmen der Datenerhebung für die Überarbeitung des Best Available Techniques Reference Document „ Waste Treatment“ im Jahre 2013 vom Umweltbundesamt in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgemeinschaft stoffstromspezifische Abfallbehandlung – ASA (Verband der MBA-Betreiber) ermittelten Emissionsdaten für die MBA herangezogen (Cuhls & Kühle-Weidemeier, 2013). Die

Emissionsdaten für Methan und N_2O lagen hierbei deutlich unter den zulässigen Grenzwerten (Tabelle 458).

Tabelle 458: Emissionen der MBA

Emissionsparameter (Abgas)	Rahmenbedingungen (Normalbedingungen)	Emissionsbandbreiten 16 Anlagen		Emissionsfaktor (Mittelwert)	Grenzwerte 30. BImSchV
Gesamtkohlenstoff ($C_{ges.}$)	Monatsmittelwerte: Fracht in g C_{ges}/t Abfall, rechnerisch aus Halbstundenmittelwerten	untere Werte	2,3 – 21,8	19,5 (26,1 g CH_4/t)	55
		Median	8,36 – 30,7		
		obere Werte	10,6 – 44,0		
Distickstoffoxid (N_2O)	Monatsmittelwerte: Fracht in g N_2O/t Abfall, rechnerisch aus Halbstundenmittelwerten	untere Werte.	0,01 – 33,3	30,3	100
		Median	1,54 – 59,0		
		obere Werte	6,23 - 108		

Die in der Erhebung gemeldeten Emissionsdaten sind für den deutschen Anlagenbestand repräsentativ und berücksichtigen alle in Deutschland eingesetzten MBA-Varianten. Mit der Erhebung wurden die Bandbreiten der Emissionsfrachten für die jeweiligen Anlagen abgefragt. Nach Rückmeldungen aus 16 Anlagen lagen die unteren Werte der Bandbreiten der Emissionen für die Einzelanlagen bei C_{ges} zwischen 2,3 und 21,8 g/t Abfall und bei N_2O zwischen 0,01 und 33,3 g/t Abfall. Die oberen Werte der Bandbreite lagen bei C_{ges} zwischen 10,6 und 44,0 g/t Abfall und bei N_2O zwischen 6,23 und 108 g/t Abfall. Die Mediane der einzelnen Anlagen lagen bei C_{ges} zwischen 8,36 und 30,7 g/t Abfall und bei N_2O zwischen 1,54 und 59,0 g/t Abfall.

Auf der Grundlage dieser Erhebung wurden für die Jahre ab 2006 die Emissionsfaktoren an die realen Anlagenemissionen angepasst.

Für die Emissionsfaktoren wurden jeweils die Mittelwerte aus dem unteren und dem oberen Median verwendet, d.h.:

EF-N_2O = 30,3 g N_2O/t Abfall

EF-CH_4 = 26,1 g CH_4/t Abfall (dabei entsprechen 19,5 g $C_{ges.}$ nach stöchiometrischer Umrechnung 26,1 g CH_4 - wobei 12 g C = 16 g CH_4)

7.6.1.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (5.E Other MBA)

Die Unsicherheiten der mechanisch-biologisch behandelten Abfallmengen werden als sehr gering (2 %) geschätzt, da es sich um eine Totalerhebung handelt, das Niveau der Berichterstattung an das Statistische Bundesamt gut ist und die Betreiber an einer guten Berichterstattung interessiert sind. Die Unsicherheiten der Emissionsfaktoren für den Zeitraum vor 2005 hängen von der Art der Anlage, der zum Zeitpunkt eingesetzten Anlagentechnik und der Wirkung der eingesetzten Biofilter ab. Da die Angaben aus der Literatur sehr stark schwanken, wurden im Ergebnis des zugrundeliegenden Forschungsvorhabens (IFEU, siehe oben) die Unsicherheiten für Methan mit ±60 % und für Lachgas mit ±100 % (offene MBA) bzw. ±60 % (geschlossene MBA) ermittelt.

Ab 2006 werden ausschließlich geschlossene Anlagen mit Abluftfassung und Behandlung betrieben. Die Emissionen für CH_4 und NO_2 werden kontinuierlich gemessen, sie schwanken jedoch bei allen Einzelanlagen, abhängig von Betriebszuständen und Zusammensetzung der Abfälle über größere Bandbreiten. Aufgrund dieser Tatsache und der guten Qualität der Datenbasis werden die Unsicherheiten für den Zeitraum ab 2006 von den Experten im Umweltbundesamt auf ±20 % geschätzt.

Der sich dabei ergebende Sprung der Unsicherheiten über die Zeitreihe ist aus technischen Gründen im ZSE leider nicht darstellbar. Aus diesem Grunde erfolgt eine Priorisierung, nach der die Quantifizierung der Unsicherheiten für die aktuellen Werte als deutlich relevanter eingestuft wird. Aus diesem Grunde wurden die Unsicherheiten mit der Berichterstattung 2022 über die gesamte Zeitreihe auf ±20 % angepasst. Der Bezugswert für 1990 ist von dieser Anpassung nicht betroffen, da THG Emissionen aus der MBA erst ab 1995 berichtet werden.

7.6.1.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (5.E Other MBA)

Ein Vergleich mit den Berichterstattungen anderer Länder wurde mit der Berichterstattung 2021 durchgeführt. Im Ergebnis dessen zeigte sich, dass ein Abgleich nicht möglich ist, weil Deutschland bislang als einzigstes Land THG-Emissionen der MBA im Nationalen Treibhausgasinventar berichtet – demgemäß stehen auch keine IEF aus anderen Ländern zum Vergleich zur Verfügung. Eine Überprüfung dieser Bewertung im Verlauf der Berichterstattung 2025 ergab, dass diese Umstand nach wie vor aktuell ist.

7.6.1.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (5.E Other MBA)

Bei der Erarbeitung der jeweils aktuellen Inventardaten liegen statistische Daten für die behandelten Abfallmengen immer nur für das vorhergehende Berichtsjahr vor, da die Abfallstatistik des Statistischen Bundesamtes mit einem Jahr Verzug erscheint (siehe Kapitel 7.6.1.2, Aktivitätsdaten). Das aktuelle Berichtsjahr wird daher auf Basis des Trends der letzten beiden Vorjahre linear extrapoliert. Diese Fortschreibung. wird im jeweils folgenden Jahr durch die dann aktuellen Daten ersetzt. Aus diesem Grund sind jährliche Rückrechnungen für das vorvergangene Jahr erforderlich.

Tabelle 459: Rekalkulation MBA für 2023

	Einheit		
behandelte Abfallmenge	[kt]	Submission 2026	3.331,0
		Submission 2025	3.281,0
CH_4	[kg]	Submission 2026	86.939
		Submission 2025	85.634
N2O	[kg]	Submission 2026	100.929
		Submission 2025	99.414

7.6.1.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (5.E Other MBA)

Derzeit sind keine neuen Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4 Verbesserungen des Inventars, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

8 Andere (CRF-Sektor 6)

Nach Empfehlungen des UNFCCC Expertenteams im Rahmen des In-Country-Reviews 2016 werden unter CRF 6 keine Treibhausgase berichtet. In CRF 6 werden die Gesamtemissionen an Treibhausgas-Vorläufersubstanzen, mit Ausnahme von NH_3 aus LULUCF und Landwirtschaft, berichtet.

9 Indirektes CO2 & N2O

9.1 Beschreibung der Kategorie (indirekte Emissionen)

In der Kategorie indirekte Emission werden Emissionen von Treibhausgasen (CO_2 und N_2O) berichtet, die durch Umwandlung emittierter Gase, welche selbst keine direkte Treibhauswirkung haben, in der Atmosphäre (CO und NMVOC zu CO_2) oder in Wasser und Boden (NO_X und NH_3 zu N_2O) entstehen. Indirekte Emissionen treten in den Kategorien CRF 1.A, CRF 2.D.1 & 3, CRF 3 und CRF 4 auf. Eine Beschreibung der Quellen für indirekte Emissionen erfolgt in den jeweiligen Kategoriekapiteln.

9.2 Methodische Aspekte (indirekte Emissionen)

Indirekte CO_2-Emissionen aus CO und NMVOC werden im Inventar nicht explizit berechnet. Sie werden aber in folgenden CRF mittelbar über die vorgegebene/verwendete Berechnungsmethodik als CO_2 berücksichtigt:

- CRF 1.A: da die Berechnung der Emissionen auf Basis einer Kohlenstoff-Massenbilanz erfolgt, wird indirektes CO_2 bereits durch die Berechnungsmethodik miterfasst, ist aber nicht gesondert ausweisbar.
- CRF 2.D.1 & 3: NMVOC-Emissionen werden auf Basis des Kohlenstoffgehalts in CO2-Emissionen umgerechnet und berichtet.

Die Ausweisung indirekter N_2O-Emissionen aus NO_X und NH_3 erfolgt für das nationale Inventar nur in sehr wenigen Einzelfällen. Diese sind:

- CRF 3: in CRF 3.B(b) und 3.D werden die indirekten N_2O-Emissionen aus atmosphärischer Deposition und Auswaschung/Oberflächenabfluss berichtet.
- CRF 4: die indirekten N_2O-Emissionen aus Auswaschung/Oberflächenabfluss werden in CRF 4(III) berichtet.

Aufbauend auf dem Reviewergebnis des ARR 2018 (G.11, Table 6) sowie dessen Reiteration im ARR 2020 (G7, Table 3 2020) werden die indirekten N_2O-Emissionen des Landwirtschafts- und LULUCF-Sektors mit dem Notation Key „IE“ berichtet. Dieses Vorgehen wurde im Review 2020 bestätigt. Für Energie, IPPU und den Abfallsektor wird NE berichtet.

9.3 Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz (indirekte Emissionen)

Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenzen werden in den jeweiligen Kapiteln für CRF 1.A, 2.D.1, 2.D.3, 3 und 4 beschrieben.

9.4 Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung (indirekte Emissionen)

Kategoriespezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung werden in den jeweiligen Kapiteln für CRF 1.A, 2.D.1, 2.D.3, 3 und 4 beschrieben.

9.5 Kategoriespezifische Rückrechnungen (indirekte Emissionen)

Gegebenenfalls erforderliche Rückrechnungen werden in den jeweiligen Kapiteln für CRF 1.A, 2.D.1, 2.D.3, 3 und 4 beschrieben.

9.6 Geplante Verbesserungen, kategoriespezifisch (indirekte Emissionen)

Derzeit geplante Verbesserungen werden in den jeweiligen Kapiteln für CRF 1.A, 2.D.1, 2.D.3, 3 und 4 beschrieben.

10 Rückrechnungen und Verbesserungen

10.1 Erklärung und Rechtfertigung der Rückrechnungen

10.1.1 Generelles Vorgehen

Neben Korrekturen gibt es eine Reihe von fachlichen Gründen für Rückrechnungen und Verbesserungen:

- Ergänzende Daten, die zur Schließung von Fehlstellen des Inventars beitragen, sind verfügbar.
- Die Datenquelle hat sich geändert.
- Die für die Quellgruppe genutzte Methode wurde an die Vorgaben der *Good Practice Guidance* angepasst.
- Die Quellgruppe ist eine Hauptquellkategorie geworden und ein Methodenwechsel erforderlich.
- Neue landesspezifische Berechnungsverfahren werden angewendet.
- Hinweise und Ergebnisse aus Reviews wurden umgesetzt.

10.1.2 Rückrechnungen im Inventar 2026 nach Quellgruppen

Die Rückrechnungen begründen sich diesjährig durch verschiedene methodische Anpassungen, die teilweise erhebliche Veränderungen in den betroffenen Quellgruppen nach sich zogen, sowie weiteren Detailverbesserungen.

Die Inventare enthalten dabei Verbesserungen in folgenden Bereichen (wenn nicht anders angegeben beziehen sich die Änderungen auf die gesamte Zeitreihe):

Energie

In Quellkategorie 1.A kommt es infolge der Revision der Energiebilanzen 2003 bis 2022 sowie mit Vorliegen der endgültigen Bilanz für 2023 für die verschiedenen Brennstoffe zu mehr oder weniger deutlichen Rückrechnungen.

Gleichzeitig resultieren die gegenüber Submission 2025 erfolgten Rekalkulationen auch aus revidierten Emissionsfaktoren. Unter anderem wurden übergreifend verwendete Kohlendioxid-Emissionsfaktoren aktualisiert, vereinheitlicht und konsolidiert.

(darüber hinaus, auszugsweise)

- mobile Emittenten in 1.A.2.g vii, 1.A.4.a ii, b ii und c ii: revidierte prozentuale Anteile an Inlands-absätzen gemäß Zeile 67 der nationalen Energiebilanzen
- 1.A.1.b+c, 1.A.2.g viii: Überarbeitung Berechnung Aktivitätsdaten infolge Änderungen in Struktur der verwedeten Datenquellen, ab 2003
- 1.B.2.a: neue Erkenntnisse aus Forschungsvorhaben zur Lagerung von Mineralölprodukten, ab 1990

Industrieprozesse & Produktverwendung

- 2.B.9.b: Implementierung aktuelle Forschungsergebnisse zu SF_6-Emissionen, 2014 und 2023

- 2.B.10: Implemetierung Ergebnisse aus Forschungsvorhaben für CH_4
- 2.C.1: Implementierung Daten der endgültigen Energiebilanz 2023
- 2.C.2: Anpassung Produktionsmengen 2021-2023
- 2.D.2, 2.G.4 Holzkohle: Anpassung der Außenhandelsstatistik 2023
- 2.F.1: Rückrechnungen basierend auf Veröffentlichungen des Statistischen Bundesamtes
- 2.F.2: Rekalkulation Vorjahres-Inlandsverbrauch HFKW-134a, HFKW-152a, uHFKW-1234ze
- 2.F.3: Revision HFKW-236fa-Bestandsemissionen, 2004 bis 2023
- 2.F.4: Rekalkulation Anwendungsemissionen HFKW-134a und HFKW-227ea 2022 und 2023
- 2.G.2.c Korrektur Berechnungsverfahren, ab 1995
- 2.G.4: Revision nach Neu-Recherche Inlands-Neuverbrauch HFKW-245fa, ab 2018

Landwirtschaft

- 3.B, 3.D: neues Modell zur räumlichen und zeitlichen Verteilung von N-haltigen Substraten
- 3.D: Korrektur EF(NH3) für synthetischen Dünger aus EMEP (2023)
- 3.D: Anwendung Klima-spezifischer EF nach IPCC (2019) für Emissionen aus Weidegang und indirekte Emissionen aus Deposition
- 3.A+B, Milchkühe: Änderung Ableitung der N-Ausscheidung, verbessertes Berechnungsverfahren Milchleistungen; Schweine: Aufteilung Jung- und Altsauen; Gehegewild: Korrektur Tierzahlen, ab 2009
- 3.B, Pferde: Aktualisierung N- und VS-Ausscheidungen
- 3.D, Wirtschaftsdüngerimporte: Korrektur niederländische Exportdaten, ab 2010; Ernterückstände: Aktualisierung Anzahl Grünlandschnitte
- 3.J, Vergärung: Änderung Anteile an Wirtschaftsdünger für Vergärung
- 3.D, N-Mineralisierung Mineralböden: Neu-Ausweisung N-Mineralisierung in Grünland
- 3.D, bewirtschaftete organische Böden: Änderung Gesamtfläche durch Datenaktualisierung in CRF 4

Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft:

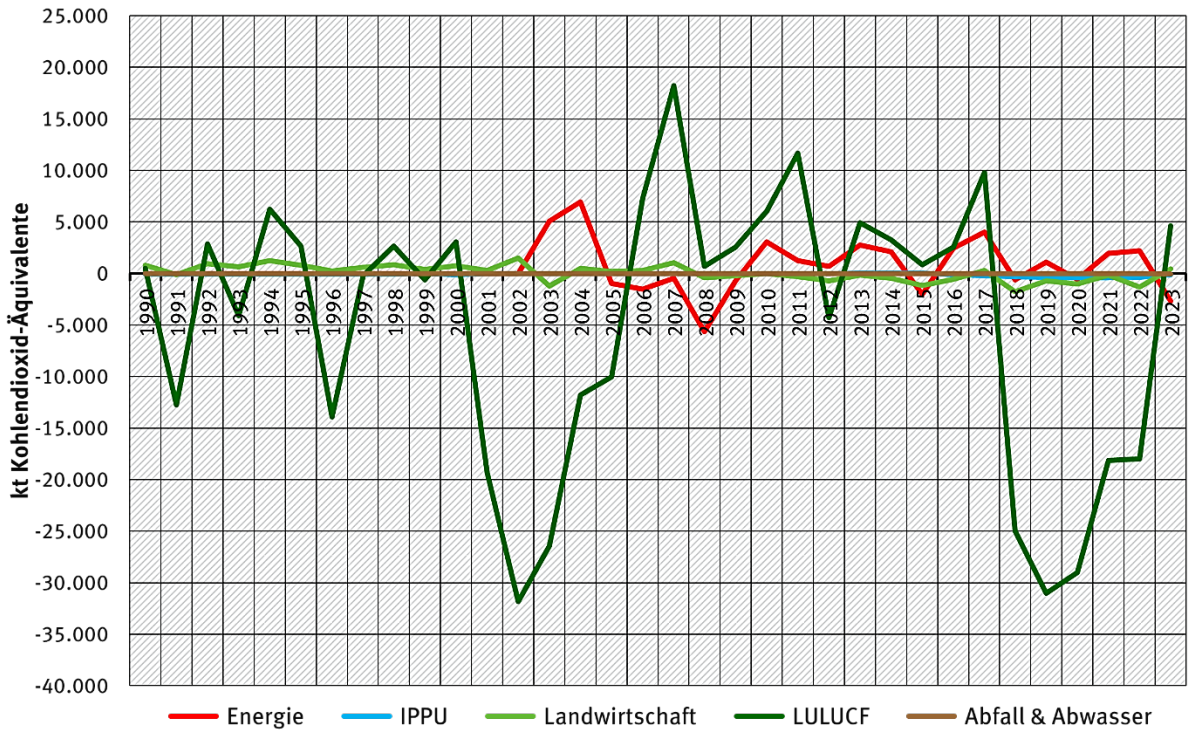
- 4.A: Modifikation Inputdaten für computergestützte Modellierung mit YASSO15
- 4.A-E: Modifikation hydrologisches Modell zur Berechnung Grundwasserstände in organischen Böden; neues Verfahren zur Bestimmung Landnutzung vor 2010
- 4.B: Modifikation Modell zur Berechnung Kohlenstoffvorräte Mineralböden auf Ackerland; Implementierung Einzelstandortberechnung
- 4.B-E: explizite Aufnahme Streuobstwiesen; Berichterstattung unter Obstanbau

- 4.D: Unterteilung „Natürliche Gewässer“ in die Subkategorien „Flüsse“ (wetr) und „Seen“ (wetl)
- 4.E: Korrektur C-Vorrat um Versiegelungsfaktor Siedlungs-/Freiraumflächen sowie virtuelle Korrektur Massenbilanz
- 4.E: neues Modell zur Bestimmung Entwicklung perennierender Phytomasse in Siedlungsgebieten, neuer Versiegelungsfaktor und neue Verteilungskoeffizienten für unterschiedliche Pflanzentypen
- 4.E: neue Landnutzungskategorie „Photovoltaikflächen“ unter LUC Siedlungen

Abfall und Abwasser:

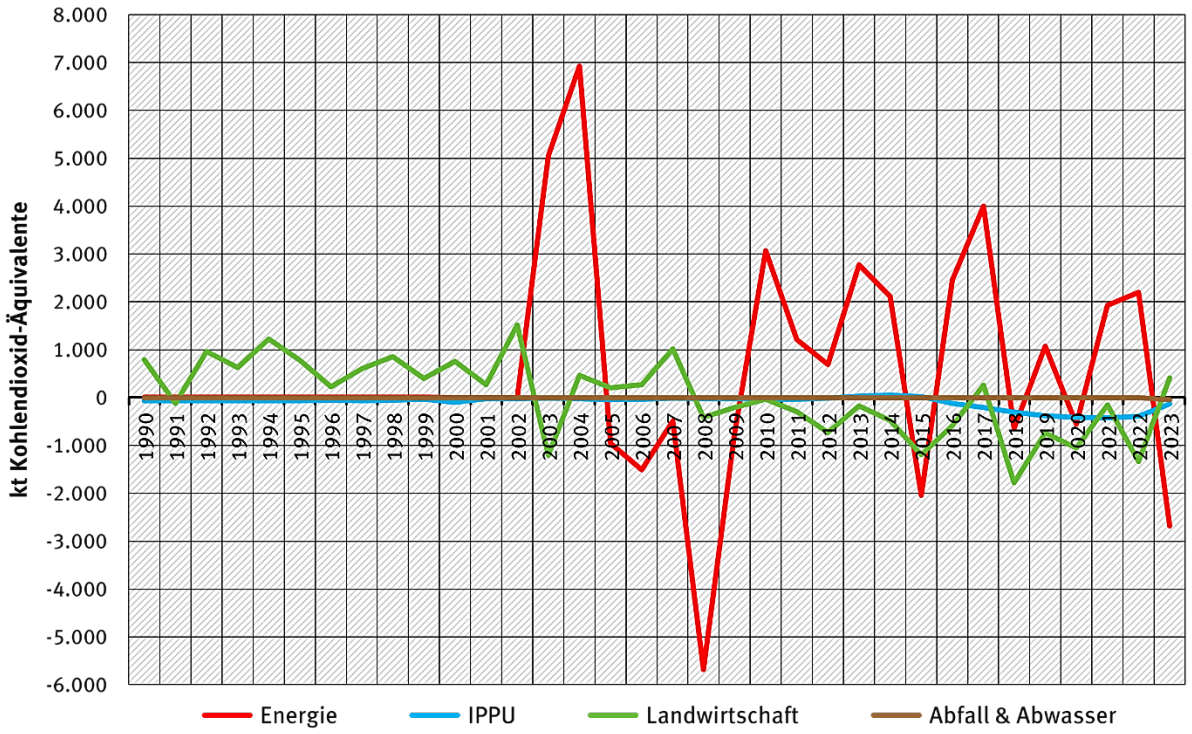
- 5.A.1, 5.B.1, 5.B.2, 5.E.1: Routine-Aktualisierung statistischer Daten für vorvergangenes Jahr
- 5.D.1, CH_4 + N_2O: Aktualisierung Bevölkerungszahlen ab 2022, Auswirkungen auf alle Jahre ab 2020

Abbildung 113: Änderung der Gesamtemissionen über alle Kategorien gegenüber Submission 2025



Quelle: eigene Darstellung, UBA

Abbildung 114: Änderung der Gesamtemissionen über alle Kategorien gegenüber Submission 2025, ohne LULUCF



Quelle: eigene Darstellung, UBA

10.1.3 Rückrechnungen im Inventar 2026 nach Substanzen

Rückrechnungen erfolgten in folgenden Kategorien (siehe auch Nennungen unter 10.1.2):

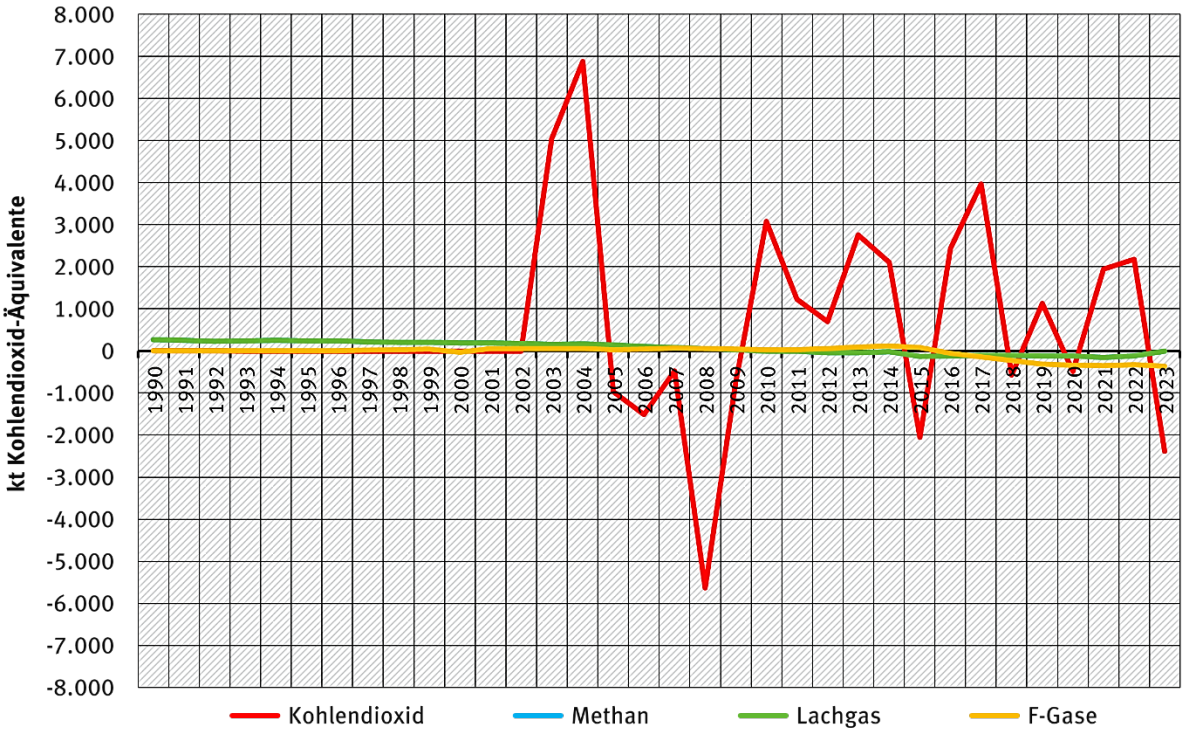
Tabelle 460: Übersicht der von Rückrechnungen betroffenen CRF-Oberkategorien

CRF	CO_2	CH_4	N_2O	HFCs	PFCs	SF_6	NF_3
1 - Energie	x	x	x				
2 – Industrieprozesse & Produktanwendung	x	x	x	x	x	x	
3 - Landwirtschaft	x	x	x				
4 - LULUCF	x	x	x				
5 - Abfall & Abwasser		x	x				

Tabelle 461: prozentuale Änderungen gegenüber der vorjährigen Berichterstattung

		Basisjahr	2005	2023
Gesamt (CO_2-äquiv.)		0,06%	-0,08%	-0,36%
CO_2	1990:	0,00%	-0,11%	-0,40%
CH_4		0,20%	0,19%	-0,01%
N_2O		0,89%	0,02%	1,31%
F-Gase	1995:	0,01%	0,22%	-3,83%

Abbildung 115: Rückrechnung der Gesamtemission der einzelnen Treibhausgase über alle Quellgruppen gegenüber der Submission 2025



Quelle: eigene Darstellung, UBA

Gegenüber der Submission 2025 erfolgten mehrere auf Hinweisen oder Empfehlungen aus Reviews resultierenden Rückrechnungen. Details hierzu finden sich in den entsprechenden Kapiteln der betroffenen Sektoren.

10.2 Auswirkung auf die Höhe der Emissionen

Die Veränderungen gegenüber Submission 2025 fallen mit plus 0,06 % für 1990, minus 0,08 % für 2005 bzw. minus 0,36 % für 2023 ähnlich gering aus wie in der vorangegangenen Submission.

Für die einzelnen CRF-Sektoren sind die Veränderungen innerhalb der für 1990, 2005 bzw. 2023 berichteten Emissionen in Tabelle 464 bis Tabelle 466 dargestellt.

Das Inventar wurde in Bezug auf Vollständigkeit und Genauigkeit weiter verbessert.

Tabelle 462: Rückrechnung der nationalen THG-Gesamtemissionen (ohne LULUCF)

	Submission 2025	Submission 2026	Veränderung ggü. Submission 2026	
1990	1.252.397	1.253.128	731	0,06%
1995	1.122.691	1.123.404	713	0,06%
2000	1.042.347	1.042.998	651	0,06%
2005	989.744	988.947	-797	-0,08%
2010	930.250	933.250	3.000	0,32%
2011	906.735	907.615	880	0,10%
2012	916.997	916.945	-51,8	-0,01%
2013	933.986	936.610	2.624	0,28%
2014	893.549	895.232	1.682	0,19%

	Submission 2025	Submission 2026	Veränderung ggü. Submission 2026	
2015	901.826	898.606	-3.220	-0,36%
2016	897.287	899.030	1.743	0,19%
2017	882.232	886.280	4.048	0,46%
2018	852.858	850.135	-2.723	-0,32%
2019	798.048	798.001	-47,5	-0,01%
2020	732.993	730.972	-2.021	-0,28%
2021	761.427	762.773	1.346	0,18%
2022	748.793	749.266	474	0,06%
2023	672.020	669.578	-2.442	-0,36%

Quelle: eigene Berechnungen

Die nachrichtlich berichteten Emissionen der sogenannten MemoItems wurden gegenüber der vorangegangenen Berichterstattung ebenfalls korrigiert.

Am deutlichsten fielen die Änderungen dabei beim internatioalen zivilen Flug- und Seeverkehr aus.

Tabelle 463: Rückrechnungen der nachrichtlichen Inventardaten (Memo Items)

	1990	2005	2023
nachrichtliche Emissionen:	**0,00%**	**-0,01%**	**1,10%**
aus internationalen Verkehren	0,00%	0,00%	0,07%
davon: internationaler ziviler Flugverkehr	0,00%	0,00%	-0,07%
davon: internationaler Schiffsverkehr	0,00%	0,00%	1,28%
aus multilateralen Militäreinsätzen	NE	NE	NE
CO_2 aus der Verbrennung von Biomasse	0,00%	-0,02%	1,41%
aufgefangenes CO_2 (CCS)	NO	NO	NO

Quelle: eigene Berechnungen

10.2.1 Auswirkung auf die Emissionshöhe von Kategorien 1990

Die Gesamtemissionen (ohne LULUCF) für 1990 werden um etwa 0,06 % bzw. 731 kt CO_2-Äquivalente nach oben korrigiert (siehe Tabelle 464).

Die maßgebliche inventarwirksame Korrektur erfolgt dabei im Sektor Landwirtschaft (+788 kt | +1,07 %).

Hinzu kommen weit weniger bedeutende Korrekturen in den Sektoren Energie (+4,60 kt) und sowie Industrieprozesse und Produktanwendung (-62 kt | +0,07 %). Die zuletzt für den Sektor Abfall & Abwasser berichteten Emissionen bleiben dagegen unverändert.

Die für den LULUCF-Sektor berichtete netto-CO_2-Freisetzung wird mit -1.037 kt deutlich (-3,72 %) nach unten korrigiert. Als gegenläufiger Effekt kommt es gleichzeitig zu einer ebenso deutlichen Anhebung der aggregierten Methan- und Lachgas-Emissionen um 1.504 kt bzw. 18,4%.

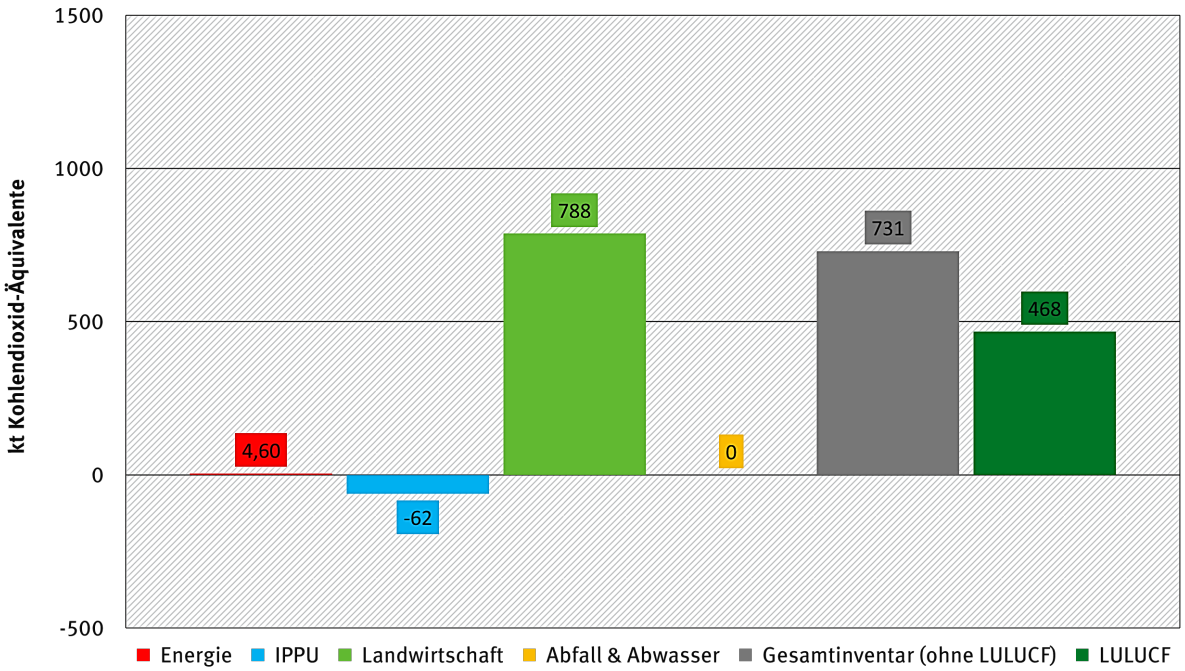
Detailliertere Informationen sind, in Ergänzung zu nachfolgender Tabelle, in den CRF-Tabellen 8(a)s1 bis 8(a)s4 verfügbar.

Tabelle 464: Rückrechnung der CRF-spezifischen THG-Gesamtemission 1990, in kt CO_2-Äquiv.

	Submission 2025	Submission 2026	Änderung ggü. Subm. 2025	
Nationale Gesamtemissionen (ohne LULUCF)	1.252.397	1.253.128	731	0,06%
1. Energie	1.044.279	1.044.283	4,60	0,00%
2. IPPU	93.278	93.216	-61,7	-0,07%
3. Landwirtschaft	73.290	74.078	788	1,07%
4. Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft	36.027	36.495	468	-1,30%
CO_2 (Netto-Emissionen/Einbindung)	*27.859*	*26.822*	*-1.037*	*-3,72%*
N_2O + CH_4 (Emissionen)	*8.168*	*9.673*	*1.504*	*18,4%*
5. Abfall & Abwasser	41.550	41.550	0,00	0,00%

Quelle: eigene Berechnungen

Abbildung 116: absolute Änderungen in CRF-Hauptkategorien und Gesamtinventar, für 1990



Quelle: eigene Darstellung, UBA

10.2.2 Auswirkung auf die Emissionshöhe von Kategorien 2005

Im Vergleich zur Submission 2025 werden die für 2005 berichteten Gesamtemissionen ohne LULUCF um 797 kt CO_2-Äquivalente bzw. 0,08 % nach unten korrigiert (siehe Tabelle 466).

Die maßgeblichen Korrekturen erfolgen dabei in den Sektoren Energie (-957 kt | -0,11 %) und Landwirtschaft (+203 kt | +0,34 %).

Hinzu kommt eine weit weniger bedeutende Korrektur im Sektor Industrieprozesse und Produktanwendung (-42,5 kt | -0,06 %). Die für den Sektor Abfall & Abwasser berichteten Emissionen bleiben auch für 2005 unverändert.

Im LULUCF-Sektor kommt es für 2005 zu einer extremen Reduzierung der CO_2-Freisetzung um über 11.000 kt (-84 %). Die zusammengefassten Methan- und Lachgas-Emissionen werden dagegen deutlich angehoben (+1.121 kt | +14 %).

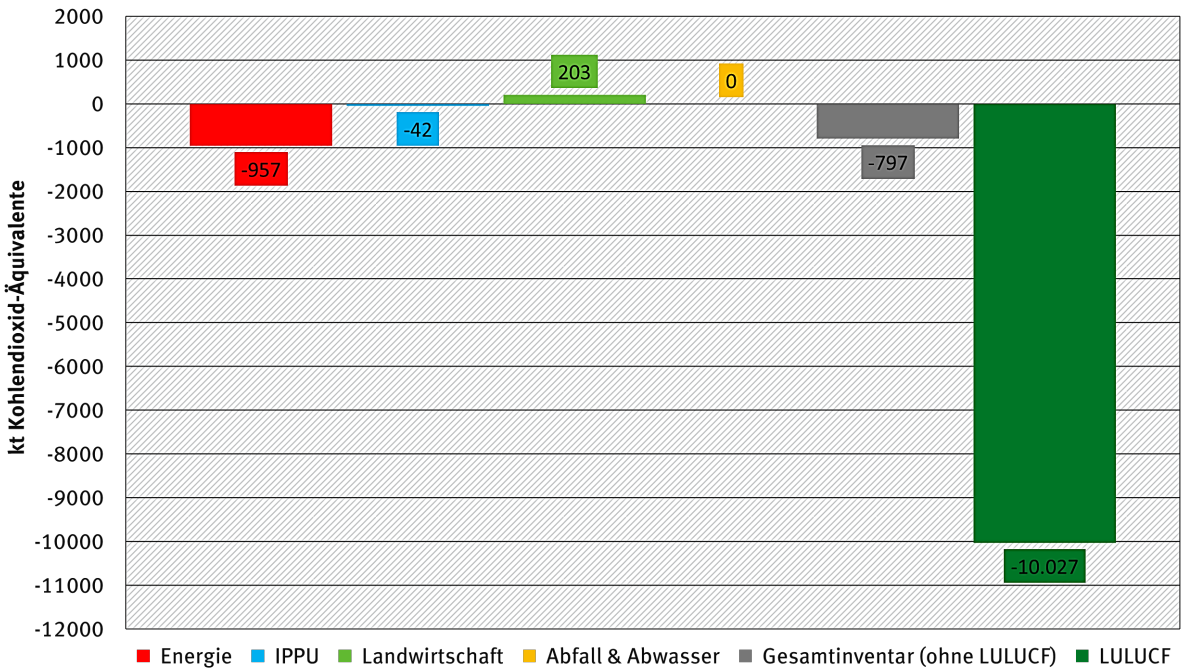
Detailliertere Informationen sind, in Ergänzung zu nachfolgender Tabelle, in den CRF-Tabellen 8(a)s1 bis 8(a)s4 verfügbar.

Tabelle 465: Rückrechnung der CRF-spezifischen THG-Gesamtemission 2005, in kt CO_2-Äquiv.

	Submission 2025	Submission 2026	Änderung ggü. Subm. 2026	
Nationale Gesamtemissionen (ohne LULUCF)	989.744	988.947	-797	-0,08%
1. Energie	836.715	835.758	-957	-0,11%
2. IPPU	72.795	72.752	-42,5	-0,06%
3. Landwirtschaft	60.403	60.606	203	0,34%
4. Landnutzungsänderung u. Forstwirtschaft	21.317	11.290	-10.027	47,0%
CO_2 (Netto-Emissionen/Einbindung)	*13.303*	*2.155*	*-11.148*	*-83,8%*
N_2O + CH_4 (Emissionen)	*8.014*	*9.136*	*1.121*	*14,0%*
5. Abfall & Abwasser	19.831	19.831	0,00	0,00%

Quelle: eigene Berechnungen

Abbildung 117: absolute Änderungen in CRF-Hauptkategorien und Gesamtinventar, für 2005



Quelle: eigene Darstellung, UBA

10.2.3 Auswirkung auf die Emissionshöhe von Kategorien 2023

Im Vergleich zur Submission 2025 werden die für das Jahr 2023 berichteten Gesamtemissionen ohne LULUCF um 2.442 kt CO_2-Äquivalente bzw. 0,36 % nach unten korrigiert (siehe Tabelle 466).

Die maßgeblichen, aber gegenläufigen Korrekturen entfallen dabei wiederum auf die Sektoren Energie (-2.680 kt | -0,47 %) und Landwirtschaft (+411 kt | +0,75 %).

Hinzu kommen kleinere Änderungen in den Sektoren Industrieprozesse und Produktanwendung (-132 kt | -0,28 %) sowie Abfall & Abwasser (-40,7 kt | -0,74 %).

Im LULUCF-Sektor kommt es für 2023 zu einer Anhebung der CO_2-Freisetzung (+2.738 kt | +4,57 %). Die zusammengefassten Methan- und Lachgas-Emissionen fallen mit einem Plus von 1.880 kt (+21,5 %) ebenfalls deutlich höher aus als in Submission 2025.

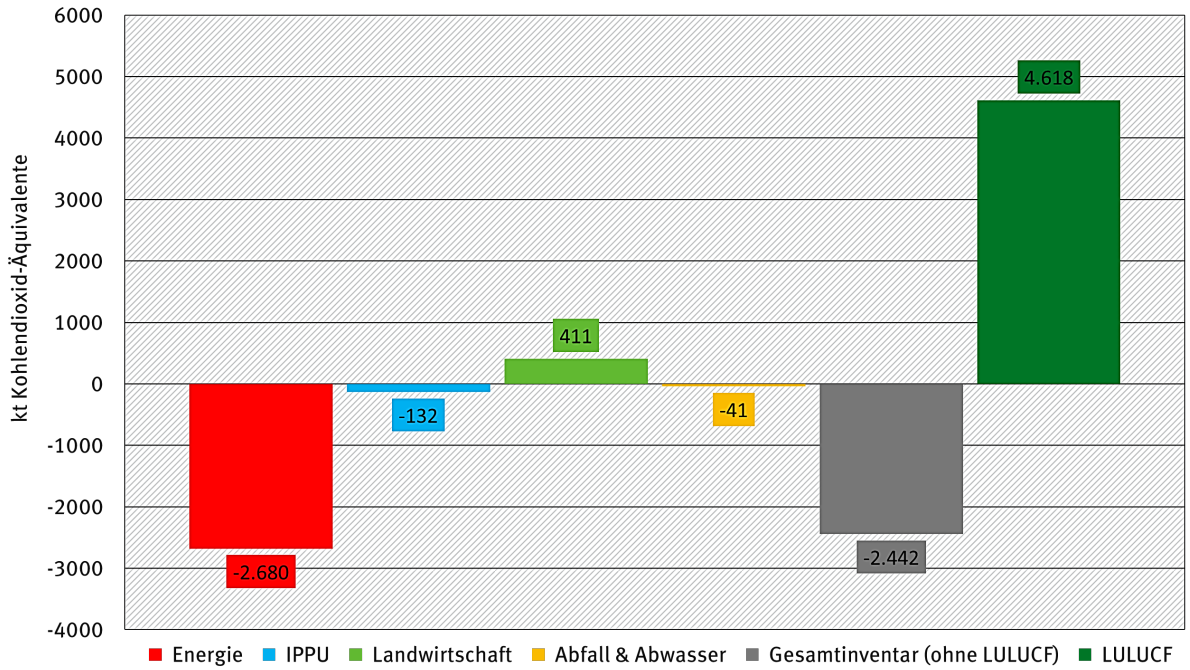
Detailliertere Informationen sind, in Ergänzung zu nachfolgender Tabelle, in den CRF-Tabellen 8(a)s1 bis 8(a)s4 verfügbar.

Tabelle 466: Rückrechnung der CRF-spezifischen THG-Gesamtemission 2023, in kt CO_2-Äquiv.

	Submission 2025	Submission 2026	Änderung ggü. Subm. 2025	
Nationale Gesamtemissionen (ohne LULUCF)	672.020	669.578	-2.442	-0,36%
1. Energie	564.584	561.904	-2.680	-0,47%
2. IPPU	47.154	47.022	-132	-0,28%
3. Landwirtschaft	54.792	55.203	411	0,75%
4. Landnutzungsänderung u. Forstwirtschaft	68.653	73.271	4.618	6,73%
CO_2 (Netto-Emissionen/Einbindung)	*59.895*	*62.632*	*2.738*	*4,57%*
N_2O + CH_4 (Emissionen)	*8.758*	*10.638*	*1.880*	*21,5%*
5. Abfall & Abwasser	5.490	5.449	-40,7	-0,74%

Quelle: eigene Berechnungen

Abbildung 118: absolute Änderungen in CRF-Hauptkategorien und Gesamtinventar, für 2023



Quelle: eigene Darstellung, UBA

10.3 Auswirkung auf die Emissionstrends und die Konsistenz der Zeitreihe

Die Konsistenz der Zeitreihen hat sich auf Grund der Rückrechnungen verbessert.

Im Ergebnis stellt sich der Trend der nationalen Gesamtemissionen (ohne LULUCF) gegenüber dem aktuellen Basisjahr in einer Reduktion von rund 48 % dar. (zum Vergleich: Für das stärker von der Pandemie beeinflusste Jahr 2020 liegt die Minderung bei rund 42 %.)

Die reinen CO_2-Emissionen liegen dabei in 2024 aufgrund der Minderung von 3 % gegenüber dem Vorjahr deutlich unter den Werten von 2023. Mit einem Minus von 1,8 % bzw. 5,7 % gegenüber dem Vorjahr gingen die Methan- und Lachgasemissionen ebenfalls weiter zurück.

Die Emissionen der Summe der F-Gase sanken um knapp 2 %, wobei die Trends der einzelnen F-Gase sich weiterhin uneinheitlich entwickeln.

10.4 Verbesserungen des Inventars

Die folgende Tabelle fasst die durchgeführten Verbesserungen der THG-Emissionsberichterstattung aufgrund der Hinweise und Anmerkungen des ERT aus den zurückliegenden Überprüfungen unter der Klimarahmenkonvention zusammen. Die Tabelle nennt nur Aspekte, die nicht bereits während der Überprüfung gelöst wurden.

Tabelle 467: Zusammenstellung der mit der aktuellen Berichterstattung erledigten Review-Empfehlungen

CRF	Review recommendation	Improvement	Report [year]	Reference	Reference of reitteration	Resolved in … (NIR, CRF-table, …)
0.	The ERT recommends that the Party include the NCVs for all fuels included in the reference approach.	Resolved.	2022	E.7, Table 5	-	see NID 2026, Annex 3.1, Table 474
1.	The ERT encourages Germany to improve the transparency of the NIR by providing explicit information on the differences between the reporting to IEA and the reporting under the Convention, referencing, as appropriate, inconsistencies resulting from the use of preliminary versus final data and other differences owing to the timing of the availability of data, and, if possible, quantify the various contributions to the differences.	Resolved. Chapter 3.2.1.2 in NID contains more information on the IEA data vs the national energy balances, compared to submission 2016.	2015, 2016	E.14, Table 5	-	see NID chap. 3.2.1.2
1.A.1.a	The ERT recommends that the Party describe in more detail in the NIR the methodology, data and assumptions used to report emissions from biomass consumed under subcategory 1.A.1.a (public electricity and heat production), including the sources used for the EFs for the combustion plants regulated by the EU directive on medium combustion plants and small-sized combustion plants. The ERT also recommends that the Party adequately explain relevant recalculations made in the NIR to ensure that sufficient information is provided to show whether or not the recalculations were made in accordance with the 2006 IPCC Guidelines.	Resolved. For CH4 emissions from biomass under 1A1a the latest NID submission provides info on the relevance of firing technique (in this case biogas use in combustion engines) in Chapter 3.2.4.1. In Chapter 3.2.4.2. further explanation for the CH4 emissions factors can be found. There have also been updates to the methods of the national energy balance since submission 2022. Since the energy balance is the main source for the activity data in 1A1a, changes have an effect on the IEFs, depending on the revisions. These energy balance revisions now take place every two years. The calculation algorithms in our databank are also updated and refined, depending on data availability. Consequently, recalculations take place in recent as well as in previous years. Overall, along with the values, reasons for any recalculation are provided each year in NID under the dedicated chapters for the subcategories, as well as in Chapter 10 "Recalculation and Improvements".	2022	E.8, Table 5	-	see NID chaps. 3.2.4.1. & 3.2.4.2

Alle Maßnahmen zielen auf volle Konsistenz mit den UNFCCC-Berichtsguidelines und den IPCC-Guidelines ab.

In der folgenden Tabelle werden die in den Quellgruppen-Kapiteln gemachten Aussagen der Inventarberichte (seit 2011) zu den geplanten Verbesserungen zusammengefasst. Sie werden ergänzt um Informationen zum daraus abgeleiteten Handlungsbedarf, dem avisierten Termin zur Umsetzung der Maßnahme (Deadline) und dem aktuellen Bearbeitungsstand.

Tabelle 468: Zusammenfassung der mit der aktuellen Berichterstattung erledigten und der offenen in den NIR-Kategoriekapiteln genannten geplanten Verbesserungen

CRF	Planned improvement	Data quality objective	Deadline	STATUS	Comment	Report [year]	Reference NIR/NID-Chapter	Resolved in ...
1.A.3.d.	With regard to inland waterway transport, in cooperation with the responsible modellers (ifeu) and national experts (ZKR: Zentralkommission für die Rheinschifffahrt / CCNR: Central Commission for the Navigation of the Rhine), ways are sought for the exact separate collection of national and international vessels.	National and international ships are to be recorded exactly and separately. The procedure should be developed with ifeu and the ZKR and documented in the NIR and the IB. If needed, the inventory has to be updated.	[2020]	overdue	Germany is continuing to work on that issue.	2017	3.2.10.4.6	
1.A.3.e	Thought is being given to using the methane emission figures from the operators' data pursuant to the EU Methane Regulation 2024/1787.	If possible the Emissions reporting is to be improved by using the methane emission figures from the operators' data pursuant to the EU Methane Regulation 2024/1787.	[2026]	overdue	Germany is continuing to work on that issue.	2025	3.2.8.5.6	
2.B.10	Currently, a research project is being carried out in cooperation with the Hamburg-based Ökopol Institute for Environmental Strategies. It is focused on verification of emissions from cleaning. It comprises analysis of current VOC emissions from cleaning of the interiors of transport equipment and tanks, such as storage facilities at refineries, and non-refinery tank-storage facilities and tank containers. The results of these efforts will feed into the reporting.	The results of the research project with Ökopol Institute for Environmental Strategies shall be fed into the reporting.	[2026]	done	Project results have been intergrated into the emission reporting.	2025	4.3.10.6	see NID chap. 4.3.10.
2.B.10.(i)	It is planned to exchange further information with the manufacturer of 1,12-Dodecandiacid in order to ensure consistency of the data over the entire time series and to enable a better assessment of the quality of the reported data.	Further information must be exchanged with the manufacturer of 1,12-Dodecandiacid in order to ensure consistency of the data over the entire time series and to enable a better assessment of the quality of the reported data.	[2025]	closed	Information from the data provider have been requested, but were not provided because data submission is voluntary.	2024	4.3.10.6	-
2.D.3.(b)	Relevant findings currently available from a research project are to be used for specific evaluation of emission factors.	The emission factors need to be evaluated on the basis of the existing project report.	[2012]	overdue	Germany is continuing to work on that issue.	2012	4.2.6.6	
2.H.2.	Based on an ongoing project, emission factors shall be updated.	Based on the results of the recently launched project, the emission factors used so far need to be updated.	[2023]	overdue	Germany is continuing to work on that issue.	2021	4.9.2.6	
4.	The planned improvements for the coming years include the following: Introduction of model-based calculation of carbon and nitrogen stocks in mineral soils in the land-use category Grassland. No truly reliable data sets are available for validation of models in the area of Grassland. Development of such calculation, therefore, will depend on the availability of results of repeat soil-inventory sampling (this commenced in 2022).	Introduction of model-based calculation of carbon and nitrogen stocks in mineral soils in the land-use category Grassland. No truly reliable data sets are available for validation of models in the area of Grassland. Development of such calculation, therefore, will depend on the availability of results of repeat soil-inventory sampling (this commenced in 2022).	[2028]	done	A model for mineral soils covered with grassland has been implemented; however, it is not accurate at the hectare level or site-specific. Germany is working on that issue.	2023	6.1.2.1.9	NID 2026 Chapter 6.1.2.1.1, Subsection: Estimation of carbon stock change in mineral soils under grassland

CRF	Planned improvement	Data quality objective	Deadline	STATUS	Comment	Report [year]	Reference NIR/NID-Chapter	Resolved in ...
4.	Chapter 6.1.4 1. Improvement of the model for calculation of carbon and nitrogen stock changes in mineral soils in the remaining categories of the land-use category Cropland and Grassland (cf. also Chapter 6.1.2.1.9). - Development of a model for derivation of complete-coverage, regionalised cultivation data from the database of the EU's Integrated Administration and Control System (IACS) (in progress, planned for 2026 submission). - Further development of the model in order to be able to calculate the carbon and nitrogen stock changes in mineral soils of the land-use categories Cropland and Grassland on a regionalised basis at hectare level and over time (in progress, planned for 2026 submission). Chapter 6.1.2.1.9 The planned improvements for the coming years include the following: - Recalculation of the models for calculation of carbon and nitrogen stock changes in mineral soils in the land-use category Cropland. This will have to be preceded by the ongoing collection of regionalised cultivation data from the database of the EU's Integrated Administration and Control System (IACS) (in progress, planned for 2026 submission). This will then enable the model to be applied to the grid of the inventory (100 x 100 m), and a varying trend over time to be derived.	The models for calculation of carbon and nitrogen stock changes in mineral soils in the land-use category Cropland are to be recalculated.	[2026]	done	Implemented with 2026 submission	2025	6.1.4 + 6.1.2.1.9	NID 2026 Chapter 6.1.2.1.1, Subsection: Calculation of the changes in carbon stocks in mineral soils beneath Cropland and Grassland using the RothC process model
4.	Chapter 6.1.4 1. Improvement of the model for calculation of carbon and nitrogen stock changes in mineral soils in the remaining categories of the land-use category Cropland and Grassland (cf. also Chapter 6.1.2.1.9). - Development of a model for derivation of complete-coverage, regionalised cultivation data from the database of the EU's Integrated Administration and Control System (IACS) (in progress, planned for 2026 submission). - Further development of the model in order to be able to calculate the carbon and nitrogen stock changes in mineral soils of the land-use categories Cropland and Grassland on a regionalised basis at hectare level and over time (in progress, planned for 2026 submission). Chapter 6.1.2.1.9 The planned improvements for the coming years include the following:	The model-based calculation of carbon and nitrogen stocks in mineral soils in the land-use category Grassland are to be recalculated.	[2026]	done	A model for mineral soils covered with grassland has been implemented.	2025	6.1.4 + 6.1.2.1.9	NID 2026 Chapter 6.1.2.1.1, Subsection: Estimation of carbon stock change in mineral soils under grassland

CRF	Planned improvement	Data quality objective	Deadline	STATUS	Comment	Report [year]	Reference NIR/NID-Chapter	Resolved in ...
	- Recalculation of the model-based calculation of carbon and nitrogen stocks in mineral soils in the land-use category Grassland on the grid of the inventory (100 x 100 m), and derivation of a varying trend over time.							
4.	2. Improvement of the methodology to record GHG emissions from inland water bodies (planned for 2028 submission). - Recording of all inland water bodies (especially man-made water bodies) and their trophic state as completely as possible and georeferenced. - Determination of Länder-specific emission factors	The methodology to record GHG emissions from inland water bodies has to be improved. For this, all inland water bodies (especially man-made water bodies) and their trophic state shall be recorded as completely as possible and georeferenced, moreover country specific emission factors shall be determined.	[2028]	open	Germany is working on that issue.	2025	6.1.4	
4.	3. Development of methods to record GHG emissions from coastal wetlands (planned for 2030 submission). - Definition of the boundaries of the land-use category and its subcategories - Recording of the relevant activity data - Determination of Länder-specific emission factors	A methodology for recording of GHG emissions from coastal wetlands shall be developed. For this (a) a definition of the boundaries of the land-use category and its subcategories, (b) the recording of the relevant activity data, (c) the determination of Länder-specific emission factors is required.	[2030]	open	Germany is working on that issue.	2025	6.1.4	
4.	Planned improvements for the coming years include: 1. (Section 6.1.2.1.9): Improving the model-based calculation of changes in carbon stocks on cropland. Improving the data available regarding land management and data inputs. as well as 1.a. (Section 6.1.4): Further development of the model for hectare-precise calculation on cropland, particularly with regard to input data	The model-based calculation of changes in carbon stocks on cropland needs to be improved in terms of the data available regarding land management and data inputs.	[2028]	open	Germany is working on that issue.	2026	6.1.2.1.9, 6.1.4	
4.	Planned improvements for the coming years include: 2. (Section 6.1.2.1.9): Introduction of model-based calculations of changes in carbon and nitrogen stocks in mineral soils of the land use category Grassland for each individual point of the sampling grid (100 x 100 m). as well as 1.b. (Section 6.1.4): Further development of the model to enable the calculation of changes in carbon and nitrogen stocks in mineral soils of the land use category Grassland on a regionalized, hectare-precise, and temporally dynamic basis.	The model-based calculation of changes of carbon and nitrogen stocks in mineral soils classified as grassland is to be implemented for each individual point in the sampling grid (100 x 100 m).	[2030]	open	Germany is working on that issue.	2026	6.1.2.1.9, 6.1.4	
4.	Planned improvements for the coming years include: 3. (Section 6.1.2.1.9): Development of a method to determine trends in carbon stock changes in mineral soils in Settlements a. the remaining category Buildings and open areas as well as 2.a. (Section 6.1.4): Implementation of a method for recording changes in carbon and nitrogen stocks in mineral soils of the remaining category of Settlements, particularly the subcategory of Buildings and open areas.	The methodology for determining changes of carbon and nitrogen stocks in mineral soils classified as settlements needs to be further developed for the “Buildings and Open Spaces” land use category.	[2028]	open	Germany is working on that issue.	2026	6.1.2.1.9, 6.1.4	

CRF	Planned improvement	Data quality objective	Deadline	STATUS	Comment	Report [year]	Reference NIR/NID-Chapter	Resolved in ...
4.	Planned improvements for the coming years: 3. (Section 6.1.2.1.9): Method development to determine trends in carbon stock changes in mineral soils in Settlements b. Introduction of soil sealing and emission factors for mineral soils in the subcategories Roads and Railway tracks as well as 2.c. (Section 6.1.4): Recording of emissions from the subcategories Roads and Railway facilities: Derivation and implementation of EFs for mineral soils.	The methodology for determining changes of carbon stocks in mineral soils classified as settlements is to be completed when sealing- and emission factors for mineral soils in the “roads” and “railway embankments” subcategories are introduced.	[2028]	open	Germany is working on that issue.	2026	6.1.2.1.9, 6.1.4	
4.	2.b.: Dynamic management of the subcategories Roads and Rail infrastructure	Development and implementation of a method for the model-based determination and dynamization of the areas of the subcategories “roads” and “railway embankments”.	[2028]	open	Germany is working on that issue.	2026	6.1.4	
4.	2.c. Reporting emissions from the subcategories Roads and Rail infrastructure: Derivation and implementation of EFs for biomass	The methodology for determining changes of carbon stocks in biomass is to be completed when emission factors for biomass in the “roads” and “railway tracks” subcategories are introduced.	[2028]	open	Germany is working on that issue.	2026	6.1.4	
4.	Improvement of the methodology for reporting GHG emissions from inland waters: 3.a.: As complete as possible, georeferenced inventory of all inland waters (especially artificial waters) and their trophic status	Development and implementation of a method for the model-based determination of the surface areas of inland waters and their trophic levels.	[2028]	open	Germany is working on that issue.	2026	6.1.4	
4.	Improvement of the methodology for capturing GHG emissions from inland waters: 3.b.: Derivation of country-specific emission factors	Derivation and implementation of country specific EF for inland waters.	[2030]	open	Germany is working on that issue.	2026	6.1.4	
4.	Development of methods for capturing GHG emissions from coastal wetlands: 4.a: Definition of the boundaries of the land use category and its subcategories	The boundaries of the land-use category “coastal wetlands” and any subcategories must be defined, and their boundaries must be established in the system.	[2030]	open	Germany is working on that issue.	2026	6.1.4	
4.	Development of methods for recording GHG emissions from coastal wetlands: 4.b.: Recording of activity data	Development and implementation of a method for the computer-aided determination of the areas of coastal wetlands and their site conditions.	[2030]	open	Germany is working on that issue.	2026	6.1.4	
4.	Development of methods for recording GHG emissions from coastal wetlands: 4.c.: Derivation of country-specific emission factors	Derivation and implementation of country specific EF for Coastal wetlands and their subcategories.	[2030]	open	Germany is working on that issue.	2026	6.1.4	
4.G	In 2024, the Council of Experts on Climate Change examined the CRF category 4A. Forest Land in the LULUCF sector, and also touched on the CRF HWP category (4.G). It found that the Thünen-Institute of Wood Research “due to legal requirements regarding the confidentiality of individual reporting numbers of the production statistics in accordance with section 16 of the Federal Statistics Act has no access to existing data on wood products of the Federal Statistical Office” which could be used in	The database on which the calculation is based must be improved. This applies in particular to the recording of the temporal dynamics of the use of damaged timber that has been lost due to calamities (e.g. in 1990) but has not or not yet been used for further processing into a materially used wood product (for details see “Specific objectives”).	[2026]	done	Implemented with 2026 submission.	2025	6.10.6	NID 2026 Chapter 6.10.2.1, esp. Figures 105 and 106 incl. correstponding explanation.

CRF	Planned improvement	Data quality objective	Deadline	STATUS	Comment	Report [year]	Reference NIR/NID-Chapter	Resolved in ...
	place of the FAO data. This results in great uncertainties (cf. Chapter 6.10.5). “A calculation using more specific national activity data, as envisaged by the IPCC (IPCC et al., 2014a), and with related conversion factors already available [at the Thünen-Institute of Wood Research] is therefore not possible.” (Council of Experts on Climate Change, 2024). The “general review of the legal basis for data access and flows” recommended by the Council of Experts, which should “[therefore] be considered by the legislature, with a view to “[granting] access to relevant data for all federal authorities involved in emission calculations” has yet to be undertaken. Nevertheless, efforts continue to be made to improve the calculation of the underlying data basis. This is particularly true of the recording of the dynamism over time of the use of raw wood which is lost due to calamities (e.g. in 1990) but has not, or not yet, been used for further processing into a wood product used as a material (cf. notes in the context of the ESD review in 02/2024 and (Rüter & Stümer, 2024). The recent evaluation of the latest forest inventory data, which was only completed just before the compilation of this report (09/2024), made it possible initially to continue to differentiate the loss of raw wood by tree type group into a) those quantities of raw wood which enter deadwood storage and b) those which are mainly used for energy purposes or are available for material further processing into HWPs. In order to maintain the consistency of the time series, in a further step the current raw wood loss, which is extrapolated for the period after the last forest inventory in line with the procedure described above, has to be differentiated on the basis of information about the nature of the calamity, since suddenly accruing damaged timber cannot always be processed and used, or only in exceptional circumstances (cf. 1990) (cf. Figure 95). At the same time, it is necessary to note that Germany uses the corresponding chapters of the 2013 IPCC KP Supplement (IPCC et al., 2014a) and the 2019 Refinement (IPCC et al., 2014a) as a methodological basis for the calculation of the category in order to comply with the legal requirements for the balancing of HWPs in the inventory (i.e. EU Regulation 2018/841 and EU Regulation 2023/839). As a basic prerequisite for a corresponding calculation, the availability of transparent data is cited here, not least in order to comply with one of the core principles for the handling of measures in the LULUCF source group: not to overestimate the carbon sequestration of the storage, and not to underestimate emissions							

10.4.1 Implementing Regulation Article 9: Reporting on implementation of recommendations and adjustments

Tabelle 469: Implementing Regulation Article 9: Reporting on implementation of recommendations and adjustments, Article 9.1

Member State: Germany **Reporting year: UNFCCC Annual Review Report 2022**						
CRF/CRT	**Review recommendation**	**MS response/ Status of implementation**	**Report [year]**	**Paragraph/ Reference**	**Reference of reitteration**	**Resolved in ... (NIR, CRF-table,...)**
0.	ARR 2022: The ERT concludes that this potential problem of a mandatory nature does not influence the Party's ability to fulfil its commitments for the second commitment period of the Kyoto Protocol and therefore this issue was not included in the list of potential problems and further questions raised. The ERT recommends that the Party annually review, and if necessary, update the information in the NIR with respect to the calculation of the commitment period reserve, ensuring that it is calculated based on the most recent information	Closed, due to the ending of Kyoto commitment period.	2015, 2016	G.5, Table 5	G.6, 2015; G.5, 2018; G.3, Table 3, 2020 G.1, Table 3, 2022	-
0.	The ERT recommends that the Party archive all documentation related to expert judgment, ensuring easy accessibility for review on request by the ERT. (For specific recommendations related to the documentation of expert judgment in the NIR refer to ID#s E.10, E.13, I.11, I.12 and I.14 below.)	Resolved. Within the QAQC-Checklists of the Quality-System a new and general Task has been icluded to make it possible to document the relevant information related to expert judgment in the future. This Task has to be carried out within a special documentation form of the Central System on Emissions (CSE; Database). The Form is based on and in compliance with the 2006 IPCC-GL, Vol 1, Chap 2 DataCollection, Annex 2A1, Table 2.A.1, as requested in ARR 2022, E.10, E.13 and I.14 (table 5).	2022	G.4, Table 5		CSE
0.	The ERT **encourages** the Party to reduce the number of cross-references to external documents and summarize the key elements of the methodologies and justifications for country-specific EFs for the key categories (in particular where they are lower than the default EFs) within the main body of the NIR.	Open	2022	G.5, Table 5		-
0.	The ERT recommends that the Party include the NCVs for all fuels included in the reference approach.	Resolved.	2022	E.7, Table 5	-	see NID 2026, Annex 3.1, Table 474
1.	The ERT **encourages** the Party to continue to facilitate collaboration between inventory compilers, the Working Group on Energy Balances and the German Federal Statistical Office to ensure that the final energy balance for the most recent inventory year is made available in time for the preparation of that inventory, and to include the final energy balance in annex 4 to the NIR. The ERT also **encourages** the Party to include in its NIR an update on the project for improving the timely provision of energy statistics, if the project has not yet been finalized at the time of the next submission.	Resolved. The description of undertaken QC/QA measures to obtain more timely access to the final energy balance for the most recent year is correct. As described, from 2022 onward, the improved statistical data on energy has been used to compile the preliminary energy balance that is delivered to the inventory compilers for further inventory work in September. Thus, the collaboration between inventory compilers, the Working Group on Energy Balances and the German Federal Statistical Office ensures that the best possible energy balance for the most recent inventory year is made available in time for the preparation of that inventory. The final Energy balace is to be published by AGEB by February/March of the reporting year and can be investigated under the following link: https://ag-energiebilanzen.de/daten-und-	2022	E.5, Table 5		https://ag-energiebilanzen.de/daten-und-fakten/bilanzen-1990-bis-2030/?wpv-jahresbereich-bilanz=2021-2030

Member State: Germany **Reporting year: UNFCCC Annual Review Report 2022**						
		fakten/bilanzen-1990-bis-2030/?wpv-jahresbereich-bilanz=2021-2030. If the ERT wishes, the link can be referred to in Annex 4 to the NID.				
1.	The ERT also **encourages** the Party to include in its NIR an update on the project for improving the timely provision of energy statistics, if the project has not yet been finalized at the time of the next submission.	Resolved. The project for improving the timely provision of energy statistics has been finalized. An update on the description of the ending of the project can be found in the NIR in chapter 16.1.	2022	E.5, Table 5		NID 2024, chap. 16.1
1.A.	ARR 2022: The ERT considers that the recommendation has not yet been fully addressed because the Party has not provided a clear list of the primary assumptions used to estimate the preliminary national energy balance in the most recent inventory. The ERT recommends that Germany include in its NIR the main assumptions used to establish the provisional energy balance.	Resolved. Information on the main differences between the provisional and the final energy balance result from provisional results of the statistical offices. In NID in chapter 16.1 and 16.4 we describe the data flow from the statistical offices of the Länder to the federal statistical office and from there to AGEB as the data delivery source for UBA: Missing data at the early date of delivery has been replaced by a procedure of imputation in the federal Statistical office.	2018	E.7, Table 5	E.2, Table 3, 2020; E.2, Table 3, 2022	NID 2024, chap. 16.1 and 16.4
1.A.1.a	The ERT recommends that the Party describe in more detail in the NIR the methodology, data and assumptions used to report emissions from biomass consumed under subcategory 1.A.1.a (public electricity and heat production), including the sources used for the EFs for the combustion plants regulated by the EU directive on medium combustion plants and small-sized combustion plants. The ERT also recommends that the Party adequately explain relevant recalculations made in the NIR to ensure that sufficient information is provided to show whether or not the recalculations were made in accordance with the 2006 IPCC Guidelines.	Resolved. For CH4 emissions from biomass under 1A1a the latest NID submission provides info on the relevance of firing technique (in this case biogas use in combustion engines) in Chapter 3.2.4.1. In Chapter 3.2.4.2. further explanation for the CH4 emissions factors can be found. There have also been updates to the methods of the national energy balance since submission 2022. Since the energy balance is the main source for the activity data in 1A1a, changes have an effect on the IEFs, depending on the revisions. These energy balance revisions now take place every two years. The calculation algorithms in our databank are also updated and refined, depending on data availability. Consequently, recalculations take place in recent as well as in previous years. Overall, along with the values, reasons for any recalculation are provided each year in NID under the dedicated chapters for the subcategories, as well as in Chapter 10 "Recalculation and Improvements".	2022	E.8, Table 5	-	see NID 2026, Annex 3.1, Table 474
1.A.3.b.	ARR 2022: The ERT considers that the recommendation has not yet been addressed because the Party has not justified in its NIR the use of a CO2 EF that is higher than the upper value of the default range in the 2006 IPCC Guidelines. The ERT **encourages** that Germany improve the transparency of future NIRs by including an explanation of the adjustment made to the CO2 EF for gasoline, which resulted in a CO2 EF that is higher than the IPCC default value and among the highest IEFs reported by Parties for all categories in which gasoline is used.	Resolved	2020	E.5, Table 5	-	see NID chaps. 3.2.4.1. & 3.2.4.2
1.A.3.b.i	The ERT recommends that the Party provide in the NIR the NCVs used for gasoline for subcategory 1.A.3.b.i (cars) across the time series, providing references for the sources of the NCV values and an explanation of their impact on the CO2 IEF trend..	Issue has been closed. Firstly and most importantly, since gasoline is not only used in passenger cars (CRF 1.A.3.b i), fuel-specific data such as (annual) NCVs need to be provided at a super-ordinate level. Here, the German NID already includes very specific information on the individual fuels in appendix chapter 16.8 - CO2 emission factors, also providing reference to underlying studies or analyses especially with regard to gasoline fuels.	2022	E.9, Table 5		see NID 2025, appendix chapter 16.8
1.A.3.b.i	The ERT **encourages** the Party to include either the results of the 2021 measurement study for recalculating gasoline NCVs from the 2020 inventory year or a description of progress in implementing the 2021 measurement study in the planned improvement sections of the NIR.	Encouragement is resolved. The study was completed in 2021, with the measurement results for the gasoline fuels sampled in 2020 being included in the 2022 GHG reporting. Since no final report was published after the study was completed, relevant information is available in NID chapter 16.7.1.	2022	E.9, Table 5		see NID 2025, chapter 16.7.1

Member State: Germany **Reporting year: UNFCCC Annual Review Report 2022**						
1.AD	ARR 2022: The Party did not explain in its NIR the use of “NE” in CRF table 1.A(d) for other bituminous coal, coke oven/gas coke and lignite, although for coke oven/gas coke the category in which the emissions are reported is specified in the table. Further, it did not include in its NIR information about any planned improvements to its reporting in CRF table 1.A(d). ARR 2020: The ERT recommends that Germany, when completing CRF table 1.A(d) in future submissions, report estimates of emissions from non-energy uses of fuels and/or use the appropriate notation keys in line with paragraph 37 of the UNFCCC Annex I inventory reporting guidelines (e.g. “NA” instead of “NE” when no emissions are expected from the non-energy use of a fuel).	The recommendation has been implemented. With the current submission, data from the Joint Annual Questionnairre are applied that also include specific information on the named fuels formerly reported as "NE".	2020	E.4, Table 5	E.1, Table 3, 2022	see NID 2025, chapter 13
1.AD	The ERT recommends that the Party (a) review the time series for the NEU of gasoline and recalculate it, if necessary, (b) explain in which year emissions from this source began in the time series, and (c) clarify whether emissions from the NEU of gasoline are reported elsewhere in the inventory. The ERT also recommends that the Party explain the underlying drivers if further recalculations take place for the NEU of gasoline.	Open	2022	E.6, Table 5		-
1.B.2.	The ERT recommends that, in line with the requirements under the 2006 IPCC Guidelines (vol. 1, chap. 2, annex 2A.1), the Party document the use of expert judgment that underpins the estimates for category 1.B, namely (a) country-specific EFs used to estimate CH4 emissions for subcategory 1.B.2.a.2 (oil production), (b) CH4 emissions for subcategory 1.B.2.a.4 (oil refining/storage (anode production, tank storage facilities in refineries, and tank storage facilities outside refineries)), and (c) the split factor of 40 per cent sour gas to 60 per cent sweet gas for estimating CO2 and CH4 emissions for subcategory 1.B.2.b.3 (natural gas processing), and hold the relevant documentation at the German Environment Agency (the single national entity of Germany), to be provided for review upon request by the ERT.	Resolved. The Party documented the expert judgment.	2022	E.10, Table 5		CSE
1.B.2.	The ERT **encourages** the Party to update the information in the NIR and CRF tables to improve clarity on the source of the EFs and methodologies used for each subcategory under category 1.B.2 (oil, natural gas and other emissions from energy production).	Closed. With regard to the encouragement: In the CRF the requested information is given for each year (Summary 3). Further disaggregation is not possible within the CRF-Reporter. The overviewtables of each sector can only be prepared for the respective year of the NID.	2022	E.10, Table 5		-
1.B.2.a	The ERT recommends that the Party ensure consistency between the information in the NIR and CRF tables by updating the input to CRF summary 3 in terms of methods and EFs used to estimate CO2 and CH4 emissions for category 1.B.2.a.1 (oil exploration), namely a tier 1 method and default EF for CO2 and CH4 for all years.	Closed. In the CRF the requested information is given for each year (Summary 3). Further disaggregation is not possible within the CRF-Reporter. The the requested information is given in the overviewtables of each sector - these tables can only be prepared for the respective year of the NID.	2022	E.11, Table 5		-
1.B.2.a	The ERT recommends that the Party correct the description in NIR section 3.3.2.1.3.2 to reflect the CH4 methods and EFs used, and ensure consistency between the NIR and the CRF regarding the information on methods and EFs used, namely tier 1 and 2 methods and default and country-specific EFs for CH4 for all years.	Resolved. Description has been corrected	2022	E.12, Table 5		NID 2024, chap. 3.3.2.1.3.2

Member State: Germany **Reporting year: UNFCCC Annual Review Report 2022**						
1.B.2.a	The ERT recommends that the Party (a) estimate CO2 emissions for subcategory 1.B.2.a.3 (oil – transport) and report them in CRF table 1.B.2 in line with the 2006 IPCC Guidelines (vol. 2, chap. 4, table 4.2.4); (b) report CO2 emissions for this category as "NE" and document the notation key in accordance with paragraph 37(b) of the UNFCCC Annex I inventory reporting guidelines, including the approximate default emissions of 0.04 kt CO2 provided during the review, in the assessment of completeness in the NIR (annex 5); or (c) continue to report the CO2 emissions in table 1.B.2 as "NA" and include in the NIR a relevant justification in line with annex 2A.1 of the 2006 IPCC Guidelines (vol. 1, chap. 2).	Closed. The Party cannot implement the issue. Reason is given in NID 2024, chap. 3.3.2.1.3.4	2022	E.13, Table 5		NID 2024, chap. 3.3.2.1.3.4
1.B.2.a	The ERT recommends that the Party describe in more detail in the NIR the assumptions, data and references used to disaggregate liquid petroleum products emissions between subcategory 1.B.2.a.4 (oil refining/storage) and category 2.B.10 (chemical industry – other), including the logical basis and split factors used across the time series. The ERT further recommends that the Party explain in the NIR that the data available do not allow for a split between gaseous fuels associated with subcategory 1.B.2.a.4 (oil refining/storage) and category 2.B.10 (chemical industry – other) and that the aggregate of emissions for both categories are reported together under category 2.B.10.	Resolved. The requested information is given in CRF 2.B.10.	2022	E.14, Table 5		NID 2024, chap. for 2.B.10.
1.B.2.b	The ERT recommends that the Party review the methodologies used for estimating CO2 and CH4 emissions from natural gas production, ensuring that, where two different methods are used (i.e. tier 1 for 1990–1998 and tier 2 for 1999–2020), there is adherence to the splicing techniques for maintaining time-series consistency described in the 2006 IPCC Guidelines (vol. 1, chap. 5.3.3). The methods and any splicing techniques used should be included in the NIR with adequate information to demonstrate compliance with the 2006 IPCC Guidelines and the UNFCCC Annex I inventory reporting guidelines. The ERT also recommends that the Party update the methodological information on subcategory 1.B.2.b.2 (natural gas production) reported in CRF Reporter as input to CRF summary 3 to reflect the actual methods and EFs used (i.e. a tier 1 method and default EFs for CO2 and CH4 for 1990–1998 and a tier 2 method and country-specific EFs for 1999–2020), and to describe in the NIR the country-specific EFs used and how they were developed in line with the 2006 IPCC Guidelines.	Resolved. A report on this issue has been published and several references have entered the NID.	2022	E.15, Table 5		https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/aktualisierung-der-emissionsfaktoren-fuer-methan
1.B.2.b	The ERT recommends that the Party describe in the NIR the causes for the sharp decline in natural gas produced in Germany since 2003 (75.5 per cent for 2003–2020).	Resolved. Desciption of the reasons for the sharp decline has been given.	2022	E.16, Table 5		NID 2024, chap. 3.3.2.2.2.1 and 3.3.2.2.3.1
1.B.2.c	The ERT recommends that the Party report AD used for the N2O estimates (natural gas production) in the NIR in a similar manner to the way that the AD used for the CO2 estimates is reported in the NIR (table 160). The ERT further recommends that NIR table 160 is updated to indicate that the AD currently reported in the table relate to the CO2 estimates only. The ERT also	Closed. Recommendation cannot be solved because only one AD can be entered in the CRF description has been given in chap. 3.3.2.3.1.2	2022	E.17, Table 5		NID 2024, chap. 3.3.2.3.1.2

Member State: Germany **Reporting year: UNFCCC Annual Review Report 2022**						
	recommends that the Party include in the NIR an explanation for reporting the AD on gas flared with a notation key ("IE") in CRF table 1.B.2 when emission values are reported for CO2 and N2O for the subcategory.					
1.D.1 + 1.D.2	The ERT recommends that the Party explain in the NIR the data and assumptions used to split the aviation gasoline AD between international and domestic flights, and landing/take-off and cruise.	Recommendation has been closed. The distribution of domestic fuel deliveries between domestic flights and flights abroad and between L/TO and cruise is generally carried out in the TREMOD AV (TREMOD Aviation) model named at the appropriate point in the NIR (NID).	2022	E.18, Table 5		-
1.D.1 + 1.D.2	The ERT **encourages** the Party to describe in the NIR the category-specific planned improvements for refinement of the disaggregation of aviation gasoline.	Open	2022	E.18, Table 5		-
2.A.4.b.	ARR 2022: The ERT considers that the recommendation has not yet been fully addressed because the Party was still working on the accuracy of the AD time series at the time of submitting its inventory. The ERT recommends that Germany either verify the decreasing emission trend and large inter-annual variation in emissions for 2016–2018 for subcategory 2.A.4.b (other uses of soda ash) and justify it in the NIR or recalculate the reported emissions to ensure time-series consistency.	Resolved. With data of 2022 the decreasing emission trend was stoped. The large inter-annual variation in emissions for 2016–2018 was recalculated. But to ensure time-series consistency we have to interpolate furthermore for this years. Former statistical data couldn't be changed.	2020	I.16, Table 5	I.2, Table 3, 2022	NID 2024, chap. 4.2.4.2.2
2.B.3.	ARR 2022: The ERT considers that the recommendation has not yet been fully addressed because the Party reported tier 3 as the method used for 1990–2020 in the CRF tables but stated in the NIR that a tier 2 approach was used for 1990–2012, and did not explain how the applied methods across the time series can be considered to be consistent. ARR 2020: The ERT considers that the recommendation has not yet been fully addressed because the Party did not include this information in the correct NIR section on time-series consistency (section 4.3.3.3). The ERT recommends that, for the third plant, which started operation in 2002 but began conducting measurements only in 2013, Germany report on how the N2O emissions were estimated for the period 2002–2012. The ERT further recommends that Germany report on how time-series consistency was ensured, given the use of different methods in the time series	Resolved. This issue has been adressed and the change of method has been carried out since submission 2023	2015, 2016	I.9, Table 5	I.4, 2018; I.8, Table 3, 2020; I.4, Table 3, 2022	CRF-Table summary3s1
2.B.9.	The ERT recommends that the Party include in the NIR a detailed explanation of the estimation of the production quantities of HCFC-22 and HFC-23 emissions under subcategory 2.B.9.a (fluorochemical production – by-product emissions) and hold the relevant background documents (details from the review of assumptions by industry representatives, including its outcomes) at the German Environment Agency to be provided for review upon request by the ERT.	Resolved. The reporting company was persuaded to provide data directly to the UBA and has transmitted the data (also retroactively to 2020) confidentially. The data is available for inspection in a confidential folder. They can be made available by reviewers on request.	2022	I.11, Table 5		NID 2024, Chemical industry: Production of halogenated hydrocarbons and SF6 (2.B.9)
2.B.9.	The ERT recommends that the Party include in the NIR an explanation of the review of the EFs of the fugitive emissions for category 2.B.9.b (fluorochemical production – fugitive emissions) by industry representatives and hold the relevant documentation at the German Environment Agency to be provided for review upon request by the ERT.	Resolved. The text passages in the NID were changed accordingly: From 2011 to 2019, the production volumes for HCFC-22 and HFC-23 were estimated by experts. Due to the higher uncertainty resulting from the estimate, a forced HFC-23 production of 3 % was still assumed. The data available for 2020-2022	2022	I.12, Table 5		NID 2024, chap. 4.3.9.2.2

Member State: Germany **Reporting year: UNFCCC Annual Review Report 2022**						
		show that the forced production is less than 2 %, so that a recalculation for the years 2011 to 2021 was carried out this year.				
2.C.2.	The ERT recommends that the Party collect AD on the quantities of reducing agent consumed in ferroalloys production and reallocate the CO2 emissions related to the consumption of the reducing agent from category 1.A.2 (manufacturing industries and construction) to category 2.C.2 (ferroalloys production) in line with the 2006 IPCC Guidelines (vol. 3, chap. 4.3.2.1), while ensuring that no double counting of these emissions occurs; alternatively, the ERT recommends that the Party include information explaining the low CO2 IEF (0.11 t/t in 2020) in category 2.C.2 (ferroalloys production) in the NIR, if the reallocation is not done.	Resolved. With the exact production figures from 2020 onwards, the emission factor is set to 0.004 %. This corresponds to the 2019-Refinements, Vol.3, page 3.19: "If the exhaust gas is captured for treatment, thermal oxidation has been shown to reduce HFC-23 emissions by 99.996 per cent (Irving, 2000)."	2022	I.13, Table 5		NID 2024, chap. 4.4.2.2
2.C.3.a.	ARR 2020: The ERT considers that the recommendation has not yet been fully addressed because the Party did not include the information on the validation of the EF used from 2009 in the NIR. The ERT recommends that Germany include in the NIR the explanation that the aluminium plant was redesigned, resulting in a reduction in the SF6 EF for secondary aluminium. The ERT also recommends that the Party explain in detail how the change in the EF was justified, whether by confidential measurement results and/or by a measurement protocol, and that the measurement protocol was checked and verified by a third party.	Resolved	2018	I.20, Table 6	I.11, Table 3, 2020; I.6, Table 3, 2022	NIR 2022, chap. 4.4.3.2, p.344
2.E.3.	ARR 2022: The ERT considers that the recommendation has not yet been fully addressed because the Party did not use the appropriate notation key, "NO", for years where SF6 emissions from photovoltaics did not occur. The ERT recommends that Germany update CRF table 2(II).B-Hs1 such that the appropriate notation key is reported for all years where SF6 emissions from photovoltaics are not occurring (i.e. 1990–2002 and 2014 onward).	Resolved. Since submission 2024, Germany updated CRF table 2(II).B-Hs1 such that the appropriate notation key is reported for all years where SF6 emissions from photovoltaics are not occurring (i.e. 1990-2002 and 2014 onward). Alte Response aus 2022: The value was replaced by the notation key.	2020	I.20, Table 5	I.9, Table 3, 2022	CRF table 2(II)B-Hs1 - 2024
2.F.1.	The ERT recommends that the Party include in the NIR an explanation of the trend of the product life factors of HFC-134a (range of 6.28–14.09 per cent) for category 2.F.1.d (transport refrigeration), which are lower than the default values of the 2006 IPCC Guidelines (vol. 3, chap. 7, table 7.9), along with relevant documentation of the expert judgment used in line with annex 2A.1 of the 2006 IPCC Guidelines (vol. 1, chap. 2).	Resolved. Germany has included the relevant information in the NID	2022	I.14, Table 5		NID 2024, chapter 4.7.1.2.4
2.F.2.	The ERT **encourages** the Party to include an explanation for the use of "C" for AD and "IE" for emissions from closed-cell foam products in category 2.F.2 (foam blowing agents) in the NIR.	Resolved. Germany has included the relevant information in the NID	2022	I.15, Table 5		NID 2024, chapter 4.7.2
3.B.1.	The ERT recommends the Party elaborate in the NIR fully on the basis for the updated estimates for the typical animal mass (also explaining the initial, final and average mass) and Nex rate for dairy and non-dairy cattle and explain how the new methodology is more in line with the German feeding standards, including clear references to those standards.	Resolved. Detailed methods are described in Vos et al. 2024	2022	A.7, Table 5		NID 2024, chap. 5.1.3.3 (Table 25) and chap. 2.4.1 in Vos et al. 2024

Member State: Germany **Reporting year: UNFCCC Annual Review Report 2022**						
3.D.a	The ERT recommends that the Party include in the NIR further information on the development of EFs for N2O emissions from application of inorganic and organic N fertilizers, along with a detailed comparison with the default values from the 2006 IPCC Guidelines (vol. 4, chap. 11, table 11.1).	Resolved. Detailed information and comparison with IPCC EF has been added to the NID	2022	A.8, Table 5		NID 2024, chap. 5.5.2.1.1
3.D.a.2.b	The ERT recommends that the Party work with data suppliers to establish the underlying reasons for the high inter-annual variations of N input from sewage sludge applied to soils and include explanatory information in its NIR.	Resolved. Explanation for variations has been given by the data supplier	2022	A.9, Table 5		NID 2024, chap. 5.1.5.1.2
3.D.a.2.c + 3.D.b	ARR 2022: The ERT considers that the recommendation has not been fully addressed, as the country-specific EF has not been compared with the default EFs for N2O emissions from agricultural soil in the 2006 IPCC Guidelines (vol. 4, chap. 11, tables 11.1 and 11.3). It is also not clear in the NIR whether indirect N2O emissions from the application of biowaste (from volatilization of ammonia and NOX or leaching and run-off) are included in the N2O EFs provided. The ERT recommends that Germany increase the transparency of its reporting by providing detailed information in the next NIR or in supplementary material on how direct and indirect N2O emissions resulting from the application of biowaste onto managed soils are included in the country-specific N2O EF used by the Party and how this EF compares with the default EFs from the 2006 IPCC Guidelines (vol. 3, chap. 11). ARR 2022:Resolved: The ERT also recommends that the Party remove the statement “they can be neglected, since the nitrogen they include is organically bound and mineralizes very slowly” from the NIR (p.709)	Resolved. Information on the inclusion of biowaste application in country-specific EF for N2O emissions has been added. Comparison with the default EF is provided. Alte Response aus 2022: Detailed information on the composition of the used EFs for N2O, regarding treatment, application and minerlisation have been added to the NIR, including a comparison with the default factor from IPCC. Addiotionally the questioned statement has been deleted and the sentence adjusted accordingly.	2020	A.8, Table 5	A.5, Table 3, 2022; A.6, Table 3, 2022	NID 2024, chap. 5.5.2.1
4(V)	ARR 2022: The ERT recommends that Germany use available data on DOM stocks to include them as fuel when calculating CH4 and N2O emissions from biomass burning.	Resolved. For forest fire, biomass from the deadwood and litter pools will also be considered for burning as of this submission.	2020	L.16, Table 5	L.12, Table 3, 2022	see NIR chapter 6.4.5, 6.4.2.7.5 and 6.4.2.7.2, Tab 369,
4.	ARR 2022: The ERT considers that the recommendation has not yet been addressed because the Party did not report SOC changes associated with changes in the use and management of land with different soil types and climate conditions at a minimum in its 2022 submission. ARR 2022: The ERT considers that the recommendation has not been addressed because the Party did not report SOC changes consistently with the 2006 IPCC Guidelines in terms of stratification by climate zone and soil type. The ERT recommends that Germany ensure that the new reporting system is capable of detecting and reporting SOC changes associated with changes in the use and management of land with different soil types and climate conditions at a minimum. Until the new reporting system is fully implemented, the ERT recommends that the Party apply a method consistent with good practice, as defined by the 2006 IPCC Guidelines (vol. 4, section 2.3.3.1), for estimating SOC changes. For instance, a set of SOCREF values stratified by climate zone and soil	Resolved. "With this submission, Germany implemented the ERT recommendation from the 2020 review process (ARR 2020: L.8, Table 5) and regionalized the carbon and nitrogen stocks of mineral soils. "	2020	L.8, Table 5	L.1, Table 3, 2022; L.2, Table 3, 2022	see NIR chapter 6.4.2.5, 6.1.2.1.9

Member State: Germany Reporting year: UNFCCC Annual Review Report 2022						
	type using SOC measurements taken in forest land, and grassland under natural conditions, if any, could be calculated. Thus, if the SOCREF values calculated are within the uncertainty range of the IPCC default values, the IPCC default stock change factors could be applied. Then, the SOC for each combination of land use and management system, as stratified by climate and soil type, could be calculated and formulation B of equation 2.25 from the 2006 IPCC Guidelines (vol. 4, box 2.1) could be applied to estimate the annual net SOC change associated with each change in the use and/or management of land.					
4.A .	ARR 2022: The ERT considers that the recommendation has not been addressed because the Party did not report complete, transparent information in the NIR, including, where practicable, a flow chart that clearly presents in a visual format all steps and data used in the calculation of the SOC change, in order to demonstrate that the calculated SOC change is not biased by changes in forest area over time. The ERT recommends that Germany report complete information, including, where practicable, a flow chart that clearly presents in a visual format all steps and data used in the calculation of the SOC change, in order to demonstrate that the calculated SOC change is not biased by changes in forest area over time.	Resolved. Detailed description of SOC change calculation added	2020	L.9, Table 5	L.3, Table 3, 2022	NID 2024, chap. 6.4.2.5.3
4.B.1. + 4.C.1.	ARR 2022: The ERT considers that the recommendation has not been addressed because the Party has not reported the verification of estimates by applying the default methodology in the 2006 IPCC Guidelines (vol. 4, chaps. 2, 5 and 6, and equation 2.25) to estimate SOC changes in cropland remaining cropland and grassland remaining grassland associated with changes in land management in its 2022 submission. The ERT recommends that Germany provide verification of reported estimates by applying the default methodology in the 2006 IPCC Guidelines (vol. 4, chaps. 2, 5 and 6, and equation 2.25) to estimate SOC changes in cropland remaining cropland and grassland remaining grassland associated with changes in land management.	Resolved. Already resolved in 2023!	2020	L.14, Table 5	L.10, Table 3, 2022	NID 2024, chap. 6.5.2.3.2 and 6.6.2.3
5.A.1.	ARR 2022: The ERT notes that the calculation of emissions using the currently applied national k-value, namely 0.173 for food waste and sewage sludge derived from the default half-life value of four years, is in line with 2006 IPCC Guidelines (vol. 5, chap. 3, table 3.4). However, the recommendation has not yet been fully addressed because the Party has not yet used the updated national k-value for the calculation of emissions or reported the results or status of the research project in its NIR. ARR 2020: Germany indicated during the review that the results of the ongoing research projects to determine country-specific k-values were not available in time to implement them in the 2020 annual submission (NIR, section 7.2.1.6, p.707). While the latest results of the research have been published, they can only be	Resolved. The k-Values have been updated with emission reporting 2023.	2018	W.11, Table 6	W.2, Table 3, 2020; W.1, Table 3, 2022	see NIR 2023 chapter 7.2.1.2.7

Member State: Germany **Reporting year: UNFCCC Annual Review Report 2022**						
	incorporated into the emission inventory report after clarification of review questions with the contractors, QA through peer review and public validation by national experts. These processes are planned for completion in 2020. The Party expects the results from the research projects to be applied in the 2021 submission. The ERT recommends that Germany update the k-values used in the emission estimation as soon as the data from the research projects that will determine national k-values are available. If the results are not available in time for the 2019 annual submission, the ERT recommends that the Party include the status of these projects in the NIR, including a timeline for the implementation of their results in the inventory.					
5.B.1.	The ERT recommends that the Party provide in the NIR detailed information on the types of compost and anaerobic digestion plants with their corresponding CH4 and N2O EFs, and respective shares of biowaste treated, used to derive country-specific CH4 and N2O EFs.	Resolved. Detailed information on the types of compost and anaerobic digestion plants have been added to the NID.	2022	W.5, Table 5		NID 2024, chap. 7.3.1.2 + 7.3.2.2
5.B.2.	ARR 2022: The ERT considers that the reporting does not raise an accuracy issue, but the recommendation has not yet been fully addressed because the Party has not reported the emissions from livestock manure co-digested anaerobically with biowaste at biogas facilities in accordance with the 2006 IPCC Guidelines (vol. 5, chap. 4.1.1, p.4.5) or clearly explained allocation of the emissions (both CH4 and N2O), including from flaring and recovery, to the energy, waste and agriculture sectors. ARR 2020: The ERT recommends that Germany report in future submissions the amount of livestock manure co-digested anaerobically with biowaste at biogas facilities (i.e. the AD) in CRF table 5.B, column B, and report the associated CH4 and N2O emissions in CRF table 5.B as “IE” while indicating in the documentation box to that table that they are reported under the agriculture sector in CRF table 3.B(a) to avoid double counting.	The recommendation has been implemented. The allocation of the emissions (Notation Keys IE) has been explained thoroughly and can be found in the appropriate explanation cells of CRT-Table 5B2b-Livestock manure co-digested. Additionally, they should be also entered by the CRT-Reporter into Table 9 "Information on notation keys" and can be found there.	2020	W.10, Table 5	W.2, Table 3, 2022	CRT-Table 5B2b-Livestock manure co-digested. And/or Table 9.
5.D.1.	ARR 2022: The German Environment Agency is currently working on a review paper covering about 40 publications, including the ongoing study, as the basis for representative country-specific EFs. Germany will also consider a new CH4 EF for septic tanks derived from a literature review and expert opinions.Anmerkung StS: hier hat das ERT jetzt zwei HBs zusammengeworfen - EF für CH4+N2O (Original) und Anpassung MCF The ERT recommends that Germany implement the results of the study that will produce better documented EFs as soon as the data are available. If the results are not available in time for the 2019 submission, the ERT recommends that the Party include the status of this study in the NIR, including a timeline for the implementation of its results in the inventory.	Resolved. The inventory has been improved in keeping with the results of a review paper by the federal environment agency itself, that has just been finalised. This review incorporates the results of the R&D project on "fugitive emissions" and a variety of other studies related to Emissions of CH4 and N2O in wastewater treatment.	2018	W.14, Table 6	W.5, Table 3, 2020; W.3, Table 3, 2022	NID 2024, chap. 7.5.1
5.D.1.	The ERT recommends that the Party update in the NIR the information on the underlying reason for the decrease in the CH4 EF for wastewater treatment	Resolved. Description has been improved.	2022	W.6, Table 5		NID 2024, chap. 7.5.1.1.2

Member State: Germany **Reporting year: UNFCCC Annual Review Report 2022**						
	plants and provide an explanation of the trend before and after 2020. The ERT also recommends that the Party provide details on the contribution of various sources in the estimated emissions and the improvement measures performed in the sludge treatment units that led to the decrease in CH4 emissions in domestic wastewater sector during 1990–2020.					
5.D.1.	The ERT recommends that the Party apply updated MCF values based on actual temperatures in Germany in the estimation of emissions when the ongoing research has been completed (or provide in the NIR information on the status of the research if not yet completed) and provide information on actual temperature conditions in Germany to justify the use of the selected MCF values.	The recommendation has been implemented - the MCF has been updated.	2022	W.7, Table 5		see NID 2025, chapter 7.5.1.1.2
KP-CM	The ERT recommends that Germany consider the issues listed in ID#s L.9;, L.10; and L.12; under the LULUCF sector (CM) above as also being relevant to KP-LULUCF activities.	Closed - as KP-Inventory-Reporting is no longer carried out.	2020	KL.18, Table 5	KL.11, Table 3, 2022	-
KP-CM - GM	The ERT recommends that Germany consider the issue listed in ID# L.14 under the LULUCF sector (CM and GM) above as also being relevant to KP-LULUCF activities.	Closed - as KP-Inventory-Reporting is no longer carried out.	2020	KL.19, Table 5	KL.12, Table 3, 2022	-
KP-FM	ARR 2022: Keine zusätzliche Anleitung - recommendation aus ARR 2020 gilt unverändert. The ERT recommends that Germany provide in future submissions information demonstrating that model-based calculations reproduce the data for FM or forest land remaining forest land for the historical period reported in the inventory.	Closed - as KP-Inventory-Reporting is no longer carried out.	2020	KL.13, Table 5	KL.4, Table 3, 2022	-
KP-FM	ARR 2022: The ERT recommends that Germany provide in its next submission information on the main factors generating the accounted quantity under FM (i.e. the difference in net emissions between reporting of FM during the second commitment period and the FMRL) and on the difference between the projected harvest rate and the actual harvest rate.	Closed - as KP-Inventory-Reporting is no longer carried out.	2020	KL.14, Table 5	KL.5, Table 3, 2022	-
KP-FM	The ERT recommends that Germany consider the issue listed in ID# L.9 under the LULUCF sector (FM) above as also being relevant to KP-LULUCF activities.	Closed - as KP-Inventory-Reporting is no longer carried out.	2020	KL.16, Table 5	KL.7, Table 3, 2022	-
KP-LULUCF	ARR 2022: On the basis of information provided during the review to show the conservative nature of the Party's approach, the ERT concluded that this potential problem of a mandatory nature does not influence the Party's ability to fulfil its commitments for the second commitment period of the Kyoto Protocol and therefore the accuracy issue was not included in the list of potential problems and further questions raised. The ERT recommends that Germany consider the issue listed in ID# L.8 under the LULUCF sector above as also being relevant to KP-LULUCF activities.	Closed - as KP-Inventory-Reporting is no longer carried out.	2020	KL.10, Table 5	KL.2, Table 3, 2022	-

10.5 Areas of improvement and/or capacity-building related to the flexibility provisions applied with self-determined estimated time frames for improvements (related to non-mandatory provisions as per para. 7(c–d) of the MPGs)

Deutschland macht keinen Gebrauch von Flexibilitäten.

Anhang 1 Hauptkategorien

Entsprechend der *2006 IPCC Guidelines* sind die Vertragsstaaten der Klimarahmenkonvention und des Kyoto-Protokolls verpflichtet, jährlich Emissionsdaten zu berechnen und zu veröffentlichen.

Diese Emissionsinventare müssen für jeden nachvollziehbar sein (Transparenz), in der Zeitreihe seit 1990 vergleichbar berechnet sein (Konsistenz), durch Anwendung der vorgeschriebenen Berechnungsmethoden international einheitlich bewertet sein (Vergleichbarkeit), alle im Berichtsland relevanten Emissionsquellen und –senken beinhalten (Vollständigkeit) und mit einer Fehlerangabe bewertet sein sowie einem permanentem internen und externen Qualitätsmanagement unterliegen (Genauigkeit).

Um die hierfür notwendigen, vielfältigen und detaillierten Aktivitäten und Ressourcen auf die wesentlichen Kategorien der Inventare konzentrieren zu können, wurde durch den IPCC die Definition einer Hauptkategorie (engl.: Key Source) eingeführt. Als solche werden Kategorien bezeichnet, die im nationalen Inventarsystem herausgehoben sind, da ihre Emissionen einen signifikanten Einfluss auf die Gesamtemission der direkten Treibhausgase haben, entweder in der absoluten Höhe der Emissionen, im Beitrag zum zeitlichen Emissionstrend oder beides.

In den 2006 IPCC Guidelines sind hierzu im Kapitel 4 die für die Bestimmung der Hauptkategorien anzuwendenden Methoden festgelegt. Diese ermöglichen es, durch die Analyse des Inventars für ein Jahr (Methode 1 Level Assessment), die Analyse einer Zeitreihe der Inventarangaben (Methode 1 Trend Assessment), einer detaillierten Analyse der fehlerbewerteten Inventarangaben (Methode 2 Trend Assessment unter Berücksichtigung der Ungenauigkeiten), sowie einer Bewertung qualitativer Kriterien (entsprechend (IPCC, 2006b), Kapitel 4.3.3, Vol. 4, Ch. 1) jeweils die Hauptkategorien zu identifizieren

Die Analysen nach Methode 1 sind dabei immer nach zwei Verfahren durchzuführen. In einem ersten Durchlauf werden lediglich die Emissionen – die Einbindungen in Senken bleiben hier unberücksichtigt – aus Quellen bewertet. In einem zusätzlichen Durchlauf wird dann auch der Betrag (ohne Berücksichtigung des Vorzeichens) der Emissionseinbindung in den Senken mit einbezogen. Beide Ergebnisse differieren dann erwartungsgemäß. Entsprechend den 2006 IPCC GL sind beide Ergebnisse bei der Festlegung der Hauptkategorien zu berücksichtigen.

Für die identifizierten Hauptkategorien besteht dann die Verpflichtung, für die Emissionen sehr detaillierte Berechnungsmethoden (Methode 2 oder höher), die ebenfalls in (IPCC, 2006a) vorgegeben sind, anzuwenden. Sollte deren direkte Anwendung aus den verschiedensten Gründen (z.B. die Datenverfügbarkeit für die benötigten Eingangsgrößen o.ä.) nicht möglich sein, besteht die Verpflichtung, nachzuweisen, dass durch die national angewendeten Methoden mindestens eine vergleichbare Genauigkeit im Berechnungsergebnis erreicht wird. Diese Nachweise sowie auch die insgesamt durchgeführte Hauptkategorienanalyse sind in dem jährlich zu erarbeitenden nationalen Inventarbericht zu beschreiben.

Anhang 1.1 Beschreibung der Methoden zur Festlegung der Hauptkategorien

In Tabelle 8, Kapitel 1.4 werden die Ergebnisse der Hauptkategorienanalyse nach den beiden Methode-1-Verfahren (Level und Trend), dem Methode-2-Verfahren und der Bewertung qualitativer Kriterien vorgestellt. Auf die Beschreibung der zugrunde gelegten Methoden in den *2006 IPCC GL* (IPCC (2006a): Vol. 1) wird verwiesen.

Anhang 1.1.1 Methode-1-Verfahren

Im Ergebnis der Level-Analyse werden die Kategorien als Hauptkategorien (●) festgelegt, die im Basisjahr (1990 bzw. 1995 für die F-Gase), bzw. im aktuellen Jahr von der Menge der freigesetzten Emissionen 95 % der nationalen Gesamtemission (als CO_2-Äquivalentemission) verursachen. Die Berechnung erfolgte unter Anwendung der Formel 4.1 der 2006 IPCC Guidelines (IPCC (2006a): Vol. 1).

Im Ergebnis der Trend-Analyse werden die Kategorien als Hauptkategorien (●) festgelegt, die hinsichtlich der zeitlichen Entwicklung ihres Emissionsbeitrages seit dem Basisjahr zur Änderung der Gesamttreibhausgasemissionen des neuesten Jahres besonders beigetragen haben. Es spielt hierbei keine Rolle, ob durch diese Änderung eine Minderung oder Steigerung der Emissionen der Gesamtemissionen erfolgt ist. Die Berechnung erfolgte unter Anwendung der Formel 4.2 der 2006 IPCC Guidelines (IPCC (2006a): Vol. 1).

In der folgenden Tabelle findet sich die vollständige Liste aller in der Analyse berücksichtigten Unterkategorien.

Tabelle 470: Hauptkategorien für Deutschland gemäß Methode 1-Ansatz (vollständige Liste, mit IPCC AR5-GWP gerechnet)

IPCC Categories	Activity	Emissions of	Level Base Year	Level Base Year +LULUCF	Level 1990	Level 1990 +LULUCF	Level 2023	Level 2024 +LULUCF	Trend 2024	Trend 2024 +LULUCF	KCA decission
1 A 1 a, Public Electricity and Heat Production	fossil fuels	CO_2	•	•	•	•	•	•	•	•	L/T
1 A 1 a, Public Electricity and Heat Production		CH_4	-	-	-	-	•	•	•	•	L/T
1 A 1 a, Public Electricity and Heat Production		N_2O	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
1 A 1 b, Petroleum Refining	fossil fuels	CO_2	•	•	•	•	•	•	•	•	L/T
1 A 1 b, Petroleum Refining		CH_4	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
1 A 1 b, Petroleum Refining		N_2O	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
1 A 1 c, Manufacture of Solid Fuels and Other Energy Industries	fossil fuels	CO_2	•	•	•	•	•	•	•	•	L/T
1 A 1 c, Manufacture of Solid Fuels and Other Energy Industries		CH_4	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
1 A 1 c, Manufacture of Solid Fuels and Other Energy Industries		N_2O	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
1 A 2 a, Iron and Steel	fossil fuels	CO_2	•	•	•	•	•	•	•	•	L/T
1 A 2 a, Iron and Steel		CH_4	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
1 A 2 a, Iron and Steel		N_2O	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
1 A 2 b, Non-ferrous Metals	fossil fuels	CO_2	-	-	-	-	•	-	-	-	L/-
1 A 2 b, Non-ferrous Metals		CH_4	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
1 A 2 b, Non-ferrous Metals		N_2O	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
1 A 2 d, Pulp, Paper and Print	fossil fuels	CO_2	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
1 A 2 d, Pulp, Paper and Print		CH_4	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
1 A 2 d, Pulp, Paper and Print		N_2O	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
1 A 2 e, Food Processing, Beverages and Tobacco	fossil fuels	CO_2	-	-	-	-	-	-	•	-	-/T
1 A 2 e, Food Processing, Beverages and Tobacco		CH_4	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
1 A 2 e, Food Processing, Beverages and Tobacco		N_2O	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
1 A 2 f, Non-metallic Minerals	fossil fuels	CO_2	•	•	•	•	•	•	-	-	L/-
1 A 2 f, Non-metallic Minerals		CH_4	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
1 A 2 f, Non-metallic Minerals		N_2O	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
1 A 2 g, Other Manufacturing Industries and Construction	fossil fuels	CO_2	•	•	•	•	•	•	•	•	L/T
1 A 2 g, Other Manufacturing Industries and Construction		CH_4	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
1 A 2 g, Other Manufacturing Industries and Construction		N_2O	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
1 A 3 a, Civil Aviation	fossil fuels	CO_2	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
1 A 3 a, Civil Aviation		CH_4	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
1 A 3 a, Civil Aviation		N_2O	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
1 A 3 b, Road transport	fossil fuels	CO_2	•	•	•	•	•	•	•	•	L/T
1 A 3 b, Road transport		CH_4	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
1 A 3 b, Road transport		N_2O	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
1 A 3 c, Rail Transport	fossil fuels	CO_2	•	•	•	•	-	-	•	•	L/T

			Level	Level	Level	Level	Level	Level	Trend	Trend	
1 A 3 c, Rail Transport		CH_4	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
1 A 3 c, Rail Transport		N_2O	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
1 A 3 d, National Shipping	fossil fuels	CO_2	•	•	-	-	-	-	-	-	L/-
1 A 3 d, National Shipping		CH_4	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
1 A 3 d, National Shipping		N_2O	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
1 A 3 e, Other Transport	fossil fuels	CO_2	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
1 A 3 e, Other Transport		CH_4	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
1 A 3 e, Other Transport		N_2O	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
1 A 4 a, Commercial/Institutional	fossil fuels	CO_2	•	•	•	•	•	•	•	•	L/T
1 A 4 a, Commercial/Institutional		CH_4	-	-	-	-	-	-	•	-	-/T
1 A 4 a, Commercial/Institutional		N_2O	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
1 A 4 b, Residential	fossil fuels	CO_2	•	•	•	•	•	•	•	•	L/T
1 A 4 b, Residential		CH_4	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
1 A 4 b, Residential		N_2O	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
1 A 4 c, Agriculture/Forestry/Fishing	fossil fuels	CO_2	•	•	•	•	•	•	•	•	L/T
1 A 4 c, Agriculture/Forestry/Fishing		CH_4	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
1 A 4 c, Agriculture/Forestry/Fishing		N_2O	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
1 A 5, Military	fossil fuels	CO_2	•	•	•	•	-	-	•	•	L/T
1 A 5, Military		CH_4	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
1 A 5, Military		N_2O	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
1 B 1, Solid Fuels		CO_2	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
1 B 1, Solid Fuels		CH_4	•	•	•	•	-	-	•	•	L/T
1 B 2 a, Fugitive Emissions from Oil		CO_2	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
1 B 2 a, Fugitive Emissions from Oil		CH_4	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
1 B 2 a, Fugitive Emissions from Oil		N_2O	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
1 B 2 b, Fugitive Emissions from Natural Gas		CO_2	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
1 B 2 b, Fugitive Emissions from Natural Gas		CH_4	•	•	•	•	•	•	•	•	L/T
1 B 2 c, Venting and Flaring (oil, gas, combined oil and gas)		CO_2	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
1 B 2 c, Venting and Flaring (oil, gas, combined oil and gas)		CH_4	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
1 B 2 c, Venting and Flaring (oil, gas, combined oil and gas)		N_2O	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 A 1, Cement Production		CO_2	•	•	•	•	•	•	•	•	L/T
2 A 2, Lime Production		CO_2	•	•	•	•	•	•	•	-	L/T
2 A 3, Glass Production		CO_2	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 A 4, Other Process Uses of Carbonates		CO_2	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 B 1, Ammonia Production		CO_2	•	•	•	•	•	•	-	-	L/-
2 B 2, Nitric Acid Production		N_2O	-	-	-	-	-	-	•	•	-/T
2 B 3, Adipic Acid Production		N_2O	•	•	•	•	-	-	•	•	L/T
2 B 5, Carbide Production		CO_2	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 B 7, Soda Ash Production		CO_2	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-

			Level	Level	Level	Level	Level	Level	Trend	Trend	
2 B 8, Petrochemical and Carbon Black Production		CO_2	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 B 8, Petrochemical and Carbon Black Production		CH_4	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 B 9 a, By-Product Emissions		HFC23	•	•	•	•	-	-	•	•	L/T
2 B 9 b, Fugitive Emissions		CF_4	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 B 9 b, Fugitive Emissions		HFC134a	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 B 9 b, Fugitive Emissions		HFC227ea	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 B 9 b, Fugitive Emissions		SF_6	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 B 10, Other Chemical Industry		CH_4	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 B 10, Other Chemical Industry		N_2O	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 C 1, Iron and Steel Production		CO_2	•	•	•	•	•	•	•	•	L/T
2 C 1, Iron and Steel Production		CH_4	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 C 1, Iron and Steel Production		N_2O	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 C 2, Ferroalloys Production		CO_2	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 C 2, Ferroalloys Production		CH_4	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 C 3, Aluminium Production		CO_2	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 C 3, Aluminium Production		CF_4	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 C 3, Aluminium Production		C2F6	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 C 3, Aluminium Production		SF_6	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 C 4, Magnesium Production		HFC134a	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 C 4, Magnesium Production		SF_6	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 C 5, Lead Production		CO_2	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 C 6, Zinc Production		CO_2	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 D 1, Lubricant Use		CO_2	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 D 2, Paraffin Wax Use		CO_2	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 D 2, Paraffin Wax Use		N_2O	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 D 3, Other Non-Energy Products from Fuels		CO_2	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 E, Electronics Industry		N_2O	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 E, Electronics Industry		CF_4	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 E, Electronics Industry		C_2F_6	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 E, Electronics Industry		C_3F_8	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 E, Electronics Industry		cC4F8	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 E, Electronics Industry		C6F14	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 E, Electronics Industry		HFC23	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 E, Electronics Industry		HFC32	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 E, Electronics Industry		SF_6	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 E, Electronics Industry		NF_3	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 F, Product Uses as Substitutes for ODS		C_2F_6	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 F, Product Uses as Substitutes for ODS		C_3F_8	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 F, Product Uses as Substitutes for ODS		C6F14	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-

			Level	Level	Level	Level	Level	Level	Trend	Trend	
2 F, Product Uses as Substitutes for ODS		HFC23	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 F, Product Uses as Substitutes for ODS		HFC32	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 F, Product Uses as Substitutes for ODS		HFC4310mee	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 F, Product Uses as Substitutes for ODS		HFC125	-	-	-	-	•	•	•	•	L/T
2 F, Product Uses as Substitutes for ODS		HFC134a	-	-	-	-	•	•	•	•	L/T
2 F, Product Uses as Substitutes for ODS		HFC143a	-	-	-	-	-	-	•	•	-/T
2 F, Product Uses as Substitutes for ODS		HFC152a	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 F, Product Uses as Substitutes for ODS		HFC227ea	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 F, Product Uses as Substitutes for ODS		HFC236fa	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 F, Product Uses as Substitutes for ODS		HFC245fa	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 F, Product Uses as Substitutes for ODS		HFC365mfc	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 G, Other Product Manufacture and Use		CH_4	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 G, Other Product Manufacture and Use		N_2O	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 G, Other Product Manufacture and Use		C10F18	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 G, Other Product Manufacture and Use		HFC134a	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 G, Other Product Manufacture and Use		HFC245fa	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 G, Other Product Manufacture and Use		HFC365mfc	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
2 G, Other Product Manufacture and Use		SF_6	•	•	•	•	-	-	•	•	L/T
3 A, Enteric Fermentation	dairy cows	CH_4	•	•	•	•	•	•	•	•	L/T
3 A, Enteric Fermentation	non-dairy cattle	CH_4	•	•	•	•	•	•	•	•	L/T
3 A, Enteric Fermentation	other animals	CH_4	-	-	-	-	•	•	-	-	L/-
3 B, Manure Management	dairy cows	CH_4	-	-	-	-	•	•	•	•	L/T
3 B, Manure Management	non-dairy cattle	CH_4	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
3 B, Manure Management	swine	CH_4	•	•	•	•	•	•	-	-	L/-
3 B, Manure Management	other animals	CH_4	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
3 B, Manure Management	dairy cows	N_2O	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
3 B, Manure Management	non-dairy cattle	N_2O	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
3 B, Manure Management	swine	N_2O	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
3 B, Manure Management	other animals	N_2O	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
3 B, Manure Management	deposition and leaching	N_2O	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
3 D, Agricultural Soils		N_2O	•	•	•	•	•	•	•	•	L/T
3 G, Liming		CO_2	-	-	-	-	•	•	•	-	L/T
3 H, Urea Application		CO_2	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
3 I, Other Carbon-containing Fertilizers		CO_2	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
3 J, Other Agriculture		CH_4	-	-	-	-	-	-	•	•	-/T
3 J, Other Agriculture		N_2O	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
4 A, Forest Land		CO_2	-	•	-	•	-	•	-	•	L/T
4 A, Forest Land		CH_4	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
4 A, Forest Land		N_2O	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-

			Level	Level	Level	Level	Level	Level	Trend	Trend	
4 B, Cropland		CO_2	-	•	-	•	-	•	-	•	L/T
4 B, Cropland		CH_4	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
4 B, Cropland		N_2O	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
4 C, Grassland		CO_2	-	•	-	•	-	•	-	•	L/T
4 C, Grassland		CH_4	-	-	-	-	-	•	-	•	L/T
4 C, Grassland		N_2O	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
4 D, Wetlands		CO_2	-	•	-	•	-	•	-	•	L/T
4 D, Wetlands		CH_4	-	•	-	•	-	•	-	•	L/T
4 D, Wetlands		N_2O	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
4 E, Settlements		CO_2	-	•	-	•	-	•	-	•	L/T
4 E, Settlements		CH_4	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
4 E, Settlements		N_2O	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
4 G, Harvested Wood Products		CO_2	-	-	-	-	-	-	-	•	-/T
5 A, Solid Waste Disposal		CH_4	•	•	•	•	•	•	•	•	L/T
5 B, Biological Treatment of Solid Waste		CH_4	-	-	-	-	-	-	•	•	-/T
5 B, Biological Treatment of Solid Waste		N_2O	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
5 D 1, Domestic Wastewater		CH_4	•	•	•	•	-	-	•	•	L/T
5 D 1, Domestic Wastewater		N_2O	-	-	-	-	-	-	•	•	-/T
5 D 2, Industrial Wastewater		CH_4	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
5 D 2, Industrial Wastewater		N_2O	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
5 E, Other Waste		CH_4	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-
5 E, Other Waste		N_2O	-	-	-	-	-	-	-	-	-/-

Anhang 1.1.2 Methode-2-Verfahren

Die Hauptkategorienanalyse nach dem Methode-2-Ansatz beruht auf den Ergebnissen der aktuellen Unsicherheitenbestimmung nach Methode 1. Die Ergebnisse bestätigten in weiten Teilen die Ergebnisse der Methode-1-Hauptkategorien-Analysen. Hinzu kommen jedoch die in Tabelle 9, Kapitel 1.4 genannten Kategorien.

Anhang 1.1.3 Bewertung qualitativer Kriterien

Deutschland führt eine Bewertung der Hauptkategorien durch die Anwendung qualitativer Kriterien durch. Die anzuwendenden Kriterien sind in Kapitel 4.3.3 der 2006 IPCC Guidelines (IPCC (2006a): Vol. 1) empfohlen und schließen eine Bewertung aufgrund des Einsatzes von Minderungstechniken, der Erwartung einer überproportionalen Zunahme der Emissionen, einer hohen Unsicherheit oder unerwartet niedriger oder hoher Emissionen einer Kategorie ein. Auf Grund dieser Kriterien können zusätzliche Kategorien als eine Hauptkategorie festgelegt werden.

In der Adipinsäureproduktion (2.B.3) wurde eine redundante Abgasbehandlungsanlage installiert. Aufgrund dessen wird es nach qualitativen Kriterien als Hauptkategorie eingestuft. 2.B.3 ist aber bereits nach Methode 1 Level und Trend eine Hauptkategorie.

Unter 2.G.2 werden SF_6-Emissionen aus Schallschutzscheiben berichtet. Noch ist der Trend nicht zu erkennen, aber aufgrund der zunehmenden Entsorgung dieser Scheiben ist mit stark steigenden SF_6-Emissionen in den kommenden Jahren zu rechnen. Deshalb ist es bereits nach den qualitativen Kriterien eine Hauptkategorie. Dies führt zu keiner Änderung da bereits 2G für SF_6 nach Methode 1 Level und Trend eine Hauptkategorie ist. Eine qualitative Wertung aufgrund hoher Unsicherheiten ist nicht erforderlich, da Deutschland eine Methode 2 Hauptkategorienanalyse für das gesamte Inventar jedes Jahr durchführt. Im Inventar fielen keine unerwartet niedrigen oder hohen Emissionen auf.

Durch die Anwendung qualitativer Kriterien werden in Deutschland keine zusätzlichen Hauptkategorien identifiziert.

Deutschland wendet alle empfohlenen Verfahren für die Ermittlung bzw. Bewertung der Quellkategorien an. Die IPCC-Guidelines schreiben vor dass 95% der Emissionen aus Quellen bzw. Einbindungen in Senken als Hauptkategorien festgelegt werden müssen. Da die Festlegung der Hauptkategorien in Deutschland durch die Kombination der Ergebnisse aller Analysenverfahren und Bewertungen erfolgt, werden insgesamt die verursachenden Aktivitäten für ca. 98 % des Inventars als Hauptkategorien identifiziert.

Anhang 2 Bewertung der Unsicherheit: Unsicherheiten nach Kategorien

Die Unsicherheiten für die deutschen Treibhausgasinventare wurden vollständig für alle Kategorien und jeweils das Basisjahr, das aktuelle Berichtsjahr sowie den Trend ermittelt. In Deutschland werden die Unsicherheiten jedes Jahr nach Approach 1 (Fehlerfortpflanzung) und nach Approach 2 (Monte-Carlo-Simulation) berechnet.

Die Ergebnisse der diesjährigen Unsicherheitenanalyse sind nach den Vorgaben von Tabelle 3.4 und 3.5 der IPCC Guidelines 2006 (IPCC, 2006a) in den Tabelle 471 und Tabelle 472 dargestellt.

Tabelle 471: Unsicherheiten nach Kategorien (Approach 1, Fehlerfortpflanzung gemäß Tabelle 3.4 der IPCC Guidelines)

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
IPCC Category	Gas	Base year emissions or removals	2024 emissions or removals	Activity data uncertainty	Emission factor / estimation parameter uncertainty	Combined uncertainty	Contribution to Variance by Category in Year x	Type A sensitivity	Type B sensitivity	Uncertainty in trend in national emissions introduced by emission factor / estimation parameter uncertainty	Uncertainty in trend in national emissions introduced by activity data uncertainty	Uncertainty introduced into the trend in total national emissions
		Input data	Input data	Input data Note A	Input data Note A	$\sqrt{E^2 + F^2}$	$\frac{(G * D)^2}{(\sum D)^2}$	Note B	$\lvert\frac{D}{\sum C}\rvert$	I * F Note C	J * E * Note D	$\sqrt{2\ K^2 + L^2}$
		kt CO_2 equivalent	kt CO_2 equivalent	%	%	%		%	%	%	%	%
Sum	**THG**	**1.293.320,67**	**707.608,32**			**3,10**						**3,07**
1 A 1 a, Public Electricity and Heat Production	CO_2	338.451,16	151.375,41	3,12	1,04	3,29	0,50	0,02	0,12	0,52	0,17	0,30
1 A 1 a, Public Electricity and Heat Production	CH_4	192,83	2.637,87	7,66	55,66	56,18	0,04	0,00	0,00	0,02	0,16	0,03
1 A 1 a, Public Electricity and Heat Production	N_2O	2.140,86	1.241,79	3,01	17,57	17,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00
1 A 1 b, Petroleum Refining	CO_2	24.212,49	21.079,80	0,00	5,11	5,11	0,02	0,01	0,02	0,00	0,12	0,01
1 A 1 b, Petroleum Refining	CH_4	17,99	17,28	0,00	16,60	16,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1 A 1 b, Petroleum Refining	N_2O	89,27	56,08	0,00	29,45	29,45	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1 A 1 c, Manufacture of Solid Fuels and Other Energy Industries	CO_2	65.289,06	8.735,95	0,00	5,73	5,73	0,01	0,01	0,01	0,00	0,05	0,00
1 A 1 c, Manufacture of Solid Fuels and Other Energy Industries	CH_4	103,02	113,12	0,00	115,60	115,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
1 A 1 c, Manufacture of Solid Fuels and Other Energy Industries	N_2O	586,23	116,43	0,00	24,88	24,88	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1 A 2 a, Iron and Steel	CO_2	35.269,33	33.166,23	4,71	3,36	5,78	0,07	0,01	0,03	0,17	0,12	0,04
1 A 2 a, Iron and Steel	CH_4	69,95	63,73	8,43	25,36	26,73	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1 A 2 a, Iron and Steel	N_2O	137,93	88,33	4,81	35,42	35,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1 A 2 b, Non-ferrous Metals	CO_2	1.629,22	1.524,28	10,63	0,94	10,67	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00
1 A 2 b, Non-ferrous Metals	CH_4	1,55	1,86	10,83	67,68	68,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1 A 2 b, Non-ferrous Metals	N_2O	15,25	7,39	9,35	58,81	59,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1 A 2 d, Pulp, Paper and Print	CO_2	3,65	8,85	5,22	2,24	5,68	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1 A 2 d, Pulp, Paper and Print	CH_4	0,73	2,67	4,04	43,24	43,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1 A 2 d, Pulp, Paper and Print	N_2O	2,50	9,09	4,04	51,54	51,70	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1 A 2 e, Food Processing, Beverages and Tobacco	CO_2	2.015,91	280,87	5,69	1,50	5,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1 A 2 e, Food Processing, Beverages and Tobacco	CH_4	5,02	0,19	6,33	41,29	41,77	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1 A 2 e, Food Processing, Beverages and Tobacco	N_2O	21,92	2,23	5,87	55,16	55,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1 A 2 f, Non-metallic Minerals	CO_2	18.507,38	9.581,88	3,99	0,89	4,09	0,00	0,00	0,01	0,04	0,01	0,00
1 A 2 f, Non-metallic Minerals	CH_4	56,31	12,55	3,64	24,89	25,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1 A 2 f, Non-metallic Minerals	N_2O	182,53	76,25	3,16	28,72	28,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1 A 2 g, Other Manufacturing Industries and Construction	CO_2	125.527,76	56.437,66	0,00	3,77	3,77	0,09	0,01	0,04	0,00	0,23	0,05
1 A 2 g, Other Manufacturing Industries and Construction	CH_4	146,88	202,46	0,00	30,63	30,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
1 A 2 g, Other Manufacturing Industries and Construction	N_2O	831,54	411,25	0,00	15,25	15,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
1 A 3 a, Civil Aviation	CO_2	2.310,48	1.087,32	7,19	3,83	8,15	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
1 A 3 a, Civil Aviation	CH_4	3,48	1,52	16,40	76,39	78,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1 A 3 a, Civil Aviation	N_2O	20,68	9,70	0,00	21,32	21,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1 A 3 b, Road transport	CO_2	151.889,81	139.371,62	0,00	5,29	5,29	1,09	0,04	0,11	0,00	0,81	0,65
1 A 3 b, Road transport	CH_4	1.812,75	229,38	6,50	10,01	11,93	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1 A 3 b, Road transport	N_2O	1.123,44	1.306,82	6,75	14,43	15,93	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,00
1 A 3 c, Rail Transport	CO_2	3.133,05	742,99	0,00	10,01	10,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
1 A 3 c, Rail Transport	CH_4	19,73	0,26	8,59	28,90	30,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1 A 3 c, Rail Transport	N_2O	6,83	1,64	8,84	65,47	66,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1 A 3 d, National Shipping	CO_2	3.013,77	1.410,58	0,00	24,24	24,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00
1 A 3 d, National Shipping	CH_4	2,65	10,07	9,26	135,78	136,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1 A 3 d, National Shipping	N_2O	18,68	10,42	12,18	98,29	99,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1 A 3 e, Other Transport	CO_2	1.083,27	675,05	2,72	0,91	2,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1 A 3 e, Other Transport	CH_4	5,95	3,66	2,72	67,90	67,96	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1 A 3 e, Other Transport	N_2O	12,88	5,11	2,85	47,58	47,66	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1 A 4 a, Commercial/Institutional	CO_2	64.025,93	21.323,69	0,00	9,43	9,43	0,08	0,01	0,02	0,00	0,22	0,05
1 A 4 a, Commercial/Institutional	CH_4	1.636,92	100,24	15,14	103,02	104,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
1 A 4 a, Commercial/Institutional	N_2O	130,28	70,04	8,30	71,31	71,79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
1 A 4 b, Residential	CO_2	128.635,75	76.863,21	0,00	8,58	8,58	0,87	0,00	0,06	0,00	0,72	0,52
1 A 4 b, Residential	CH_4	2.782,86	813,85	14,82	137,67	138,47	0,03	0,00	0,00	0,01	0,12	0,02
1 A 4 b, Residential	N_2O	683,71	226,93	9,57	87,32	87,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00
1 A 4 c, Agriculture/Forestry/Fishing	CO_2	11.359,76	7.263,37	0,00	13,58	13,58	0,02	0,00	0,01	0,00	0,11	0,01

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1 A 4 c, Agriculture/Forestry/Fishing	CH_4	272,15	203,52	8,21	52,63	53,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
1 A 4 c, Agriculture/Forestry/Fishing	N_2O	66,84	71,36	14,31	101,26	102,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
1 A 5, Military	CO_2	11.764,62	597,06	0,00	6,19	6,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1 A 5, Military	CH_4	312,97	1,51	0,00	50,66	50,66	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1 A 5, Military	N_2O	54,14	1,51	0,00	61,34	61,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1 B 1, Solid Fuels	CO_2	1.832,80	699,81	0,00	36,49	36,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00
1 B 1, Solid Fuels	CH_4	28.579,16	78,09	0,00	43,52	43,52	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
1 B 2 a, Fugitive Emissions from Oil	CO_2	477,63	387,01	0,00	24,92	24,92	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
1 B 2 a, Fugitive Emissions from Oil	CH_4	275,47	23,60	0,00	30,72	30,72	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1 B 2 a, Fugitive Emissions from Oil	N_2O	0,28	0,23	0,00	30,00	30,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1 B 2 b, Fugitive Emissions from Natural Gas	CO_2	986,72	398,54	0,00	22,30	22,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
1 B 2 b, Fugitive Emissions from Natural Gas	CH_4	9.892,63	1.732,86	0,00	24,96	24,96	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00
1 B 2 c, Venting and Flaring (oil, gas, combined oil and gas)	CO_2	543,52	319,64	0,00	143,67	143,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,00
1 B 2 c, Venting and Flaring (oil, gas, combined oil and gas)	CH_4	1,85	0,63	0,00	133,13	133,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1 B 2 c, Venting and Flaring (oil, gas, combined oil and gas)	N_2O	1,74	0,62	0,00	70,04	70,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 A 1, Cement Production	CO_2	15.297,27	9.830,97	2,50	1,00	2,69	0,00	0,00	0,01	0,03	0,01	0,00
2 A 2, Lime Production	CO_2	5.986,62	3.979,72	2,37	10,54	10,81	0,00	0,00	0,00	0,01	0,05	0,00
2 A 3, Glass Production	CO_2	780,48	763,49	3,11	11,25	11,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
2 A 4, Other Process Uses of Carbonates	CO_2	1.458,01	505,61	8,78	8,31	12,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 B 1, Ammonia Production	CO_2	6.025,00	3.267,00	0,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 B 2, Nitric Acid Production	N_2O	2.896,77	114,29	0,50	2,67	2,72	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 B 3, Adipic Acid Production	N_2O	16.074,90	32,92	2,00	6,00	6,32	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
2 B 5, Carbide Production	CO_2	443,16	4,39	1,00	10,00	10,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 B 7, Soda Ash Production	CO_2	615,50	404,45	0,00	4,18	4,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 B 8, Petrochemical and Carbon Black Production	CO_2	973,97	756,98	11,68	13,80	18,08	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
2 B 8, Petrochemical and Carbon Black Production	CH_4	373,73	423,06	16,33	13,05	20,90	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00
2 B 9 a, By-Product Emissions	HFC23	C	C	0,00	3,00	3,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 B 9 b, Fugitive Emissions	CF_4	C	C	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 B 9 b, Fugitive Emissions	HFC134a	C	C	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 B 9 b, Fugitive Emissions	HFC227ea	C	C	0,00	3,00	3,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 B 9 b, Fugitive Emissions	SF_6	164,50	8,88	0,00	3,00	3,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 B 10, Other Chemical Industry	CH_4	3,87	1,11	0,00	202,26	202,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 B 10, Other Chemical Industry	N_2O	C	C	0,00	40,00	40,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 C 1, Iron and Steel Production	CO_2	22.810,29	16.386,42	0,00	8,45	8,45	0,04	0,00	0,01	0,00	0,15	0,02
2 C 1, Iron and Steel Production	CH_4	5,22	5,04	0,00	68,09	68,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 C 1, Iron and Steel Production	N_2O	23,60	12,92	7,74	64,39	64,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 C 2, Ferroalloys Production	CO_2	429,00	5,74	50,00	7,00	50,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 C 2, Ferroalloys Production	CH_4	9,61	1,75	50,00	50,00	70,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 C 3, Aluminium Production	CO_2	1.011,92	302,62	1,00	5,00	5,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 C 3, Aluminium Production	CF4	1.385,67	69,98	0,00	15,00	15,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 C 3, Aluminium Production	C2F6	233,10	14,17	0,00	15,03	15,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 C 3, Aluminium Production	SF_6	C	C	0,00	50,00	50,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 C 4, Magnesium Production	HFC134a	0,00	7,19	0,00	35,00	35,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 C 4, Magnesium Production	SF_6	C	C	0,00	30,04	30,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 C 5, Lead Production	CO_2	157,87	64,89	5,72	40,87	41,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 C 6, Zinc Production	CO_2	670,80	81,65	0,00	50,25	50,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 D 1, Lubricant Use	CO_2	188,64	191,41	0,00	19,16	19,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 D 2, Paraffin Wax Use	CO_2	242,70	442,71	0,00	70,71	70,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00
2 D 2, Paraffin Wax Use	N2O	0,62	1,13	0,00	60,57	60,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 D 3, Other Non-Energy Products from Fuels	CO_2	2.551,10	1.224,63	0,00	10,08	10,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
2 E, Electronics Industry	N_2O	0,66	36,00	0,00	18,03	18,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 E, Electronics Industry	CF_4	92,06	72,53	0,00	6,41	6,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 E, Electronics Industry	C_2F_6	147,83	37,63	0,00	7,00	7,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 E, Electronics Industry	C3F8	0,00	14,58	0,00	7,00	7,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 E, Electronics Industry	cC4F8	0,00	5,15	0,00	7,00	7,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 E, Electronics Industry	C6F14	21,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 E, Electronics Industry	HFC23	14,34	13,14	0,00	7,00	7,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 E, Electronics Industry	HFC32	0,00	0,10	0,00	7,00	7,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
2 E, Electronics Industry	SF_6	48,73	63,92	0,00	7,00	7,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 E, Electronics Industry	NF_3	4,95	20,45	0,00	7,00	7,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 F, Product Uses as Substitutes for ODS	C_2F_6	0,00	3,32	0,00	19,98	19,98	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 F, Product Uses as Substitutes for ODS	C3F8	20,07	0,49	0,00	19,14	19,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 F, Product Uses as Substitutes for ODS	C6F14	C	C	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 F, Product Uses as Substitutes for ODS	HFC23	13,62	36,76	0,00	17,56	17,56	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 F, Product Uses as Substitutes for ODS	HFC32	0,76	262,22	0,00	8,37	8,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 F, Product Uses as Substitutes for ODS	HFC4310mee	C	C	0,00	2,00	2,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 F, Product Uses as Substitutes for ODS	HFC125	135,68	1.604,04	0,00	6,66	6,66	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
2 F, Product Uses as Substitutes for ODS	HFC134a	2.062,32	3.863,22	0,00	5,24	5,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00
2 F, Product Uses as Substitutes for ODS	HFC143a	76,48	988,39	0,00	10,86	10,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
2 F, Product Uses as Substitutes for ODS	HFC152a	100,24	0,00	0,00	24,28	24,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 F, Product Uses as Substitutes for ODS	HFC227ea	0,67	106,84	0,00	3,06	3,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 F, Product Uses as Substitutes for ODS	HFC236fa	C	C	0,00	9,20	9,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 F, Product Uses as Substitutes for ODS	HFC245fa	C	C	0,00	22,36	22,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 F, Product Uses as Substitutes for ODS	HFC365mfc	C	C	0,00	14,90	14,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 G, Other Product Manufacture and Use	CH_4	5,07	16,73	20,00	20,00	28,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 G, Other Product Manufacture and Use	N_2O	C	C	0,00	51,54	51,54	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
2 G, Other Product Manufacture and Use	C10F18	C	C	0,00	24,87	24,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 G, Other Product Manufacture and Use	HFC134a	0,00	0,18	0,00	22,36	22,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 G, Other Product Manufacture and Use	HFC245fa	0,00	21,54	0,00	20,71	20,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2 G, Other Product Manufacture and Use	HFC365mfc	0,00	0,71	0,00	22,36	22,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
2 G, Other Product Manufacture and Use	SF_6	C	C	0,00	8,01	8,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
3 A, Enteric Fermentation	CH_4	20.188,82	14.788,07	4,00	20,00	20,40	0,18	0,00	0,01	0,06	0,32	0,11
3 A, Enteric Fermentation	CH_4	15.273,58	9.267,27	2,15	10,73	10,94	0,02	0,00	0,01	0,02	0,11	0,01
3 A, Enteric Fermentation	CH_4	2.161,42	1.792,61	18,65	13,47	23,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,03	0,00
3 B, Manure Management	CH_4	2.521,46	2.499,53	4,00	20,00	20,40	0,01	0,00	0,00	0,01	0,05	0,00
3 B, Manure Management	CH_4	2.683,78	1.468,79	2,22	11,08	11,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00
3 B, Manure Management	CH_4	3.045,17	1.945,35	3,21	16,04	16,35	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	0,00
3 B, Manure Management	CH_4	238,01	313,14	5,73	15,67	16,69	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
3 B, Manure Management	N_2O	1.313,24	643,84	4,00	100,00	100,08	0,01	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00
3 B, Manure Management	N_2O	1.068,01	680,49	2,08	52,04	52,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00
3 B, Manure Management	N_2O	444,50	270,47	3,14	78,53	78,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00
3 B, Manure Management	N_2O	390,15	417,04	8,32	82,88	83,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00
3 B, Manure Management	N_2O	1.266,26	828,68	39,99	119,98	126,47	0,02	0,00	0,00	0,04	0,11	0,01
3 D, Agricultural Soils	N_2O	20.292,80	14.473,14	16,81	46,19	49,15	1,01	0,00	0,01	0,27	0,73	0,60
3 G, Liming	CO_2	2.200,01	1.906,50	3,57	2,94	4,63	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00
3 H, Urea Application	CO_2	480,00	330,20	1,00	1,00	1,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3 I, Other Carbon-containing Fertilizers	CO_2	510,45	144,75	3,00	3,00	4,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3 J, Other Agriculture	CH_4	0,31	1.445,31	10,00	20,00	22,36	0,00	0,00	0,00	0,02	0,03	0,00
3 J, Other Agriculture	N_2O	0,11	92,70	9,41	94,20	94,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
4 A, Forest Land	CO_2	-26.920,55	1.648,08	0,00	10,42	10,42	0,00	0,03	0,01	0,00	0,17	0,03
4 A, Forest Land	CH_4	32,44	26,91	0,00	93,16	93,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4 A, Forest Land	N_2O	435,49	465,46	0,00	80,24	80,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00
4 B, Cropland	CO_2	25.789,59	16.833,12	0,00	19,25	19,25	0,21	0,00	0,01	0,00	0,37	0,14
4 B, Cropland	CH_4	413,90	312,23	0,00	67,34	67,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00
4 B, Cropland	N_2O	543,02	370,18	0,00	142,48	142,48	0,01	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00
4 C, Grassland	CO_2	22.519,88	21.469,12	0,00	44,40	44,40	1,81	0,01	0,03	0,00	2,15	4,61
4 C, Grassland	CH_4	2.582,33	2.657,31	0,00	360,45	360,45	1,83	0,00	0,00	0,00	1,05	1,09
4 C, Grassland	N_2O	80,60	51,98	0,00	62,00	62,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4 D, Wetlands	CO_2	3.586,67	3.478,53	0,00	26,94	26,94	0,02	0,00	0,00	0,00	0,13	0,02
4 D, Wetlands	CH_4	5.368,71	5.447,38	0,00	63,47	63,47	0,24	0,00	0,00	0,00	0,38	0,14
4 D, Wetlands	N_2O	26,27	26,76	0,00	177,99	177,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
4 E, Settlements	CO_2	3.141,45	4.370,55	0,00	18,14	18,14	0,01	0,00	0,00	0,00	0,11	0,01
4 E, Settlements	CH_4	53,82	96,43	0,00	59,40	59,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
4 E, Settlements	N_2O	136,11	177,18	0,00	144,89	144,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00
4 G, Harvested Wood Products	CO_2	-1.294,86	407,62	0,00	25,87	25,87	0,00	0,00	0,01	0,00	0,32	0,10
5 A, Solid Waste Disposal	CH_4	37.191,25	1.997,16	0,00	20,00	20,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,04	0,00

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
5 B, Biological Treatment of Solid Waste	CH_4	59,39	918,33	1,49	149,84	149,85	0,04	0,00	0,00	0,00	0,15	0,02
5 B, Biological Treatment of Solid Waste	N_2O	19,67	194,29	1,42	109,81	109,82	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00
5 D 1, Domestic Wastewater	CH4	3.725,66	926,91	3,04	388,41	388,43	0,26	0,00	0,00	0,00	0,39	0,15
5 D 1, Domestic Wastewater	N_2O	515,78	1.131,75	5,29	639,14	639,17	1,05	0,00	0,00	0,01	0,79	0,62
5 D 2, Industrial Wastewater	CH_4	10,36	56,61	0,00	50,00	50,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5 D 2, Industrial Wastewater	N_2O	28,09	24,01	50,00	310,00	314,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00
5 E, Other Waste	CH4	0,00	2,36	2,00	20,00	20,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5 E, Other Waste	N_2O	0,00	25,90	2,00	20,00	20,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabelle 472: Unsicherheiten nach Sektoren (Approach 2, Monte-Carlo-Simulation, gemäß Tabelle 3.5 der 2006 IPCC Guidelines)

A1	A2	B	C	D	E-	E+	F-	F+	G-	G+	H	I	J-	J+
IPCC Category	Qualifier	gas	Base year emissions or removals	Emissions or removals 2024	Activity data uncertainty		Emission factor uncertainty		Combined uncertainty		Contribution to variance 2024		Inventory trend in nationalemissions for 2024 increase with respect to base year	
			kt CO_2 equivalent	kt CO_2 equivalent	-%	+%	-%	+%	-%	+%	fraction	% of base year	-%	+%
Sum		THG	1.293.320,67	707.608,32					2,58	2,53		-45,29	6,68	6,76
1 A 1 a, Public Electricity and Heat Production	fossil fuels	CO_2	338.451,16	151.375,41	7,98	8,29	2,83	2,81	3,24	3,27	0,08	-55,27	5,70	5,82
1 A 1 a, Public Electricity and Heat Production		CH_4	192,83	2.637,87	28,19	42,78	48,81	114,98	28,32	39,20	0,00	1.267,99	47,47	64,94
1 A 1 a, Public Electricity and Heat Production		N_2O	2.140,86	1.241,79	27,42	22,98	50,37	44,65	20,16	20,73	0,00	-42,00	63,62	88,48
1 A 1 b, Petroleum Refining	fossil fuels	CO_2	24.212,49	21.079,80	10,83	11,36	10,02	11,00	4,95	5,12	0,00	-12,94	87,03	90,95
1 A 1 b, Petroleum Refining		CH_4	17,99	17,28	50,93	62,45	27,04	45,51	17,35	17,82	0,00	-3,97	5.967,97	7.412,06
1 A 1 b, Petroleum Refining		N_2O	89,27	56,08	63,41	53,13	29,96	37,35	32,22	32,39	0,00	-37,18	8.685,67	12.184,62
1 A 1 c, Manufacture of Solid Fuels and Other Energy Industries	fossil fuels	CO_2	65.289,06	8.735,95	9,28	9,89	10,99	11,34	5,61	5,75	0,00	-86,62	2,12	2,21
1 A 1 c, Manufacture of Solid Fuels and Other Energy Industries		CH_4	103,02	113,12	31,41	42,16	59,77	125,16	49,87	83,74	0,00	9,81	270,83	489,55
1 A 1 c, Manufacture of Solid Fuels and Other Energy Industries		N_2O	586,23	116,43	17,10	18,90	50,05	64,90	28,49	29,48	0,00	-80,14	19,14	23,42
1 A 2 a, Iron and Steel	fossil fuels	CO_2	35.269,33	33.166,23	13,46	14,92	10,19	10,70	5,39	5,78	0,01	-5,96	2.304,78	2.448,20
1 A 2 a, Iron and Steel		CH_4	69,95	63,73	9,91	9,36	32,50	33,76	25,73	26,02	0,00	-8,89	622,17	841,42

A1	A2	B	C	D	E-	E+	F-	F+	G-	G+	H	I	J-	J+
1 A 2 a, Iron and Steel		N_2O	137,93	88,33	40,68	36,07	73,93	98,64	37,73	38,21	0,00	-35,96	371,25	577,48
1 A 2 b, Non-ferrous Metals	fossil fuels	CO_2	1.629,22	1.524,28	10,00	10,66	1,55	1,52	7,97	8,48	0,00	-6,44	27,76	29,79
1 A 2 b, Non-ferrous Metals		CH_4	1,55	1,86	23,42	15,61	66,23	74,66	67,70	69,80	0,00	19,71	785,70	1.647,04
1 A 2 b, Non-ferrous Metals		N_2O	15,25	7,39	40,83	26,29	49,88	63,63	59,97	62,25	0,00	-51,54	123,18	219,44
1 A 2 d, Pulp, Paper and Print	fossil fuels	CO_2	3,65	8,85	8,61	8,83	3,02	3,17	5,65	5,75	0,00	142,57	34,65	36,98
1 A 2 d, Pulp, Paper and Print		CH_4	0,73	2,67	43,20	42,74	55,85	65,73	47,97	48,82	0,00	264,38	98,91	159,04
1 A 2 d, Pulp, Paper and Print		N_2O	2,50	9,09	10,61	11,12	10,40	11,86	7,09	7,47	0,00	264,38	17,38	18,58
1 A 2 e, Food Processing, Beverages and Tobacco	fossil fuels	CO_2	2.015,91	280,87	6,23	6,55	4,26	4,47	3,96	4,10	0,00	-86,07	0,89	0,93
1 A 2 e, Food Processing, Beverages and Tobacco		CH_4	5,02	0,19	39,42	40,17	45,24	62,09	42,20	42,52	0,00	-96,14	5,14	8,21
1 A 2 e, Food Processing, Beverages and Tobacco		N_2O	21,92	2,23	33,98	32,69	62,55	81,44	46,67	49,33	0,00	-89,81	10,22	18,69
1 A 2 f, Non-metallic Minerals	fossil fuels	CO_2	18.507,38	9.581,88	13,29	15,33	1,99	2,07	3,09	3,19	0,00	-48,23	5,00	5,11
1 A 2 f, Non-metallic Minerals		CH_4	56,31	12,55	51,49	59,37	37,97	38,42	28,63	28,81	0,00	-77,71	62,17	84,42
1 A 2 f, Non-metallic Minerals		N_2O	182,53	76,25	34,43	49,10	36,11	45,78	25,37	25,71	0,00	-58,23	38,52	58,34
1 A 2 g, Other Manufacturing Industries and Construction	fossil fuels	CO_2	125.527,76	56.437,66	14,74	16,60	3,99	4,28	3,01	3,10	0,01	-55,04	7,75	7,93
1 A 2 g, Other Manufacturing Industries and Construction		CH_4	146,88	202,46	40,06	48,48	65,90	157,97	18,64	22,56	0,00	37,85	103,80	127,98
1 A 2 g, Other Manufacturing Industries and Construction		N_2O	831,54	411,25	39,19	46,80	30,38	40,83	13,82	14,09	0,00	-50,54	48,72	55,78
1 A 3 a, Civil Aviation	fossil fuels	CO_2	2.310,48	1.087,32	12,37	12,49	5,26	5,52	8,06	8,17	0,00	-52,94	10,08	10,89
1 A 3 a, Civil Aviation		CH_4	3,48	1,52	21,17	9,23	64,55	273,54	49,46	77,88	0,00	-56,28	99,94	187,41
1 A 3 a, Civil Aviation		N_2O	20,68	9,70	17,12	18,55	20,91	21,81	20,99	21,81	0,00	-53,11	25,75	32,08
1 A 3 b, Road transport	fossil fuels	CO_2	151.889,81	139.371,62	24,92	34,91	4,02	5,10	4,61	4,85	0,13	-8,24	40,52	42,65
1 A 3 b, Road transport		CH_4	1.812,75	229,38	28,42	52,06	29,48	40,02	9,48	10,96	0,00	-87,35	6,86	7,76
1 A 3 b, Road transport		N_2O	1.123,44	1.306,82	36,94	58,85	31,69	61,70	12,40	15,06	0,00	16,32	121,06	139,89
1 A 3 c, Rail Transport	fossil fuels	CO_2	3.133,05	742,99	10,52	10,51	3,23	3,22	10,01	10,09	0,00	-76,29	5,88	6,44
1 A 3 c, Rail Transport		CH_4	19,73	0,26	13,71	13,28	53,98	93,14	29,68	30,87	0,00	-98,66	0,81	1,05
1 A 3 c, Rail Transport		N_2O	6,83	1,64	15,19	14,01	39,08	62,80	38,08	55,74	0,00	-76,00	25,18	40,99
1 A 3 d, National Shipping	fossil fuels	CO_2	3.013,77	1.410,58	21,23	41,96	3,16	4,41	24,48	24,18	0,00	-53,20	52,61	79,66
1 A 3 d, National Shipping		CH_4	2,65	10,07	39,17	111,92	80,78	189,84	68,17	156,93	0,00	280,56	89,05	214,83
1 A 3 d, National Shipping		N_2O	18,68	10,42	11,90	13,19	48,41	74,92	32,72	43,66	0,00	-44,22	132,12	194,41
1 A 3 e, Other Transport	fossil fuels	CO_2	1.083,27	675,05	1,25	1,81	1,10	1,10	1,45	1,73	0,00	-37,68	2,09	2,21
1 A 3 e, Other Transport		CH_4	5,95	3,66	9,35	6,36	43,27	67,14	38,75	56,28	0,00	-38,43	51,45	80,86

A1	A2	B	C	D	E-	E+	F-	F+	G-	G+	H	I	J-	J+
1 A 3 e, Other Transport		N_2O	12,88	5,11	6,33	4,11	52,03	52,21	47,57	47,44	0,00	-60,34	29,30	47,35
1 A 4 a, Commercial/Institutional	fossil fuels	CO_2	64.025,93	21.323,69	9,44	10,10	2,19	2,25	5,71	6,10	0,00	-66,70	5,61	6,19
1 A 4 a, Commercial/Institutional		CH_4	1.636,92	100,24	44,76	51,13	48,47	107,81	35,77	52,23	0,00	-93,88	41,46	78,80
1 A 4 a, Commercial/Institutional		N_2O	130,28	70,04	43,60	48,58	42,04	67,08	30,42	35,71	0,00	-46,24	34,93	48,48
1 A 4 b, Residential	fossil fuels	CO_2	128.635,75	76.863,21	9,44	10,35	1,22	1,28	6,20	6,26	0,07	-40,25	13,14	14,25
1 A 4 b, Residential		CH_4	2.782,86	813,85	18,96	21,10	45,82	73,85	40,97	59,22	0,00	-70,76	224,23	365,45
1 A 4 b, Residential		N_2O	683,71	226,93	25,51	43,03	54,38	92,24	35,13	41,16	0,00	-66,81	54,86	77,37
1 A 4 c, Agriculture/Forestry/Fishing	fossil fuels	CO_2	11.359,76	7.263,37	26,13	26,98	7,31	6,70	13,49	13,61	0,00	-36,06	48,67	54,91
1 A 4 c, Agriculture/Forestry/Fishing		CH_4	272,15	203,52	22,18	24,12	46,63	79,74	30,94	42,74	0,00	-25,22	70,04	99,17
1 A 4 c, Agriculture/Forestry/Fishing		N_2O	66,84	71,36	30,98	31,88	47,52	74,00	31,21	44,22	0,00	6,77	878,52	1.303,43
1 A 5, Military	fossil fuels	CO_2	11.764,62	597,06	10,55	11,54	1,70	1,85	4,23	4,37	0,00	-94,92	0,90	0,95
1 A 5, Military		CH_4	312,97	1,51	24,79	61,23	80,37	100,33	50,04	50,73	0,00	-99,52	6,10	8,60
1 A 5, Military		N_2O	54,14	1,51	39,85	50,01	41,05	94,06	29,94	32,03	0,00	-97,21	3,43	4,31
1 B 1, Solid Fuels		CO_2	1.832,80	699,81	31,09	45,31	64,27	70,22	33,10	33,16	0,00	-61,82	135,22	188,20
1 B 1, Solid Fuels		CH_4	28.579,16	78,09	15,22	15,05	28,80	30,87	43,80	43,99	0,00	-99,73	0,89	1,73
1 B 2 a, Fugitive Emissions from Oil		CO_2	477,63	387,01	35,29	45,75	31,08	31,74	26,28	28,30	0,00	-18,97	229,08	304,77
1 B 2 a, Fugitive Emissions from Oil		CH_4	275,47	23,60	20,13	17,13	49,29	64,46	23,06	35,39	0,00	-91,43	4,70	6,98
1 B 2 a, Fugitive Emissions from Oil		N_2O	0,28	0,23	0,00	0,00	0,00	0,00	30,18	29,84	0,00	-20,23	370,14	509,10
1 B 2 b, Fugitive Emissions from Natural Gas		CO_2	986,72	398,54	4,99	5,00	24,91	25,06	17,06	17,41	0,00	-59,61	21,95	26,33
1 B 2 b, Fugitive Emissions from Natural Gas		CH_4	9.892,63	1.732,86	44,53	52,54	41,64	54,33	26,17	28,01	0,00	-82,48	2,28	2,53
1 B 2 c, Venting and Flaring (oil, gas, combined oil and gas)		CO_2	543,52	319,64	3,01	3,00	10,00	10,00	15,95	16,00	0,00	-41,19	62,51	73,33
1 B 2 c, Venting and Flaring (oil, gas, combined oil and gas)		CH_4	1,85	0,63	0,00	0,00	0,00	0,00	19,24	19,13	0,00	-65,94	33,87	43,93
1 B 2 c, Venting and Flaring (oil, gas, combined oil and gas)		N_2O	1,74	0,62	3,01	3,00	25,15	24,92	74,89	74,75	0,00	-64,51	264,01	532,07
2 A 1, Cement Production		CO_2	15.297,27	9.830,97	2,51	2,50	1,00	1,00	2,71	2,70	0,00	-35,73	6,46	6,65
2 A 2, Lime Production		CO_2	5.986,62	3.979,72	2,73	2,74	7,38	5,97	7,13	6,14	0,00	-33,52	17,08	18,12
2 A 3, Glass Production		CO_2	780,48	763,49	8,72	10,16	25,42	29,84	11,56	11,83	0,00	-2,18	101,09	112,91
2 A 4, Other Process Uses of Carbonates		CO_2	1.458,01	505,61	12,37	13,32	11,25	11,51	11,68	11,81	0,00	-65,32	6,72	8,14
2 B 1, Ammonia Production		CO_2	6.025,00	3.267,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,99	1,00	0,00	-45,78	1,42	1,42
2 B 2, Nitric Acid Production		N_2O	2.896,77	114,29	3,12	3,18	15,29	16,33	2,71	2,75	0,00	-96,05	0,14	0,15
2 B 3, Adipic Acid Production		N_2O	16.074,90	32,92	2,01	1,99	6,05	5,94	6,30	6,33	0,00	-99,80	0,02	0,02

A1	A2	B	C	D	E-	E+	F-	F+	G-	G+	H	I	J-	J+
2 B 5, Carbide Production		CO_2	443,16	4,39	1,01	1,00	10,00	10,11	10,04	10,14	0,00	-99,01	2,78	3,11
2 B 7, Soda Ash Production		CO_2	615,50	404,45	0,00	0,00	0,00	0,00	4,16	4,17	0,00	-34,29	25,85	26,87
2 B 8, Petrochemical and Carbon Black Production		CO_2	973,97	756,98	42,09	56,26	20,67	21,30	17,45	18,76	0,00	-22,28	158,26	189,54
2 B 8, Petrochemical and Carbon Black Production		CH_4	373,73	423,06	24,48	24,95	13,49	14,04	19,51	20,05	0,00	13,20	233,66	290,96
2 B 9 a, By-Product Emissions		HFC23	C	C	0,00	0,00	0,00	0,00	2,99	2,99	0,00	-100,00	0,00	0,00
2 B 9 b, Fugitive Emissions		CF_4	C	C	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00
2 B 9 b, Fugitive Emissions		HFC134a	C	C	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-100,00	0,00	0,00
2 B 9 b, Fugitive Emissions		HFC227ea	C	C	0,00	0,00	0,00	0,00	3,02	3,03	0,00		0,00	0,00
2 B 9 b, Fugitive Emissions		SF_6	164,50	8,88	0,00	0,00	0,00	0,00	2,99	2,96	0,00	-94,60	0,24	0,25
2 B 10, Other Chemical Industry		CH_4	3,87	1,11	60,44	105,28	85,25	276,46	73,02	210,90	0,00	-71,26	53,04	154,74
2 B 10, Other Chemical Industry		N_2O	C	C	0,00	0,00	0,00	0,00	39,98	39,88	0,00	-99,52	0,24	0,38
2 C 1, Iron and Steel Production		CO_2	22.810,29	16.386,42	20,46	22,67	8,19	8,41	8,35	8,62	0,01	-28,16	64,73	70,83
2 C 1, Iron and Steel Production		CH_4	5,22	5,04	1,00	1,01	77,93	80,25	67,23	67,92	0,00	-3,51	178,89	331,95
2 C 1, Iron and Steel Production		N_2O	23,60	12,92	35,39	22,13	68,79	73,26	66,49	68,26	0,00	-45,26	1.508,36	3.567,47
2 C 2, Ferroalloys Production		CO_2	429,00	5,74	50,43	50,20	7,02	7,03	50,68	51,03	0,00	-98,66	128,46	231,15
2 C 2, Ferroalloys Production		CH_4	9,61	1,75	50,44	50,22	50,15	49,33	62,58	79,97	0,00	-81,75	207,99	461,16
2 C 3, Aluminium Production		CO_2	1.011,92	302,62	1,00	1,00	5,03	5,01	5,12	5,12	0,00	-70,09	4,38	4,66
2 C 3, Aluminium Production		CF_4	1.385,67	69,98	0,00	0,00	0,00	0,00	14,88	15,14	0,00	-94,95	1,05	1,24
2 C 3, Aluminium Production		C_2F_6	233,10	14,17	0,00	0,00	0,00	0,00	15,13	15,15	0,00	-93,92	1,28	1,50
2 C 3, Aluminium Production		SF_6	C	C	0,00	0,00	0,00	0,00	10,04	10,74	0,00	-67,60	6,70	7,42
2 C 4, Magnesium Production		HFC134a	0,00	7,19	0,00	0,00	0,00	0,00	20,49	12,99	0,00		0,00	0,00
2 C 4, Magnesium Production		SF_6	C	C	0,00	0,00	0,00	0,00	17,25	11,02	0,00	-39,02	33,89	40,65
2 C 5, Lead Production		CO_2	157,87	64,89	20,10	15,96	39,64	49,54	40,62	41,47	0,00	-58,89	64,33	92,99
2 C 6, Zinc Production		CO_2	670,80	81,65	0,00	0,00	0,00	0,00	50,55	50,08	0,00	-87,83	14,26	25,02
2 D 1, Lubricant Use		CO_2	188,64	191,41	24,86	24,90	10,01	9,99	18,78	19,53	0,00	1,47	370,75	444,97
2 D 2, Paraffin Wax Use		CO_2	242,70	442,71	0,00	0,00	0,00	0,00	70,70	71,31	0,00	82,41	196,37	494,24
2 D 2, Paraffin Wax Use		N_2O	0,62	1,13	0,00	0,00	0,00	0,00	60,56	60,40	0,00	82,41	184,67	371,95
2 D 3, Other Non-Energy Products from Fuels		CO_2	2.551,10	1.224,63	20,00	20,12	10,07	10,08	10,08	10,11	0,00	-52,00	19,36	21,09
2 E, Electronics Industry		N_2O	0,66	36,00	0,00	0,00	0,00	0,00	17,98	17,89	0,00	5.333,96	24,69	29,82
2 E, Electronics Industry		CF_4	92,06	72,53	0,00	0,00	0,00	0,00	6,41	6,44	0,00	-21,21	32,77	35,23
2 E, Electronics Industry		C_2F_6	147,83	37,63	0,00	0,00	0,00	0,00	7,01	7,03	0,00	-74,55	3,28	3,57
2 E, Electronics Industry		C_3F_8	0,00	14,58	0,00	0,00	0,00	0,00	7,03	6,99	0,00		0,00	0,00

A1	A2	B	C	D	E-	E+	F-	F+	G-	G+	H	I	J-	J+
2 E, Electronics Industry		cC4F8	0,00	5,15	0,00	0,00	0,00	0,00	7,01	6,98	0,00		0,00	0,00
2 E, Electronics Industry		C6F14	21,57	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-100,00	0,00	0,00
2 E, Electronics Industry		HFC23	14,34	13,14	0,00	0,00	0,00	0,00	7,02	7,03	0,00	-8,32	107,38	115,05
2 E, Electronics Industry		HFC32	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	6,97	6,94	0,00		0,00	0,00
2 E, Electronics Industry		SF_6	48,73	63,92	0,00	0,00	0,00	0,00	6,98	7,03	0,00	31,16	40,13	42,72
2 E, Electronics Industry		NF_3	4,95	20,45	0,00	0,00	0,00	0,00	6,94	7,04	0,00	312,95	12,67	13,52
2 F, Product Uses as Substitutes for ODS		C_2F_6	0,00	3,32	0,00	0,00	0,00	0,00	19,93	19,78	0,00		0,00	0,00
2 F, Product Uses as Substitutes for ODS		C3F8	20,07	0,49	0,00	0,00	0,00	0,00	19,16	19,14	0,00	-97,57	0,72	0,96
2 F, Product Uses as Substitutes for ODS		C6F14	C	C	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00
2 F, Product Uses as Substitutes for ODS		HFC23	13,62	36,76	0,00	0,00	0,00	0,00	17,53	17,50	0,00	169,95	35,14	42,65
2 F, Product Uses as Substitutes for ODS		HFC32	0,76	262,22	0,00	0,00	0,00	0,00	8,38	8,44	0,00	34.492,77	13,99	16,31
2 F, Product Uses as Substitutes for ODS		HFC4310 mee	C	C	0,00	0,00	0,00	0,00	1,98	2,00	0,00		0,00	0,00
2 F, Product Uses as Substitutes for ODS		HFC125	135,68	1.604,04	0,00	0,00	0,00	0,00	6,67	6,68	0,00	1.082,21	17,34	21,93
2 F, Product Uses as Substitutes for ODS		HFC134a	2.062,32	3.863,22	0,00	0,00	0,00	0,00	5,25	5,28	0,00	87,32	19,95	22,35
2 F, Product Uses as Substitutes for ODS		HFC143a	76,48	988,39	0,00	0,00	0,00	0,00	11,00	10,86	0,00	1.192,35	15,57	17,47
2 F, Product Uses as Substitutes for ODS		HFC152a	100,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	24,22	24,11	0,00	-100,00	0,11	0,15
2 F, Product Uses as Substitutes for ODS		HFC227ea	0,67	106,84	0,00	0,00	0,00	0,00	3,07	3,07	0,00	15.781,00	18,75	25,76
2 F, Product Uses as Substitutes for ODS		HFC236fa	C	C	0,00	0,00	0,00	0,00	9,23	9,18	0,00		0,00	0,00
2 F, Product Uses as Substitutes for ODS		HFC245fa	C	C	0,00	0,00	0,00	0,00	22,03	22,26	0,00		0,00	0,00
2 F, Product Uses as Substitutes for ODS		HFC365mfc	C	C	0,00	0,00	0,00	0,00	14,93	14,89	0,00		0,00	0,00
2 G, Other Product Manufacture and Use		CH_4	5,07	16,73	20,03	20,20	19,92	20,04	26,87	29,99	0,00	229,90	136,01	185,46
2 G, Other Product Manufacture and Use		N_2O	C	C	88,28	102,86	48,25	88,28	51,38	51,06	0,00	-90,64	8,34	13,92

A1	A2	B	C	D	E-	E+	F-	F+	G-	G+	H	I	J-	J+
2 G, Other Product Manufacture and Use		C10F18	C	C	0,00	0,00	0,00	0,00	24,84	24,78	0,00		0,00	0,00
2 G, Other Product Manufacture and Use		HFC134a	0,00	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	22,50	22,56	0,00		0,00	0,00
2 G, Other Product Manufacture and Use		HFC245fa	0,00	21,54	0,00	0,00	0,00	0,00	20,59	21,08	0,00		0,00	0,00
2 G, Other Product Manufacture and Use		HFC365mfc	0,00	0,71	0,00	0,00	0,00	0,00	22,14	22,41	0,00		0,00	0,00
2 G, Other Product Manufacture and Use		SF_6	C	C	0,00	0,00	0,00	0,00	7,99	7,97	0,00	-78,58	38,85	40,46
3 A, Enteric Fermentation	dairy cows	CH_4	20.188,82	14.788,07	4,00	4,01	19,88	19,80	20,04	20,30	0,03	-26,75	133,08	164,34
3 A, Enteric Fermentation	non-dairy cattle	CH_4	15.273,58	9.267,27	11,76	12,17	13,88	15,64	10,81	11,03	0,00	-39,32	35,52	39,92
3 A, Enteric Fermentation	other animals	CH_4	2.161,42	1.792,61	22,89	23,71	36,47	44,46	16,80	22,44	0,00	-17,06	118,09	151,80
3 B, Manure Management	dairy cows	CH_4	2.521,46	2.499,53	4,02	4,01	20,18	19,99	20,46	20,65	0,00	-0,87	248,46	305,65
3 B, Manure Management	non-dairy cattle	CH_4	2.683,78	1.468,79	10,58	11,13	17,19	19,25	11,30	11,35	0,00	-45,27	29,12	32,54
3 B, Manure Management	swine	CH_4	3.045,17	1.945,35	7,52	7,11	19,69	21,24	16,11	16,48	0,00	-36,12	71,83	84,52
3 B, Manure Management	other animals	CH_4	238,01	313,14	21,49	25,45	43,23	46,97	16,37	16,79	0,00	31,56	147,61	180,16
3 B, Manure Management	dairy cows	N_2O	1.313,24	643,84	4,02	4,01	56,55	98,19	56,70	97,70	0,00	-50,97	195,31	432,86
3 B, Manure Management	non-dairy cattle	N_2O	1.068,01	680,49	33,45	43,33	44,32	92,53	33,89	48,34	0,00	-36,28	153,22	229,71
3 B, Manure Management	swine	N_2O	444,50	270,47	27,56	20,00	52,62	97,65	46,31	77,03	0,00	-39,15	164,54	296,36
3 B, Manure Management	other animals	N_2O	390,15	417,04	52,58	98,91	65,73	116,07	48,07	82,02	0,00	6,89	10.989,84	20.756,74
3 B, Manure Management	deposition and leaching	N_2O	1.266,26	828,68	39,85	39,87	0,05	0,02	39,85	39,88	0,00	-34,56	151,11	238,24
3 D, Agricultural Soils		N_2O	20.292,80	14.473,14	18,91	17,38	29,71	90,38	15,55	22,27	0,02	-28,68	130,66	148,70
3 G, Liming		CO_2	2.200,01	1.906,50	3,55	3,34	3,49	3,37	4,37	4,54	0,00	-13,34	44,78	36,24
3 H, Urea Application		CO_2	480,00	330,20	1,00	1,00	1,00	1,00	1,43	1,43	0,00	-31,21	5,09	5,20
3 I, Other Carbon-containing Fertilizers		CO_2	510,45	144,75	3,00	3,02	2,99	3,01	4,21	4,29	0,00	-71,64	3,47	3,64
3 J, Other Agriculture		CH_4	0,31	1.445,31	10,07	10,02	19,99	20,31	22,10	23,14	0,00	460.915,75	28,81	36,32
3 J, Other Agriculture		N_2O	0,11	92,70	20,38	22,75	0,91	0,83	9,40	9,35	0,00	87.107,90	12,93	14,22
4 A, Forest Land		CO_2	-26.920,55	1.648,08	0,00	0,00	0,00	0,00	103,60	103,50	0,01	-106,12	2,42	2,40
4 A, Forest Land		CH_4	32,44	26,91	15,03	14,98	35,04	34,98	63,43	143,40	0,00	-17,04	393,96	972,06
4 A, Forest Land		N_2O	435,49	465,46	15,03	14,98	34,76	35,02	48,27	48,28	0,00	6,88	315,02	603,30
4 B, Cropland		CO_2	25.789,59	16.833,12	0,00	0,00	0,00	0,00	13,39	11,56	0,01	-34,73	23,12	23,09

A1	A2	B	C	D	E-	E+	F-	F+	G-	G+	H	I	J-	J+
4 B, Cropland		CH_4	413,90	312,23	0,00	0,00	0,00	0,00	44,79	71,85	0,00	-24,57	352,45	625,87
4 B, Cropland		N_2O	543,02	370,18	0,00	0,00	0,00	0,00	55,12	103,95	0,00	-31,83	339,55	726,42
4 C, Grassland		CO_2	22.519,88	21.469,12	0,00	0,00	0,00	0,00	74,66	64,46	0,49	-4,67	556,87	1.515,66
4 C, Grassland		CH_4	2.582,33	2.657,31	0,00	0,00	0,00	0,00	49,62	88,76	0,01	2,90	343,20	663,10
4 C, Grassland		N_2O	80,60	51,98	0,00	0,00	0,00	0,00	48,58	48,50	0,00	-35,51	176,85	325,59
4 D, Wetlands		CO_2	3.586,67	3.478,53	0,00	0,00	0,00	0,00	42,73	132,61	0,04	-3,01	2.537,55	5.299,18
4 D, Wetlands		CH_4	5.368,71	5.447,38	0,00	0,00	0,00	0,00	22,92	30,24	0,01	1,47	990,03	1.327,29
4 D, Wetlands		N_2O	26,27	26,76	0,00	0,00	0,00	0,00	5,92	5,98	0,00	1,86	2.153,95	2.558,23
4 E, Settlements		CO_2	3.141,45	4.370,55	0,00	0,00	0,00	0,00	18,45	19,95	0,00	39,13	82,91	95,40
4 E, Settlements		CH_4	53,82	96,43	0,00	0,00	0,00	0,00	40,96	65,11	0,00	79,18	123,10	209,73
4 E, Settlements		N_2O	136,11	177,18	0,00	0,00	0,00	0,00	50,84	135,15	0,00	30,17	252,45	587,52
4 G, Harvested Wood Products		CO_2	-1.294,86	407,62	0,00	0,00	0,00	0,00	725,54	722,40	0,03	-131,48	96,77	94,92
5 A, Solid Waste Disposal		CH_4	37.191,25	1.997,16	0,00	0,00	0,00	0,00	20,11	19,89	0,00	-94,63	1,46	1,82
5 B, Biological Treatment of Solid Waste		CH_4	59,39	918,33	11,44	20,22	76,27	203,58	69,16	148,97	0,00	1.446,32	102,33	376,82
5 B, Biological Treatment of Solid Waste		N_2O	19,67	194,29	6,30	16,50	63,75	148,47	57,75	106,01	0,00	887,61	103,93	248,10
5 D 1, Domestic Wastewater		CH_4	3.725,66	926,91	30,29	29,75	36,13	36,00	43,36	50,73	0,00	-75,12	3,77	6,25
5 D 1, Domestic Wastewater		N_2O	515,78	1.131,75	39,30	16,90	99,43	606,29	64,41	127,53	0,00	119,42	185,92	476,59
5 D 2, Industrial Wastewater		CH_4	10,36	56,61	0,00	0,00	0,00	0,00	50,37	49,76	0,00	446,30	81,42	148,21
5 D 2, Industrial Wastewater		N_2O	28,09	24,01	49,97	50,25	89,91	307,52	91,12	322,42	0,00	-14,53	158,71	792,10
5 E, Other Waste		CH4	0,00	2,36	2,00	2,01	20,01	20,18	20,08	20,28	0,00		39,11	48,34
5 E, Other Waste		N_2O	0,00	25,90	2,00	1,99	20,07	19,89	20,12	19,99	0,00		72,46	166,73

Die Unsicherheitsbestimmung für die Kategorien erfolgte einerseits bereits sukzessive im Rahmen der Zuarbeit der datenliefernden Facheinheiten im UBA zur aktuellen Emissionsberichterstattung. Andererseits wurden für Quellgruppen, für die bisher keine oder nur unvollständige Angaben zu den Unsicherheiten vorlagen, im Rahmen von Forschungsvorhaben weitere Unsicherheitenbestimmungen von externen Experten durchgeführt und die Ergebnisse in die Unsicherheitenanalyse der aktuellen Berichterstattung eingearbeitet.

Die Unsicherheiten in der Kategorien Landwirtschaft und LULUCF werden von Experten des TI abgeschätzt.

Anhang 3 CO_2-Referenzverfahren und Vergleich mit dem Sektoransatz

Allgemeine Hinweise

Das in Kapitel 3.2.1.1 bereits kurz vorgestellte Referenzverfahren soll grundsätzlich für alle Berichtsstaaten anwendbar sein. Allein diese Abstraktion und Verallgemeinerung führt unausweichlich zu Diskrepanzen zum Sektoralen Ansatz.

Insgesamt erlaubt der Sektorale Ansatz wesentlich differenziertere und exaktere Berechnungen, deren Ergebnisse insbesondere auf Detaileben ggf. stark von denen des Referenzverfahrens abweichenden.

Die in den vergangenen Jahren begonnenen und mit dieser Submission fortgesetzten Arbeiten insbesondere zur Beseitigung von Fehlern bei der Überführung landesspezifischer Aktivitätsdaten in die Struktur des Referenzverfahrens haben auf maximal aggregierter Ebene eine sehr gute Übereinstimmung der mit beiden Berechnungsansätzen erzielten Ergebnisse zur Folge (siehe Kapitel 3.2.1.1). Auf *Brennstoffgruppen*-, vor allem aber auf *Brennstoff*-Ebene auch weiterhin bestehende Abweichungen lassen sich zumindest teilweise mit landesspezifischen Besonderheiten erklären, können bisher aber nicht zufriedenstellend beseitigt werden.

Das Referenzverfahren bietet damit auch in Zukunft Raum für weitere Verbesserungen. Neben der Prüfung und ggf. Revision insbesondere der für den nicht-energetischen Verbrauch genutzten Eingangsdaten und Rechenwege würde eine größtmögliche Flexibilisierung der Datenhaltung im CRF-Reporter die Vergleichbarkeit beider Ansätze weiter verbessern.

Anhang 3.1 Vergleich der Ergebnisse des sektoralen und des Referenz-Ansatzes

Im Folgenden soll genauer auf die Ergebnisse der Gegenüberstellung der mit sektoralem und Referenzansatz berechneten CO_2-Emissionen aus der Nutzung von Brennstoffen eingegangen werden.

Mit der vorliegenden Berichterstattung bildet dabei zum zweiten Mal der *Joint Annual Questionnaire* (JAQ) der EU die Datengrundlage.

CRT-Berichtstabelle 1.A(c) enthält einen Vergleich des sektoralen Ansatzes (1.AA) mit den Ergebnissen des Referenzansatzes (1.AB). Da der nicht-energetische Verbrauch (NEV, 1.AD) der betrachteten Brennstoffe an anderer Stelle erfolgt (Industrieprozesse und Produktanwendung), werden die laut *JAQ* darauf entfallenden Mengen vom Referenzansatz abgezogen. Dies betrifft neben Schmierstoffen, Bitumen und Rohbenzin auch Diesel, leichtes und schweres Heizöl, Flüssiggas, andere Mineralöle und Petrolkoks, Stein- und Braunkohlen, Koks und Erdgas.

Für das Jahr 2024 ergibt sich daraus ein (manuell berechneter) nicht-energetischer Verbrauch von etwa 834 Petajoule.

Nachdem dies für Submission 2025 noch an technischen Problemen gescheitert war, wurden die nachfolgend präsentierten Ergebnisse innerhalb des *ETF Reporting Tools* erzeugt. Für das Jahr 2024 ergibt sich für den Referenzansatz hier ein um 0,89 % niedrigerer energetischer Brennstoffeinsatz bei um 2,48 % niedrigeren Referenz-Emissionen (siehe Kapitel 3.2.1.1).

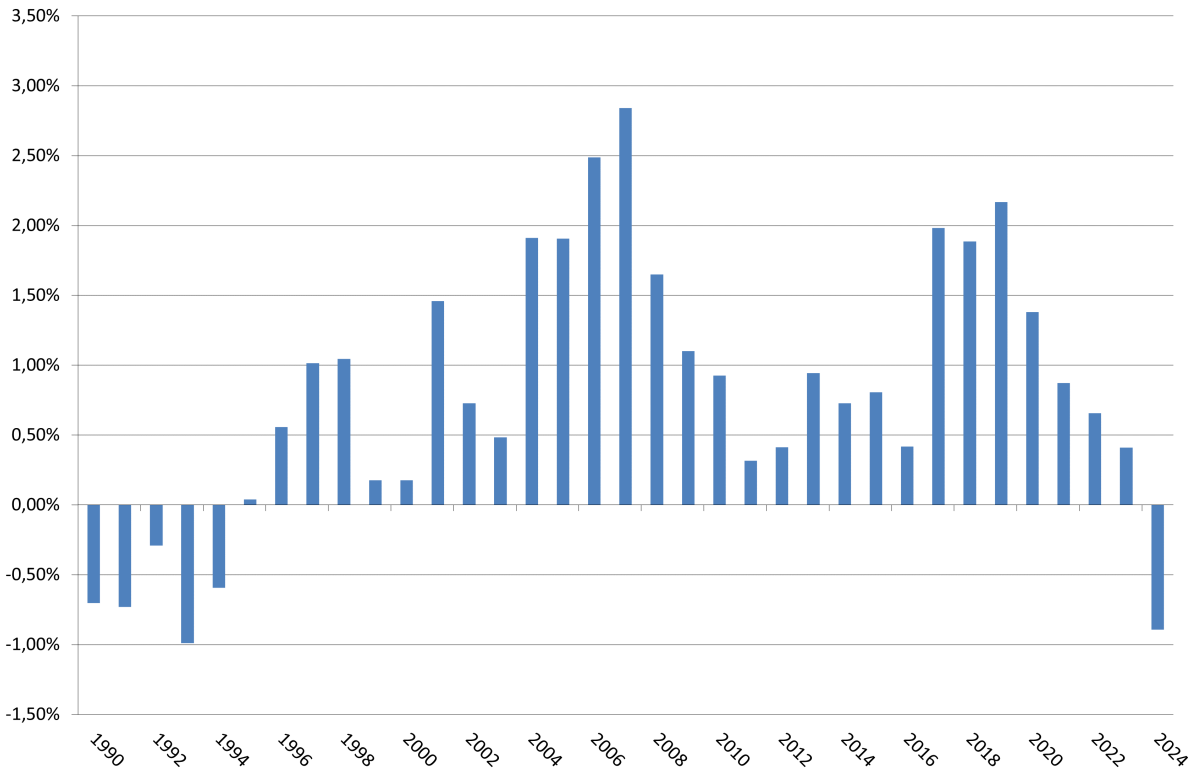
Betrachtet man den gesamten Zeitraum ab 1990, liegen die für das Referenzverfahren ausgewiesenen Brennstoffeinsätze (abzüglich der nicht-energetisch verwendeten Mengen) zumeist über denen des sektoralen Ansatzes. Ausnahmen bilden hier die Jahre 1990 bis 1994 sowie 2024.

Tabelle 473: Vergleich der mittels sektoralem und Referenzansatz (ohne NEV) ermittelten Energieeinsätze, in Terajoule

Jahr	1.AA	*1.AB (inkl. NEV)*	1.AB (exkl. NEV)	1.AB (exkl. NEV) minus 1.AA	
1990	11.754	12.826	11.671	-82,7	-0,70%
1995	10.983	12.141	10.988	4,24	0,04%
2000	10.590	11.847	10.608	18,7	0,18%
2005	10.276	11.650	10.472	196	1,91%
2010	9.895	11.054	9.987	91,6	0,93%
2011	9.520	10.614	9.550	30,2	0,32%
2012	9.614	10.674	9.654	39,7	0,41%
2013	9.878	10.992	9.971	93,3	0,94%
2014	9.306	10.425	9.373	67,7	0,73%
2015	9.405	10.495	9.481	75,9	0,81%
2016	9.563	10.640	9.603	39,9	0,42%
2017	9.361	10.668	9.547	186	1,98%
2018	9.072	10.306	9.243	171	1,89%
2019	8.674	9.904	8.862	188	2,17%
2020	8.020	9.142	8.130	111	1,38%
2021	8.325	9.509	8.398	72,6	0,87%
2022	8.128	9.116	8.181	53,4	0,66%
2023	7.286	8.132	7.315	29,8	0,41%
2024	7.115	7.966	7.052	-63,5	-0,89%

Quelle: ETF Reporting Tool

Abbildung 119: prozentuale Abweichungen der im Referenzverfahren erfassten jährlichen Gesamt-Aktivitätsraten von den Gesamtmengen gemäß sektoralem Ansatz



Quelle: eigene Darstellung, UBA

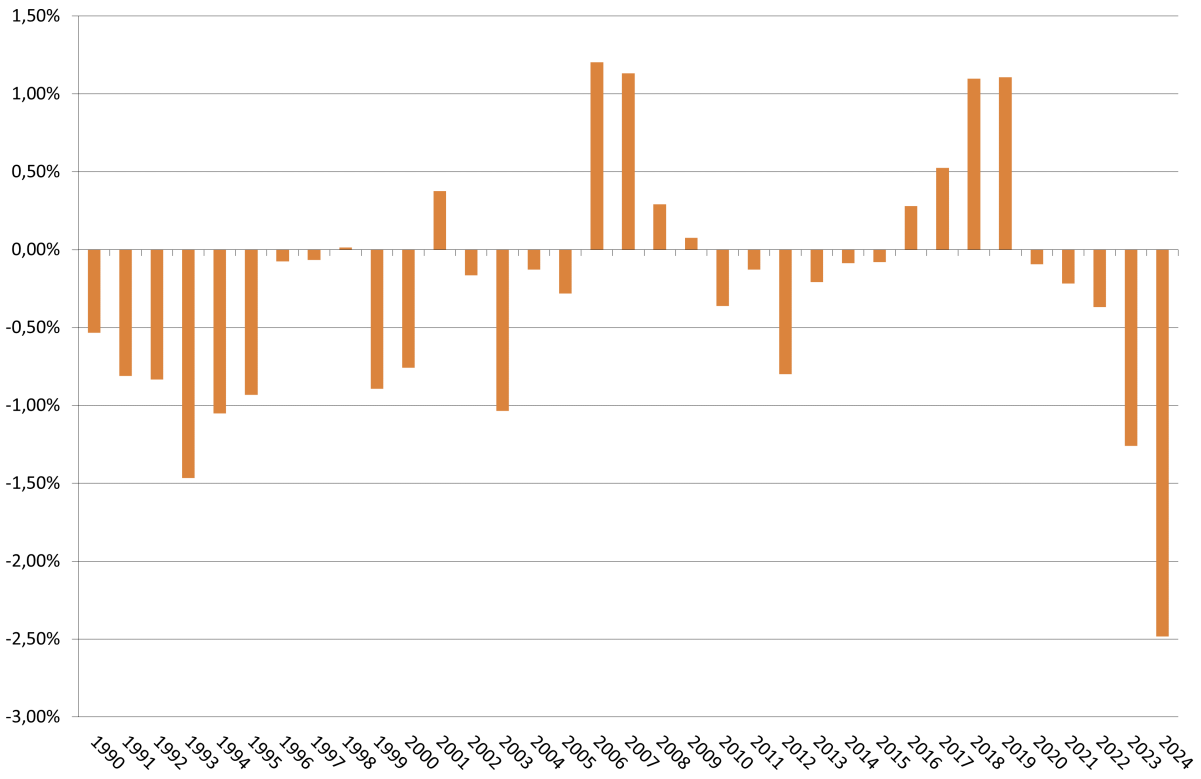
Hinsichtlich der im Referenzansatz berechneten Kohlendioxid-Emissionen ergibt sich ein heterogeneres Bild: Diese allen bis einschließlich 2005, von 2010 bis 2015 sowie ab 2020 geringer aus, als die mit dem sektoralen Ansatz berechneten Mengen. (siehe Kapitel 3.2.1.1).

Tabelle 474: Vergleich der mittels sektoralem und Referenzansatz (ohne NEV) ermittelten CO_2-Emissionen, in Kilotonnen

	1.AA	1.AB (exkl. NEV)	1.AB (exkl. NEV) minus 1.AA	
1990	988.122	982.842	-5.280	-0,53%
1995	878.998	870.796	-8.202	-0,93%
2000	835.868	829.528	-6.340	-0,76%
2005	810.812	808.525	-2.286	-0,28%
2010	778.760	775.950	-2.810	-0,36%
2015	749.820	749.216	-604	-0,08%
2016	749.860	751.962	2.102	0,28%
2017	734.193	738.048	3.855	0,53%
2018	706.154	713.903	7.748	1,10%
2019	660.039	667.345	7.307	1,11%
2020	599.889	599.323	-566	-0,09%
2021	630.554	629.185	-1.369	-0,22%
2022	625.032	622.729	-2.303	-0,37%
2023	550.118	543.193	-6.925	-1,26%
2024	531.526	518.329	-13.197	-2,48%

Quelle: ETF Reporting Tool

Abbildung 120: prozentuale Abweichungen der mit dem Referenzverfahren berechneten jährlichen Kohlendioxid-Emissionen von den Ergebnissen des sektoralen Ansatzes



Quelle: eigene Darstellung, UBA

Die folgende Tabelle beinhaltet die aus den Brennstoff-spezifischen Inlandsverbräuchen inkl. nichtenergetischer Nutzung (= *apparent consumption*) gemäß JAQ abgeleiteten Heizwerte für das Jahr 2024.

Tabelle 475: für die jeweiligen Inlandsverbräuche abgeleitete Heizwerte, in [MJ/kg]

Brennstoff / Brennstoffgruppe		Heizwert
Rohöl		42,505
Ottokraftstoffe		42,281
Jet- und sonstiges Kerosin		42,800
Diesel und leichtes Heizöl		43,000
Schweröl		40,343
LPG		43,074
Rohbenzin		44,000
Bitumen		39,011
Schmierstoffe		41,818
Petrolkoks		32,000
andere Mineralölprodukte:	*Additive*	37,661
	Paraffiwachse	43,325
	Testbenzin (Spiritus)	43,200
	sonstige Ölprodukte	39,501
Anthrazitkohle		29,700
Kokskohle		29,000
(sonstige) Steinkohlen		28,284
Rohbraunkohle		8,988
Braunkohlebriketts		21,774
Hartbraunkohle		31,400
Koks		28,650
Erdgas (inkl. Grubengas)		34,863

Anhang 4 QS/QK-Plan

Informationen zum QKQS-Plan sind zu finden in Kapitel 1.2.2.3.1.5.

Anhang 5 Zusatzinformationen als Bestandteil des NID oder andere hilfreiche Referenzinformationen

Anhang 5.1 Zusatzinformationen zur Inventarerstellung und zum Nationalen System

Anhang 5.1.1 Festlegungen im Grundsatzpapier „Nationales System“ zur Emissionsberichterstattung

Durch das Grundsatzpapier „Nationales System“ zur Emissionsberichterstattung haben die Staatssekretäre vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB); Bundesministerium des Innern (BMI); Bundesministerium der Verteidigung (BMVg); Bundesministerium der Finanzen (BMF); Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi); Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) und vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) die Zuständigkeiten für die Quell- und Senkengruppen sowie die notwendige Finanzierung für 2008 geregelt. Die Vereinbarung lautet:

BMUB, BMI, BMVg, BMF, BMWi, BMVBS, BMEL Berlin, den 05.06.2007

Grundsatzpapier „Nationales System“ zur Emissionsberichterstattung

Die Staatssekretäre der betroffenen Ressorts stellen zum Thema „Nationales System“ zur Emissionsberichterstattung nach Art. 5(1) Kyoto-Protokoll einvernehmlich fest:

1. *Das Umweltbundesamt, Fachgebiet I 4.6[108] „Emissionssituation“ ist die zuständige Nationale Koordinierungsstelle („single national entity“) für die Berichterstattung nach VN-Klimarahmenkonvention und Kyoto-Protokoll. Die Nationale Koordinierungsstelle ist dafür zuständig, das nationale Inventar zu erstellen, auf eine ständige Verbesserung des Inventars hinzuwirken, die am nationalen System Beteiligten zu unterstützen und die Entscheidungen des Koordinierungsausschusses vorzubereiten.*

2. *Für alle zu klärenden Fragen im Rahmen des Nationalen Systems sowie zur offiziellen Erörterung und Freigabe der Inventare und der nach den Artikeln 5, 7 und 8 des Kyoto-Protokolls notwendigen Berichte wird ein Koordinierungsausschuss aller betroffenen Ressorts eingerichtet, der den Prozess begleitet und insbesondere Zweifelsfragen, z.B. bei der Festlegung einzelner Emissionsfaktoren, klärt.*

   Insbesondere legt der Ausschuss die Hauptquell- und -senkengruppen, die Mindestanforderungen an die Qualitätskontrolle und Qualitätssicherung der Datenerhebung und -verarbeitung sowie den jährlichen Qualitätskontroll- und Qualitätssicherungsplan fest.

   Soweit erforderlich kann der Ausschuss die Methoden zur Berechnung der Emissionen in den Kategorien und zur Berechnung des Abbaus in den Senkengruppen festlegen. Die Federführung hat BMU. Ausschusssitzungen finden statt, wenn mindestens ein Ressort die Notwendigkeit hierfür sieht. Nachgeordnete Behörden und weitere an der Erstellung der Inventare beteiligte Institutionen können nach Bedarf zu Sitzungen hinzugezogen werden.

3. *Für die Erstellung des nationalen Inventars werden Daten zur Berechnung der Emissionen und des Abbaus verwendet, die nach Maßgabe der Anforderungen des Art. 3 Abs. 1 der Entscheidung 280/2004/EG und des Art. 2 Abs. 1 der Durchführungsbestimmungen zur Berechnung der Emissionen in den Quell- und des Abbaus in den Senkengruppen erforderlich sind. Die Erstellung des Inventars erfolgt jährlich. Dabei ist die Durchführung einer Qualitätskontrolle nach den Anforderungen des Art. 12 der*

[108] Anm. des Autors: aktuell I 2.6.

Durchführungsbestimmungen sicherzustellen. Ebenso ist eine nachweisbare Dokumentation und Archivierung erforderlich.

Bestehende Datenflüsse, etwa auf der Grundlage freiwilliger Vereinbarungen oder gesetzlicher Vorschriften sollen nicht grundlegend geändert, sondern nur ggf. vervollständigt und verbessert werden, um eine verlässliche Datengrundlage zu schaffen. Daher ist mit der Zuständigkeit nicht zwingend die Erhebung und Weitergabe von Daten verbunden. Für die Aufgabenverteilung zwischen BMU/UBA, BMVBS und BMWI wird insbesondere auf Anlage 1 verwiesen.

Die Zuständigkeiten für die Sicherstellung der Datenlieferung an die Nationale Koordinierungsstelle sowie die Qualitätskontrolle, Dokumentation und Archivierung der Daten verteilen sich wie folgt auf die Ressorts:

a) Für die Kategorie 1 (Energie) ist - mit Ausnahme der Kategorien 1.A.3 (Verkehr) und 1.A.5a (Energie: Sonstige), soweit Emittenten der Bundeswehr betroffen sind, - das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie zuständig.

b) Für die Kategorien 2 (Produktionsprozesse) und 3 (Verwendung von Lösemitteln und anderen Erzeugnissen) ist das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie zuständig.

c) für die Kategorie 1.A.3 (Verkehr) ist das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung zuständig.

d) Für die Kategorie 1.A.5a (Energie: Sonstige) ist, soweit Emittenten der Bundeswehr betroffen sind, das Bundesministerium für Verteidigung zuständig. Soweit Daten der Geheimhaltung unterliegen, werden vom Umweltbundesamt die Erfordernisse der Geheimhaltung berücksichtigt.

e) Für die Quell- und Senkengruppen 4 (Landwirtschaft) und 5 (Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft, ist das Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz zuständig.

f) Für die Kategorie 6 (Abfall) und Kategorie 7 sowie die Treibhausgas-Emissionen aus der Verbrennung von Biomasse, ist das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit zuständig.

g) Das Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz ist auch für die Erstellung der Tabellen im einheitlichen Berichtsformat nach Art. 2 Abs. 2 Buchstabe a der der Entscheidung 2005/166/EG (Durchführungsbestimmungen) in den Quell- und Senkengruppen 4 und 5.

Grundsätzlich sind für Durchführungsaufgaben der amtlichen Statistik einschließlich Datenlieferung, Qualitätskontrolle, Dokumentation und Archivierung der Daten die nach den einschlägigen Statistikvorschriften bestimmten Behörden zuständig. Die Zusammenarbeit der statistischen Ämter des Bundes und der Länder mit den mit der Berichterstattung befassten Stellen erfolgt durch das Statistische Bundesamt. Dabei ist die statistische Geheimhaltung sicher zu stellen.

4. *Die zuständigen Ressorts klären kurzfristig, wie die anforderungsgerechte Bereitstellung der Daten dauerhaft sichergestellt wird, soweit dies nicht schon der Fall ist. Insbesondere betrifft dies Vereinbarungen, Verordnungen oder Gesetze, die zur Institutionalisierung des Nationalen Systems erforderlich werden. Freiwillige Vereinbarungen mit Verbänden und/oder Einzelunternehmen stehen gesetzlichen Vorschriften für die Zwecke der Emissionsberichterstattung grundsätzlich gleich. Umweltbundesamt und Statistisches Bundesamt prüfen, wie im Abstimmungsgespräch am 12.09.2006 vereinbart, darüber hinaus, welche Daten aus dem amtlichen statistischen System für die Berichterstattung bereit gestellt werden können oder nach ihrer Auffassung zusätzlich über das amtliche statistische System erhoben werden sollen. Die Ressorts, UBA und Statistisches Bundesamtübermitteln ihre entsprechenden Vorschläge bis zum 15.07.2007 an das BMU.*

5. *Bis zum 31.07.2007 wird BMU die beteiligten Ressorts zur Abstimmung der Vorschläge und Festlegung eines Fahrplans zur Implementierung der notwendigen Instrumente einladen. Die zuständigen Ressorts bzw. die Bundesregierung werden die Etablierung der erforderlichen Instrumente schnellstmöglich veranlassen.*

6. *Soweit für die Wahrnehmung der unter 3. genannten Zuständigkeiten zusätzliche Mittel erforderlich sind, werden diese aus den Einnahmen des Verkaufs von AAUs finanziert, in Erweiterung der Vereinbarung der Staatssekretäre vom 22.12.2006 zu Artikel 3.4 Kyoto-Protokoll.*

   Hierzu wird bereits für das Haushaltsjahr 2008 ein Einnahmetitel im Einzelplan 16 eingerichtet. Die zu finanzierenden Mehrbedarfe werden nach Prüfung durch BMF als Ausgaben in den Einzelplänen der Ressorts ausgewiesen. Die Nachmeldungen der Ressorts hierzu müssen bis zum 6.6.2007 gegenüber BMF erfolgen.

   Sollten über den in im Haushalt 2008 festgestellten Mehrbedarf hinaus in den kommenden Jahren zusätzliche Haushaltsmittel erforderlich sein, werden in den darauf folgenden Jahren im entsprechenden Umfang zusätzliche AAUs veräußert.

[…]

Anlage: Aufgabenverteilung zwischen BMU/UBA, BMVBS und BMWI

Zwischen BMU, BMVBS und BMWi besteht Einigkeit, dass die bisherigen Strukturen der Emissionsberichterstattung beibehalten werden sollen und UBA auch weiterhin seine bisherigen Aufgaben in den Kategorien 1, 1.A.3, 2 und 3 ausübt. BMVBS und BMWi stellen sicher, dass etwaige Datenlücken in den Quellgruppen, für die sie zuständig sind, geschlossen werden.

Im Einzelnen:

BMWi:

Zur Kategorie 1: Die Inventare in diesem Bereich werden im UBA u.a. auf Basis der Energiedaten, die der vom BMWi mit der Erstellung der Energiebilanzen beauftragte Auftragnehmer übermittelt hat, sowie auf Basis weiterer Statistiken und Verbandsangaben, erstellt.

Zur Kategorie 2: Die Inventare in diesem Bereich werden im UBA auf Basis von Daten erstellt, die u.a. aus der Statistik im Produzierenden Gewerbe (ProdGewStatG) sowie aus Mitteilungen von Verbänden/Einzelunternehmen stammen.

Zur Kategorie 3: Die Inventare in diesem Bereich werden im UBA auf Basis von Daten erstellt, die u.a. aus der Statistik im Produzierenden Gewerbe (ProdGewStatG), aus der Außenhandelsstatistik sowie aus Mitteilungen von Verbänden/Einzelunternehmen stammen.

Die bestehenden Optimierungsnotwendigkeiten werden zwischen BMWi, BMU und UBA kurzfristig geklärt. Soweit Datenoptimierungen durch Änderung bestehender Erhebungen auf Grundlage des Umweltstatistikgesetzes (UStatG) oder der 13. BImSchV erforderlich sein sollten, ist das BMU zuständig. Das UBA übernimmt die Dokumentation und Archivierung der im UBA eingehenden Daten.

BMVBS:

Zur Kategorie 1.A.3 (Verkehr) werden Emissionen bei UBA über das TREMOD-Modell berechnet. Für die Schließung von Lücken und für die Emissionen des internationalen Luftverkehrs stellt das BMVBS, soweit notwendig, Daten/Berechnungen zur Verfügung bzw. stellt sicher, dass diese durch Dritte zur Verfügung gestellt werden. Die Emissionen des Schiffsverkehrs können derzeit aus Daten der Energiebilanz und Default-Emissionsfaktoren berechnet werden. Das UBA übernimmt die Dokumentation und Archivierung der im UBA eingehenden Daten.

Anhang 5.1.2 Zusatzinformationen zum Qualitätssystem Emission

Anhang 5.1.2.1 Mindestanforderungen an ein System zur Qualitätskontrolle und –sicherung

Wie bereits im Hauptteil beschrieben werden die Anforderungen an das System zur Qualitätskontrolle und Qualitätssicherung (QK/QS-System) und an die Maßnahmen zur

Qualitätskontrolle und Qualitätssicherung im Wesentlichen durch das Kapitel 8 der *IPCC Good Practice Guidance* definiert.

Aus diesen wurden von UBA „Allgemeine Mindestanforderungen an die Qualitätskontrolle und Qualitätssicherung bei der Treibhausgasemissionsberichterstattung“ abgeleitet (Stand November 2007), die im Folgenden wiedergegeben werden.

Anhang 5.1.2.1.1 Einführung

Die Vertreter der beteiligten Ressorts im Koordinierungsausschuss des Nationalen Systems Emissionsinventare legen die in diesem Dokument beschriebenen allgemeinen Mindestanforderungen an die Qualitätskontrolle und Qualitätssicherung (QK/QS) bei der Treibhausgasemissionsberichterstattung fest. Sie werden damit Grundlage für die Erhebung, Verarbeitung, Weitergabe und Berichterstattung von allen Daten, die der THG-Berichterstattung dienen.

Diese QK/QS Mindestanforderungen müssen auf allen Ebenen der Inventarerstellung eingehalten werden. In vielen Fällen kann dabei auf existierenden Prozessen und Systemen aufgebaut werden, z. B. den Qualitätsstandards der öffentlichen Statistik. Im Anhang 1 dieses Dokuments ist exemplarisch die Umsetzung der QK/QS Mindestanforderungen und das QK/QS System im Umweltbundesamt dargestellt. Eine entsprechende Beschreibung zur Umsetzung dieser Mindestanforderungen ist von allen beteiligten Institutionen vorzunehmen, so dass sie im Rahmen der Berichterstattung 2009 mit dem Inventarbericht veröffentlicht werden kann. Auf Anfrage unterstützt das Umweltbundesamt die Ministerien bei der Erstellung der QK/QS Systeme in den jeweiligen Zuständigkeitsbereichen.

Anhang 5.1.2.1.2 System zur Qualitätskontrolle und Qualitätssicherung

Die Durchführungsbestimmungen 2005/166/EG zur Entscheidung 280/2004/EG verlangen, dass das nationale Treibhausgasinventar den QK/QS Anforderungen der IPCC good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories (IPCC good practice guidance) und der IPCC good practice guidance for land use, land-use change and forestry (IPCC Good Practice Guidance for LULUCF) entspricht.

Um die Verbesserung der Transparenz, Konsistenz, Vergleichbarkeit, Vollständigkeit und Genauigkeit der nationalen Emissionsinventare und insbesondere die Erfüllung der Anforderungen an die „Gute Inventarpraxis“ zu gewährleisten, fordern die IPCC Good Practice Guidance die Einführung eines Qualitätskontroll- und Qualitätssicherungssystems. Ein QK/QS System umfasst:

- eine zuständige Stelle für die Koordinierung der QK/QS Aktivitäten
- die Entwicklung und Umsetzung eines QK/QS-Plans
- allgemeine QK Verfahren
- kategoriespezifische QK Verfahren
- QS Verfahren und
- Verfahren für die Berichterstattung,
- Verfahren für die Dokumentation und Archivierung

QK/QS Maßnahmen können im Konflikt zu Anforderungen an Pünktlichkeit und Kosteneffizienz stehen. Bei der Entwicklung eines QK/QS Systems sollen deshalb die vorhandenen zeitlichen,

personellen und materiellen Ressourcen berücksichtigt werden. Es ist gute Praxis, höhere Anforderungen an die Datenqualität der Hauptkategorien zu stellen. Für andere Kategorien ist es nicht notwendig, alle kategoriespezifischen QK Verfahren umzusetzen. Des Weiteren sind nicht alle Maßnahmen jährlich notwendig, z.B. muss die Methodik zur Erhebung von Daten nur einmalig detailliert überprüft werden. Danach reichen periodische Kontrollen, ob die Voraussetzungen für die Anwendung der Methodik weiterhin gegeben sind. Ein weiteres Kriterium für die Anforderungen an die QK/QS Maßnahmen ist die Unsicherheit einer Angabe. Um die gesamte Unsicherheit des Inventars zu reduzieren, sollten diejenigen Kategorien detailliert überprüft werden, die eine hohe Unsicherheit aufweisen.

Anhang 5.1.2.1.3 Zuständige Stelle für die Koordinierung der QK/QS Aktivitäten

Das Umweltbundesamt als Nationale Koordinierungsstelle ist zuständig für das QK/QS System des nationalen Treibhausgasinventars und hat dafür die Stelle des Koordinators für das Qualitätssystem Emissionen (QSE) eingerichtet. Es ist gute Praxis, dass alle an der Inventarerstellung beteiligten Unternehmen und Organisationen einen QK/QS Koordinator ernennen und dem QSE Koordinator mitteilen.

Der QK/QS Koordinator ist verantwortlich dafür, dass ein QK/QS System entwickelt und umgesetzt wird. Die Umsetzung sollte in geeigneter Weise institutionalisiert werden, z.B. durch eine Hausanweisung oder Verbändevereinbarung.

Damit die nationale Koordinierungsstelle ihre unterstützenden Aufgaben zielgerichtet wahrnehmen kann, sind dem QSE Koordinator für die Wahrnehmung der folgenden weiteren Funktionen namentlich Personen zu benennen:

Fachverantwortlicher – Zuständige Person für die Datengewinnung, Dateneingabe, Berechnung entsprechend den vorgegebenen Methoden, für die Durchführung von QK-Maßnahmen und die Erstellung des Textbeitrags für den Nationalen Inventarbericht.

Qualitätskontrollverantwortlicher - Zuständige Person für die Prüfung und Freigabe der Daten und Berichtsteile (Funktion kann vom QK/QS Koordinator mit wahrgenommen werden).

Anhang 5.1.2.1.4 QK/QS Plan

Der QK/QS Plan soll die Organisation und Durchführung von QK/QS Maßnahmen sicherstellen. Er enthält eine Darstellung über alle durchzuführenden QK/QS Maßnahmen sowie den Zeitplan zur Umsetzung der Maßnahmen. Der QK/QS Plan legt die Schwerpunkte der durchzuführenden Maßnahmen fest. Kriterien für die Auswahl der Quellgruppen, die detailliert geprüft werden, sind u.a.:

- die Relevanz der Kategorie (Hauptkategorie ja/nein, Unsicherheiten hoch/gering)
- der Zeitpunkt und die Ergebnisse der letzten detaillierten QK/QS Maßnahme für die Quellgruppe
- Änderungen der Methodik oder der Datengrundlage
- Ergebnisse der jährlichen Inventarüberprüfung unter der Klimarahmenkonvention
- vorhandene Ressourcen zur Durchführung der QK/QS Maßnahmen

Es ist gute Praxis, einen QK/QS Plan anzulegen und jährlich nach Ende der Inventarerstellung zu überprüfen und zu aktualisieren.

Auf der Grundlage der Ergebnisse der jährlichen Inventarüberprüfung und der Ergebnisse aus den ihr bekannten QK/QS-Maßnahmen erstellt die nationale Koordinierungsstelle für das gesamte Inventar einen Verbesserungsplan. Auf dieser Grundlage leitet sie Vorschläge für einen verbindlichen Inventar-Plan für das nächste Berichtsjahr ab, der dem Koordinierungsausschuss als Beschlussvorlage vorgelegt wird. Der QK/QS Koordinator legt gemeinsam mit dem QSE Koordinator in der Nationalen Koordinierungsstelle Verfahren und Termine fest, wie und in welchem Umfang die QK/QS-Maßnahmen der Institution in den Inventar-Plan für das Gesamtinventar Eingang finden.

Anhang 5.1.2.1.5 Allgemeine Qualitätskontrolle

Nach der Definition der IPCC (Kapitel 8.1 *Good Practice Guidance*) ist die Qualitätskontrolle (QK) ein System routinemäßiger fachlicher Maßnahmen zur Messung und Kontrolle der Qualität des in Erarbeitung befindlichen Inventars.

Hierfür soll das QK-System:

- Routinemäßige und einheitliche Überprüfungen ermöglichen, um für die Integrität, Korrektheit und Vollständigkeit der Daten Sorge zu tragen;
- Fehler und Auslassungen ermitteln und beheben;
- Inventarmaterial dokumentieren und archivieren sowie alle QK-Aktivitäten aufzeichnen.

In Tabelle 8.1 der *IPCC Good Practice Guidance* ist eine vollständige Liste der allgemeinen QK-Maßnahmen dargestellt. Anforderungen an die allgemeinen QK-Verfahren nach Tier 1 lassen sich aus den in Kapitel 8.6 der *IPCC Good Practice Guidance* benannten ableiten. Typische allgemeine Qualitätskontrollmaßnahmen bei der Ermittlung der Aktivitätsrate sind die Überprüfung der Daten auf Übertragungsfehler, Überprüfung auf Vollständigkeit, Überprüfung der Formeln zur Zusammenfassung der Daten sowie Plausibilitätsprüfungen anhand von externen Datenquellen und früheren Berechnungen. Lieferanten von Emissionsberechnungen müssen zusätzliche QK-Maßnahmen durchführen, z.B. die Überprüfung der Formeln zur Berechnung der Emissionen.

Die notwendigen Qualitätskontrollen sollen in Form von Checklisten dokumentiert werden. Die Listen sollen mindestens die durchgeführte Maßnahme, das Ergebnis der Kontrolle, die ggf. umgesetzte Korrektur und den Bearbeiter enthalten. Im Anhang 2 dieses Dokuments ist exemplarisch eine Checkliste im Umweltbundesamt dargestellt.

Nicht alle Qualitätskontrollen müssen jährlich durchgeführt werden, sondern können auch periodisch umgesetzt werden. Dies gilt insbesondere für Aspekte der Datenerhebung, die sich nicht jährlich ändern. Für Hauptkategorien werden höhere Anforderungen an die Häufigkeit und Vollständigkeit der QK-Maßnahmen als für andere Kategorien gestellt. Es ist darauf zu achten, dass alle Kategorien zumindest periodisch einer detaillierten Qualitätskontrolle unterliegen.

Anhang 5.1.2.1.6 Kategoriespezifische Qualitätskontrolle

Ergänzend zu den Tier 1 Verfahren sollten die besonders relevanten Kategorien (z.B. Hauptkategorien), immer unter Abwägung von Ressourcenaspekten, bei der Ermittlung von Aktivitätsraten, Emissionen und Unsicherheiten einer Qualitätskontrolle nach Tier 2 unterzogen werden (siehe Kapitel 8.7 *Good Practice Guidance*). Die Kapitel der *IPCC Good Practice Guidance* zu den einzelnen Kategorien (Kapitel 1-5) enthalten zusätzliche Hinweise zu kategoriespezifischen QK-Maßnahmen. Diese müssen bei der Erstellung des QK/QS Plans berücksichtigt werden. :

Werden zusammengefasste Aktivitätsraten aus Sekundärquellen verwendet, ist es gute Praxis, die QK Maßnahmen bei der Erstellung der Sekundärquellen zu evaluieren. Ist das Niveau dieser Maßnahmen ausreichend, reicht es darauf in der Dokumentation zu verweisen. Falls die Sekundärquellen den Mindestanforderungen an die Qualitätskontrolle nicht genügen, sollen QK/QS Kontrollen von der Institution durchgeführt werden, die die Daten verwendet. Die Ergebnisse der nachträglichen QK/QS Kontrollen sollen in die Bestimmung der Unsicherheiten der Aktivitätsraten einfließen. Des Weiteren sollen, soweit möglich, verschiedene Quellen verglichen werden, um die Güte der Daten zu ermitteln.

Bei der Verwendung von anlagenspezifischen Aktivitätsdaten ist es gute Praxis, die Methodik und den QK/QS Standard bei der Datenermittlung zu überprüfen. Sollten diese nicht den Mindestanforderungen genügen, soll die Verwendung der Daten grundsätzlich überdacht und ggf. die Unsicherheitsangaben angepasst werden.

Bei Emissionsdaten gehört es zur guten Praxis, die verwendeten Emissionsfaktoren zu überprüfen. Dazu gehört die Verwendung von nationalen Emissionsfaktoren für Hauptkategorien und die Überprüfung der Gültigkeit der IPCC Standardfaktoren unter nationalen Gegebenheiten. Werden Emissionen durch direkte Messung ermittelt ist es gute Praxis, die Messmethoden und verwendeten Qualitätsstandards zu überprüfen. Emissionsdaten und Emissionsfaktoren sollen mit Daten der Vorjahre sowie unabhängigen Quellen überprüft und Abweichungen erklärt werden.

Die Qualitätskontrolle der Unsicherheiten umfasst die Überprüfung, ob die Berechnung frei von Fehlern ist und die Dokumentation zur Reproduktion der Ergebnisse ausreichend ist. Bei der Verwendung von Expertenschätzungen soll die Qualifikation der Experten und die Methodik zur Schätzung überprüft und dokumentiert werden.

Anhang 5.1.2.1.7 Verfahren zur Qualitätssicherung

Während das Ziel der Qualitätskontrolle hauptsächlich die korrekte Anwendung einer Methodik ist, soll bei der Qualitätssicherung die Methodik als solche untersucht und ggf. verbessert werden.

Nach der Definition der IPCC (Kapitel 8.1 *Good Practice Guidance*) beruhen die Maßnahmen der Qualitätssicherung (QS) *„auf einem planvollen System von Überprüfungen durch Personen, die nicht unmittelbar an der Erarbeitung des Inventars mitwirkten. Solche Überprüfungen – am besten durch unabhängige Dritte – sollten an einem fertig gestellten Inventar nach Realisierung von QK-Prozeduren erfolgen. Durch sie wird:*

- verifiziert, dass die Kriterien der Datenqualität erfüllt wurden,
- dafür Sorge getragen, dass das Inventar die bestmöglichen Schätzungen von Emissionen und Senken auf der Grundlage des neuesten Standes der Wissenschaft und der verfügbaren Daten berücksichtigt, und
- die Effizienz des QK-Systems gefördert“.

Das geforderte Instrument der Qualitätssicherung sind Peer Reviews. Die Durchführung von Audits wird angeregt, stellt aber keine verbindliche Anforderung dar.

Anhang 5.1.2.1.8 Verfahren zur Berichterstattung

Die Einleitung, Koordinierung und Gesamtorganisation der Berichterstattung erfolgt durch die Nationale Koordinierungsstelle. Zuarbeiten von Datenteilen oder Berichten durch Dritte erfolgen unter Beachtung der Vereinbarungen über Umfang Form und Zeitpunkt dieser Zuarbeit.

Anhang 5.1.2.1.9 Dokumentation und Archivierung

Es besteht die generelle Pflicht alle Daten und Informationen zur Inventarberechnung für jedes Berichtsjahr zu dokumentieren und zu archivieren. Die Dokumentation soll es ermöglichen, die Emissionsberechnung vollständig nachzuvollziehen. Die allgemeinen Anforderungen an die Dokumentation und Archivierung für den gesamten Prozess der Erstellung von Treibhausgasinventaren ergeben sich aus Kapitel 8.10.1 der *IPCC Good Practice Guidance*.

Die Datenlieferanten haben die Pflicht, die folgenden Informationen zu den an das UBA gelieferten Daten für die Inventarberechnungen zu dokumentieren:

Lieferanten von Daten:

- Veröffentlichung / Quelle der Aktivitätsdaten mit detailliertem Verweis auf entsprechende Tabellennummern und -bezeichnungen und Seiten der Originalquellen;
- Erhebungsinhalte (Definitionen der erhobenen Merkmale, Abschneidegrenzen, Erhebungseinheiten) und Erhebungsmethodik;
- Rechtsgrundlagen, Verordnungen, auf denen die Erhebung basiert;
- Zeitliche und räumliche Vergleichbarkeit zu Vorjahresdaten, Veränderungen hinsichtlich Definitionen, Geltungsbereichen, Abschneidegrenzen, Quellen von Aktivitätsraten oder der Methodik der Datengewinnung;
- Revisionen von bereits veröffentlichen Daten;
- Genauigkeit bzw. quantitative Fehlerangabe der Aktivitätsdaten, Methodik der Fehlerschätzung und Benennung der Experten, welche die Fehlerschätzung vorgenommen haben.
- Geheimhaltung und Datenschutz: Dokumentation falls Einzelangaben als geheim gelten.

Diese Dokumentation soll dem UBA jährlich zusammen mit den Daten zur Verfügung gestellt werden und wird vom UBA zentral archiviert.

Qualitätskontrolle

Im Rahmen der Qualitätskontrolle soll die Dokumentation zuständige und durchführende Mitarbeiter, Art, Datum und Ergebnisse der Qualitätskontrollen sowie Korrekturen und Modifikationen, die durch die Qualitätskontrollen ausgelöst wurden, erfassen. Die Dokumentation und Archivierung der Qualitätskontrollen erfolgt intern durch die Daten liefernde Einrichtung. Eine allgemeine Beschreibung der regelmäßig durchgeführten Qualitätskontrollen wird dem UBA für den nationale Inventarbericht und die Inventarüberprüfung zur Verfügung gestellt.

Lieferanten von Emissionsberechnungen

Für Lieferanten von Emissionsberechnungen umfassen die Mindestanforderungen zur Dokumentation zusätzlich die folgenden Bestandteile:

- Beschreibung der Berechnungsmethodik und Begründung der Wahl der Methode;
- Annahmen und Kriterien zu Auswahl von Aktivitätsdaten und Emissionsfaktoren;
- Dokumentation der Emissionsfaktoren und deren Quellen mit detaillierten Verweis auf entsprechende Nummern und Seiten der Originalquellen;

- Berechnungsmodelle;
- Berechnungsdateien, Berechnungssoftware.

Punkte 1-4 werden im Rahmen der gelieferten Beschreibungen für den nationalen Inventarbericht dokumentiert und archiviert. Für Berechnungsmodelle ist eine gesonderte Dokumentation der Modelle entsprechend allgemeiner wissenschaftlichen Praxis erforderlich sowie eine interne Dokumentation in Form von Handbüchern oder Anleitungen. Die Dokumentation und Archivierung der Berechnungsdateien oder Berechnungssoftware erfolgt intern beim Datenlieferanten. Diese sollen dem UBA zur Verfügung gestellt werden, falls dies im Rahmen der Inventarüberprüfung gefordert wird.

Qualitätssicherung

Lieferanten von Emissionsberechnungen sind neben Maßnahmen zur Qualitätskontrolle auch zur Qualitätssicherung verpflichtet. Im Rahmen der Qualitätssicherung soll die Dokumentation die zuständigen und durchführenden Mitarbeiter, Art, Datum und Ergebnisse der Qualitätssicherung sowie Korrekturen und Modifikationen, die durch die Qualitätssicherung ausgelöst wurden, erfassen. Darüber hinaus sollen kategoriespezifische Qualitätskontrollen dokumentiert werden.

Die Dokumentation und Archivierung der Qualitätssicherung erfolgt intern durch die Daten liefernde Einrichtung, sowie durch eine Zusammenfassung der Sicherungsmaßnahmen im nationalen Inventarbericht.

Vertrauliche Daten / Geheimhaltung

Generell sind vertrauliche Daten bei der Übermittlung als solche zu kennzeichnen, damit bei ihrer Verwendung entsprechende Vorkehrungen getroffen werden.

Im Rahmen der Inventarüberprüfung besteht eine generelle Pflicht, vertrauliche Daten offen zu legen, falls dies im Rahmen der Inventarüberprüfung aus Gründen der Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Emissionsberechnungen von den Inventarprüfern für erforderlich gehalten wird. Inwieweit dies tatsächlich die Offenlegung von Einzelangaben berührt, soll im Einzelfall mit der Daten liefernden Einrichtung geklärt werden.

Anhang 5.1.2.1.10 Mindestanforderungen an die Qualitätskontrolle und Qualitätssicherung bei der Emissionsberichterstattung im Umweltbundesamt

Anhang 5.1.2.1.10.1 Einführung

Die vom Koordinierungsausschuss des Nationalen Systems Emissionsinventare beschlossenen allgemeinen Mindestanforderungen an die Qualitätskontrolle und Qualitätssicherung (QK/QS) bei der Treibhausgasemissionsberichterstattung gelten für alle Beteiligten. Sie sind Grundlage für die Erhebung, Verarbeitung, Weitergabe und Berichterstattung von allen Daten, die der THG-Berichterstattung dienen und damit auch verbindlich für alle Arbeitseinheiten, die im Umweltbundesamt an der Erfüllung dieser Aufgabe mitwirken.

Anhang 5.1.2.1.10.2 System zur Qualitätskontrolle und Qualitätssicherung

Über die vom Koordinierungsausschuss des Nationalen Systems Emissionsinventare beschlossenen allgemeinen Mindestanforderungen an die Qualitätskontrolle und Qualitätssicherung (QK/QS) bei der Treibhausgasemissionsberichterstattung gelten im Umweltbundesamt die konkreten Festlegungen der Hausanordnung Nr. 11/2005, die das im QSE-Handbuch festgelegte Verfahren für alle an der Emissionsberichterstattung Beteiligten des UBA verbindlich vorschreibt (Geschäftsordnung des Umweltbundesamtes, Band II, Ziffer XV).

Die Anforderungen von Kapitel 8 der IPCC *Good Practice Guidance* sind über die Hausanordnung vollständig umgesetzt. Für eine effektive Erfassung und Durchführung von Maßnahmen zur kontinuierlichen Inventarverbesserung wurden geeignete UBA-spezifische Instrumente etabliert (Verbesserungsplan und Inventarplan, siehe im Anhang 5.1.2.1.10.5). Im Ergebnis wurde das Qualitätssystem Emissionsinventare (QSE) entwickelt, dass die im Anhang 5.1.2.1.2 benannten Punkte implementiert hat.

Anhang 5.1.2.1.10.3 Zuständige Stelle für die Koordinierung der QK/QS Aktivitäten im UBA

Hausanordnung Nr. 11/2005 regelt, dass das Fachgebiet *Emissionssituation* (FG V 1.6) "Nationale Koordinierungsstelle" im UBA ist. Diese Zuständigkeit ist in der Organisationsübersicht des UBA unter der Rubrik: „Kontaktstellen internationaler Organisationen“ ausgewiesen und von den relevanten Ministerien durch einen Staatssekretärsbeschluss vom 05.06.2007 bestätigt worden.

Die Rollen und Verantwortlichkeiten der Nationalen Koordinierungsstelle und der an der Emissionsberichterstattung beteiligten Fachgebiete ergeben sich aus Kapitel 3.2 "Rollen und Verantwortlichkeiten" des QSE-Handbuchs. Die Fortschreibung und Pflege des QSE-Handbuchs und dessen Anhänge und Anlagen obliegt der Nationalen Koordinierungsstelle unter Einbeziehung der durch die Fachabteilungen benannten Ansprechpartner/innen. Die auf der Intranetseite der Nationalen Koordinierungsstelle veröffentlichte Version des QSE-Handbuchs und der mitgeltenden Unterlagen ist verbindlich.

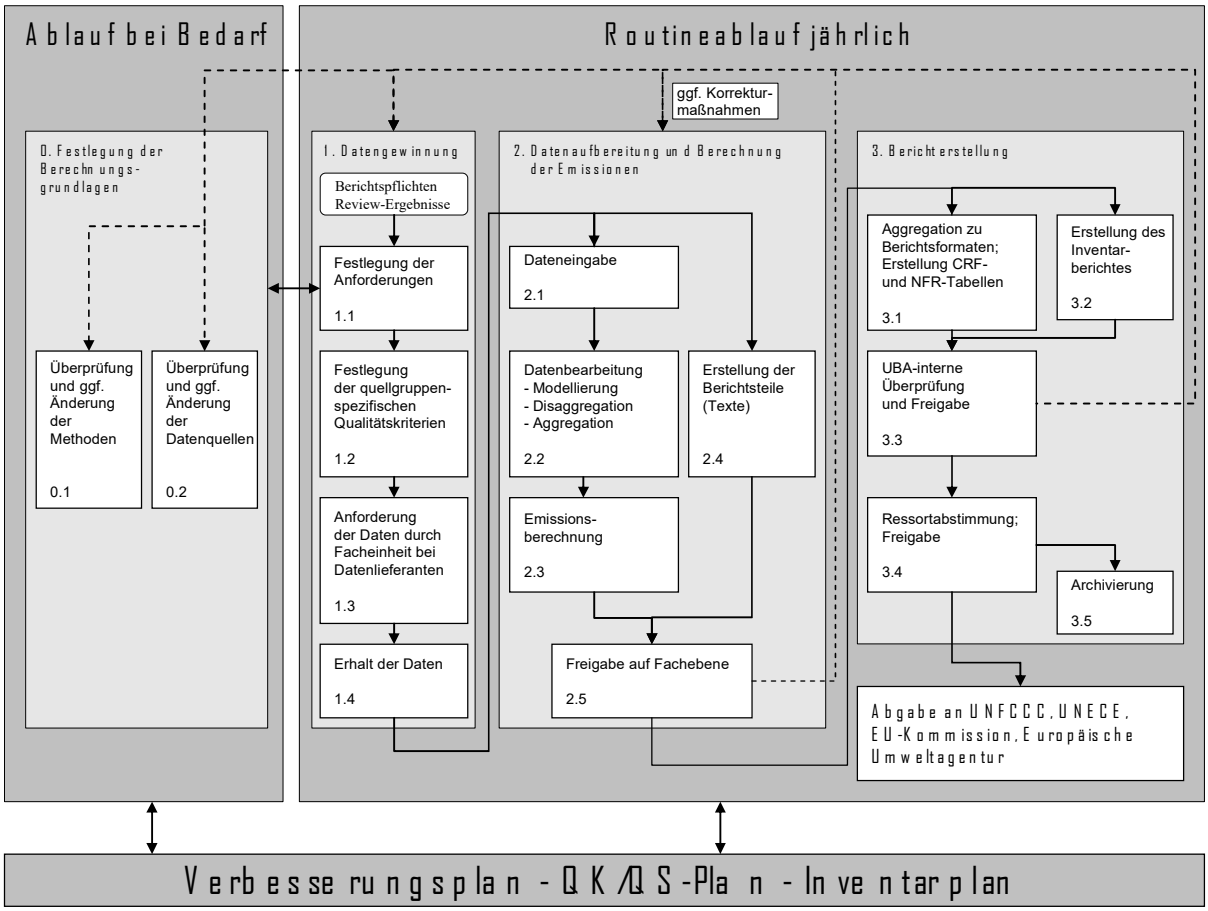
Anhang 5.1.2.1.10.4 Verfahren zur Berichterstattung

Komplexe Tätigkeiten sind im Allgemeinen dadurch gekennzeichnet, dass am Ende des Durchlaufens einer Vielzahl von unterschiedlichen, aber miteinander in Verbindung stehenden und aufeinander aufbauenden Tätigkeiten (Prozessen), ein Produkt erzeugt wird. Für ein erfolgreiches Management dieser Prozesse ist es wichtig, sich dieser existierenden oder zu schaffenden Prozessabläufe bewusst zu werden und sie auf eine logische, der Realität entsprechende Weise zu beschreiben (Tätigkeiten, Abhängigkeiten, Verantwortlichkeiten, Zuständigkeiten u.v.m.) und in Verbindung zu setzen.

In der Praxis lassen sich die Abläufe komplexer Prozesse nicht widerspruchsfrei in die hierarchisch geprägten, traditionellen Strukturen von Unternehmen und Institutionen einpassen. Sie laufen diesen oft diametral entgegen, da sie meist Organisationseinheiten übergreifend gelagert sind. Eine an der Erstellung des Produkts orientierte Organisation von zusammenhängenden Arbeitsprozessen erfordert es, dass man sich von starren Hierarchiestrukturen löst und die Arbeitsprozesse mit dem Ziel der Verbesserung neu definiert.

Die Emissionsberichterstattung wurde daher zunächst als ein Prozess beschrieben, bei dem über mehrere miteinander verbundene Tätigkeiten am Ende ein Produkt (NIR und Inventare) entsteht (siehe Abbildung 121) Weiterführende Informationen finden sich im QSE-Handbuch Kapitel 4.3.

Abbildung 121: Übersicht zum gesamten Prozess der Emissionsberichterstattung



Quelle: eigene Darstellung, UBA

Den innerhalb der abgebildeten Haupt- und Teilprozesse ablaufenden Tätigkeiten wurden über ein Rollenkonzept entsprechende Zuständigkeiten zugeordnet, die diese Prozesse durchführen/ausführen. Beispielsweise arbeiten viele Mitarbeiter in unterschiedlichen Arbeitseinheiten und Quellgruppen, führen dort aber im Wesentlichen die gleichen Tätigkeiten aus. Dies führte zur Entwicklung einer Personengruppe (Rolle; z.B. Fachverantwortliche). Dieser muss eine weitere Personengruppe (Rolle) nachgeordnet sein, die sicherstellt, dass die Anforderungen, die die erste Gruppe bei Ihrer Arbeit zu beachten und zu erfüllen hat, auch erreicht worden sind (z.B. Fachlicher Ansprechpartner). Des Weiteren wurde gemäß den Anforderungen des IPCC (siehe Anhang 5.1.2.1.2) ein Koordinator für das QSE bestellt, damit sichergestellt wird, dass das System weiterentwickelt wird.

Im Ganzen wurde ein umfassendes Rollenkonzept entwickelt, dass den vielfältigen Anforderungen Rechnung trägt, die dem UBA aus seiner Aufgabe als Nationale Koordinierungsstelle erwachsen. Hierzu gehören folgende Rollen:

1. **Fachverantwortlicher auf operativer Ebene (FV)**
   a. Wesentliche Zuständigkeiten: Datengewinnung, Dateneingabe und Berechnung entsprechend den vorgegebenen Methoden, Durchführung von QK-Maßnahmen, Erstellen des NIR-Textes.
2. **QK-Verantwortlicher (QKV)**
   a. Ist Vorgesetzter des FV
   b. Wesentliche Zuständigkeiten: Prüfung und Freigabe der Daten und Berichtsteile
3. **Fachliche Ansprechpartner (FAP)**

a. Mitarbeiter der Nationalen Koordinierungsstelle
b. Wesentliche Zuständigkeiten: Kategoriespezifische Betreuung der fachlich Zuarbeitenden (Inventararbeit und Berichterstellung) und Qualitätskontrolle/Qualitätssicherung in den zugehörigen Kategorien in NIR und ZSE.

4. **Berichtskoordinator (NIRK)**
   a. Mitarbeiter der Nationalen Koordinierungsstelle
   b. Wesentliche Zuständigkeiten: Koordination von textlichen Zuarbeiten, Erstellung des NIR aus den einzelnen Zulieferungen, übergreifende QK und QS für den NIR
5. **ZSE-Koordinator (ZSEK)**
   a. Mitarbeiter der Nationalen Koordinierungsstelle
   b. Wesentliche Zuständigkeiten: Wartung der Datenbanken, Emissionsberechnung und Aggregation, Übergreifende QK und QS bei Eingabe und Berechnung des Inventars
6. **QSE-Koordinator (QSEK)**
   a. Mitarbeiter der Nationalen Koordinierungsstelle
   b. Wesentliche Zuständigkeiten: Aufrechterhaltung und Fortentwicklung des QSE (System, Checklisten, Verbesserungsplan, Inventarplan, QK/QS-Plan und QSE-Handbuch)
7. **NaSE-Koordinator (NaSEK)**
   a. Mitarbeiter der Nationalen Koordinierungsstelle
   b. Wesentliche Zuständigkeiten: termingerechte und anforderungskonforme Berichterstattung, Einbindung nationaler Institutionen, Festlegung/Dokumentation von rechtlichen Vereinbarungen

Die oben erläuterten Rollen haben i.d.R. Aufgaben in mehreren Haupt- und Teilprozessen der Emissionsberichterstattung.

Anhang 5.1.2.1.10.5 QK-Plan, QS-Plan und Inventarplan

Um zu gewährleisten, dass alle Verbesserungspotentiale, die im Zuge der Inventararbeiten ermittelt werden, einer systematischen Umsetzung zugeführt werden können, ist es unerlässlich diese zunächst auf koordinierte Weise zusammenzutragen. Dabei sind die erkannten Verbesserungspotentiale mit allen Informationen zu versehen (Herkunft des Verbesserungspotentials, Quellgruppe, Zuständigkeit, Priorität, etc.), die für eine zielgerichtete Weiterverwendung notwendig sind. Aufbauend auf diesen grundlegenden Informationen sind Festlegungen zur Umsetzung der erkannten Verbesserungspotentiale zu treffen (Handlungsbedarf/Korrekturmaßnahme, Terminsetzungen, etc.).

Zur Steuerung und Dokumentation im Rahmen des NaSE und des QSE (siehe Abbildung 122) wurden Verfahren festlegt, wie die ermittelten Verbesserungspotentiale für das systematische Management der Verbesserungspotentiale aufbereitet und weiterverwendet werden sollen. Ziel ist es, die zentralen Fragen, WER, WAS, WIE, WANN und WARUM tun soll, zu beantworten:

WER?: Gibt den Bezug zum Rollenkonzept: zuständig ist eine bestimmte Person xy mit der Rolle z.B. Fachverantwortlicher (FV)

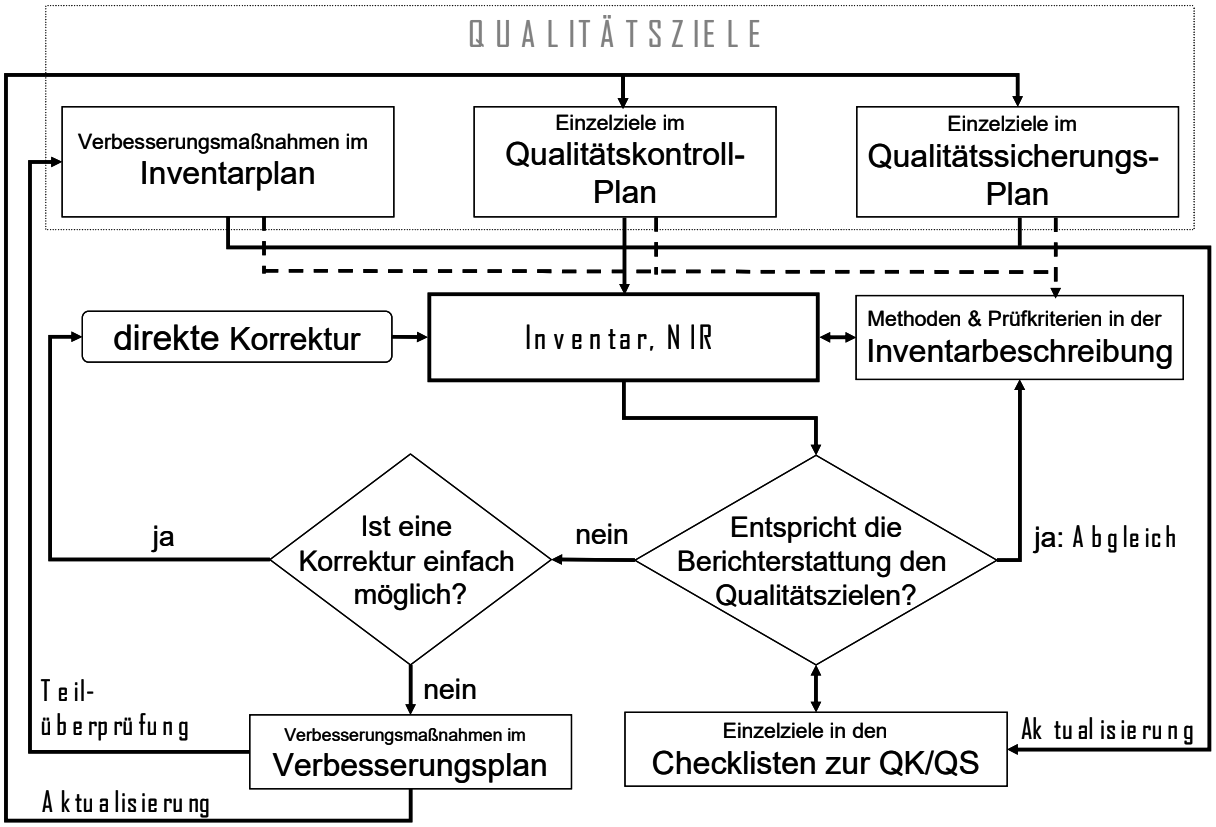
WAS?: Gibt den Bezug zum Objekt, das verbessert soll, z.B. Verbesserung der CO_2-Berechnung in Kategorie xy

WIE?: Gibt den Bezug zum Ziel, das erreicht werden soll, z.B. durch Erreichen einer bestimmten Verbesserung laut Inventarplan oder Checkliste.

WANN?: Gibt den Bezug zum Zeitpunkt, bis zu dem die Verbesserung laut Inventarplan durchgeführt sein muss

WARUM?: Gibt den Bezug zum Ursprung der notwendigen Handlung, z.B. aufgrund einer Empfehlung aus dem Überprüfungsprozess der UNFCCC

Abbildung 122: Steuerung und Dokumentation im Rahmen des NaSE und des QSE



Quelle: eigene Darstellung, UBA

Die Qualitätsziele wurden den allgemeinen Qualitätszielen der *IPCC Good Practice Guidance* entnommen (Transparenz, Konsistenz, Genauigkeit, Vergleichbarkeit, Vollständigkeit). Darüber hinaus sind für die einzelnen Kategorien operative Einzelziele zur Qualitätskontrolle und Qualitätssicherung aus dem Vergleich zwischen den Anforderungen aus den *IPCC Good Practice Guidance*, den Ergebnissen der unabhängigen Inventarüberprüfungen (UNFCCC und EU) und der Inventarrealität abgeleitet worden.

In einem Verbesserungsplan werden alle Verbesserungsmöglichkeiten beziehungsweise Beanstandungen aus den Ergebnissen der unabhängigen Inventarüberprüfungen, gesammelt und mit möglichen Korrekturmaßnahmen hinterlegt. Sie werden durch die Nationale Koordinierungsstelle kategorisiert, mit Prioritäten versehen und in Rücksprache mit den Fachverantwortlichen teilweise in den Inventarplan überführt. Dort werden sie mit Terminen und Verantwortlichkeiten hinterlegt. Der Inventarplan durchläuft als Anhang des NIR einen Abstimmungs- und Freigabeprozess im UBA und im Koordinierungsausschuss und stellt somit ein verbindliches Vorgabedokument für die zukünftig umzusetzenden Verbesserungsmaßnahmen dar.

Um die Kontrolle und Durchführung von Maßnahmen zur Inventarverbesserung transparent und effektiv zu steuern, sind sie nach Maßgabe der IPCC *Good Practice Guidance* (Kapitel 8.5) im Qualitätskontrollplan/Qualitätssicherungsplan (QK/QS-Plan) rollenspezifisch sowie gegebenenfalls kategoriespezifisch vorgegeben. Der QK-Plan bezieht sich ausschließlich auf die Ziele der Qualitätskontrolle des Inventars. Im QS-Plan können die Ziele der Qualitätssicherung

das Inventar, den Prozess der Berichterstattung oder das QSE selbst zum Gegenstand haben. Weiterhin erfolgt im Qualitätssicherungsplan die zeitliche Planung von Qualitätssicherungsmaßnahmen, die durch externe Dritte vorgenommen werden.

In den Checklisten zur Qualitätskontrolle und zur Qualitätssicherung sind entsprechend den Qualitätskontroll- und Qualitätssicherungsplänen alle Einzelziele im Prozess der Emissionsberichterstattung aufgeführt. Die Checklisten werden allen für Qualitätskontrolle und Qualitätssicherung verantwortlichen Akteuren zur Verfügung gestellt und sollen die Kontrolle der Erreichung der Einzelziele erleichtern. In den Checklisten wird die Durchführung von Maßnahmen zur Qualitätskontrolle und Qualitätssicherung dokumentiert. Sofern Einzelziele nicht erreicht werden und keine direkte Korrektur möglich ist, hat ein Eintrag in den Verbesserungsplan (siehe oben) zu erfolgen.

Anhang 5.1.2.1.10.6 Verfahren zur allgemeinen und kategoriespezifischen Qualitätskontrolle

Aus den Anforderungen der IPCC Good Practice Guidance hat das Umweltbundesamt ein Checklistenkonzept entwickelt, in dem die Qualitätsanforderungen als konkrete Ziele formuliert wurden. Diese Einzelziele gilt es, zu erreichen. Die Zielerreichung wird in den Checklisten eingetragen und dokumentiert. Es sind Einträge von Ja (Ziel ist erreicht), über „Trifft nicht zu“ (Zielformulierung korrespondiert nicht mit der speziellen Situation der Quellgruppe; nur sehr selten als Antwort möglich) bis hin zu „Nein“ (Ziel konnte nicht erreicht werden) möglich.

Die Checklisten bestehen aus einem allgemeinen Teil, der die gesamten Tier 1 QK-Anforderungen der IPCC Good Practice Guidance reflektiert und mit jeder Berichterstattung durchgeführt wird. Zusätzlich beinhalten die Checklisten einen kategoriespezifischen Teil (Tier 2), der konkrete Zielvorgaben für den Bereich der Hauptkategorien macht.

Checklisten gibt es für die ersten fünf Rollen des Rollenkonzepts. In dem Maße, wie die verschiedenen Rollen für verschiedene Haupt- und Teilprozesse der Emissionsberichterstattung zuständig sind (vergleiche Anhang 5.1.2.1.10.4), beziehen sich auch die Checklisten überwiegend auf mehrere Haupt- und Teilprozesse der Emissionsberichterstattung. Sie stellen somit einen Querschnitt durch die Emissionsberichterstattung her. Hierbei ist für die Checklisten der FV und der FAP eine gemeinsame Grundgesamtheit der zu erreichenden Ziele vorgesehen. Da die FAP dafür zuständig sind, die Arbeiten der FV zu prüfen, lässt sich dies am besten gewährleisten, wenn sich beide an gleichen Zielen orientieren müssen.

Anhang 5.1.2.1.10.7 Verfahren zur Qualitätssicherung

Bereits mit dem Rollenkonzept sind die Verfahren derart gestaltet, dass die Qualitätssicherung immer zumindest über ein Vieraugenprinzip gestützt wird. In diesem Zusammenhang wurde den Fachlichen Ansprechpartnern (FAP) die Aufgabe übertragen, die Qualität der Emissionsberechnungen und textlichen Zuarbeiten der Fachverantwortlichen (FV) sicherzustellen.

IPCC stellt unter dem Punkt „Überprüfung durch unabhängige Experten (Experten-Peer Review)“ klar, dass das obige von UBA gewählte formale Prüfverfahren, die Überprüfungen eines Experten-Peer Review ergänzen, aber nicht ersetzen kann (Good Practice Guidance; Kapitel 8.8). Um unter Abwägung der vorhandenen Ressourcen, der begründeten Forderung nach Einbeziehung externer Experten entsprechen zu können, werden zum einen, für konkrete Fragestellungen, detaillierte Überprüfungen durch externe Dritte im Rahmen von Forschungsvorhaben und Gutachten durchgeführt. Eine Beauftragung Dritter wird generell von beiden Seiten (d.h. FV und FAP) gemeinsam betreut. Zum anderen wurde das Instrument eines unregelmäßig durchgeführten Workshops zum Nationalen System ins Leben gerufen. Ziel dieses

Workshops ist es, nationale Experten ins UBA zu laden und gemeinsam mit den UBA-Experten (FV) zu ausgewählten Kategorien aktuelle Inventarfragen zu besprechen.

Audits wurden im Umweltbundesamt bislang nicht durchgeführt und sind zurzeit nicht geplant. Laut Good Practice Guidance sind Audits nicht zwingend durchzuführen.

Anhang 5.1.2.1.10.8 Dokumentation und Archivierung

Bei der Erstellung der deutschen Treibhausgas-Inventare soll eine im Grundsatz einheitliche Praxis bei der Dokumentation und Archivierung erreicht werden. Dabei ist zu unterscheiden zwischen der zentralen Dokumentation und Archivierung in der Nationalen Koordinierungsstelle und der dezentralen Dokumentation und Archivierung, die in den Facheinheiten des UBA und in anderen Institutionen erfolgt.

Die Dokumentationsverfahren für Daten und Kontextinformationen unterscheiden sich bedarfsgemäß und umfassen einige Informationen überlappend, wobei es sich teilweise um Redundanzen handelt und teilweise um Informationen mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad. Bei beiden ist die Konsistenz regelmäßig sicherzustellen.

Um eine im Grundsatz einheitliche Praxis für alle Arbeitseinheiten des Umweltbundesamtes zu erreichen, sind für die verwendeten Instrumente allgemeine oder speziell für die Emissionsberichterstattung entwickelte Vorgaben einzuhalten. Im Umweltbundesamt können für die Dokumentation die in Tabelle 476 beschriebenen Instrumente verwendet werden. Dabei sind die jeweils genannten Vorgaben zur Dokumentation einzuhalten. Sofern keine speziellen Vorgaben bestehen, sind die Anforderungen aus den „Allgemeinen Mindestanforderungen an die Qualitätskontrolle und Qualitätssicherung bei der Treibhausgasemissionsberichterstattung“ einzuhalten.

Tabelle 476: Dokumentationsinstrumente im Umweltbundesamt

Instrument	Vorgaben zur Dokumentation
öffentlich verfügbar	
Nationales Inventar (CRF-Tabellen, CRF-Reporter)	Anhang 2, QSE-Handbuch: Anleitung zur Durchführung der Rückrechnungen in den CRF–Tabellen
Nationaler Inventarbericht	Anhang 3, QSE-Handbuch: Vorgaben bei der Erstellung von Berichtsteilen im Nationalen System
Publikation	GO des UBA: Punkt 6.2 Veröffentlichungen
veröffentlichte Handbücher, Anleitungen	Bei IT-Beschreibungen: Vorgehensmodell UBA, sonst: keine speziellen Vorgaben
intern zentral in der Nationalen Koordinierungsstelle verfügbar	
Datenbank ZSE	Anhang 5, QSE-Handbuch: Vorgaben für die Datendokumentation im ZSE
Inventarbeschreibung	Anhang 4, QSE-Handbuch: Anforderungen an die Dokumentation und Archivierung
intern dezentral verfügbar	
Akten der zentralen Registratur	GO des UBA: Punkt 4.2.10 Aktenbehandlung
Handakte	keine speziellen Vorgaben
interne Handbücher, Anleitungen	Bei IT-Beschreibungen: Vorgehensmodell UBA, sonst: keine speziellen Vorgaben

Ein integriertes Dokumentationskonzept legt fest, welche wesentlichen Inhalte in den genannten Dokumentationsinstrumenten vorgehalten werden sollen und wie zwischen den genannten Dokumentationsinstrumenten Konsistenz und Transparenz durch ein entsprechendes Verweissystem zwischen diesen Instrumenten herzustellen ist (siehe Anhang 4, QSE-Handbuch).

Anhang 5.1.2.1.11 Beispiel einer allgemeinen Checkliste für die Rolle Fachverantwortlicher

Im unten stehenden Beispiel (Stand: CHKL 2010) sind nur die relevanten Anforderungen abgebildet. Darüber hinaus gehende Detailinformationen wurden zur Verbesserung der Übersichtlichkeit entfernt.

Tabelle 477: Allgemeine Checkliste für Fachverantwortliche

Prozess Nr.	Teilprozess Bezeichnung	Einzelziel	Optionales Ziel
Hauptprozess: 0. Festlegung der Berechnungsgrundlagen			
0.1	Überprüfung und ggf. Änderung der Methoden	Die Berechnungsmethode steht im Einklang mit der aktuellen Hauptkategorienanalyse.	
0.1	Überprüfung und ggf. Änderung der Methoden	Die Auswahl der Berechnungsmethode ist nach dem Entscheidungsbaum der IPCC-Good Practice Guidance erfolgt, bzw. stimmt mit diesen überein.	Abweichungen vom Entscheidungsbaum der IPCC-Good Practice Guidance sind fachlich und nachvollziehbar begründet und dokumentiert.
0.1	Überprüfung und ggf. Änderung der Methoden	Die Auswahl der Berechnungsmethode hat die Anforderungen aus dem Inventarplan berücksichtigt.	Abweichungen vom Inventarplan wurden fachlich und nachvollziehbar begründet und dokumentiert.
0.1	Überprüfung und ggf. Änderung der Methoden	Die ausgewählte Berechnungsmethode kann für die gesamte Zeitreihe ab 1990 angewendet werden oder wird bereits konsistent angewandt.	Bei Methodenwechsel in der Zeitreihe(n) ist die Durchführung einer Rekalkulation gemäß QSE-Handbuch (Anhang 2) und die Erstellung einer nachvollziehbaren Dokumentation sichergestellt.
0.1	Überprüfung und ggf. Änderung der Methoden	Abweichungen von den durch 0.1.01-0.1.04 geforderten Zielen sind fachlich und nachvollziehbar begründet und dokumentiert.	
0.2	Überprüfung und ggf. Änderung der Datenquellen	Wurden neue Datenquellen verwendet?	
0.2	Überprüfung und ggf. Änderung der Datenquellen	Die Datenquelle(n) ist/sind für die Zukunft langfristig verfügbar (z.B. auf Basis gesetzlicher Grundlagen, Vereinbarungen mit längerer Laufzeit [> 3 Jahre] etc.).	
0.2	Überprüfung und ggf. Änderung der Datenquellen	Aus der/den Datenquelle(n) ist eine/mehrere vollständige Zeitreihe(n) ab 1990 verfügbar.	Lücken in der Datenverfügbarkeit für Zeitreihe(n) ab 1990 wurden nachvollziehbar begründet und dokumentiert.
0.2	Überprüfung und ggf. Änderung der Datenquellen	Aus der/den Datenquelle(n) ist eine/mehrere vollständige Zeitreihe(n) ab 1990 verfügbar.	Für den Umgang mit Datenlücken wurde gemäß der IPCC Good Practice Guidance (Kap. 7.3.2.2) ein fachlich geeignetes Vorgehen (Inter-/Extrapolation) festgelegt und nachvollziehbar dokumentiert. Hinweis: Fortschreibung ist keine Extrapolation !
0.2	Überprüfung und ggf. Änderung der Datenquellen	Aus der/den Datenquelle(n) ist eine/mehrere vollständige Zeitreihe(n) ab 1990 verfügbar.	Nach der Schließung von Datenlücken ist, wo notwendig, eine Rekalkulation der Zeitreihe(n) gemäß QSE-Handbuch (Anhang 2) erfolgt und diese nachvollziehbar in NIR und CRF dokumentiert.
0.2	Überprüfung und ggf. Änderung der Datenquellen	Die Datenquelle(n) deckt/decken die Kategorie vollständig ab.	Die unvollständige Abdeckung wurde in einer Hochrechnung und in der Unsicherheitenberechnung berücksichtigt. Alle Schritte sind nachvollziehbar dokumentiert.
0.2	Überprüfung und ggf. Änderung der Datenquellen	Für die Datenquelle(n) liegen Angaben von Unsicherheiten (Höhe und Verteilung) vor.	
0.2	Überprüfung und ggf. Änderung der Datenquellen	EF und AR stimmen in Ihrem Quellgruppenzuschnitt überein.	Bei fehlender Übereinstimmung von EF und AR können andere Datenquellen Deckungsgleichheit herstellen. Alternativ wurde die fehlende Übereinstimmung in einer Hochrechnung und in der Unsicherheitenberechnung berücksichtigt und alles nachvollziehbar dokumentiert.

Prozess Nr.	Teilprozess Bezeichnung	Einzelziel	Optionales Ziel
0.2	Überprüfung und ggf. Änderung der Datenquellen	Die Verfahren zur Berechnung der Ausgangsdaten sind nachvollziehbar beschrieben.	
0.2	Überprüfung und ggf. Änderung der Datenquellen	Die Auswahl der Datenquelle(n) hat die Anforderungen aus dem Inventarplan berücksichtigt.	Abweichungen wurden nachvollziehbar begründet und dokumentiert.
0.2	Überprüfung und ggf. Änderung der Datenquellen	Die Annahmen und Kriterien, die zur Auswahl der jeweiligen Datenquelle(n) geführt haben sind nachvollziehbar dokumentiert.	
0.2	Überprüfung und ggf. Änderung der Datenquellen	Für die Datenquelle(n) werden durch den Datenlieferanten geeignete routinemäßige Qualitätskontrollen durchgeführt. Bei Einzelvorhaben wurden einmalige Qualitätskontrollen durchgeführt. Die Durchführung ist dokumentiert.	
0.2	Überprüfung und ggf. Änderung der Datenquellen	Bei der Verwendung einer/mehrerer neuer Datenquellen wurde eine Rekalkulation gemäß QSE-Handbuch (Anhang 2) auf Basis dieser andere(n) Datenquelle(n) durchgeführt.	
0.2	Überprüfung und ggf. Änderung der Datenquellen	Bei Verwendung von IPCC-Default-EF sind diese hinsichtlich ihrer Generierung mit den nationalen Gegebenheiten verglichen worden und in Deutschland anwendbar. Das Ergebnis dieser Prüfung wurde nachvollziehbar dokumentiert.	Für IPCC Default-Werte die nicht mit den nationalen Gegebenheiten übereinstimmen, wurden die Abweichungen in den Unsicherheiten berücksichtigt und dokumentiert .
0.2	Überprüfung und ggf. Änderung der Datenquellen	Bei Verwendung anderer EF als der IPCC Default-EF, wurden diese nachvollziehbar begründet und dokumentiert. Hinweis: Die Verwendung anderer EF ist nur zulässig, wenn diese eine exaktere Berechnung der landesspezifischen Emissionen ermöglichen.	
0.2	Überprüfung und ggf. Änderung der Datenquellen	Ein Vergleich der verwendeten AR gegen andere Datenquellen (z.B. EU-ETS, IEA, EPER etc.) ist erfolgt und das Ergebnis nachvollziehbar dokumentiert.	
Hauptprozess: 1. Datengewinnung			
1.1	Festlegung der Anforderungen	Die Anforderungen an die Daten berücksichtigen die Hinweise aus dem Inventarplan und den Inventarüberprüfungen (z.B. S&A Report, Centralized Review).	
1.3	Anforderung der Daten durch Facheinheit bei Datenlieferanten	Die Anforderungen an die QK und die Datenformate sind an die Datenlieferanten und/oder die Auftragnehmer weitergegeben worden und diese Weitergabe ist dokumentiert. Hinweis: Wo Datenlieferanten über NaSE-Vereinbarungen eingebunden sind, ist Ziel erreicht.	Der Datenlieferant (z.B. Verbände) führt eigene routinemäßige Qualitätskontrollen durch und dieses Ergebnis ist dokumentiert.
1.4	Erhalt der Daten	Der Datenlieferant bzw. der Auftragnehmer hat die geforderten Qualitätskontrollen durchgeführt und dokumentiert.	Der Datenlieferant (z.B. Verbände) führt eigene routinemäßige Qualitätskontrollen durch und dieses Ergebnis wurde dokumentiert.
1.4	Erhalt der Daten	Die erhaltenen Daten sind vollständig und weisen keine Datenlücken auf.	Alle Datenlücken in der Zeitreihe ab 1990 sind im Einklang mit den IPCC Good Pract. Guidance durch Extrapolation/Interpolation (Kap.7.3.2.2) geschlossen worden und nachvollziehbar dokumentiert und begründet. Hinweis: Fortschreibung ist keine Extrapolation
1.4	Erhalt der Daten	Die erhaltenen Daten sind konsistent mit den Vorjahreswerten und nachvollziehbar beschrieben.	Deutliche Abweichungen von den Vorjahreswerten sind nachvollziehbar begründet und dokumentiert.
1.4	Erhalt der Daten	Die erhaltenen Daten liegen im Vergleich zu anderen Datenquellen (z.B. ETS-Daten, IEA, EPER etc.) in der gleichen Größenordnung. Das Prüfungsergebnis wurde dokumentiert.	Die Ursachen für Abweichungen sind nachvollziehbar begründet und dokumentiert.
1.4	Erhalt der Daten	Die Methodik/Annahmen auf denen die Unsicherheitsbestimmungen basieren, sind nachvollziehbar dokumentiert.	Konnten keine Annahmen abgeleitet werden, wurde alternativ eine Expertenschätzung durchgeführt und die Qualifikation des Experten nachvollziehbar dokumentiert.
1.4	Erhalt der Daten	Die Unsicherheitsbestimmungen sind vollständig und plausibel.	

Prozess Nr.	Teilprozess Bezeichnung	Einzelziel	Optionales Ziel
Hauptprozess: 2. Datenaufbereitung / Emissionsberechnung			
2.1	Dateneingabe (bevorzugt ZSE)	Die EF sind vollständig im ZSE eingetragen.	
2.1	Dateneingabe (bevorzugt ZSE)	Die Dokumentation der Datenherkunft von EF ist vollständig und entspricht den Anforderungen des QSE Handbuchs (Anhänge 3, 4 und 5).	
2.1	Dateneingabe (bevorzugt ZSE)	Die Entwicklung der EF innerhalb der Zeitreihe ist plausibel und im Falle von Auffälligkeiten (z.B. Größenordnungsänderungen) nachvollziehbar begründet und dokumentiert.	Unplausible EF wurden korrigiert.
2.1	Dateneingabe (bevorzugt ZSE)	Die AR sind vollständig im ZSE eingetragen.	
2.1	Dateneingabe (bevorzugt ZSE)	Die Dokumentation der Datenherkunft von AR ist vollständig und entspricht den Anforderungen des QSE Handbuchs (Anhänge 3, 4 und 5).	
2.1	Dateneingabe (bevorzugt ZSE)	Die Entwicklung der AR innerhalb der Zeitreihe ist plausibel und im Falle von Auffälligkeiten (z.B. Größenordnungsänderungen) nachvollziehbar begründet und dokumentiert.	Unplausible Abweichungen wurden korrigiert.
2.1	Dateneingabe (bevorzugt ZSE)	Nach Abschluss der Dateneingabe in das ZSE wurde die Richtigkeit der Eingabe von Zahlen, Einheiten und Umrechnungsfaktoren überprüft und bestätigt.	
2.1	Dateneingabe (bevorzugt ZSE)	Die Unsicherheiten sind vollständig im ZSE eingegeben und entsprechend den Anforderungen des QSE Handbuchs (Anhänge 3, 4 und 5) dokumentiert.	
2.2	Datenbearbeitung (Modellbildung, Disaggregation, Aggregation)	Eine adäquate Beschreibung der Modelle in Bezug auf Aufbau, Modellstruktur, Rechengang, Annahmen etc. liegt in der Inventarbeschreibung vor.	
2.3	Emissionsberechnung	Die aktuellen Inventarberechnungen sind mit Berechnungen vorhergehender Berichterstattungen abgeglichen worden.	Bei signifikanten Änderungen oder auffälligen Abweichungen vom erwarteten Trend, wurde die Rechnung und die Eingangsdaten der Berechnung überprüft und weiterbestehende Unterschiede begründet und dokumentiert.
2.3	Emissionsberechnung	Die Ergebnisse der Emissionsberechnung der aktuellen/vorhergehenden Berichterstattungen sind mit anderen Datenquellen für Deutschland, insbesondere ETS-Daten, abgeglichen worden und vergleichbar. Das Ergebnis wurde nachvollziehbar dokumentiert.	Wenn eine Vergleichbarkeit nicht gegeben ist bzw. ein Vergleich nicht durchgeführt wurde, ist dies fachlich und nachvollziehbar begründet worden.
2.3	Emissionsberechnung	Der nationale implizierte EF (national Implied EF; siehe S&A Report I) der vorhergehenden Berichterstattung ist mit den implizierten EF anderer Länder vergleichbar (gleiche Größenordnung).	Extreme implied EF, sind im NIR fachlich und nachvollziehbar begründet und dokumentiert worden bzw. es wurde auf eine bestehende Begründung verwiesen.
2.4	Erstellung Berichtsteile (Texte)	Die Kategorie ist für den NIR entsprechend der geforderten sechs Unterkapitel des NIR ("Beschreibung der Quellgruppe", "Methodische Aspekte" etc.) vollständig und nachvollziehbar beschrieben.	
2.5	Freigabe auf der Fachebene	Die Werte von AR, EF, ED und deren Unsicherheiten im NIR sind aktuell und mit den Werten im ZSE kongruent.	
2.5	Freigabe auf der Fachebene	Die Dokumentation der Datenherkunft von AR, EF, ED und deren Unsicherheiten im NIR ist aktuell und mit den Angaben im ZSE kongruent.	Fehlende oder unvollständige Dokumentationen der Datenherkunft sind fachlich und nachvollziehbar begründet und dokumentiert.

Anhang 5.1.3 Das Datenbanksystem Zentrales System Emissionen

Als informationstechnologisches Werkzeug für die Inventarerstellung etabliert und pflegt das Umweltbundesamt seit 1998 eine integrierte nationale Datenbank, das *Zentrale System*

Emissionen (ZSE). Das ZSE setzt die vielfältigen Anforderungen an die Emissionsberechnung und -berichterstattung um und automatisiert wesentliche Arbeitsschritte. Es unterstützt die Inventarplanung und die Berichterstattung (z. B. durch Emissionsberechnung, -rekalkulation und Fehleranalyse) sowie das Inventarmanagement (z. B. durch Archivierung, jährliche Evaluierung der Daten) und das Qualitätsmanagement auf der Datenebene (siehe UBA 2003a, Projekthandbuch Decor). Mit Hilfe des ZSE werden die Schlüsselanforderungen der Transparenz, Konsistenz, Vollständigkeit, Vergleichbarkeit und Genauigkeit auf der Datenebene erfüllt.

Dabei wird der Datendokumentation eine zentrale Rolle eingeräumt. Das ZSE speichert die zuständigen Bearbeiter, die Datenquellen und Berechnungsverfahren sowie die Unsicherheiten von Zeitreihenwerten. Auch Zeitpunkt und Verursacher von Änderungen werden festgehalten. Das System verfügt über eine Historienverwaltung, die gelöschte Werte archiviert und bei Bedarf wiederherstellt. Rückverfolgungen und Rekonstruktion von Daten sowie eine unabhängige Überprüfung durch Dritte werden so ermöglicht. Für die Durchführung der Qualitätssicherung auf der Datenebene werden unterstützende Instrumente bereitgestellt (z. B. eine Komponente zur Erfassung von Unsicherheiten, Plausibilitätsprüfungen). Der Transparenz wird vor allem dadurch Rechnung getragen, dass die Datenerfassung in derselben Struktur erfolgt, in der die Daten bereitstehen und sämtliche Bearbeitungen und Transformationen hin zu einem Berichtsformat erst im ZSE selbst und damit nachvollziehbar erfolgen. Das ZSE verwaltet dazu detaillierte technik-spezifische Aktivitätsdaten und Emissionsfaktoren, die über Rechenregeln (Berechnungsverfahren) zu aggregierten, kategoriespezifischen Werten für die Berichtsformate verdichtet werden. Die Aggregation der einzelnen ZSE-Zeitreihen zu den CRF-Berichtszeilen beispielsweise sind im Anhang 3 bzw. Kapitel 3 ff jeweils bei den einzelnen Kategorien beschrieben. Neben der Aggregation und Modellbildung für Berechnungen unterstützt das ZSE auch die Durchführung von Szenarien- und Prognoseberechnungen sowie beim Reference Approach.

Über das Zentrale System Emissionen wird zudem der Datenaustausch im Rahmen des Nationalen Systems, also innerhalb des UBA und mit Dritten, organisiert. Neben der Direkteingabe werden dazu aus vorhandenen Datenbanken aggregierte Werte über eine Standardschnittstelle importiert (z. B. TREMOD für Verkehrsdaten oder GAS-EM für Daten zur Landwirtschaft). Ziel ist es, dass Inventardaten möglichst direkt von den inhaltlich zuständigen Fachverantwortlichen in das ZSE eingepflegt oder vom ZSE-Administrator über die Importschnittstelle eingelesen werden. Dies gilt für UBA-interne und für externe Mitwirkende am Nationalen System.

Anhang 5.1.4 Verification of the German Greenhouse Gas Inventory

Anhang 5.1.4.1 Introduction

Four independent set of data were used. They were selected amongst the criteria given in the 2019 refinements of the IPCC guidelines for verification (IPCC, 2019). Here the IPCC lists several data sources that may serve as independent verification datasets. The most prominent dataset amongst the options listed under 6.10.1 of the 2019 refinements are the Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR) of the JRC (Crippa et al., 2025). We chose this dataset for verification as it is widely used amongst the atmospheric research community and is for example used in the compilation of the Copernicus Atmospheric Monitoring Service data products for methane (Seegers et al., 2020) and CO_2 (Chevallier, 2020). EDGAR is also compiled

by data sources (EC, 2025) that are listed in the IPCC refinements under 6.10.1, therefore, EDGAR represents a prime synergetic dataset that has to be included in any verification workrk.

Another important source of data that is explicitly mentioned is data from inverse modelling, discussed in the IPCC refinements in chapter 6.10.2. Under 6.10.2.5 CAMS data is explicitly mentioned as a potential source of verification data. Therefore, the CAMS global inversion data from the Copernicus Atmospheric Datastore is used for verification, which is available for N_2O (Thompson, 2021), CO_2 (Chevallier, 2020) and CH_4 (Seegers et al., 2020).

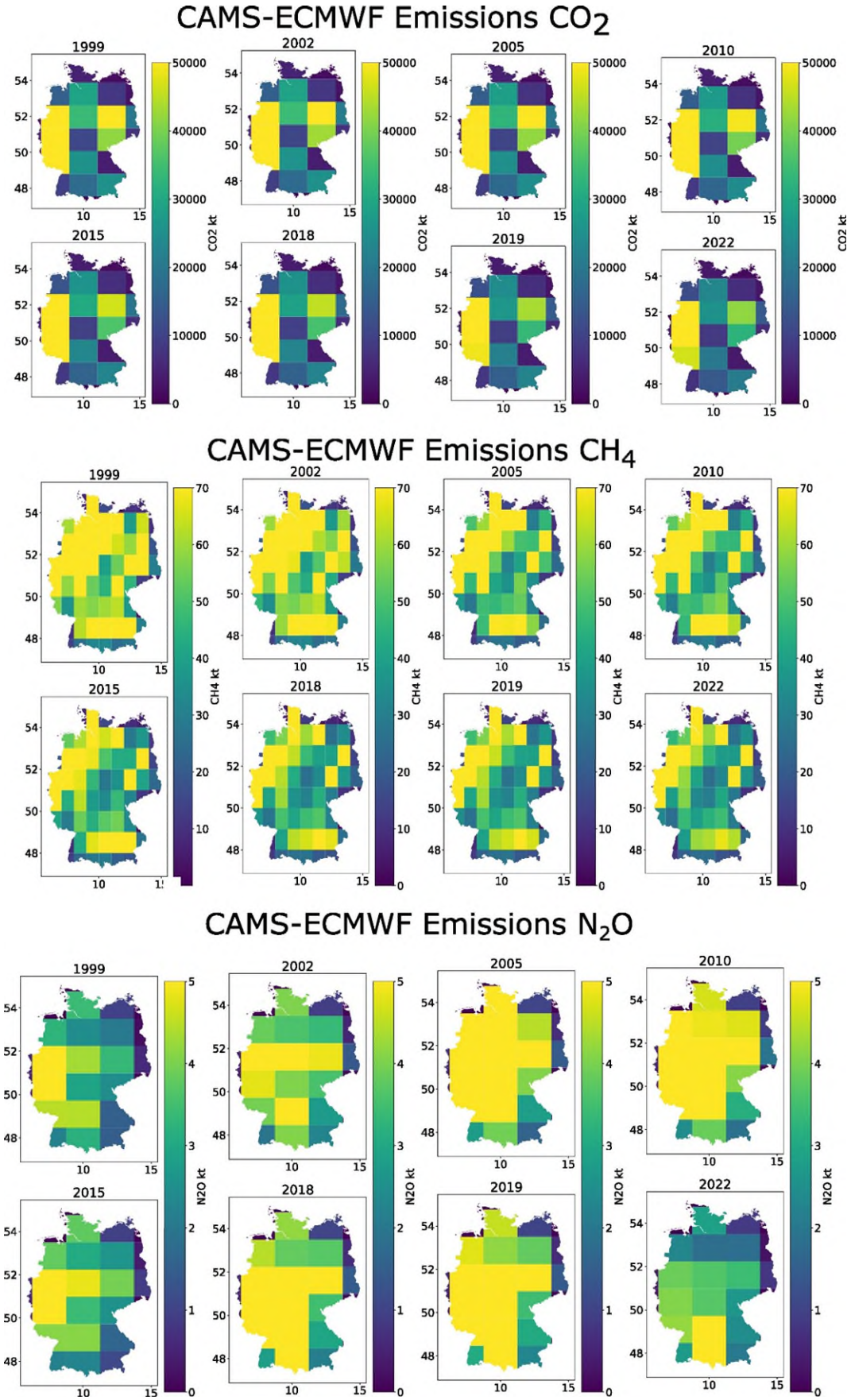
The last two independent sources of data that will be used for verification are not explicitly listed by the IPCC 2019 refinements (IPCC, 2019). These are the database of the Pollution Release and Transfer Register (PRTR) (Umweltbundesamt, 2025) and the data from the European Emission Trade System (ETS), provided by the European Environment Agency (EEA, 2025). Details of the German PRTR data as well as the database may be found under: https://thru.de/thrude/. Details with respect to the ETS data may be found in the European topic center report compiled by (Graichen, Cludius and Gores, 2019). These four diverse and independent datasets are ideal for a verification of the German inventory according to the IPCC Refinements of 2019 (Romano et al., 2019). Data for all of the three major Green House Gases (GHG) N_2O, CH_4 and CO_2 for all the sectors (including LULUCF/AFOLU) were compared with the four datasets in order to verify the temporal trends in diagrams and by standard mathematical similarity operators such as the Pearson and Spearman-Rank correlations, which are widely used to compute similarity between two mathematical vectors.

The main aim of this chapter is to offer qualitative and semi-quantitative comparisons of the national totals for the three major GHGs methane, nitrous-oxide and CO_2 to independent sources of GHG data. The specific focus is set on the verification of temporal trends in the yearly national totals of the three above named GHGs in kt of CO_2 equivalent. Direct sectoral comparisons has not been considered as the verification data exhibit very different levels of disaggregation (from none, as in case of the CAMS data product, up until very detailed, as in case of EDGAR).

Methods and Materials

The four sets of data each require their own analysis tools that have been developed for this verification work. Whilst the EDGAR database is available for modelling activities in yearly gridded format, it is also available as tabulated document presenting only the national totals. The PRTR- database, in form of an sql-database file offers all the national reported data on large point sources, whilst the CAMS data is available in monthly slices in netcdf-Format. The ETS data is available as a csv file for download hosted at the EEA.

Abbildung 123: Time Slice Emission data for Germany from the CAMS data store



Quelle: eigene Darstellung, UBA

Anhang 5.1.4.1.1 The EDGAR Inventory

The EDGAR Inventory Data and its methodology for previous versions of the EDGAR GHG Database has been described in detail in (Crippa et al., 2025)). An update of this report is currently in preparation. EDGAR strives to support all countries of the world with emission inventory data. In the process EDGAR is compiled in a consistent, homogeneous and transparent manner (Crippa et al., 2025). This is of high benefit for e.g. all developing countries, who do not yet have consistent inventory data. In addition, the gridded emission data of EDGAR is highly appreciated in the inverse modelling community, who rely on globally consistent gridded emission data for their model runs. Calculation of the CAMS CO_2 and CH4 inversion optimized data product require the usage of EDGAR data as stated in (Seegers et al., 2020) and (Chevallier, 2020). The yearly national total data from the tabulated EDGAR files (Crippa et al., 2025) will be used in the following for the here presented verification work for CO_2, N2O and CH4.

Anhang 5.1.4.1.2 The CAMS Global Inversion-Optimized Greenhouse Gas Data

The CAMS global inversion optimized GHG data is a compilation of data, which are produced by three different processing chains. The CH_4 production chain is described in (Seegers et al., 2020). Data processing for the compilation of the N_2O data is detailed in (Thompson, 2021), whilst (Chevallier, 2020), describes the data for the CO_2 product. Abbildung 123 shows the data from the three processing chains, clipped to the extent of Germany. The spatial resolution of the data differs from 2.5° longitude x 1.27° latitude (Thompson, 2021) to 1° longitude x 1° latitude for the methane data product (Seegers et al., 2020). For the verification of the data three different inversion runs can be selected from the application programming interface of CAMS. These are based either on no additional input (time series from 1990 till 2023), surface air samples (time series 1979-2023), spaceborne data (time series from 2015 onwards), or a combination of surface air samples (time series 1979-2023) and surface data (time series from 1990 to 2023). The longest time series option (surface air sample) was chosen, for the data comparison work presented here to enable the longest trend comparison possible for CO_2, whilst the 1990-2023 data was used for methane. Please note that the CAMS time series data for N_2O only starts from 1996 onwards whilst the comparisons for CO_2 use the full timespan from 1990 till 2023 and 1990-2022 CH_4.

The Pollution Release and Transfer Register (The PRTR) database is offered as an SQL-Database file at the domain thru.de by the Umweltbundesamt in Germany. It is comprised of reported data for large emission sources in Germany. The PRTR reporting is based on the European Union Regulation No 166/2006 on the establishment of a PRTR register. To access the PRTR database and extract annual data for the three GHGs a modified Python script was used, which is based on the PRTR reporting tool (Hausmann et al., 2021). Abbildung 124 shows the data of the PRTR point sources reported in the PRTR database file to illustrate points of high point-source emission activity. Currently the database offers PRTR data from 2007 till 2023.

Anhang 5.1.4.2 The European Emission Trade Data

The ETS database is hosted by the EEA (EEA/EuTL, 2025), which also provides a webtool for the display, download and analysis of the data. The data lists the different sectors, which are part of the ETS system, with their respective CO_2 emission equivalents. More details on the database and an in-depth analysis can be found in (Graichen et al., 2019).

Anhang 5.1.4.2.1 Analysis

The analysis of the data requires an overlapping time-period with the GHG totals of Germanys national inventory from previous reporting years (2023) CRF tables. Therefore, the time-period

from 1990-2022/23 was considered as time frame for the comparisons considering the temporal coverage of the three comparison data sets. The available data was, where applicable (the CAMS and the PRTR data), plotted for a visual comparison shown in Abbildung 123 and Abbildung 124 to visually identify potential spatial patterns and to highlight the spatial density or sparsity of the data in question. The pearson and the spearman-rank correlation were computed for the individual temporal verification datasets to the national inventory data in the overlapping time periods visible in figure 125. These two mathematical similarity measures were computed, in order to quantify the similarity between the temporal trends visible in Abbildung 125, for trend verification purposes. The results are shown in Tabelle 472.

The EDGAR Inventory

EDGAR data was extracted from the national totals spread-sheets, offered as download from the JRC (EC, 2025). The national totals for Germany were converted to kt CO_2 equivalent for a better comparison of the data to the national inventory, in case of the comparison to the EU-ETS data, AR5 GWP were used in this case. For an individual Comparison of the gases CO_2, N_2O and CH_4 were compared separately in their own individual mass fractions. Abbildung 125 shows the EDGAR data in orange, whilst the national inventory data is plotted as thick blue line.

Anhang 5.1.4.2.2 The CAMS Global Inversion--Optimized Greenhouse Gas Data

The CAMS inversion optimized GHG data was aggregated to the spatial scale of Germany using a spatial vector data file symbolizing the country area of Germany (Patterson & Kelso, 2022), which was intersected with the CAMS data, enabling the cropping of the data pixels. Then the equal earth projection (Šavrič et al., 2019) was used to calculate the area of each cell in-order to convert the CAMS flux data to mass per pixel and month. These were then summed up for all twelve months of the respective year to yield the total for the respective gas and year. The data is shown as green line in Abbildung 125.

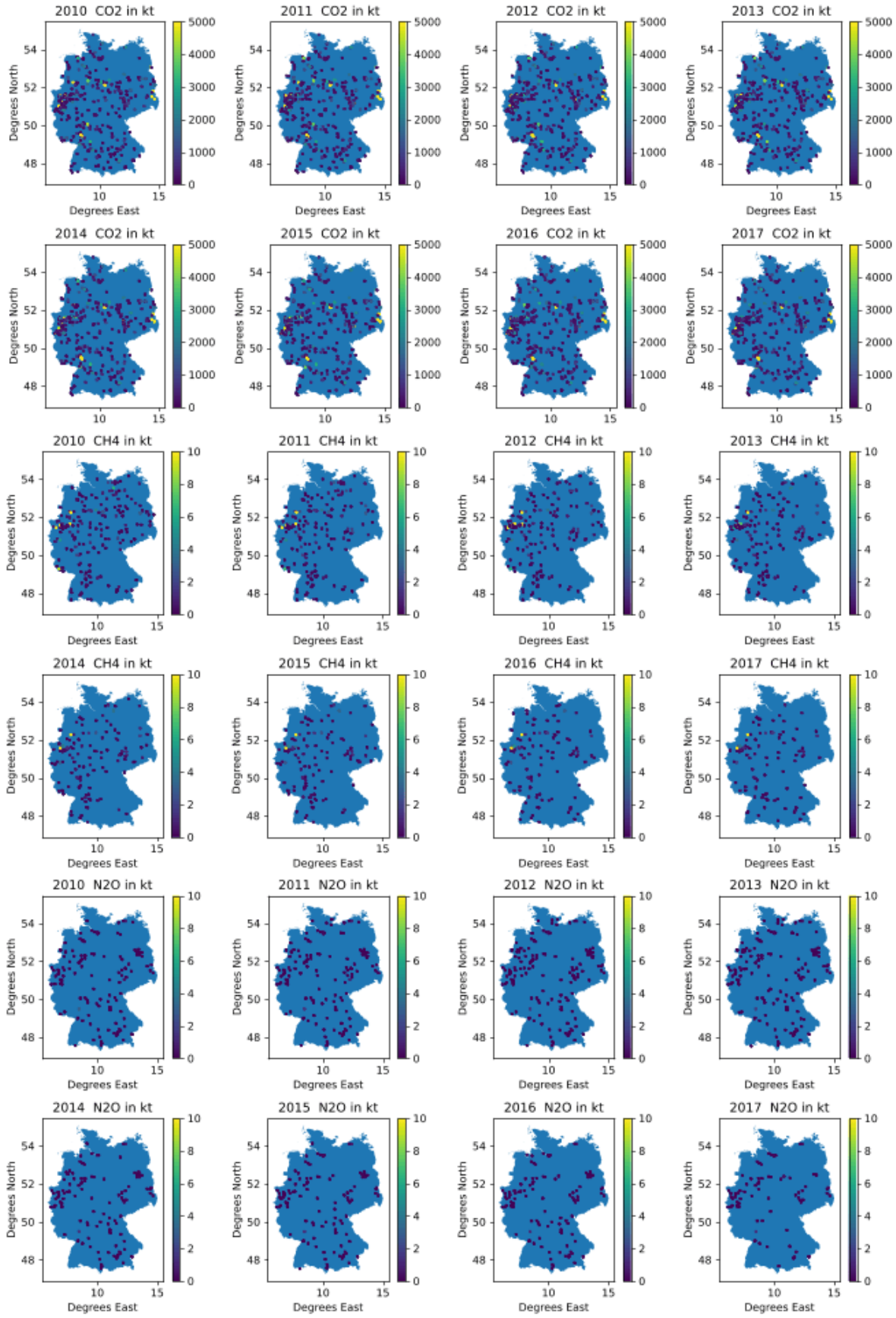
Anhang 5.1.4.2.3 The Pollution Release and Transfer Register

The PRTR database was queried for data reported from large point-sources. These data contain the longitude and latitude coordinates of each point source, which offers the possibility of spatially displaying the data, as shown in Abbildung 124 for visualisation. The yearly sums, plotted as red line in Abbildung 125, were directly extracted from the database file.

Anhang 5.1.4.2.4 The European Emission Trade System

The data of the ETS system, hosted by the EEA (EEA, 2025), are filtered for the total verified Emissions of all sectors and plotted against the sum of N_2O and CO_2 of all the other datasets as shown in the leftmost bottom diagram of Abbildung 125. As data from the ETS system does not cover methane the ETS data is only compared to the sum of the respective gases CO_2 equivalent in Tabelle 472.

Abbildung 124: Time Slice Emission data for Germany from the EPRTR Database



Quelle: eigene Darstellung, UBA

Anhang 5.1.4.3 Results and Discussion

The trend data in Abbildung 125 shows very different patterns for each of the three GHG, which is also visible in Tabelle 472. Overall the EDGAR data shows the highest trend similarity to the national GHG total with correlation scores above 0.9 together with the PRTR data, whilst the CAMS data shows large similarity to the national CH4 total only in case of CH4 and CO_2. The biggest disagreement is between the CAMS N2O trend and the national totals for N2O with rather small correlation values for the pearson correlation and the spearman rank correlation.

Tabelle 478: Correlation Scores for the three datasets to the German inventory totals

CO_2	PRTR	CAMS	EDGAR	ETS
Pearson	0.988	0.994	0.99	NaN
Spearman-Rank	0.986	0.997	0.99	NaN
CH_4	PRTR	CAMS	EDGAR	ETS
Pearson	0.983	0.977	0.992	NaN
Spearman-Rank	0.993	0.985	0.999	NaN
N_2O	PRTR	CAMS	EDGAR	ETS
Pearson	0.941	0.135	0.97	NaN
Spearman-Rank	0.87	-0.064	0.917	NaN
CO_2 and N_2O	PRTR	CAMS	EDGAR	ETS
Pearson	NaN	NaN	NaN	0.91
Spearman-Rank	NaN	NaN	NaN	0.84

Anhang 5.1.4.3.1 The EDGAR Inventory

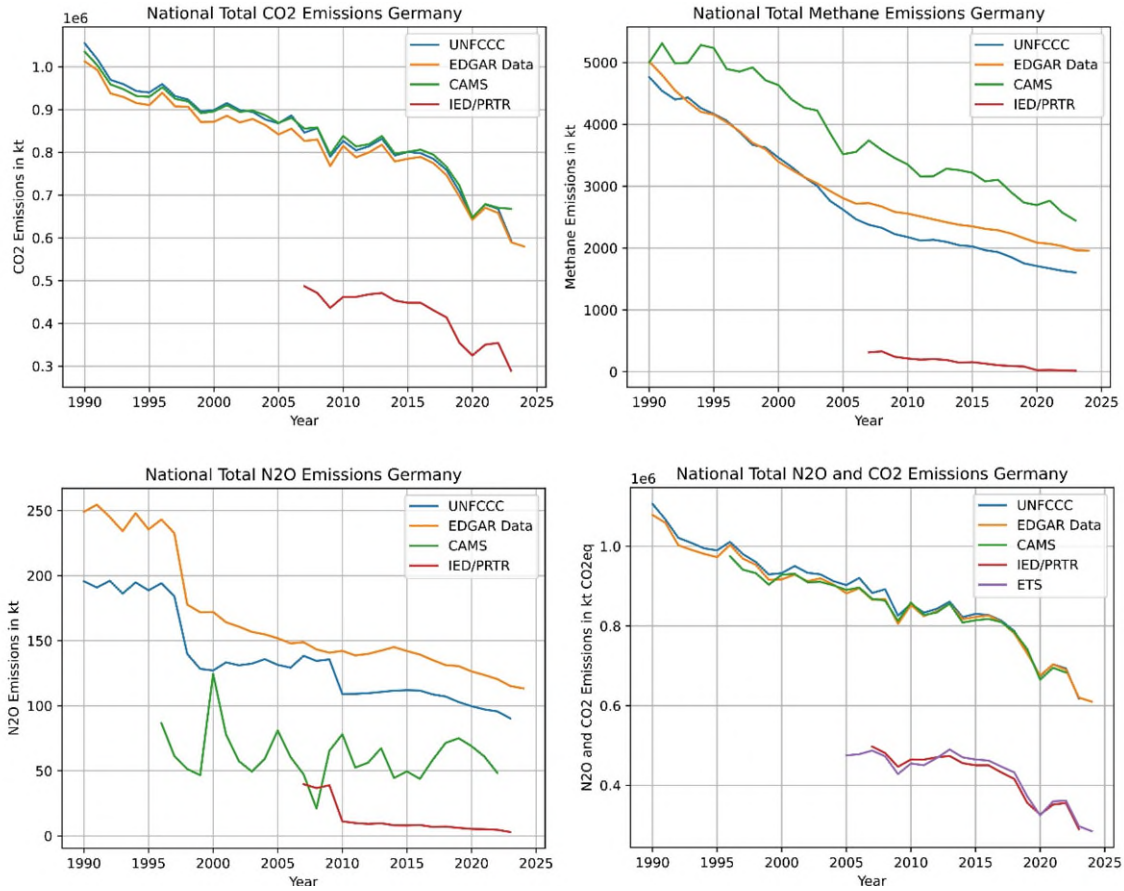
The EDGAR inventory usually is in good agreement with the national inventory data with high correlation values to the national inventory totals, as shown in Tabelle 472 and as visible by the orange line, which is always in close agreement with the reported national totals (blue line) in Abbildung 125. Overall, the EDGAR data shows slightly higher emission values, which is to be expected if different data sources are used to compile a worldwide consistent emission database. The lower values in the CO_2 data with respect to the 2024 reported CRF might also be caused by methodological differences.

Anhang 5.1.4.3.2 The CAMS Global Inversion-Optimized Greenhouse Gas Data

The CAMS inversion optimized datasets shows no correlation for N_2O, with the trends shown in the green curve of Abbildung 125 not matching the general trend of the inventory data in blue or the EDGAR data in orange. In addition, temporal gradients are starkly amplified in the CAMS N_2O data, if compared to the inventory data. E.g. the dip during the financial crisis in Europe around 2008. The trend between the bottom-up inventories and CAMS data is in good agreement for CO_2 and CH_4 as shown in Abbildung 125, with correlation scores higher than 0.9. Here the bottom-up inventories show an almost exactly the similar trend as the CAMS data, especially in case of the CO_2 CAMS data. This is remarkable considering the coarse spatial resolution of the CAMS data product and the research that is carried out to further refine CO_2 data modelling for inventory verification. Currently there are several big research projects underway to offer a consistent CO_2 monitoring system at a finer spatial and temporal resolution. Good examples are the European projects COCO2 and CORSO, which will offer high quality CO_2 monitoring data over Europe. Methane data from CAMS, as shown in Abbildung 125, shows a good agreement of the trend to

the inventory data, as also visible by the high correlation scores in Tabelle 472. The green curve in Abbildung 125 is, however, offset against the methane emission data from the other sources. This trend may only be explained by a closer examination and comparison of different model results, which will likely be offered by global and European research initiatives, such as the World-Emission Project, or the current EU-Projects (Avengers, EYE-Clima and Paris). N_2O data from CAMS shows a strong oscillation, if compared to the national inventory and EDGAR data. Therefore, almost no correlation can be seen in Tabelle 472 to the other data sets. A reconciliation between national inventories and this modelling results should be attempted in the aforementioned research projects. Remarkable is the large dip around 2008, which shows a strong contrast in the data if compared to the bottom-up inventories.

Abbildung 125: Trend plots for CO_2, CH_4 and N_2O emission totals 1990-2021



Quelle: eigene Darstellung, UBA

Anhang 5.1.4.3.3 The Pollution Release and Transfer Register

The PRTR data matches the trends of the reported national GHG gases quite well, as highlighted in Tabelle 472. Here we see quite consistent correlation scores for methane and nitrous oxides. The low correlation values for CO_2 are due to an increase in CO_2 emissions in the PRTR data, compared to the overall decline of CO_2 in the national totals. The strong decline in the nitrous oxides of the national totals is mirrored by the PRTR data, showing the stop of N_2O emissions from large point sources represented by the PRTR database.

Anhang 5.1.5 The European Emission Trade System

The data from the ETS verified totals for Germany fits quite well to the overall trends in the inventory data with correlation scores around 0.8/0.9 for the spearman-rank and pearson correlations as shown in Tabelle 472. This shows that the temporal trend of the combined N_2O and CO_2 emissions of Germanys national inventory is in agreement with the external ETS data.

Anhang 5.1.6 Past and Present Verification Activities of Greenhouse Gas Emissions in National and International Projects

In the following text, all emission data in CO_2 equivalents are still calculated with the greenhouse gas potentials (GWP) of the Fourth IPCC Assessment Report (IPCC AR4).

Anhang 5.1.6.1 Introduction

Multidisciplinary scientific projects are usually set up as temporal research initiatives with clearly set goals and tasks for the participating members. They develop tools and data within a project frame of 3 to 4 years and are discontinued after their completion. This places certain constraints on the development and usage of the developed data and tools for inventory agencies:

8. It is necessary to have a fixed set of coordinating personnel within the inventory agencies to use the results and tools for emission reporting.
9. Inventory staff needs to be actively involved in the design and development of these tools and sets of data.
10. The inventory team members should act as a scientific relay between the emission inventory world and e.g. the modeling community and the atmospheric science community in order to express their specific verification needs to improve the emission inventory or identify problematic source categories.

This can be done at the country and specific level with source specific bottom-up data research projects, which yield emission factors and activity data for very specific single sources. The bigger picture (sector wide goals, LULUCF/AFOLU or modeling of national totals for stakeholders), however, require the involvement of larger expert groups from various fields of academic research. This was established for the first time in for GHG research in Europe with the VERIFY project (https://verify.lsce.ipsl.fr/). The aim of the verify project was to assemble European inventory agencies such as RVIM (Netherlands), ISPRA and CMCC (Italy), UBA (Germany) and CITEPA (France) to collaborate with academic partners in order to establish a "common language" between inventory agencies and a large consortium of climate research specialists in order to answer to the 2019 IPCC refinements[109] on QA/QC and verification, which suggest just such a collaboration.

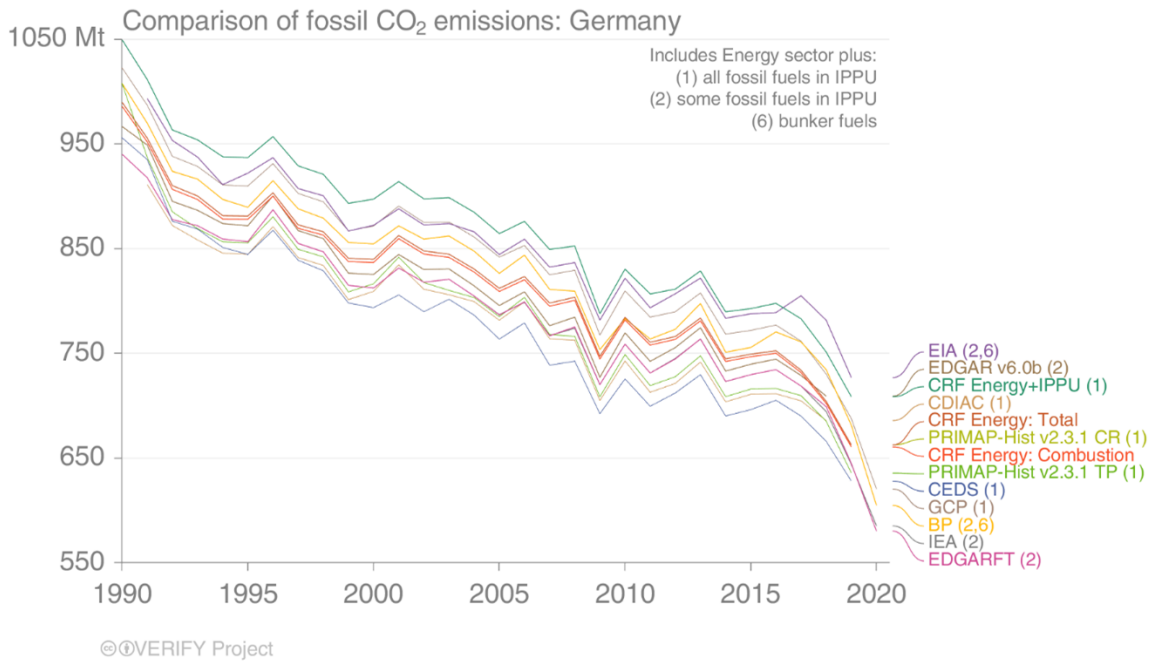
The nature of the project offers only a temporal limited set of data in the form of the report data below, which has been part of the VERIFY project, which has ended. All plots presented below are available from the following VERIFY resource page as fact sheets: http://webportals.ipsl.jussieu.fr/VERIFY/FactSheets/. Detailed reports on the methodology used in the production of the data may be found here: https://verify.lsce.ipsl.fr/index.php/repository/key-reports-verify.

109 Romano, D. et al. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories — IPCC General Guidance and Reporting. https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/ (2019).

Anhang 5.1.6.2 Fossil Fuel CO_2 data

The fossil fuel CO_2 comparison data from the VERIFY project has been published by (Petrescu et al., 2021). Figure V1 shows the UNFCCC fossil fuel data, labelled as CRF encompassing different sectors, compared to other sets of data. An in-depth description of the other individual sets of data may be found in (Petrescu et al., 2021), or in (Minx et al., 2021), which deliver an in-depth analysis of the features of different sets of data. Abbildung 126 shows that the reported greenhouse gas data is well in the envelope of the other independent bottom-up set of data, which shows that the trend as well as the overall magnitude of the reported emissions totals in Germany are in agreement with these external sets of data. An interesting aspect of these bottom-up inventories is their direct link to the economy, where it is possible to see e.g. the economic crisis in 2008-2009 as well as the Eurozone crisis around 2012. The steep decline in 2020 is also remarkable.

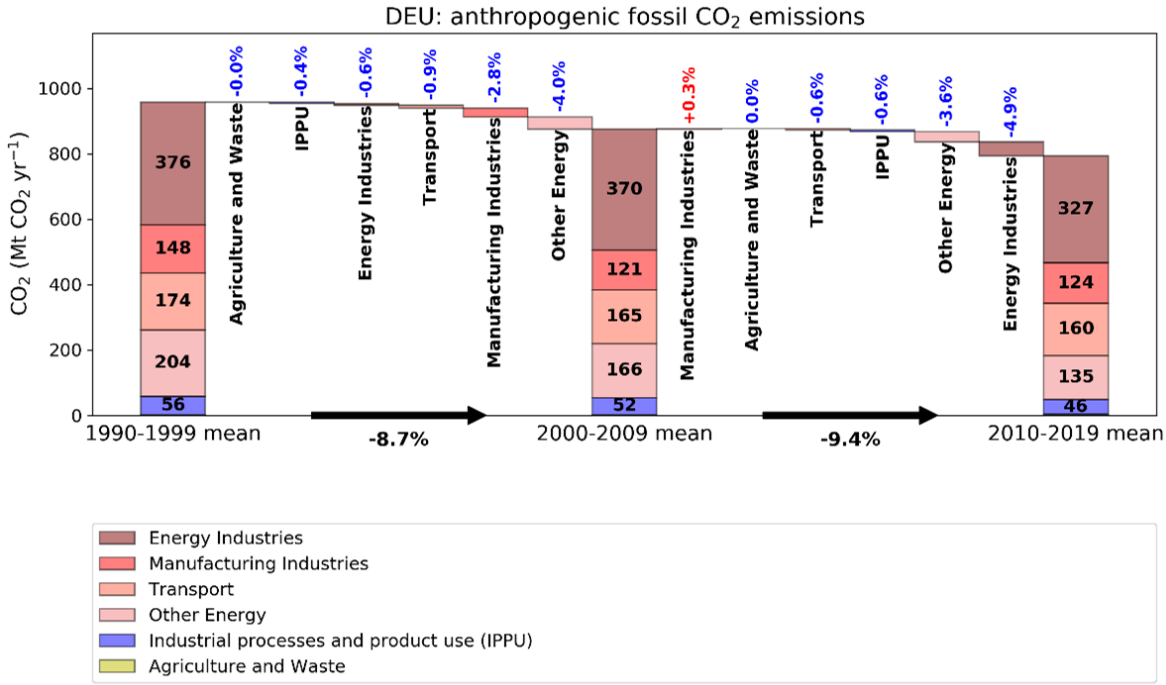
Abbildung 126: Fossil CO_2 emissions for Germany from bottom-up inventories, CRF depicts the reported emissions to the UNFCCC. The trend as well as the order of magnitude are in good agreement between the different sets of data.



Quelle: eigene Darstellung, UBA

Abbildung 127 from (Petrescu et al., 2021). shows the mean of the CO_2 data in the three decades (1990-1999, 2000-2009, 2010-2019) across individual sectors as well as the corresponding trend in each sector. Here we see that the energy related sectors contributed to a large extent to the reduction across the decades, whilst e.g. the transport sector decreased in CO_2 emissions by only a small portion. The large drop in the manufacturing industries may have been caused by closure of large manufacturing plants in the 1990s due to a restructuring of the industry which took part in Germany at that time. The growth in the 2000s in emissions in that sector shows the economic upsurge in this specific sector.

Abbildung 127: Fossil CO_2 emissions for Germany as mean over the three respective decades. Energy related emissions in Germany have dropped quite significantly between the decades, whilst transport related emissions decreased slower.



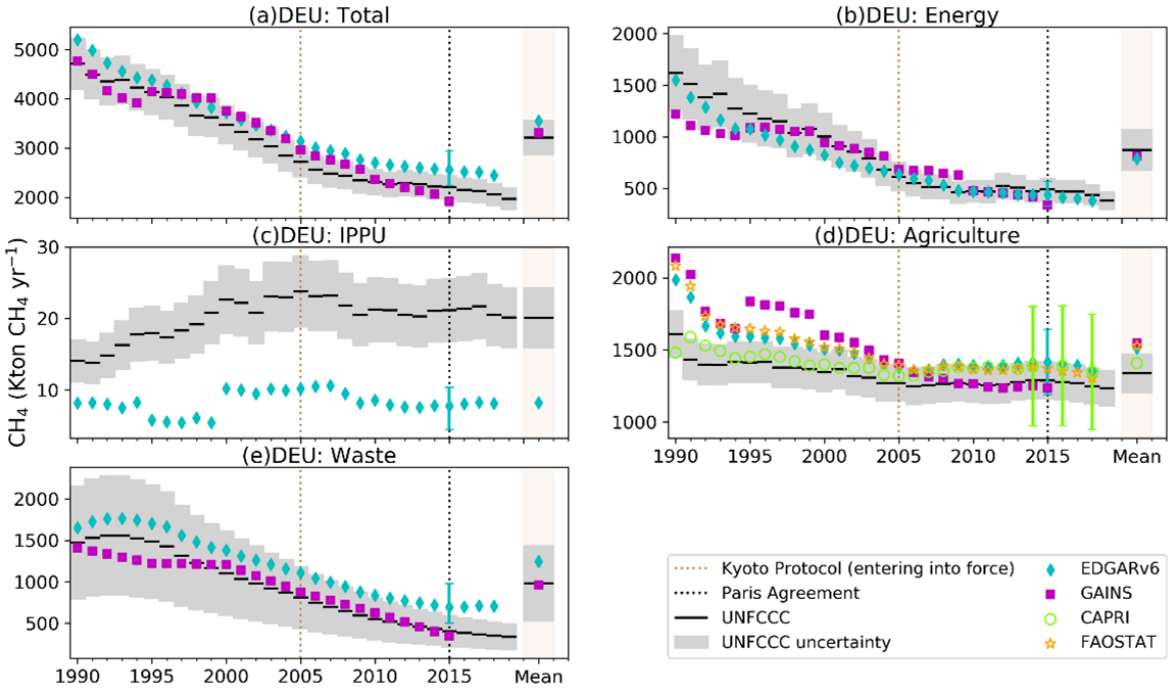
Quelle: eigene Darstellung, UBA

Anhang 5.1.6.3 Methane

The data presented here is part of VERIFYs methane data which has also been published by (Petrescu et al., 2021). Abbildung 128 shows anthropogenic methane in different sectors, compared to different bottom-up datasets. We see that the CH_4 total is in good agreement with the other bottom-up set of data, together with the energy, waste and agricultural sectors. Only the IPPU sector deviates slightly, which may be caused by methodological differences in the EDGAR data. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** shows the mean CH_4 emissions over the three decades (1990-1999, 2000-2009, 2010-2019) across individual sectors as well as the corresponding trend in each sector. We see that the energy and the waste sector have contributed substantially to the methane emission reductions, whilst agricultural emissions decreased only slowly. Abbildung 130 shows methane data from global inversions and from the GOSAT satellite. We see that the error bar for both methods is larger than from the reported UNFCCC emissions. However, both methods verify the trend of the reported UNFCCC data and envelope the reported UNFCCC methane data. Data from VERIFY for countries with lesser days of cloud cover, e.g. in southern Europe, show even better results for the top-down methane data, with smaller error bars, due to the higher availability of data from spaceborne sensors (Petrescu et al., 2021).

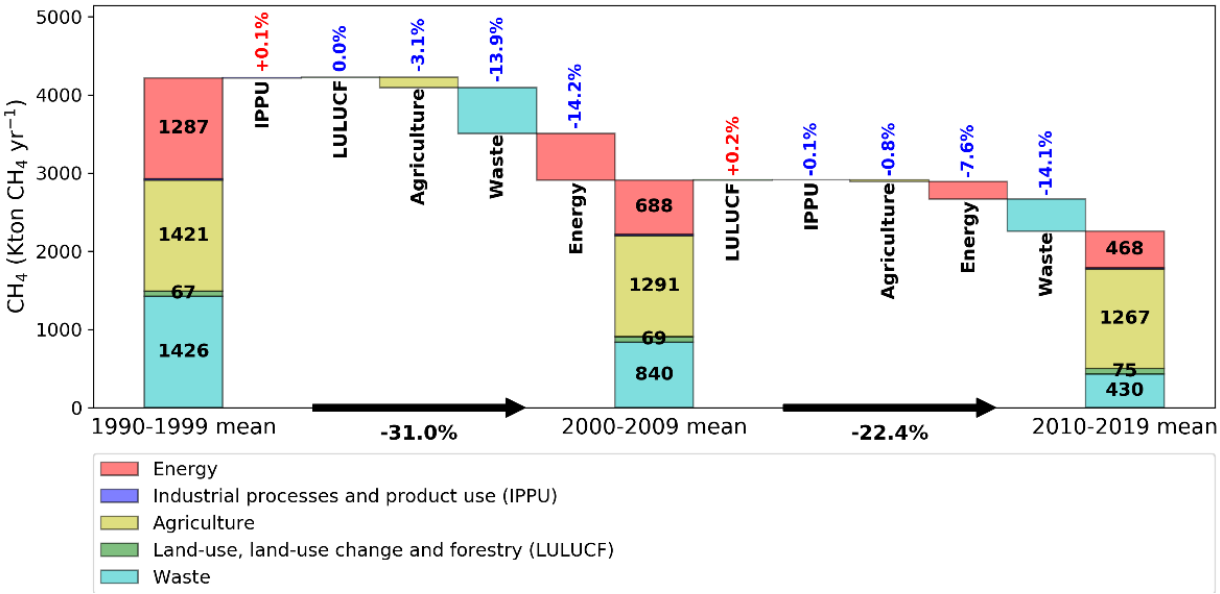
.

Abbildung 128: Anthropogenic CH_4 data for the reported UNFCCC data as well as selected bottom-up datasets



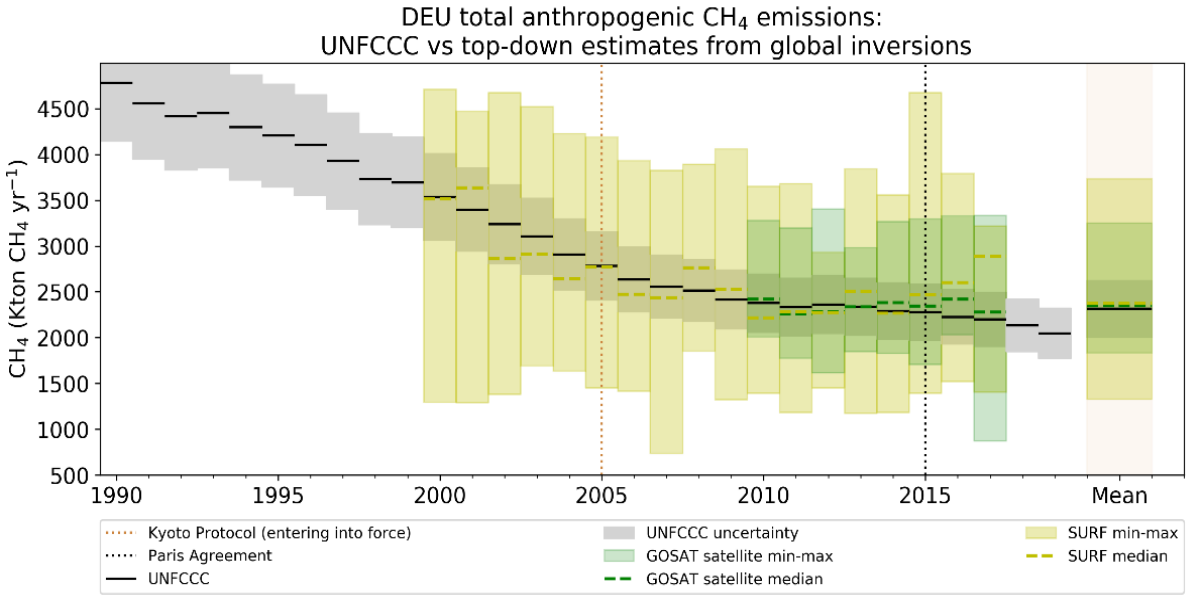
Quelle: eigene Darstellung, UBA

Abbildung 129: Trends in anthropogenic CH_4 data for the reported UNFCCC data over three decades



Quelle: eigene Darstellung, UBA

Abbildung 130: Top down anthropogenic CH_4 emissions from the GOSAT satellite as well as from global inversions

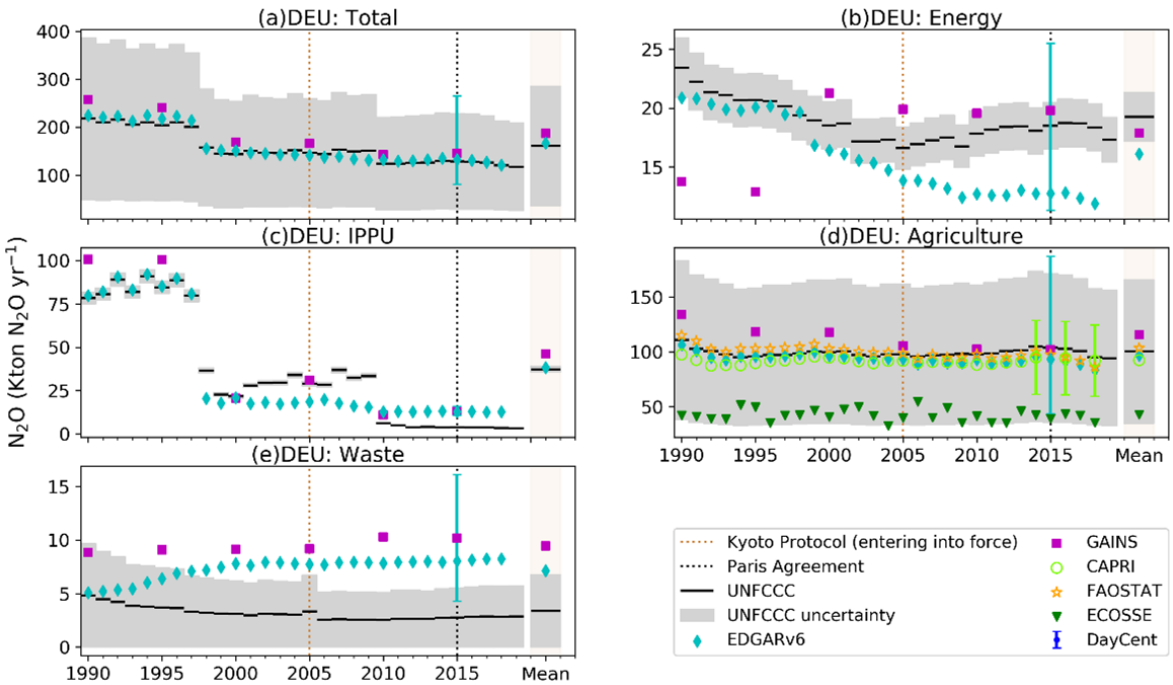


Quelle: eigene Darstellung, UBA

Anhang 5.1.6.4 N_2O

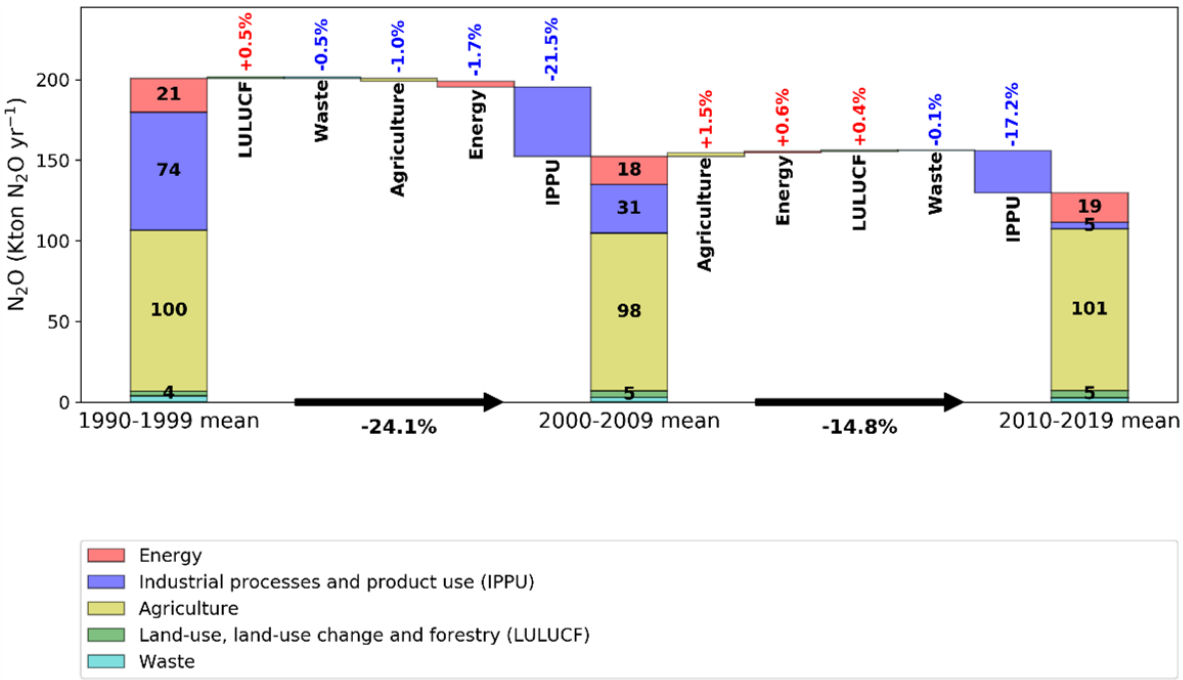
The N_2O data is also described in (Petrescu et al., 2021). Abbildung 131 shows the N_2O trend in the different sectors compared to the UNFCCC data. The trend as well as the magnitude of the N_2O data in the individual sectors fit quite well, given the large error bars in the different sectors, such as the agricultural and waste sector. The three decadal plot of Abbildung 132 shows that the largest cuts in emissions have been achieved by the IPPU sector, whilst energy, LULUCF and agriculture have seen a slight increase of N_2O in the last two decades.

Abbildung 131: Anthropogenic N2O data for the reported UNFCCC data as well as selected bottom-up datasets



Quelle: eigene Darstellung, UBA

Abbildung 132: Trends in N2O data for the reported UNFCCC data over three decades



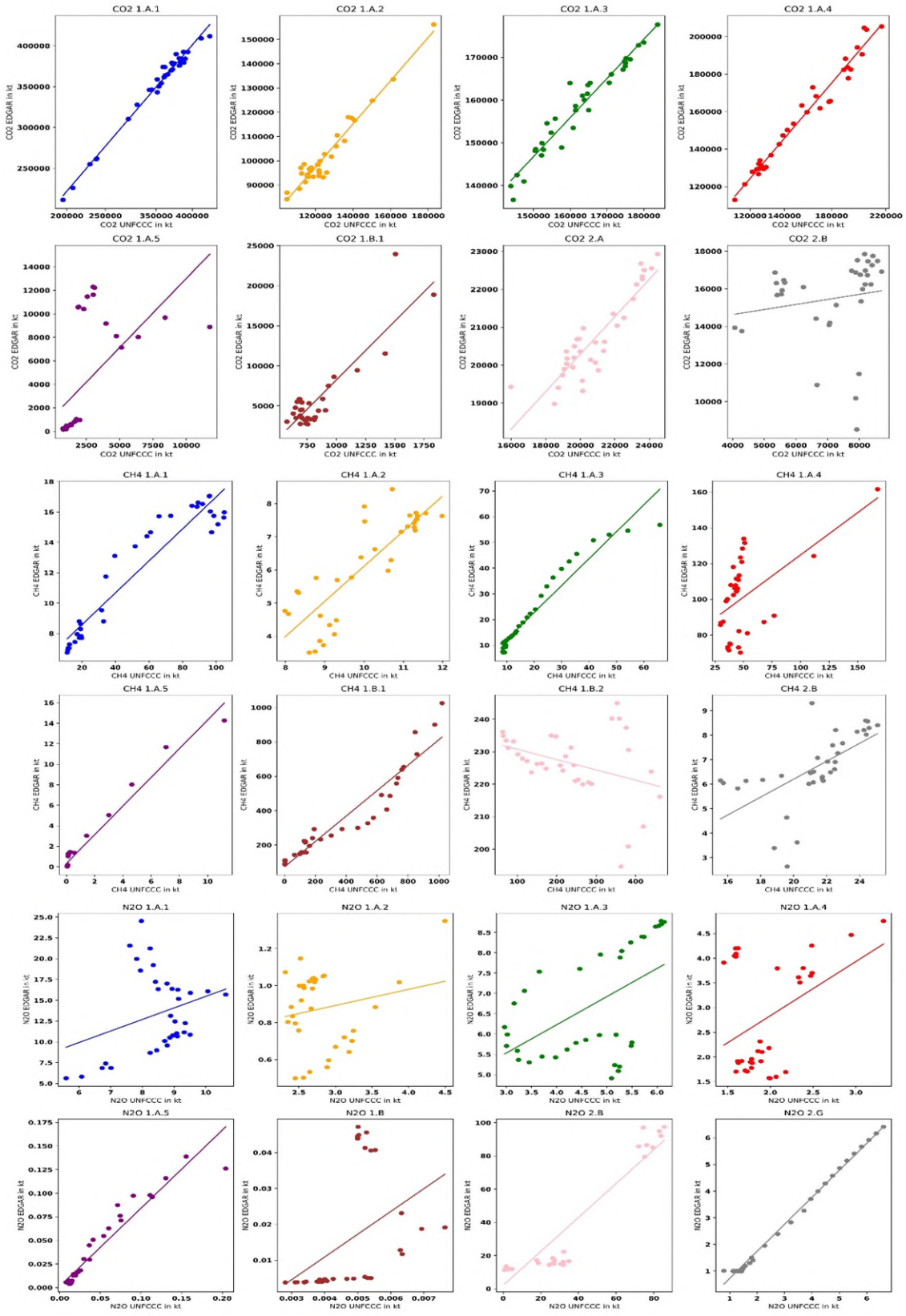
Quelle: eigene Darstellung, UBA

Anhang 5.1.7 Detailed sector time series analysis

Time series analysis of the Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR) in greater sector detail is shown in figure 133. EDGAR is one of the key sets of data which has been

recommended by the IPCC 2019 refinements on QA/QC & verification for GHG reporting by (IPCC, 2019). The data by (Crippa et al., 2022) of version 8 may be retrieved from the EDGAR project page: https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2023#intro. It is available as separate excel or ".csv" files from the JRC. All sector data for the three gases shown in Abbildung 133**.** illustrate that the trend between the EDGAR 8.0 data and the inventory data is very similar, as shown by the other, more, coarser sectoral VERIFY analysis above. The major emitting sectors are also in the same order of magnitude in the EDGAR 8.0 and the UNFCCC data. This shows that there is a high correlation between the two sets of data for all the three major greenhouse gases. Smaller deviations between the two sets of data may be due to country specific differences in the reporting (higher tier reporting in the national UNFCCC data due to an improved level of dis-aggregation and more complex models vs. more generic approaches) in case of EDGAR. The differences in the national sectoral data and the sectoral EDGAR data are more apparent in Tabelle 474. For CO_2 sectors 1.A.5, 2.B and 2.D significantly lower correlation values can be observed between the two data sets. This shows that that the Edgar data deviates significantly in the industry sectors 2B and 2D, due to different methodologies. Even higher deviations can be observed for methane in the sectors 1.A.4 and 1.B.2. The largest deviations may be found for N2O in the sectors 1.A.2, 1.A.4 and 1.B.

Abbildung 133: Sector comparison of reported trend data with EDGAR 8.0 data for Germany for the three major greenhouse gases (CO_2, CH_4 and N_2O) the line represents a least squares linear fit of the data



Quelle: eigene Darstellung, UBA

Tabelle 479: Sectoral Correlation Scores between Edgar 8.0 and Germanys 2023 sectoral CRF Data

CO_2		
Sector	**pearson**	**spearman**
1.A.1	0.992	0.9642
1.A.2	0.9723	0.799
1.A.3	0.9686	0.973
1.A.4	0.9864	0.977
1.A.5	0.587	0.889
1.B.1	0.881	0.361
2.A	0.895	0.836
2.B	0.159	0.512
2.C	0.797	0.714
2.D	0.677	0.41
CH_4		
Sector	**pearson**	**spearman**
1.A.1	0.951	0.893
1.A.2	0.8541	0.818
1.A.3	0.968	0.961
1.A.4	0.549	0.476
1.A.5	0.982	0.867
1.B.1	0.953	0.987
1.B.2	-0.356	-0.373
2.B	0.616	0.814
2.C	0.802	0.717
N_2O		
sector	**pearson**	**spearman**
1.A.1	0.304	0.15
1.A.2	0.19	-0.02
1.A.3	0.542	0.531
1.A.4	0.4144	0.086
1.A.5	0.958	0.942
1.B	0.424	0.802
2.B	0.9414	0.899
2.G	0.9974	0.91

Anhang 5.2 Zusatzinformationen zu den Trends der Treibhausgase

Hier finden Sie die detaillierten Tabellen zur Trenddiskussion der Kapitel ES.2 und 2.

Tabelle 480: Emissionsentwicklung in Deutschland, nach Treibhausgas, in Kilotonnen CO_2-äquivalent [kt CO_2-Äq.]

THG Emissionen/Senken	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
CO_2-Emissionen (ohne LULUCF)	1.054.796	1.016.930	969.465	959.385	943.227	939.933	959.689	931.507	923.498	895.441	898.974	915.254	898.833	899.538	883.451
Net CO_2 emissions/removals	1.081.618	982.470	946.420	918.884	922.548	926.712	929.776	914.224	899.780	875.424	897.408	882.469	883.287	902.516	887.461
CH_4 (ohne LULUCF)	133.690	127.417	123.512	124.408	119.596	116.975	113.908	108.703	102.921	101.719	97.140	93.016	88.315	84.315	77.523
CH_4 (mit LULUCF)	142.141	135.052	130.615	134.338	127.966	125.095	121.499	116.145	113.339	109.660	105.250	102.506	98.206	90.956	85.794
N_2O (ohne LULUCF)	52.317	50.155	52.618	49.679	52.541	50.473	51.385	49.133	37.625	34.134	34.177	35.351	36.016	33.663	36.264
N_2O (mit LULUCF)	53.539	51.395	53.870	50.834	53.731	51.656	52.598	50.349	38.758	35.327	35.363	36.486	37.133	34.909	37.436
F-Gase Summe	12.325	11.891	12.383	15.010	15.450	16.023	15.218	15.440	15.939	14.244	12.707	13.461	13.494	13.023	13.439
THG-Emissionen ohne LULUCF	1.253.128	1.206.392	1.157.977	1.148.483	1.130.814	1.123.404	1.140.200	1.104.783	1.079.983	1.045.538	1.042.998	1.057.082	1.036.658	1.030.539	1.010.676
THG-Emissionen / -Einbind. inkl. LULUCF	1.289.623	1.180.808	1.143.288	1.119.066	1.119.695	1.119.487	1.119.090	1.096.157	1.067.817	1.034.655	1.050.728	1.034.922	1.032.120	1.041.403	1.024.130
THG Emissionen/Senken	**2005**	**2006**	**2007**	**2008**	**2009**	**2010**	**2011**	**2012**	**2013**	**2014**	**2015**	**2016**	**2017**	**2018**	**2019**
CO_2-Emissionen (ohne LULUCF)	866.910	884.925	845.672	851.006	789.245	829.787	805.771	814.787	834.504	794.688	798.771	800.432	788.561	758.195	709.773
Net CO_2 emissions/removals	869.065	895.737	857.007	840.172	783.503	831.511	806.763	803.705	829.932	799.293	796.508	803.345	792.053	808.986	742.430
CH_4 (ohne LULUCF)	73.593	69.191	66.651	65.239	62.376	60.995	59.397	59.734	58.788	57.265	56.674	54.945	54.089	51.836	49.006
CH_4 (mit LULUCF)	81.554	76.353	76.039	72.712	69.783	69.454	67.724	67.476	66.711	64.862	64.371	62.333	63.333	58.099	56.367
N_2O (ohne LULUCF)	34.837	34.349	37.531	35.045	35.633	28.785	28.560	28.295	29.124	29.067	28.544	29.077	29.133	26.573	26.513
N_2O (mit LULUCF)	36.012	35.561	38.665	36.251	36.784	29.913	29.690	29.432	30.244	30.242	29.698	30.193	30.173	27.704	27.599
F-Gase Summe	13.608	13.533	13.657	13.636	14.031	13.683	13.888	14.129	14.195	14.213	14.617	14.576	14.497	13.531	12.708
THG-Emissionen ohne LULUCF	988.947	1.001.999	963.511	964.925	901.285	933.250	907.615	916.945	936.610	895.232	898.606	899.030	886.280	850.135	798.001
THG-Emissionen / -Einbind. inkl. LULUCF	1.000.238	1.021.185	985.369	962.771	904.101	944.562	918.064	914.742	941.082	908.609	905.194	910.446	900.056	908.320	839.104
THG Emissionen/Senken	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**										
CO_2-Emissionen (ohne LULUCF)	646.683	679.946	670.017	591.373	573.925										
Net CO_2 emissions/removals	686.158	715.588	719.867	654.005	622.132										
CH_4 (ohne LULUCF)	47.775	46.671	45.584	44.931	44.120										
CH_4 (mit LULUCF)	54.866	54.966	52.262	54.602	52.660										
N_2O (ohne LULUCF)	25.349	25.656	24.095	24.240	22.857										
N_2O (mit LULUCF)	26.429	26.668	25.166	25.207	23.949										
F-Gase Summe	11.165	10.499	9.571	9.035	8.867										
THG-Emissionen ohne LULUCF	730.972	762.773	749.266	669.578	649.770										
THG-Emissionen / -Einbind. inkl. LULUCF	778.619	807.721	806.865	742.849	707.608										

Tabelle 481: Emissionsentwicklung in Deutschland, nach Kategorie, in Kilotonnen CO_2-äquivalent [kt CO_2-Äq.]

THG Emissionen/Senken, nach Quell- und Senkengruppen	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
1. Energie	1.044.283	1.007.351	958.923	949.668	926.927	922.715	943.143	911.252	901.294	876.376	872.684	892.304	875.936	871.724	852.464
2. Industrieprozesse	93.216	89.549	89.529	90.792	96.316	94.745	92.862	93.448	80.994	73.414	76.592	73.067	71.521	74.145	75.911
3. Landwirtschaft	74.078	66.396	65.835	64.612	65.239	64.880	64.925	64.118	64.261	64.301	64.150	64.143	63.353	60.608	60.812
4. LULUCF	36.495	-25.584	-14.689	-29.417	-11.119	-3.917	-21.109	-8.625	-12.166	-10.883	7.730	-22.160	-4.538	10.864	13.454
CO_2	26.822	-34.459	-23.045	-40.502	-20.679	-13.220	-29.913	-17.283	-23.717	-20.017	-1.566	-32.785	-15.546	2.977	4.010
N_2O & CH_4	9.673	8.875	8.355	11.085	9.560	9.303	8.804	8.658	11.551	9.134	9.296	10.625	11.008	7.886	9.444
5. Abfall	41.550	43.096	43.691	43.411	42.332	41.065	39.270	35.964	33.433	31.447	29.572	27.569	25.848	24.062	21.489
THG Emissionen/Senken, nach Quell- und Senkengruppen	**2005**	**2006**	**2007**	**2008**	**2009**	**2010**	**2011**	**2012**	**2013**	**2014**	**2015**	**2016**	**2017**	**2018**	**2019**
1. Energie	835.758	851.450	810.157	818.205	763.434	799.058	773.097	785.887	804.967	763.159	768.670	767.800	751.784	722.043	673.699
2. Industrieprozesse	72.752	73.058	76.226	72.060	64.086	61.850	63.278	60.491	60.399	60.700	59.880	61.452	65.281	62.235	59.062
3. Landwirtschaft	60.606	59.732	60.892	59.821	60.319	60.150	59.930	60.084	61.557	62.310	61.612	61.874	61.689	58.725	58.634
4. LULUCF	11.290	19.186	21.858	-2.155	2.816	11.312	10.449	-2.203	4.471	13.377	6.589	11.416	13.776	58.185	41.103
CO_2	2.155	10.812	11.335	-10.835	-5.742	1.724	992	-11.082	-4.573	4.605	-2.262	2.913	3.492	50.791	32.656
N_2O & CH_4	9.136	8.374	10.523	8.680	8.558	9.588	9.456	8.879	9.044	8.772	8.851	8.503	10.284	7.394	8.447
5. Abfall	19.831	17.758	16.237	14.839	13.445	12.192	11.309	10.483	9.688	9.062	8.443	7.904	7.526	7.131	6.606
THG Emissionen/Senken, nach Quell- und Senkengruppen	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**										
1. Energie	612.720	643.676	637.851	561.904	543.295										
2. Industrieprozesse	54.933	56.827	51.446	47.022	47.889										
3. Landwirtschaft	57.201	56.360	54.320	55.203	53.308										
4. LULUCF	47.646	44.949	57.599	73.271	57.839										
CO_2	39.475	35.642	49.850	62.632	48.207										
N_2O & CH_4	8.171	9.307	7.749	10.638	9.632										
5. Abfall	6.118	5.909	5.650	5.449	5.277										

Tabelle 482: Anteile an der Emissionsentwicklung in Deutschland, nach Treibhausgas und Kategorie, in Prozent [%]

Anteile Treibhausgase*	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
CO_2–Emissionen*	84,2	84,3	83,7	83,5	83,4	83,7	84,2	84,3	85,5	85,6	86,2	86,6	86,7	87,3	87,4	87,7	88,3	87,8	88,2	87,6
CH_4*	10,7	10,6	10,7	10,8	10,6	10,4	10,0	9,8	9,5	9,7	9,3	8,8	8,5	8,2	7,7	7,4	6,9	6,9	6,8	6,9
N_2O*	4,2	4,2	4,5	4,3	4,6	4,5	4,5	4,4	3,5	3,3	3,3	3,3	3,5	3,3	3,6	3,5	3,4	3,9	3,6	4,0
F-Gase Summe	1,0	1,0	1,1	1,3	1,4	1,4	1,3	1,4	1,5	1,4	1,2	1,3	1,3	1,3	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4	1,6
Summe	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Anteile Treibhausgase*	**2010**	**2011**	**2012**	**2013**	**2014**	**2015**	**2016**	**2017**	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**					
CO_2–Emissionen*	88,9	88,8	88,9	89,1	88,8	88,9	89,0	89,0	89,2	88,9	88,5	89,1	89,4	88,3	88,3					
CH_4*	6,5	6,5	6,5	6,3	6,4	6,3	6,1	6,1	6,1	6,1	6,5	6,1	6,1	6,7	6,8					
N_2O*	3,1	3,1	3,1	3,1	3,2	3,2	3,2	3,3	3,1	3,3	3,5	3,4	3,2	3,6	3,5					
F-Gase Summe	1,5	1,5	1,5	1,5	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,5	1,4	1,3	1,3	1,4					
Summe	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	101					
Anteile Kategorien*	**1990**	**1991**	**1992**	**1993**	**1994**	**1995**	**1996**	**1997**	**1998**	**1999**	**2000**	**2001**	**2002**	**2003**	**2004**	**2005**	**2006**	**2007**	**2008**	**2009**
1. Energie	83,3	83,5	82,8	82,7	82,0	82,1	82,7	82,5	83,5	83,8	83,7	84,4	84,5	84,6	84,3	84,5	85,0	84,1	84,8	84,7
2. Industrieprozesse	7,4	7,4	7,7	7,9	8,5	8,4	8,1	8,5	7,5	7,0	7,3	6,9	6,9	7,2	7,5	7,4	7,3	7,9	7,5	7,1
4. Landwirtschaft	5,9	5,5	5,7	5,6	5,8	5,8	5,7	5,8	6,0	6,2	6,2	6,1	6,1	5,9	6,0	6,1	6,0	6,3	6,2	6,7
5. Abfall	3,3	3,6	3,8	3,8	3,7	3,7	3,4	3,3	3,1	3,0	2,8	2,6	2,5	2,3	2,1	2,0	1,8	1,7	1,5	1,5
Summe	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Anteile Kategorien*	**2010**	**2011**	**2012**	**2013**	**2014**	**2015**	**2016**	**2017**	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**					
1. Energie	85,6	85,2	85,7	85,9	85,2	85,5	85,4	84,8	84,9	84,4	83,8	84,4	85,1	83,9	83,6					
2. Industrieprozesse	6,6	7,0	6,6	6,4	6,8	6,7	6,8	7,4	7,3	7,4	7,5	7,5	6,9	7,0	7,4					
4. Landwirtschaft	6,4	6,6	6,6	6,6	7,0	6,9	6,9	7,0	6,9	7,3	7,8	7,4	7,2	8,2	8,2					
5. Abfall	1,3	1,2	1,1	1,0	1,0	0,9	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8					
Summe	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100					

* ohne Emissionen aus Landnutzung, Landnutzungsänderung & Forstwirtschaft (LULUCF)

Tabelle 483: Emissionen von direkten und indirekten Treibhausgasen und SO_2 in Deutschland seit 1990

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
CO_2-Emissionen (ohne LULUCF)	1.054.796	1.016.930	969.465	959.385	943.227	939.933	959.689	931.507	923.498	895.441	898.974	915.254	898.833	899.538	883.451
Netto-CO_2-Emissionen/ -Einbindungen	1.081.618	982.470	946.420	918.884	922.548	926.712	929.776	914.224	899.780	875.424	897.408	882.469	883.287	902.516	887.461
CH_4 (ohne LULUCF)	4.775	4.551	4.411	4.443	4.271	4.178	4.068	3.882	3.676	3.633	3.469	3.322	3.154	3.011	2.769
CH_4 (mit LULUCF)	5.076	4.823	4.665	4.798	4.570	4.468	4.339	4.148	4.048	3.916	3.759	3.661	3.507	3.248	3.064
N_2O (ohne LULUCF)	197	189	199	187	198	190	194	185	142	129	129	133	136	127	137
N_2O (mit LULUCF)	202	194	203	192	203	195	198	190	146	133	133	138	140	132	141
F-Gase Summe (CO_2-äquivalent)	12.325	11.891	12.383	15.010	15.450	16.023	15.218	15.440	15.939	14.244	12.707	13.461	13.494	13.023	13.439
NO_X	2.850	2.622	2.466	2.363	2.233	2.173	2.090	2.014	1.984	1.948	1.871	1.816	1.757	1.714	1.670
SO_2	5.461	3.965	3.237	2.902	2.416	1.743	1.476	1.226	978	798	643	622	559	528	486
NMVOC	3.942	3.419	3.095	2.905	2.493	2.361	2.262	2.202	2.144	1.980	1.813	1.719	1.626	1.548	1.543
CO	13.319	11.048	9.532	8.623	7.590	7.187	6.615	6.368	5.852	5.435	5.096	4.898	4.597	4.256	4.048
	2005	**2006**	**2007**	**2008**	**2009**	**2010**	**2011**	**2012**	**2013**	**2014**	**2015**	**2016**	**2017**	**2018**	**2019**
CO_2-Emissionen (ohne LULUCF)	866.910	884.925	845.672	851.006	789.245	829.787	805.771	814.787	834.504	794.688	798.771	800.432	788.561	758.195	709.773
Netto-CO_2-Emissionen/ -Einbindungen	869.065	895.737	857.007	840.172	783.503	831.511	806.763	803.705	829.932	799.293	796.508	803.345	792.053	808.986	742.430
CH_4 (ohne LULUCF)	2.628	2.471	2.380	2.330	2.228	2.178	2.121	2.133	2.100	2.045	2.024	1.962	1.932	1.851	1.750
CH_4 (mit LULUCF)	2.913	2.727	2.716	2.597	2.492	2.481	2.419	2.410	2.383	2.316	2.299	2.226	2.262	2.075	2.013
N_2O (ohne LULUCF)	131	130	142	132	134	109	108	107	110	110	108	110	110	100	100
N_2O (mit LULUCF)	136	134	146	137	139	113	112	111	114	114	112	114	114	105	104
F-Gase Summe (CO_2-äquivalent)	13.608	13.533	13.657	13.636	14.031	13.683	13.888	14.129	14.195	14.213	14.617	14.576	14.497	13.531	12.708
NO_X	1.634	1.681	1.593	1.543	1.452	1.468	1.445	1.447	1.448	1.406	1.381	1.343	1.286	1.201	1.115
SO_2	468	470	447	444	389	397	374	371	361	337	341	316	307	294	258
NMVOC	1.497	1.500	1.428	1.366	1.247	1.367	1.273	1.259	1.213	1.174	1.140	1.134	1.137	1.091	1.062
CO	3.825	3.827	3.702	3.661	3.128	3.461	3.333	3.246	3.224	3.058	3.033	2.923	2.938	2.838	2.751
	2020	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**										
CO_2-Emissionen (ohne LULUCF)	646.683	679.946	670.017	591.373	573.925										
Netto-CO_2-Emissionen/ -Einbindungen	686.158	715.588	719.867	654.005	622.132										
CH_4 (ohne LULUCF)	1.706	1.667	1.628	1.605	1.576										
CH_4 (mit LULUCF)	1.960	1.963	1.866	1.950	1.881										
N_2O (ohne LULUCF)	96	97	91	91	86										
N_2O (mit LULUCF)	100	101	95	95	90										
F-Gase Summe (CO_2-äquivalent)	11.165	10.499	9.571	9.035	8.867										
NO_X	983	969	928	841	809										
SO_2	239	249	247	210	199										
NMVOC	1.032	1.052	1.044	968	953										
CO	2.428	2.551	2.507	2.340	2.322										

Tabelle 484: Veränderungen der Emissionen direkter und indirekter Treibhausgase und SO_2 in Deutschland seit 1990/1995

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
CO_2-Emissionen (ohne LULUCF)		-3,6	-8,1	-9,0	-10,6	-10,9	-9,0	-11,7	-12,4	-15,1	-14,8	-13,2	-14,8	-14,7	-16,2
Netto-CO_2-Emissionen/ -Einbindungen		-9,2	-12,5	-15,0	-14,7	-14,3	-14,0	-15,5	-16,8	-19,1	-17,0	-18,4	-18,3	-16,6	-18,0
CH_4 (ohne LULUCF)		-4,7	-7,6	-6,9	-10,5	-12,5	-14,8	-18,7	-23,0	-23,9	-27,3	-30,4	-33,9	-36,9	-42,0
N_2O (ohne LULUCF)		-4,1	0,6	-5,0	0,4	-3,5	-1,8	-6,1	-28,1	-34,8	-34,7	-32,4	-31,2	-35,7	-30,7
F-Gase Summe		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-5,0	-3,6	-0,5	-11,1	-20,7	-16,0	-15,8	-18,7	-16,1
Gesamt-Emissionen ohne LULUCF		-3,7	-7,6	-8,4	-9,8	-10,4	-9,0	-11,8	-13,8	-16,6	-16,8	-15,6	-17,3	-17,8	-19,3
Gesamt-Emissionen / -Einbindungen inkl. LULUCF		-8,4	-11,3	-13,2	-13,2	-13,2	-13,2	-15,0	-17,2	-19,8	-18,5	-19,8	-20,0	-19,2	-20,6
Gesamt-Emissionen ohne LULUCF, ggü. Basisjahr*		-4,0	-7,9	-8,6	-10,0	-10,6	-9,3	-12,1	-14,1	-16,8	-17,0	-15,9	-17,5	-18,0	-19,6
NO_X		-8,0	-13,5	-17,1	-21,6	-23,7	-26,7	-29,3	-30,4	-31,6	-34,3	-36,3	-38,3	-39,9	-41,4
SO_2		-27,4	-40,7	-46,9	-55,8	-68,1	-73,0	-77,6	-82,1	-85,4	-88,2	-88,6	-89,8	-90,3	-91,1
NMVOC		-13,3	-21,5	-26,3	-36,8	-40,1	-42,6	-44,1	-45,6	-49,8	-54,0	-56,4	-58,7	-60,7	-60,8
CO		-17,1	-28,4	-35,3	-43,0	-46,0	-50,3	-52,2	-56,1	-59,2	-61,7	-63,2	-65,5	-68,0	-69,6
	2005	**2006**	**2007**	**2008**	**2009**	**2010**	**2011**	**2012**	**2013**	**2014**	**2015**	**2016**	**2017**	**2018**	**2019**
CO_2-Emissionen (ohne LULUCF)	-17,8	-16,1	-19,8	-19,3	-25,2	-21,3	-23,6	-22,8	-20,9	-24,7	-24,3	-24,1	-25,2	-28,1	-32,7
Netto-CO_2-Emissionen/ -Einbindungen	-19,7	-17,2	-20,8	-22,3	-27,6	-23,1	-25,4	-25,7	-23,3	-26,1	-26,4	-25,7	-26,8	-25,2	-31,4
CH_4 (ohne LULUCF)	-45,0	-48,2	-50,1	-51,2	-53,3	-54,4	-55,6	-55,3	-56,0	-57,2	-57,6	-58,9	-59,5	-61,2	-63,3
N_2O (ohne LULUCF)	-33,4	-34,3	-28,3	-33,0	-31,9	-45,0	-45,4	-45,9	-44,3	-44,4	-45,4	-44,4	-44,3	-49,2	-49,3
F-Gase Summe	-15,1	-15,5	-14,8	-14,9	-12,4	-14,6	-13,3	-11,8	-11,4	-11,3	-8,8	-9,0	-9,5	-15,6	-20,7
Gesamt-Emissionen ohne LULUCF	-21,1	-20,0	-23,1	-23,0	-28,1	-25,5	-27,6	-26,8	-25,3	-28,6	-28,3	-28,3	-29,3	-32,2	-36,3
Gesamt-Emissionen / -Einbindungen inkl. LULUCF	-22,4	-20,8	-23,6	-25,3	-29,9	-26,8	-28,8	-29,1	-27,0	-29,5	-29,8	-29,4	-30,2	-29,6	-34,9
Gesamt-Emissionen ohne LULUCF, ggü. Basisjahr*	-21,3	-20,3	-23,3	-23,2	-28,3	-25,7	-27,8	-27,0	-25,5	-28,8	-28,5	-28,5	-29,5	-32,4	-36,5
NO_X	-42,6	-41,0	-44,1	-45,8	-49,0	-48,5	-49,3	-49,2	-49,2	-50,7	-51,5	-52,9	-54,9	-57,8	-60,9
SO_2	-91,4	-91,4	-91,8	-91,9	-92,9	-92,7	-93,1	-93,2	-93,4	-93,8	-93,8	-94,2	-94,4	-94,6	-95,3
NMVOC	-62,0	-62,0	-63,8	-65,3	-68,4	-65,3	-67,7	-68,0	-69,2	-70,2	-71,1	-71,2	-71,2	-72,3	-73,0
CO	-71,3	-71,3	-72,2	-72,5	-76,5	-74,0	-75,0	-75,6	-75,8	-77,0	-77,2	-78,1	-77,9	-78,7	-79,3
	2020	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**										
CO_2-Emissionen (ohne LULUCF)	-38,7	-35,5	-36,5	-43,9	-45,6										
Netto-CO_2-Emissionen/ -Einbindungen	-36,6	-33,8	-33,4	-39,5	-42,5										
CH_4 (ohne LULUCF)	-64,3	-65,1	-65,9	-66,4	-67,0										
N_2O (ohne LULUCF)	-51,5	-51,0	-53,9	-53,7	-56,3										
F-Gase Summe	-30,3	-34,5	-40,3	-43,6	-44,7										
Gesamt-Emissionen ohne LULUCF	-41,7	-39,1	-40,2	-46,6	-48,1										
Gesamt-Emissionen / -Einbindungen inkl. LULUCF	-39,6	-37,4	-37,4	-42,4	-45,1										
Gesamt-Emissionen ohne LULUCF, ggü. Basisjahr*	-41,8	-39,3	-40,4	-46,7	-48,3										
NO_X	-65,5	-66,0	-67,4	-70,5	-71,6										
SO_2	-95,6	-95,4	-95,5	-96,1	-96,4										
NMVOC	-73,8	-73,3	-73,5	-75,4	-75,8										
CO	-81,8	-80,8	-81,2	-82,4	-82,6										

* Basisjahr für CO_2, CH_4 & N_2O ist das Jahr 1990, für HFC, PFC, SF_6 & NF_3 das Jahr 1995

Tabelle 485: Veränderungen der Emissionen direkter und indirekter Treibhausgase und SO_2 in Deutschland, seit dem jeweiligen Vorjahr, in Prozent [%]

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
CO_2-Emissionen (ohne LULUCF)		-3,6	-4,7	-1,0	-1,7	-0,3	2,1	-2,9	-0,9	-3,0	0,4	1,8	-1,8	0,1	-1,8
Netto-CO_2-Emissionen/ -Einbindungen		-9,2	-3,7	-2,9	0,4	0,5	0,3	-1,7	-1,6	-2,7	2,5	-1,7	0,1	2,2	-1,7
CH_4 (ohne LULUCF)		-4,7	-3,1	0,7	-3,9	-2,2	-2,6	-4,6	-5,3	-1,2	-4,5	-4,2	-5,1	-4,5	-8,1
N_2O (ohne LULUCF)		-4,1	4,9	-5,6	5,8	-3,9	1,8	-4,4	-23,4	-9,3	0,1	3,4	1,9	-6,5	7,7
F-Gase Summe							-5,0	1,5	3,2	-10,6	-10,8	5,9	0,2	-3,5	3,2
Gesamt-Emissionen ohne LULUCF		-3,7	-4,0	-0,8	-1,5	-0,7	1,5	-3,1	-2,2	-3,2	-0,2	1,4	-1,9	-0,6	-1,9
Gesamt-Emissionen / -Einbindungen inkl. LULUCF		-8,4	-3,2	-2,1	0,1	0,0	0,0	-2,0	-2,6	-3,1	1,6	-1,5	-0,3	0,9	-1,7
NO_X		-8,0	-5,9	-4,2	-5,5	-2,7	-3,9	-3,6	-1,5	-1,8	-4,0	-2,9	-3,2	-2,5	-2,5
SO_2		-27,4	-18,4	-10,3	-16,7	-27,9	-15,3	-17,0	-20,2	-18,4	-19,4	-3,2	-10,1	-5,5	-8,0
NMVOC		-13,3	-9,5	-6,1	-14,2	-5,3	-4,2	-2,7	-2,6	-7,6	-8,5	-5,2	-5,4	-4,8	-0,3
CO		-17,1	-13,7	-9,5	-12,0	-5,3	-8,0	-3,7	-8,1	-7,1	-6,2	-3,9	-6,1	-7,4	-4,9
	2005	**2006**	**2007**	**2008**	**2009**	**2010**	**2011**	**2012**	**2013**	**2014**	**2015**	**2016**	**2017**	**2018**	**2019**
CO_2-Emissionen (ohne LULUCF)	-1,9	2,1	-4,4	0,6	-7,3	5,1	-2,9	1,1	2,4	-4,8	0,5	0,2	-1,5	-3,9	-6,4
Netto-CO_2-Emissionen/ -Einbindungen	-2,1	3,1	-4,3	-2,0	-6,7	6,1	-3,0	-0,4	3,3	-3,7	-0,3	0,9	-1,4	2,1	-8,2
CH_4 (ohne LULUCF)	-5,1	-6,0	-3,7	-2,1	-4,4	-2,2	-2,6	0,6	-1,6	-2,6	-1,0	-3,1	-1,6	-4,2	-5,5
N_2O (ohne LULUCF)	-3,9	-1,4	9,3	-6,6	1,7	-19,2	-0,8	-0,9	2,9	-0,2	-1,8	1,9	0,2	-8,8	-0,2
F-Gase Summe	1,3	-0,5	0,9	-0,2	2,9	-2,5	1,5	1,7	0,5	0,1	2,8	-0,3	-0,5	-6,7	-6,1
Gesamt-Emissionen ohne LULUCF	-2,1	1,3	-3,8	0,1	-6,6	3,5	-2,7	1,0	2,1	-4,4	0,4	0,0	-1,4	-4,1	-6,1
Gesamt-Emissionen / -Einbindungen inkl. LULUCF	-2,3	2,1	-3,5	-2,3	-6,1	4,5	-2,8	-0,4	2,9	-3,5	-0,4	0,6	-1,1	0,9	-7,6
NO_X	-2,2	+2,8	-5,2	-3,1	-5,9	+1,1	-1,6	+0,1	+0,1	-2,9	-1,8	-2,7	-4,3	-6,6	-7,2
SO_2	-3,8	0,4	-4,9	-0,7	-12,3	2,1	-5,8	-0,8	-2,7	-6,8	1,2	-7,2	-2,8	-4,5	-12,2
NMVOC	-3,0	0,2	-4,8	-4,4	-8,7	9,5	-6,9	-1,1	-3,7	-3,2	-2,9	-0,5	0,3	-4,1	-2,6
CO	-5,5	+0,1	-3,3	-1,1	-14,6	+10,6	-3,7	-2,6	-0,7	-5,1	-0,8	-3,6	+0,5	-3,4	-3,0
	2020	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**										
CO_2-Emissionen (ohne LULUCF)	-8,9	5,1	-1,5	-11,7	-3,0										
Netto-CO_2-Emissionen/ -Einbindungen	-7,6	4,3	0,6	-9,1	-4,9										
CH_4 (ohne LULUCF)	-2,5	-2,3	-2,3	-1,4	-1,8										
N_2O (ohne LULUCF)	-4,4	1,2	-6,1	0,6	-5,7										
F-Gase Summe	-12,1	-6,0	-8,8	-5,6	-1,9										
Gesamt-Emissionen ohne LULUCF	-8,4	4,4	-1,8	-10,6	-3,0										
Gesamt-Emissionen / -Einbindungen inkl. LULUCF	-7,2	3,7	-0,1	-7,9	-4,7										
NO_X	-11,8	-1,5	-4,2	-9,4	-3,8										
SO_2	-7,3	4,2	-0,9	-14,8	-5,3										
NMVOC	-2,8	1,9	-0,7	-7,3	-1,6										
CO	-11,8	+5,1	-1,7	-6,7	-0,8										

Tabelle 486: Veränderungen der Emissionen in Deutschland nach Kategorien, seit 1990 / seit dem jeweils letzten Jahr, in Prozent [%]

gegenüber 1990	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
1. Energie		-3,5%	-8,2%	-9,1%	-11,2%	-11,6%	-9,7%	-12,7%	-13,7%	-16,1%	-16,4%	-14,6%	-16,1%	-16,5%	-18,4%	-20,0%	-18,5%	-22,4%	-21,6%	-26,9%
2. Industrieprozesse		-3,9%	-4,0%	-2,6%	3,3%	1,6%	-0,4%	0,2%	-13,1%	-21,2%	-17,8%	-21,6%	-23,3%	-20,5%	-18,6%	-22,0%	-21,6%	-18,2%	-22,7%	-31,3%
3. Landwirtschaft		-10,4%	-11,1%	-12,8%	-11,9%	-12,4%	-12,4%	-13,4%	-13,3%	-13,2%	-13,4%	-13,4%	-14,5%	-18,2%	-17,9%	-18,2%	-19,4%	-17,8%	-19,2%	-18,6%
5. Abfall		3,7%	5,2%	4,5%	1,9%	-1,2%	-5,5%	-13,4%	-19,5%	-24,3%	-28,8%	-33,6%	-37,8%	-42,1%	-48,3%	-52,3%	-57,3%	-60,9%	-64,3%	-67,6%
gegenüber 1990	**2010**	**2011**	**2012**	**2013**	**2014**	**2015**	**2016**	**2017**	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**					
1. Energie	-23,5%	-26,0%	-24,7%	-22,9%	-26,9%	-26,4%	-26,5%	-28,0%	-30,9%	-35,5%	-41,3%	-38,4%	-38,9%	-46,2%	-48,0%					
2. Industrieprozesse	-33,6%	-32,1%	-35,1%	-35,2%	-34,9%	-35,8%	-34,1%	-30,0%	-33,2%	-36,6%	-41,1%	-39,0%	-44,8%	-49,6%	-48,6%					
3. Landwirtschaft	-18,8%	-19,1%	-18,9%	-16,9%	-15,9%	-16,8%	-16,5%	-16,7%	-20,7%	-20,8%	-22,8%	-23,9%	-26,7%	-25,5%	-28,0%					
5. Abfall	-70,7%	-72,8%	-74,8%	-76,7%	-78,2%	-79,7%	-81,0%	-81,9%	-82,8%	-84,1%	-85,3%	-85,8%	-86,4%	-86,9%	-87,3%					
ggü dem Vorjahr	**1990**	**1991**	**1992**	**1993**	**1994**	**1995**	**1996**	**1997**	**1998**	**1999**	**2000**	**2001**	**2002**	**2003**	**2004**	**2005**	**2006**	**2007**	**2008**	**2009**
1. Energie		-3,5%	-4,8%	-1,0%	-2,4%	-0,5%	2,2%	-3,4%	-1,1%	-2,8%	-0,4%	2,2%	-1,8%	-0,5%	-2,2%	-2,0%	1,9%	-4,8%	1,0%	-6,7%
2. Industrieprozesse		-3,9%	0,0%	1,4%	6,1%	-1,6%	-2,0%	0,6%	-13,3%	-9,4%	4,3%	-4,6%	-2,1%	3,7%	2,4%	-4,2%	0,4%	4,3%	-5,5%	-11,1%
3. Landwirtschaft		-10,4%	-0,8%	-1,9%	1,0%	-0,6%	0,1%	-1,2%	0,2%	0,1%	-0,2%	0,0%	-1,2%	-4,3%	0,3%	-0,3%	-1,4%	1,9%	-1,8%	0,8%
5. Abfall		3,7%	1,4%	-0,6%	-2,5%	-3,0%	-4,4%	-8,4%	-7,0%	-5,9%	-6,0%	-6,8%	-6,2%	-6,9%	-10,7%	-7,7%	-10,5%	-8,6%	-8,6%	-9,4%
ggü dem Vorjahr	**2010**	**2011**	**2012**	**2013**	**2014**	**2015**	**2016**	**2017**	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**	**2024**					
1. Energie	4,7%	-3,2%	1,7%	2,4%	-5,2%	0,7%	-0,1%	-2,1%	-4,0%	-6,7%	-9,1%	5,1%	-0,9%	-11,9%	-3,3%					
2. Industrieprozesse	-3,5%	2,3%	-4,4%	-0,2%	0,5%	-1,4%	2,6%	6,2%	-4,7%	-5,1%	-7,0%	3,4%	-9,5%	-8,6%	1,8%					
3. Landwirtschaft	-0,3%	-0,4%	0,3%	2,5%	1,2%	-1,1%	0,4%	-0,3%	-4,8%	-0,2%	-2,4%	-1,5%	-3,6%	1,6%	-3,4%					
5. Abfall	-9,3%	-7,2%	-7,3%	-7,6%	-6,5%	-6,8%	-6,4%	-4,8%	-5,2%	-7,4%	-7,4%	-3,4%	-4,4%	-3,5%	-3,2%					

Anhang 5.3 Rückrechnungen: detaillierte Betrachtung auf Grundlage von CRT Table 8

Hier sei ausdrücklich auf die parallel zu diesem Bericht veröffentlichten CRF-Tabellen verwiesen.

Auf eine Überführung der konkreten Tabelleninhalte in den NID wird aus Platzgründen und zur Vermeidung von Redundanzen aber generell verzichtet.

Anhang 6 Detaillierte Erläuterung der Methoden und Daten zur Berechnung von CO_2 Emissionen aus der Verbrennung von Brennstoffen

Anhang 6.1 Die Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland

Basis für die Ermittlung energiebedingter Emissionen ist die Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland, die von der AG Energiebilanzen (AGEB) im Auftrag des BMWE erstellt wird. Die wichtigste Datenquelle für die Energiebilanz ist das Statistische Bundesamt. Die verwendeten Erhebungen des Statistischen Bundesamts (StBA) sind in der Tabelle 484 aufgelistet. Daten zu den erneuerbaren Energieträgern werden von der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) unter Federführung des Umweltbundesamtes ermittelt und für die Energiebilanzen unmittelbar durch die AGEB übernommen. Dies schließt auch vorläufige Daten zu erneuerbaren Energieträgern mit ein, die in die Schätzbilanz und in die Auswertungstabellen einfließen.

Schließlich ergänzen Daten der Verbände der deutschen Energiewirtschaft und Forschungsinstitute die o.g. Datenquellen. In die endgültige Energiebilanz fließen Daten der Verbände Deutsches Atomforum und Deutscher Braunkohlen-Industrie-Verein (DEBRIV) sowie Daten des Bundesverbands der Energie- und Wasserwirtschaft, des Gesamtverbands Steinkohle (GVSt) und des Wirtschaftsverbands Fuels und Energie (en2x) ein. Daneben werden in der Bundesrepublik Deutschland von zahlreichen anderen Stellen energiestatistische Daten veröffentlicht, die zum Teil eine unterschiedliche Darstellung, Abgrenzung bzw. Methodik und Aggregation aufweisen.

Die vollständigen Energiebilanzen für die Jahre ab 1990 werden auf der Webseite der AGEB bereitgestellt. (AGEB, 2025b)

Auf der Internetseite der AGEB ist auch ein Vorwort zu den Energiebilanzen veröffentlicht (AGEB, 2015), in dem Erläuterungen zur Struktur der Energiebilanz gegeben werden.

Die Gesamtverantwortung für die Erstellung der Energiebilanzen obliegt der AGEB.

Über die letzten Jahre gab es erhebliche Bemühungen der deutschen Energiestatistik-Experten, die Differenzen zwischen der vorläufigen und endgültigen Energiebilanz zu minimieren. Im Jahr 2020 konnte das Statistische Bundesamt erfolgreich einen EU-Grant: „improvement of timeliness of energy statistics“ von EUROSTAT einwerben, der im Rahmen eines Projekts die Datenbereitstellung für das Jahr x-1 durch das Statistische Bundesamt an die AGEB bereits im August ermöglichen sollte. Das Projekt wurde 2020 begonnen und umfasste die Statistischen Landesämter, die für die konkreten Erhebungen zuständig sind. Es wurden für die Erstellung der Energiebilanz und der Emissionsinventare wichtige Erhebungen zeitlich priorisiert, so dass das Statistische Bundesamt im Juli 2020 auf Basis der bis zum Stichtag erhobenen Daten über die Anwendung von Imputationsverfahren einen vollständigen Datensatz für das Jahr 2019 hochrechnen konnte. Im Juli 2021 wurden die entwickelten Methoden erstmals im Routinebetrieb angewendet. Die Qualitätssicherung der Methoden erfolgte im Oktober 2021 über einen Vergleich der Hochrechnungsergebnisse mit den endgültigen Erhebungsdaten 2020. Die sich anschließenden methodischen Verbesserungen konnten im Erhebungsjahr 2022 für die erstmalige Erstellung einer deutlich verbesserten auf Hochrechnungen basierten vorläufigen Energiebilanz 2021 genutzt werden. Die Terminkette im Datenfluss wurde zwischen den beteiligten Institutionen so fein abgestimmt, dass mit kürzesten Bearbeitungszeiten für einzelne Prozessschritte eine Datenverwendung für die Inventarerstellung im Berichtsjahr 2023 erfolgen konnte.

Anhang 6.2 Aufbau der Energiebilanzen

Energiebilanzen bieten in Form einer Matrix eine Übersicht über Aufkommen, Umwandlung und Verwendung von Energieträgern in einem festgelegten Raum. Der Energiefluss in derEnergiebilanz der Bundesrepublik Deutschland ist für 30 Energieträger(-gruppen) dargestellt. In der Aufkommensbilanz werden

- die Gewinnung im Inland,
- die Einfuhr,
- die Bestandsentnahmen,
- die Ausfuhr,
- die Hochseebunkerung und
- die Bestandsaufstockungen

von Energieträgern dargestellt und zum Primärenergieverbrauch zusammengefasst. Die Primärenergiebilanz ist Grundlage für die Berechnungen des IPCC-Referenzverfahrens (Plinke & Schonert, 2000). Maßgebend für die Emissionsinventarerstellung ist die Verwendungsbilanz. Auch über die Verwendungsbilanz lässt sich der Primärenergieverbrauch ermitteln. Sie umfasst:

- die Umwandlungsbilanz
- die Fackel- und Leitungsverluste
- den Nichtenergetischen Verbrauch und
- den Endenergieverbrauch.

Daten zum nichtenergetischen Verbrauch werden dem UBA im Rahmen einer Zusatztabelle zur Energiebilanz Deutschland aufgegliedert nach Wirtschaftszweigen regelmäßig zur Verfügung gestellt.

Unterschiede zwischen Aufkommens- und Verwendungsbilanz werden durch die Position „Statistische Differenzen“ ausgeglichen.

Die Umwandlungsbilanz als Bestandteil der Verwendungsbilanz gibt an, welche Energieträger in andere „sekundäre“ Energieträger umgewandelt werden. Der Umwandlungsausstoß zeigt das Ergebnis dieser Umwandlung. Die Umwandlung von Energie kann stofflicher Natur sein, z. B. die Umwandlung von Rohöl (Umwandlungseinsatz) in Mineralölprodukte (Umwandlungsausstoß) oder energetischer Natur, z. B. durch die Verbrennung von Steinkohlen (Umwandlungseinsatz) in Kraftwerken zur Erzeugung elektrischer Energie (Umwandlungsausstoß). Der Energieverbrauch im Umwandlungsbereich weist aus, wieviel Energie zum Betrieb der Umwandlungsanlagen benötigt wurde (Eigenverbrauch des Umwandlungsbereichs). Die Umwandlungsbilanz wird nach 12 Sektoren differenziert.

Der Nichtenergetische Verbrauch als Bestandteil der Verwendungsbilanz wird ohne Zuordnung zu Wirtschaftszweigen insgesamt ausgewiesen. Daten zum nichtenergetischen Verbrauch werden dem UBA im Rahmen einer Zusatztabelle zur Energiebilanz Deutschland aufgegliedert nach Wirtschaftszweigen regelmäßig zur Verfügung gestellt. Er beschreibt, welche Energieträger als Rohstoffe eingesetzt werden (z. B. in der Chemischen Industrie Umwandlung von Energieträgern in Kunststoffe).

Die Darstellung des Endenergieverbrauchs (nach Energieträgern u. -sektoren) zeigt, in welchem Umfang Energie in den Endverbrauchssektoren genutzt werden kann. (Die letztlich benötigte Nutzenergie (z. B. Arbeit, Licht, Raum- und Prozesswärme) ist davon zu unterscheiden und wird nicht in der EB ausgewiesen (AGEB, 2019). Diese Aufgliederung umfasst die Industrie, unterteilt in 14 Wirtschaftszweige, den Verkehr, die Haushalte und Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und übrige Verbraucher (inklusive Landwirtschaft).

Der Energiefluss in den Energiebilanzen ist für 30 Energieträger dargestellt. Diese Energieträger können den folgenden Hauptgruppen zugeordnet werden:

- Steinkohlen,
- Braunkohlen,
- Mineralöle (einschließlich Flüssiggas und Raffineriegas),
- Gase (Kokerei- u. Gichtgas, Erdgas, Grubengas, ohne Deponie- u. die o.g. Gase),
- Erneuerbare Energien (einschließlich erneuerbare Abfälle, ab 2013 auch Klärschlamm),
- Elektrischer Strom und sonstige Energieträger (nicht-erneuerbare)

Nähere Informationen zur Umwandlungsbilanz, zum nicht-energetischen Verbrauch, zum Endenergieverbrauch und zu den Energieträgergruppen können dem NIR (UBA et al., 2023) entnommen werden. Verwiesen wird an dieser Stelle auch auf die Broschüre („Energie in Zahlen – Arbeit und Leistungen der AG Energiebilanzen“ (AGEB, 2019)), die weitere Informationen und Hintergründe zur deutschen Energiebilanz enthält.

Gesamtdeutsche Energiebilanzen liegen für die Jahre ab 1990 vor (AGEB, 2003) Abfälle, Abwärme). Ab dem Jahr 2000 wurde die Energieträgerstruktur im Bereich Erneuerbare Energien / Müll geändert: Wasser- und Windkraft inkl. PV wurden zusammengefasst und Müll/Biomasse wurde in erneuerbare und nicht erneuerbare Anteile aufgesplittet. Seit dem Jahr 2003 werden in der Energiebilanz nichterneuerbare Abfälle und Abwärme auch im Endenergieverbrauch verbucht.

In der Energiebilanz werden die Energieträger in natürlichen Einheiten wie Tonnen (t) für feste und flüssige Brennstoffe, Kubikmeter (m^3) für Gase (außer Erdgas), Kilowattstunden (kWh) für elektrische Energie und Erdgas sowie Joule (J) für Abfälle, erneuerbare Energien, Kernenergie und Fernwärme angegeben. Um die Angaben vergleichbar und additionsfähig zu machen, werden alle Werte über geeignete Umrechnungsfaktoren in die Einheit Joule (J) umgerechnet. Anders als in Gasstatistiken werden in der Energiebilanz sämtliche Gase auf den Heizwert H_i (und nicht den Brennwert, H_s) bezogen. Diese Daten werden dem Umweltbundesamt gemeinsam mit der Lieferung der vorläufigen Energiebilanz übermittelt.

Um den Bedürfnissen der Emissionsberichterstattung nach Aktualität Rechnung zu tragen, wird dem UBA von der AGEB beginnend im Jahr 2022 jährlich Ende August eine vollständige vorläufige Energiebilanz für das Jahr x-1 für die Inventarerstellung zur Verfügung gestellt, die auf den hochgerechneten Statistiken des Statistischen Bundesamtes beruht. Die endgültige Energiebilanz legt die AGEB dem UBA planmäßig im darauf folgenden Februar (dann für das Jahr x-2) vor. Die Veröffentlichung erfolgt etwa im April.

Anhang 6.3 Methodische Aspekte: Energiebedingte Aktivitätsraten

Die im UBA erstellten Inventare für Luftschadstoffe und Treibhausgase bauen auf den von der AGEB erstellten Energiebilanzen für Deutschland auf. Dabei lassen sich die zur Emissionsberechnung benötigten Daten direkt aus den Energiebilanzzeilen 11, 12, 15, 16, 40, 60 sowie 65 und 68 ablesen. Für Erdgas und Heizöl leicht wird auch die EBZ 14 zur Berechnung herangezogen.

Um den speziellen Anforderungen für die Emissionsberechnung gerecht zu werden und die Vollständigkeit der Daten zu gewährleisten, muss in einigen wenigen Fällen von der oben genannten Systematik abgewichen und es müssen weitere Daten ergänzt werden:

- Der emissionsrelevante Brennstoffeinsatz zur Braunkohlentrocknung muss aus der EBZ 10 herausgerechnet werden. Eine genaue Beschreibung der Kategorie 1.A.1.c erfolgt im Kapitel 3.2.6.2.
- Der Erdgaseinsatz in den Kompressoren konnte für die Jahre 1995-2002 direkt der Energiebilanz (EBZ 33) entnommen werden. Für die Jahre 1990-1994 sowie ab dem Jahr 2003 müssen die Werte außerhalb der Energiebilanz berechnet werden. Die Beschreibung der Methode erfolgt im Kapitel zur Kategorie 1.A.3.e des NIR (UBA et al., 2022).
- Da die verbrannten Abfallmengen in der Energiebilanz aus systematischen Gründen bzw. unter dem Fokus der Energieerzeugung nicht über alle Jahre vollständig erfasst werden, muss auch in diesem Fall mit Hilfe der Abfallstatistik ergänzt werden. Erläuterungen dazu sind im Kapitel Kategorie 1.A.1.a sowie im Kapitel zur Kategorie 1.A.2.g Sonstige (stationär) vorhanden.
- Der Brennholzeinsatz in der Kategorie *Gewerbe, Handel, Dienstleistungen* wird in der Energiebilanz bis 2012 nicht ausgewiesen und muss ergänzt werden. Die Beschreibung erfolgt im Kapitel zur Kategorie 1.A.4.

Der Reduktionsmitteleinsatz zur Herstellung von Roheisen wird in der Energiebilanz z.T. als energetischer Verbrauch in der EBZ 54 und z.T. als Umwandlungseinsatz in EBZ 17 (Gichtgasäquivalent) ausgewiesen. Der Einsatz des bei der Roheisenherstellung entstehenden Gichtgases zur Energieerzeugung wird in den entsprechenden Energiebilanzzeilen 11, 12, 15, 33 und 54 verbucht. Um Doppelzählungen zu vermeiden, werden die in der EBZ 54 verbuchten Reduktionsmitteleinsätze aus dem Hochofen sowie das Gichtgasäquivalent nicht mit berichtet.

Anhang 6.4 Unsicherheiten, Zeitreihenkonsistenz und Qualitätssicherung der Energiebilanz

Mit Einführung des Energiestatistikgesetzes im Jahr 2003 hatte sich die wesentliche Datengrundlage der Energiebilanz relativ verbessert, aufgrund der Dynamik im Energiesektor wurde aber schon bald eine Novellierung des Energiestatistikgesetzes erforderlich. Mit der aktuell gültigen Novelle des Energiestatistikgesetzes vom 6. März 2017 (BGBl. I S. 392) werden Verbesserungen in der statistischen Abdeckung und Aktualisierungen der Erhebungskreise vorgenommen sowie neue Merkmale erfasst. Auch die Periodizität hat sich teilweise zugunsten der monatlichen Erhebung verschoben. Die erstmalige Erhebung erfolgte für das Erhebungsjahr 2018.

Kontinuierlich erfolgen Anpassungen im Datengerüst der Energiebilanz, um bestmögliche Daten zur Verfügung zu stellen.

Diese Änderungen erfolgen in größeren Abständen und werden jeweils von der AGEB dokumentiert:

- Erläuterungen zur Revision der Energiebilanzen 2003 - 2006[110]
- Anmerkungen zu den Änderungen in den Energiebilanzen 2003 bis 2007[111]
- Revision der Energiebilanzen 2003 bis 2009[112]
- Methodische Änderungen in der Energiebilanz 2012[113]
- Erläuterungen zu den Energiebilanzen (Bearbeitungsstand November 2015)[114]

Im Oktober 2021 hat die AGEB auftragsgemäß einen Bericht zum „Revisionsbedarf in der Energiebilanz Deutschland“ erstellt. In Umsetzung von Vorschlägen dieses Berichts erfolgte im Jahr 2023 erstmalig eine Revision der Zeitreihen. Weitere Revisionen erfolgen im zweijährigen Rhythmus. Eine Übersicht über die Revisionsbedarfe wurde dem UBA von der AGEB zur Verfügung gestellt.

Anhang 6.4.1 Qualitätsbericht der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen zur Erstellung der Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland

Zur Dokumentation ihrer Qualitätssicherungsmaßnahmen bei der Erstellung der Energiebilanzen legt die AGEB dem Umweltbundesamt seit dem Jahr 2012 regelmäßig einen gemeinsamen Qualitätsbericht vor. Im Rahmen des Auftrags für die Energiebilanzen werden ab dem Jahr 2020 als Qualitätssicherungsmaßnahme die Energiebilanzen in Zeitreihen erstellt und geliefert, so dass Zeitreihensprünge besser als bisher bei der Datenkompilierung erkannt werden können.

Der Inhalt des aktuellen Berichts wird im Folgenden wortgetreu veröffentlicht (kenntlich über andere Schriftart).

Anhang 6.4.1.1 Hintergrund

Hintergrund

Im Rahmen der Treibhausgasemissionsberichterstattung hat der Koordinierungsausschuss des Nationalen Systems Emissionsinventare Mindestanforderungen an die Qualitätskontrolle und Qualitätssicherung (QK/QS) festgelegt. Diese sind auf allen Ebenen der Inventarerstellung einzuhalten. Einer der wichtigsten Datensätze zur Ermittlung der Treibhausgasemissionen sind die Energiebilanzen für die Bundesrepublik Deutschland, mit deren Erstellung die Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB) beauftragt ist. Das EEFA-Forschungsinstitut, Münster und das Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW), Stuttgart als Unterauftragnehmer arbeiten für die AGEB daran mit. Die Bearbeiter der Energiebilanzen sind

[110] http://www.ag-energiebilanzen.de/#revision_der_eb_2003_bis_2006

[111] http://www.ag-energiebilanzen.de/#aktualisierungen_der_energiebilanzen_2003_bis

[112] http://www.ag-energiebilanzen.de/#revision_der_energiebilanzen_2003_bis_2009_05

[113] http://www.ag-energiebilanzen.de/#methodische_aenderungen_der_eb_2012

[114] http://www.ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=vorwort.pdf

gehalten, die Mindestanforderungen an QK/QS wie Transparenz, Konsistenz, Vergleichbarkeit, Vollständigkeit und Genauigkeit zu erfüllen.

Zur Dokumentation ihrer Datenquellen und Qualitätssicherungsmaßnahmen bei der Erstellung der Energiebilanzen legt die AGEB dem Umweltbundesamt hiermit den aktuellen Qualitätsbericht vor. Er bezieht sich insbesondere auf die endgültige Energiebilanz 2023.

1. Arbeitsteilung bei der Erstellung der Energiebilanzen

Die Energiebilanzen für Deutschland (auch vor dem Hintergrund der im 2-Jahres-Turnus durchzuführenden Datenrevision der Bilanzen) werden zentral über eine Datenbank (die beim ZSW angesiedelt ist) erzeugt. Die Verantwortlichkeit für die einzelnen Energieträger (EEFA: Stein-, Braunkohle, Kokerei-, Gicht-, Konverter- u. Grubengas; ZSW: Mineralöl sowie -produkte, Erdgas, Erdölgas u. sonstige Energieträger, GS AGEE-Stat: Erneuerbare Energien) bleibt hiervon unberührt. Darüber hinaus koordinierte das EEFA-Forschungsinstitut im Rahmen der Erstellung der Energiebilanz die vierteljährlichen Schätzungen des Primärenergieverbrauchs für die Bundesrepublik Deutschland und schätzt zudem den Energieträger Steinkohle, das ZSW ist für die „Sonstigen Energieträger" verantwortlich. Die erneuerbaren Energien werden auf der Grundlage der Daten und in Abstimmung mit der Geschäftsstelle der AGEE-Stat (GS AGEE-Stat) berechnet und veröffentlicht.

Mit dem Jahr 2024 erstellte EEFA/ZSW eine Frühschätzung der Energiebilanz 2023 im Februar (Datenstand 15.2.2024). Die Abgabe der vorläufigen Energiebilanz 2023 erfolgte dann im Mai 2024. Im September 2024 schließlich wurde, zusammen mit den Auswertungstabellen, eine weitere vorläufige Energiebilanz 2023 („early-estimates") erstellt; in diese flossen Daten bzw. Schätzungen des Statistischen Bundesamtes u.a. zur Entwicklung des Endenergieverbrauchs der Industrie ein. Darüber hinaus werden die Daten der amtlichen Mineralölstatistik (AMS) des Bundesamtes für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) in den Mineralölteil der Energiebilanz eingepflegt, die meist für das letzte Jahr zur Mitte des Folgejahres vorliegen.

Im Februar bzw. Frühjahr eines Jahres liegen i.d.R. wichtige amtliche Datenquellen, wie z. B. die Erhebungen über den Energieverbrauch der Industriesektoren, noch nicht vor. Diese Datenlücken müssen deshalb mit Hilfe von Schätzungen geschlossen werden. Es liegt deshalb auf der Hand, dass die Schätzbilanzen (bzw. Frühschätzung der Bilanz) nicht die hohen Anforderungen an die Datenqualität erfüllen, wie die endgültige Energiebilanz, die erst mit einer zeitlichen Verzögerung von rund einem Jahr publiziert wird.

2. Qualität der verwendeten Datenquellen

Zur Erstellung der Energiebilanzen für die Bundesrepublik Deutschland werden folgende Daten des Statistischen Bundesamts (StaBuA) verwendet:

- *Jahreserhebung (Nr. 060) über die Energieverwendung der Betriebe des Verarbeitenden Gewerbes, im Bergbau und der Gewinnung von Steinen und Erden,*
- *Monatserhebung (Nr. 061E) über die Einfuhr von Kohle,*
- *Jahreserhebung (Nr. 062) über Wärme- und Elektrizitätserzeugung aus Geothermie,*
- *Jahreserhebung (Nr. 063) über die Erzeugung von Biokraftstoffen,*
- *Jahreserhebung (Nr. 064) über Erzeugung und Verwendung von Wärme sowie über den Betrieb von Wärmenetzen,*

- *Monatserhebung (Nr. 066K) über die Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung zur allgemeinen Versorgung,*
- *Monatserhebung (Nr. 066N) über die Stromein- und -ausspeisung bei Netzbetreibern,*
- *Jahreserhebung (Nr. 067) über die Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung im Verarbeitenden Gewerbe, im Bergbau und in der Gewinnung von Steinen und Erden,*
- *Monatserhebung (Nr. 068) über die Gasversorgung,*
- *Jahreserhebung (Nr. 070) über die Stromein- und -ausspeisung bei Netzbetreibern,*
- *Jahreserhebung (Nr. 071) über die Abgabe von Mineralölprodukten,*
- *Jahreserhebung (Nr. 073) über Gewinnung, Verwendung und Abgabe von Klärgas,*
- *Jahreserhebung (Nr. 075) über die Abgabe von Flüssiggas,*
- *Jahreserhebung (Nr. 082) über Gasabsatz und Erlöse in der Gasversorgung,*
- *Jahreserhebung (Nr. 083) über Stromabsatz und Erlöse in der Elektrizitätsversorgung,*
- *Energiesteuerstatistik (Fachserie 14, Reihe 9.3).*

Die Daten des Statistischen Bundesamtes (StaBuA) unterliegen amtlichen Qualitätsanforderungen. Die Qualitätsberichte des StaBuA können im Internet eingesehen werden:

https://www.destatis.de/DE/Methoden/Qualitaet/Qualitaetsberichte/Energie/einfuehrung.html 115*, zuletzt aufgerufen am 12. Februar 2025.*

Außerdem werden Angaben aus der amtlichen Mineralölstatistik (AMS) des Bundesamtes für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) verwendet, diese sind seit diesem Jahr nur noch als PDF auf der Seite des BAFA publiziert, werden aber durch BAFA parallel im Excel-Format aufbereitet und per E-Mail an die AGEB versendet.

Die monatlich und jährlich publizierte AMS ist ein geschlossenes, widerspruchfreies System des gesamten Mineralölaufkommens- und -verbrauchs in Deutschland. Statistische Grundlage für die AMS ist der integrierte Mineralölbericht (IM), der auf Basis des Mineralöldatengesetzes monatlich bei Unternehmen erhoben wird, die in der Bundesrepublik auf dem Mineralölmarkt tätig sind. Das BAFA meldet diese Aufkommens- und Verbrauchsdaten zusammen mit den Daten des Statistischen Bundesamts an die IEA und Eurostat, die international vergleichbare Energiebilanzen veröffentlichen. Die Heizwerte für den Rohöleinsatz und die Ölprodukte, die für diese Meldungen genutzt werden, sind mit der nationalen Energiebilanz abgeglichen. Für die Energiebilanz werden für den Mineralölteil neben den Daten aus der AMS auch die Daten des Statistischen Bundesamts genutzt.

Neben den amtlichen Daten gehen auch Daten von Verbänden ein. Unter den Statistiken der Verbände spielt die Statistik der Kohlenwirtschaft (seit 2020 nur noch für die Braunkohle) eine besondere Rolle. Für die Energiebilanz werden u.a. folgende Daten verwendet:

- *Daten über die Förderung, Herstellung, Selbstverbrauch und den Absatz (Vordruck 5) sowie Informationen aus dem Produktionsbericht,*
- *Daten zum Inlandsabsatz/-einsatz nach Ländern und Verbrauchergruppen.*

Die Daten der Kohlenstatistik können in Deutschland als quasi amtlich und sehr genau eingestuft werden. Der Verein der Statistik der Kohlenwirtschaft e.V. arbeitet seit 60 Jahren als Bindeglied

[115] Das Statistische Bundesamt veröffentlicht auf ihrer Internetpräsenz ausschließlich die Qualitätsberichte nach dem neuen EnStatG 2017. Qualitätsberichte nach dem alten EnStatG sind online nicht mehr verfügbar.

zwischen den Unternehmen des Kohlenbergbaus und der amtlichen Statistik. Die Kohlendaten der amtlichen Statistik beruhen auf den Erhebungen der Statistik der Kohlenwirtschaft. Ein Großteil der Kohlendaten wird auf der Internetseite http://www.kohlenstatistik.de einer breiteren Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Die damit verbundene Transparenz kann ebenfalls als Beleg für die Zuverlässigkeit und Genauigkeit dieser Datenquellen herangezogen werden. Das Energiestatistikgesetz hat unter ausdrücklichem Hinweis auf das funktionierende System der Kohlenstatistik auf einen eigenen Paragrafen für Erhebungen zur inländischen Kohle verzichtet.

Ein erheblicher Teil der Daten zur Erstellung der Erdgasbilanz stammt aus amtlichen Statistikquellen. Darüber hinaus sind an einigen Stellen zusätzliche Verbandsdaten und Modellrechnungen erforderlich, um Daten- bzw. Informationslücken im amtlichen Statistikprogramm zu schließen.

Für Erdgas, Erdölgas:

- *Daten für Fackelverluste werden mit dem impliziten Heizwert vom Bundesverband Erdgas, Erdöl und Geoenergie e.V. (BVEG), vormals Wirtschaftsverband Erdöl- und Erdgasgewinnung e.V. (WEG) ermittelt. Hier gab es mit dem Statistischen Bericht 2019 (Seite 22) eine Änderung in der Abbildung der Fackelverluste in routinemäßig, sicherheitsrelevant und nicht-routinemäßig.*
- *Daten zum Erdgaseinsatz im Verkehr wurden in frühen Bilanzjahren aus Angaben des BDEW von Zukunft Erdgas, vormals Erdgas mobil abgeleitet. Zusätzlich lieferte die Energiesteuerstatistik Daten für diesen Sektor. Am aktuellen Rand werden die Daten auf Basis des CNG- und LNG-Absatzes in Deutschland modellgestützt abgeleitet.*
- *Durch die Änderung des Statistischen Berichts des BVEG ist der Eigenverbrauch als prozesstechnischer Eigenverbrauch abgebildet, d.h. inklusive Verarbeitungsverluste Messdifferenzen und Fackelverluste. Für Zwecke der Energiebilanzerstellung wurde der eigentliche Eigenverbrauch vom BVEG für die Jahr 2018 bis 2020 zur Verfügung gestellt.*

Darüber hinaus werden u.a. folgende weitere Quellen verwendet:

- *Im Rahmen des Monitorings zum Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz schätzt das Öko-Institut den Erdgaseinsatz zur Strom- und Wärmeerzeugung in kleinen Erdgas- und Heizöl-BHKW, die nicht von der amtlichen Statistik erfasst werden.*

Detaillierte Informationen zur Verwendung der verschiedenen Datenquellen im Zusammenhang mit der Erstellung der Energiebilanz können dem sog. „Kochbuch“ (enthält felderscharfe Quellenangaben zur Bilanz) entnommen werden.

Über die Qualität der vorliegenden Daten hinaus spielt für die Energiebilanzerstellung die mehrjährige Verfügbarkeit der Quellen sowie eine einheitliche und konsistente Darstellung der Zeitreihen eine wichtige Rolle. Nur so kann sichergestellt werden, dass über die zur Energiebilanzerstellung genutzten Verfahren und Methoden Daten generiert werden, die sich auch über einen langen Zeitraum konsistent und ohne Strukturbrüche in das Bilanzschema eingliedern. Sowohl die amtlichen Quellen als auch die Daten der Kohlenstatistik blicken auf eine lange Tradition zurück. Sollten aufgrund von Revisionen oder der Veränderung statistischer Grundlagen (z.B. Energiestatistikgesetz) Brüche in den Zeitreihen unvermeidbar sein, sind diese in den zur Energiebilanzerstellung genutzten Quellen dokumentiert, so dass stets eine sachgerechte Anpassung der Methoden gewährleistet ist.

3. Transparenz der Methoden und Verfahren

Am 1. Januar 2003 ist das Energiestatistikgesetz (EnStatG) in Kraft getreten. Mit diesem Gesetz wurden die amtlichen Energiestatistiken aus verschiedenen Rechtsgrundlagen zusammengeführt und an die gewandelten Informationsbedürfnisse der Nutzer angepasst. Seitdem werden durch das Statistische Bundesamt auch für die Bereiche Wärmemarkt, Kraft-Wärme-Kopplung und erneuerbare Energieträger Daten erhoben und bereitgestellt. Im Rahmen dieser Neustrukturierung weist das Statistische Bundesamt neben der Strom- und Wärmerzeugung aus Kraft-Wärme-Kopplung den kompletten Brennstoffeinsatz für Kraft-Wärme-Kopplung in der allgemeinen Versorgung und der Industrie (differenziert nach Energieträgern) aus.

Für die Energiebilanzen (und hier insbesondere für die Darstellung des industriellen Endenergieverbrauchs) ergab sich aus dem veränderten statistischen Datenangebot grundsätzlich ein methodischer Anpassungsbedarf. Die skizzierte Erweiterung des Datenangebots hat nämlich zur Folge, dass für die industrielle Stromerzeugung ab dem Jahr 2003 gesonderte Informationen zum Brennstoffeinsatz der reinen Stromerzeugung vorliegen.

Daten zur Aufteilung des Brennstoffeinsatzes auf die Produkte Strom und Wärme bei Kraft-Wärme-Kopplung in der Industrie und in Heizkraftwerken werden vom Statistischen Bundesamt nicht erhoben, sondern von der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen bzw. den von ihr beauftragten Instituten geschätzt. Die dabei angewandte „finnische" Methode beruht auf der Richtlinie 2004/8/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Februar 2004. Diese ist mathematisch genau definiert und wird im Vorwort der Energiebilanzen und aktuell auch in der Broschüre Energie in Zahlen – Arbeit und Leistungen der AG Energiebilanzen, S. 10, 11 f. näher erläutert.

Mit Blick auf die Qualitätssicherung wird die Berechnung in den Bereichen der allgemeinen Versorgung und der Industrie mit der finnischen Methode nachvollziehbar und transparent gehandhabt. Die notwendigen Annahmen wie etwa die Referenzwirkungsgrade der ungekoppelten Erzeugung in den Dokumentationen zur Energiebilanz werden angegeben. All dies zeigt, dass bei der Erstellung der Energiebilanzen trotz Anwendung teilweise komplexer methodischer Umwandlungsschritte eine hohe Transparenz und Eindeutigkeit der Ergebnisse gewährleistet werden kann. So lassen sich alle Energiebilanzfelder stets eindeutig bis hin zur jeweiligen primärstatistischen Grundlage zurückverfolgen.

Amtliche oder verbandsinterne Primärinformationen können – ungeachtet ihrer Qualität – nur an wenigen Stellen der Energiebilanz unmittelbar ohne den Einsatz methodischer oder statistischer Verfahren zur Erstellung der Energiebilanz genutzt werden. Vielmehr erfordert die komplexe Darstellung des Energieflusses in Form einer Matrix zur Einhaltung der formalen Rahmenbedingungen und methodischen Vorgaben ausgehend von vorliegenden statistischen Rohdaten zahlreiche Transformationsschritte, Umrechnungen oder Umbuchungen. Hinzu kommt, dass in einigen wenigen Bereichen der Energiebilanz keine primärstatistischen Daten vorliegen, so dass Datenlücken in Abhängigkeit vom Einzelfall auch durch die Anwendung formaler Schätzmethoden geschlossen werden müssen.[116]

[116] Ausblick: Am 10. März 2017 ist das novellierte Energiestatistikgesetz (EnStatG) in Kraft getreten. Damit wird den veränderten Anforderungen an Energiedaten auf nationaler und auf internationaler Ebene Rechnung getragen. Die Energiestatistiken werden an die geänderten Rahmenbedingungen in der Energiewirtschaft angepasst. Bestehende Datenlücken, vor allem in den Bereichen

4. Kontrolle und Verifikation der Ergebnisse

Die Maßnahmen zur Qualitätssicherung und –kontrolle umfassen die Bereiche:

- *Sicherung der Datenqualität und der Transparenz der Methoden und Verfahren,*
- *Mechanismen zur Kontrolle und kritischen Überprüfung der Energiebilanzen, die Korrektheit, Vollständigkeit und Konsistenz der Bilanz sicherstellen sowie*
- *Maßnahmen zur Dokumentation und Archivierung, die die Nachvollziehbarkeit und Reproduzierbarkeit der Bilanz gewährleisten sollen und*
- *Fachverantwortlichkeit zur Erstellung der Energiebilanzen.*

Kritische Diskussion, Verifikation und Kontrolle erfolgen auf unterschiedlichen Ebenen:

- *Die Arbeiten werden wechselseitig und anhand von Kontrollgrößen (z.B. Veränderungen im Jahresvergleich, impliziten Heizwerten, Nutzungsgraden) auf Plausibilität geprüft.*
- *Die Zeitreihenkonsistenz wird regelmäßig verifiziert. Im Falle unplausibler Sprünge in der Zeitreihe, die nicht auf Übertragungs- oder Rechenfehler, sondern auf die Entwicklungen in den primärstatistischen Erhebungen zurückzuführen sind, erfolgt in enger Kooperation mit der datenliefernden Institution wie dem StaBuA eine lösungsorientierte Erörterung des Problems.*
- *Die Energiebilanzen werden mit den Datenlieferungen an IEA/Eurostat abgeglichen.*
- *Des Weiteren kontrollieren die in der AGEB zusammengeschlossenen Verbände begleitend die Ergebnisse.*
- *Außerdem werden Daten und Ergebnisse frühzeitig mit den Fachverantwortlichen des Umweltbundesamts (UBA) diskutiert.*
- *Statistische Fragen der Energiebilanz werden zudem im „Arbeitskreis Methodik“ (AKM) beim BMWK erörtert.*

Um Fehler bei Berechnungen und Schätzungen der Daten für die Energiebilanz weitgehend zu vermeiden, erfolgt die jährliche Aufstellung der Energiebilanz im Rahmen standardisierter Vorgehensweisen. Dazu wurden umfangreiche Instrumente entwickelt, die bewährte Schätzverfahren oder formale Berechnungsmethoden im Rahmen der Bilanzarbeiten automatisieren. Aufgrund dieser Vorgehensweise, die teilweise nur das Einpflegen der statistischen Rohdaten in die entsprechenden Tools erfordert, können Berechnungs- oder Transformationsfehler weitgehend verhindert werden. Die Verwendung stets einheitlicher und standardisierter Methoden leistet zudem einen wichtigen Beitrag zur Sicherung der Zeitreihenkonsistenz.

5. Dokumentation und Archivierung

Das EEFA-Forschungsinstitut sowie das ZSW führen über die in jährlichem Abstand zu erstellenden Energiebilanzen eine detaillierte, schriftliche Dokumentation. Die Dokumentation umfasst jedes Feld der Energiebilanz, eine Auflistung der verwendeten statistischen Quellen und Erhebungen sowie eine genaue Erläuterung der angewandten Rechenmethoden und –verfahren. Ziel der Dokumentation ist die lückenlose Nachvollziehbarkeit sowohl für eigene Zwecke als auch für das BMWK und das UBA. Eine regelmäßige Aktualisierung der Dokumentation ist zudem ein Beitrag zur Sicherung der Datenqualität und Einhaltung der Zeitreihen- und Methodenkonsistenz.

erneuerbare Energien, Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) und Wärme wurden geschlossen. Die Anwendung des novellierten EnStatG erfolgte für die Monatserhebungen ab dem Berichtsmonat Januar 2018.

Alle statistischen Daten, Berechnungsmethoden, Schätzverfahren, die für die Erstellung der Energiebilanzen für die Bundesrepublik Deutschland verwendet werden, werden archiviert. Die Sicherung der elektronischen Daten erfolgt auf den Servern des ZSW (AGEB-Datenbank). Im EEFA-Institut kommen zur Archivierung elektronischer Inhalte verschiedene Rechner, Wechselplatten als auch netzbasierte Serverlösungen bzw. Cloud-Lösungen zum Einsatz. Die Sicherung der Daten erfolgt sowohl automatisch als auch in regelmäßigem Abstand auf manuellem Weg.

6. Qualifikation der Bearbeiter

Für die Bearbeitung des Dienstleistungsprojektes „Erstellen von Energiebilanzen für die Bundesrepublik Deutschland" stehen dem EEFA-Forschungsinstitut sowie dem ZSW erfahrenes Personal mit fundierten statistischen, ökonomischen sowie energiewirtschaftlichen Kenntnissen zur Verfügung.

7. Erläuterungen zur Aktualität bzw. zeitlichen Verfügbarkeit der Daten für die Erstellung der Energiebilanzen

Amtliche Statistiken

Im Rahmen der nationalen Inventarerstellung werden seit dem Jahr 2022 zusätzliche Daten im August vom Statistischen Bundesamt erhoben bzw. errechnet, die auch in die Energiebilanz 2023 und in den Joint Annual Questionnaire eingeflossen sind, so dass amtliche Daten zu einem sehr viel früheren Zeitraum vorlagen als bislang. Im Kochbuch zur Energiebilanz ist zellenscharf nachzulesen, welche Statistiken vom StaBuA, BAFA etc. genutzt wurden.

Verbandsstatistiken

In die endgültige Energiebilanz fließen an verschiedenen Stellen Daten von Verbänden ein (s.o.), um vorhandene Datenlücken im amtlichen Angebot zu schließen.

Aufgrund der vierteljährlichen Schätzungen, die die AG Energiebilanzen zusammen mit den Verbänden der Energiewirtschaft durchführt, stehen darüber hinaus laufend aktuelle Daten / Prognosen zur Entwicklung des Primärenergieverbrauchs in Deutschland zur Verfügung.

Wichtige vorläufige Daten, die auch für den Endenergieverbrauch der Schätzenergiebilanzen mit Stand Mai und September benötigt werden, liefert der BDEW, der im Sommer eines jeden Jahres Daten zum Thema „Energiemarkt Deutschland – Zahlen und Fakten zur Gas-, Strom- und Fernwärmeversorgung" veröffentlicht. Außerdem fließen in die Schätzbilanz lfd. Angaben des BDEW zur Bruttostromerzeugung ein. Hinzu kommen Daten der Statistik der Kohlenwirtschaft sowie des Wirtschaftsverbandes Fuels&Energie (en2x, früher Mineralölwirtschaftsverband).

Laufende Frühschätzung der Energiebilanz Deutschland bereits im Februar des Folgejahres

Als wesentliche Verbesserung der zeitlichen Verfügbarkeit vollständiger Energiedaten ist zweifellos die Frühschätzung der kompletten Energiebilanz Deutschland jeweils zum 15. Februar eines Jahres für das Vorjahr einzustufen. Die Frühschätzung der Energiebilanz basiert dabei nicht allein auf den zu diesem Zeitpunkt bereits vorliegenden Energiedaten, sondern in weiten Teilen der Bilanz (z.B. im Endenergieverbrauch) auch auf formalen Prognoseverfahren (Modellen). Einzelheiten zur Vorgehensweise bei der Frühschätzung der Energiebilanz Deutschland können der UBA-Studie „Pilotprojekt zur Frühschätzung der Energiebilanz 2020 und Vergleich zu späteren definierten Datenständen" (UBA-Texte 18/23, im Internet abrufbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/pilotprojekt-zur-fruehschaetzung-der-energiebilanz) sowie der UBA-Folgestudie „Weiterentwicklung des Modells zur Frühschätzung der

Energiebilanz“ (UBA-Texte 167/2024, im Internet abrufbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/weiterentwicklung-des-modells-zur-fruehschaetzung-0) entnommen werden.

Die aktuellste Frühschätzung der Energiebilanz für das Berichtsjahr 2024, wird dem Umweltbundesamt am 14. Februar 2025 übermittelt.

Sonstige Daten

Daten zur Entwicklung der erneuerbaren Energien, die in die Satellitenbilanz einfließen, stammen ausnahmslos aus Berechnungen der GS AGEE-Stat.

Zur Berechnung der Stromerzeugung und des Brennstoffeinsatzes in kleinen Erdgas-KWK-Anlagen (< 1 MW) werden Angaben aus der BHKW-Datenbank des Öko-Instituts verwendet, die auch für die IEA/Eurostat-Berichterstattung genutzt werden.

Daten für Petrolkoks zum Einsatz in Hüttenkokereien werden von den entsprechenden Ländern für die Bundesbilanz zur Verfügung gestellt, aufgrund einer Vereinbarung der AGEB mit dem Länderarbeitskreis Energiebilanzen.

Tabelle 487: Zur Erstellung der Energiebilanzen für die Bundesrepublik Deutschland verwendete Erhebungen des StaBA

Erhebung	*Nr.*	*Berichtszeitraum*	*Aktualität*	*Grundgesamtheit*	*Inhaltlicher Schwerpunkt*
Jahreserhebung über die Energieverwendung der Betriebe des Verarbeitenden Gewerbes, im Bergbau und der Gewinnung von Steinen und Erden	*060*	*jährlich*	*Ende des Folgejahres*	*Alle Betriebe des Verarbeitenden Gewerbe sowie im Bergbau und in der Gewinnung von Steinen und Erden mit mindestens 20 Beschäftigten*	*Menge des Bezugs, des Bestandes, der Verbrauchs und der Abgabe von Energieträger, getrennt nach Art und Energiegehalt; die Menge der Eigenerzeugung und des Verbrauchs der Elektrizität; …. ; die Menge der abgegebenen Elektrizität und Wärme nach Abnehmergruppen und Ausfuhr sowie die Menge der energetisch und nichtenergetischen Verwendung der Energieträger*
Erhebung über die Einfuhr von Kohle	*061E*	*monatlich, jährlich*	*Acht Wochen nach Ende des Berichtszeitraums*	*Alle rechtlichen Einheiten (im Folgenden Unternehmen genannt), die Kohle und Kohleprodukte nach Deutschland einführen und zwar sowohl zur Weiterverteilung als auch zum eigenen Verbrauch.*	*Einfuhr von Kohle, jeweils getrennt nach Staaten sowie nach Kohlearten, Energiegehalten und Grenzübergangswerten, die Menge des Bestands, getrennt nach Kohlearten, die abgegebene Menge, jeweils getrennt nach Kohlearten sowie innerhalb der Kohlearten jeweils getrennt nach Abnehmer- und Verbrauchergruppen.*
Jahreserhebung über Wärme- und Elektrizitätserzeugung aus Geothermie	*062*	*jährlich*	*Neun Monate nach Ende des Berichtszeitraums*	*Alle Betreiber von Anlagen zur Nutzung der Tiefengeothermie*	*die Art und die Leistung der Anlagen; die Menge der erzeugten Wärme und Elektrizität getrennt nach Verwendungsarten sowie die Menge der abgegebenen Wärme und Elektrizität, getrennt nach Abnehmergruppen.*
Jahreserhebung über die Erzeugung von Biokraftstoffen	*063*	*jährlich*	*Neun Monate nach Ende des Berichtszeitraums*	*alle Betreiber von Anlagen zur Erzeugung von Biokraftstoffen.*	*die Art und die Leistung der Anlagen; die Menge der eingesetzten Bioenergieträger, jeweils getrennt nach Art und Herkunft aus dem In- und Ausland; die Menge der erzeugten Biokraftstoffe, getrennt nach Arten; die Menge der eingeführten und die Menge der ausgeführten Biokraftstoffe, getrennt nach Arten sowie die Menge der abgegebenen Biokraftstoffe, getrennt nach Arten*
Jahreserhebung über Erzeugung und Verwendung von Wärme sowie über den Betrieb von Wärmenetzen	*064*	*jährlich*	*12 Monate nach Ende des Berichtszeitraums*	*alle Betreiber von Heizwerken ab einer installierten Nettonennleistung von einem Megawatt thermisch und an alle Betreiber von Anlagen zur netzgebundenen Wärmeversorgung einschließlich wärmegeführter Blockheizkraftwerke sowie an Dritte, die sich dieser Anlagen bedienen.*	*die Menge der erzeugten Wärme sowie bei wärmegeführten Blockheizkraftwerken die Menge der erzeugten Elektrizität, jeweils getrennt nach eingesetzten Energieträgern; die Menge der bezogenen Wärme, getrennt nach Lieferantengruppen; die Menge der abgegebenen Wärme, getrennt nach Abnehmergruppen; die Menge des Bestands an Energieträgern, getrennt nach Energiegehalt; die Menge der eingesetzten Energieträger zur Erzeugung von Wärme und Elektrizität, jeweils getrennt nach Arten und Energiegehalt; die Menge des Eigenverbrauchs von Wärme und Elektrizität; die installierte thermische Speicherkapazität; die Menge der Netzverluste; die Art und die installierte elektrische Nettonennleistung und thermische Nettonennleistung der Anlagen; bei Wärmenetzen die vorwiegend verwendeten Wärmeträger; die gesamte Anzahl der Wärmenetze sowie deren gesamte Trassenlänge; den Umfang des Zu- und Rückbaus von Wärmenetzen sowie die Menge der eingeführten Wärme und die Menge der ausgeführten Wärme.*
Monatserhebung über die Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung	*066K*	*monatlich, jährlich*	*Ca. 70 Tage nach Abschluss des Berichtsmonats*	*alle Betreiber von Anlagen zur Erzeugung von Elektrizität einschließlich der Kraftwärmekopplungsanlagen, jeweils ab einer Nettonennleistung von 1 Megawatt (MW) elektrisch sowie Anlagen zur Speicherung von Elektrizität ab einer installierten Nettonennleistung von 1 Megawatt elektrisch oder ab einer Speicherkapazität von 1 Megawattstunde. Diese gelten als Elektrizitätsversorgungsunternehmen (EVU) gemäß § 3 Nummer 18 Energiewirtschaftsgesetz (EnWG).*	*bei Betreibern von Anlagen zur Elektrizitätserzeugung (ab 1 MW): die Menge der erzeugten Elektrizität oder erzeugten Elektrizität und Wärme, getrennt nach eingesetzten Energieträgern und Prozessarten; die Menge der abgegebenen Menge, getrennt nach Abnehmergruppen; die Menge des Eigenverbrauchs, jeweils von Elektrizität und Wärme; die Nettonennleistung der Anlagen zur Erzeugung von Elektrizität oder Elektrizität und Wärme; die Hocheffizienzeigenschaft der KWK-Anlagen, getrennt nach Prozessarten; die Primärenergieeinsparung der KWK-Anlagen, getrennt nach Prozessarten; die Menge des Vorratsbestands von Brennstoffen zur Erzeugung von Elektrizität oder Elektrizität und Wärme bei KWK-Anlagen, jeweils getrennt nach Energieträgern und Energiegehalt; die Menge der eingesetzten*

Erhebung	Nr.	Berichtszeitraum	Aktualität	Grundgesamtheit	Inhaltlicher Schwerpunkt
					Brennstoffe zur Erzeugung von Elektrizität oder Elektrizität und Wärme bei KWK-Anlagen, jeweils getrennt nach Energieträgern und Energiegehalt. Bei Betreibern von Anlagen zur Speicherung von Elektrizität (ab 1 MW): die Menge der ein- und ausgespeicherten Elektrizität, getrennt nach Speichertechnologie, bei Pumpspeicherkraftwerken zusätzlich getrennt nach Erzeugung aus Pumpbetrieb und aus natürlichen Zufluss; die installierte elektrische Nettonennleistung, bei Pumpspeicherkraftwerken zusätzlich getrennt nach Erzeugung und Pumpbetrieb; die nutzbare Speicherkapazität.
Monatserhebung über die Stromein- und -ausspeisung bei Netzbetreibern	066N	monatlich	Ca. 70 Tage nach Abschluss des Berichtsmonats	Alle Betreiber von Elektrizitätsversorgungsnetzen	Erhoben werden Angaben zu folgenden Merkmalen: Länderweise die Anzahl, die installierte Nettonennleistung der Anlagen zur Erzeugung, die direkt an das von ihnen betriebene Netz angeschlossen sind, sowie die Einspeisung von Elektrizität in physikalischen Mengen, jeweils getrennt nach eingesetzten Energieträgern sowie innerhalb der Energieträger jeweils getrennt nach Anlagen unter und ab einer Nettonennleistung von 1 MW elektrisch; die Ein- und Ausfuhr von Elektrizität in physikalischen mengen, getrennt nach Staaten; die Menge der Netzverluste; die Menge der entnommenen Elektrizität, getrennt nach Abnehmergruppen.
Jahreserhebung über die Elektrizitäts- und Wärmeerzeugung im Verarbeitenden Gewerbe, im Bergbau und in der Gewinnung von Steinen und Erden	067	jährlich	9 Monate nach Ende des Berichtszeitraums	Betreiber von zur eigenen Versorgung bestimmten Anlagen zur Erzeugung von Elektrizität einschließlich der Anlagen zur Erzeugung von Elektrizität und Wärme in Kopplungsprozessen (KWK)	Menge der erzeugten Elektrizität oder der erzeugten Elektrizität und Wärme, getrennt nach eingesetzten Energieträgern und Prozessarten; die Menge des Eigenverbrauchs, jeweils von Elektrizität und Wärme; die Nettonennleistung der Anlagen; die Hocheffizienzeigenschaft der KWK-Anlagen, getrennt nach Prozessarten; die Primärenergieeinsparung der KWK-Anlagen, getrennt nach Prozessarten; die Menge des Vorratsbestands von Brennstoffen zur Erzeugung von Elektrizität oder von Elektrizität und Wärme bei KWK-Anlagen, jeweils getrennt nach Energieträgern und Energiegehalt sowie die Menge der eingesetzten Brennstoffe zur Erzeugung von Elektrizität oder Elektrizität
Monatserhebung über die Gasversorgung	068	monatlich jährlich	Monatlich zeitnah und die Jahreserhebung sechs Wochen nach Ende des Berichtszeitraums	alle Betreiber von Anlagen zur Gewinnung von Erdgas, zum Transport von Erdgas oder Biogas durch Fernleitungen sowie an alle Betreiber von Anlagen zur Speicherung von Erdgas	bei allen Betreibern von Anlagen zur Gewinnung von Erdgas: die Menge des gewonnenen Erdgases sowie die Menge des Eigenverbrauchs. Bei allen Betreibern von Anlagen zum Transport von Erdgas und Biogas durch Fernleitungen: die Menge des in das Fernleitungsnetz eingespeisten Erdgases; die Menge des in das Fernleitungsnetz eingespeisten Biogases; die Menge des aus dem Fernleitungsnetz ausgespeisten Gases; die Ein- und Ausfuhr von Erdgas in physikalischen Mengen, getrennt nach Nachbarstaaten sowie die Menge des Eigenverbrauchs. Bei allen Betreibern von Anlagen zur Speicherung von Erdgas: den Speichersaldo am Monatsende, die Speicherfüllstände am Monatsende sowie die Menge des Eigenverbrauchs
Jahreserhebung über die Stromein- und –ausspeisung bei Netzbetreibern	070	jährlich	12 Monate nach Ende des Berichtszeitraums	alle Betreiber von Stromnetzen für die allgemeine Versorgung	Sondervertragskunden nach § 2 Absatz 3 Nummer 1 der Konzessionsabgabenverordnung in Rechnung gestellte Nutzungsentgelte; Menge der Netzausspeisung an Letztverbraucher sowie Netzeinspeisung von Elektrizität, getrennt nach Energieträger sowie Standorte, Anzahl und installierte Nettonennleistung der Anlagen zur Erzeugung, die direkt an das von ihnen betriebene Netz angeschlossen sind
Jahreserhebung über die Abgabe von Mineralölprodukten	071	jährlich	9 Monate nach Ende des Berichtszeitraums	alle Unternehmen, die Heizöle oder Flugkraftstoffe an Letztverbraucher abgeben	Zum Erhebungsprogramm der Jahreserhebung über Mineralölprodukte gehören folgende Merkmale: Länderweise die Menge der abgesetzten Mineralölerzeugnisse, getrennt nach Erzeugnissen und Abnehmergruppen.

Erhebung	Nr.	Berichtszeitraum	Aktualität	Grundgesamtheit	Inhaltlicher Schwerpunkt
Jahreserhebung über Gewinnung, Verwendung und Abgabe von Klärgas	*073*	*jährlich*	*8 Monate nach Ende des Berichtszeitraums*	*alle Betreiber von Anlagen, die Klärgas erzeugen oder Klärschlamm zur Erzeugung von Elektrizität und Wärme einsetzen*	*Menge des gewonnenen Klärgases und die Menge des gewonnenen Klärschlamms zur Erzeugung von Elektrizität und Wärme, getrennt nach Energiegehalt; die Menge des genutzten Klärgases, getrennt nach Verwendungsarten; die Menge des abgegebenen Klärgases, getrennt nach Abnehmergruppen; die Menge der aus Klärgas und Klärschlamm erzeugten und abgegebenen Elektrizität und Wärme sowie die installierte elektrische Nettonennleistung und thermische Nettonennleistung der Anlagen zur Erzeugung von Elektrizität und Wärme*
Jahreserhebung über die Abgabe von Flüssiggas	*075*	*jährlich*	*8 Monate nach Ende des Berichtszeitraums*	*alle rechtlichen Einheiten (im Folgenden Unternehmen genannt), die jährlich mindestens 100 Tonnen Flüssiggas an Letztverbraucher abgeben.*	*Länderweise die abgegebene Menge von Flüssiggas, getrennt nach Abnehmergruppen*
Jahreserhebung über Gasabsatz und Erlöse in der Gasversorgung	*082*	*jährlich*	*8 Monate nach Ende des Berichtszeitraums vor*	*alle Betreiber von Anlagen der Gasversorgung*	*bei Produzenten bzw. Erzeugern von Gas: die Menge des gewonnen und erzeugten Gases; die Menge des abgesetzten Gases, getrennt nach Abnehmergruppen; die Erlöse aus dem Absatz von Gas, getrennt nach Abnehmergruppen; die Ein- und Ausfuhr von Erdgas nach Vertragsmengen, getrennt nach Ursprungs- und Bestimmungsstaaten; die Menge des abgefackelten Gases; die Menge des Eigenverbrauchs sowie die Menge der sonstigen Verluste. Bei Fernleitungsnetzbetreibern: die Menge des eingespeisten Gases; die Ein- und Ausfuhr von Erdgas in physischen Mengen, getrennt nach Nachbarstaaten; die Menge des Eigenverbrauchs; die Menge der sonstigen Verluste. Bei Gasspeicherbetreibern: die Anzahl, die Art, das Arbeitsvolumen und die maximale Ausspeiseleistung der Speicher; die am Jahresende kumulierte Menge des eingespeisten Gases und die am Jahresende kumulierte Menge des ausgespeisten Gases; die Menge des Eigenverbrauchs sowie die Menge der sonstigen Verluste. Bei Verteilnetzbetreibern: die Menge des in das Gasverteilnetz eingespeisten Gases; die Menge des Eigenverbrauchs sowie die Menge der sonstigen Verluste. Bei Gaslieferanten und Großhändlern: die Ein- und Ausfuhr von Erdgas nach Vertragsmengen, getrennt nach Ursprungs- und Bestimmungsstaaten; die Menge des abgesetzten Gases, getrennt nach Abnehmergruppen sowie die Erlöse aus dem Absatz von Gas, getrennt nach Abnehmergruppen*
Jahreserhebung über Stromabsatz und Erlöse in der Elektrizitätsversorgung	*083*	*jährlich*	*9 Monate nach Ende des Berichtszeitraums*	*alle Elektrizitätsversorgungsunternehmen einschließlich Stromhändlern*	*Zum Erhebungsprogramm der Jahreserhebung über Stromabsatz und Erlöse in der Elektrizitätsversorgung gehören folgende Merkmale: die Menge der abgesetzten Elektrizität, getrennt nach Abnehmergruppen; die Erlöse aus dem Absatz von Elektrizität, getrennt nach Abnehmergruppen sowie die Erlöse aus dem Absatz von Elektrizität an Sondervertragskunden nach § 2 Absatz 3 Nummer 1 der Konzessionsabgabenverordnung.*

https://www.destatis.de/DE/Methoden/Qualitaet/Qualitaetsberichte/Energie/einfuehrung.html[7] *Link zu den Qualitätsberichten einschließlich Fragebogen des StaBuA*

Regelmäßiger Vergleich der Energiebilanzen

Vergleich der endgültigen Energiebilanz 2023 mit der endgültigen Energiebilanz 2022 (nach Revision)

Die endgültigen Energiebilanzen werden von der AGEB in der Regel im Februar des übernächsten Kalenderjahres veröffentlicht. Um frühzeitiger Daten bereitstellen zu können, wird von EEFA und ZSW im Februar eine Frühschätzung vorgenommen. Im Mai wird jeweils eine erste vorläufige Energiebilanz einschließlich der Satellitenbilanz für die erneuerbaren Energien erstellt. Im September stellt dann das StaBuA Daten für die Energiebilanz („early-estimates") zur Verfügung. Zeitnah im September werden dann die Auswertungstabellen, die Zeitreihen einzelner Energieträger der Energiebilanz abbilden, erstellt.

Zur Identifikation signifikanter Abweichungen zwischen Energiebilanzen, die jeweils gesondert zu erläutern sind, werden absolute und relative Abweichungen berechnet. Aus einer Kombination der Kriterien „Abweichungen in TJ" und „Abweichungen in %" werden Positionen nach Energiebilanzspalten und –zeilen analysiert. Als Schwellenwerte werden Abweichungen von 10.000 TJ und 20 % zugrunde gelegt.

Für den Vergleich der endgültigen Energiebilanz 2023 mit der endgültigen Energiebilanz 2022 (nach Revision) resultieren bei diesen Kriterien 26 Positionen, die in der folgenden Übersicht dargestellt und erläutert werden. Die hier dargestellten Differenzen entsprechen den statistischen Veränderungen gegenüber dem Vorjahr. Ursachen solcher Änderungen bestehen generell u.a. in der Konjunkturentwicklung, Strukturänderungen, Preisänderungen, Witterungseinflüssen und Sonderentwicklungen wie dem Ausstieg aus der Kernenergie. Diese allgemeinen Entwicklungen des Energieverbrauchs und seiner Determinanten 2023 im Vergleich zu 2022 werden in den Jahresberichten der AG Energiebilanzen erläutert.[118]

Der Vergleich der Energiebilanzen dient insbesondere der Kontrolle und Dokumentation der Plausibilität von auffälligen Veränderungen. Bei einigen Bilanzpositionen sind allerdings Änderungen, die mit den oben genannten Kriterien erfasst werden, nicht ungewöhnlich. Dies betrifft z.B. Bestandsänderungen, die sich naturgemäß von Jahr zu Jahr deutlich unterscheiden.

[118] AG Energiebilanzen: Energieverbrauch in Deutschland fällt auf niedrigsten Stand seit 1990. März 2023. www.ag-energiebilanzen.de.

Übersicht: Auffällige Positionen beim Vergleich der endgültigen Energiebilanz 2023 mit der endgültigen Energiebilanz 2022

EB-Spalte	*EB-Zeile*	*TJ*	*%*	*Erläuterungen*
Steinkohle	*2*	*-318 735,3*	*-27,6*	*Daten laut Statistik*
Steinkohle	*7*	*-20 227,5*	*-59,4*	*Daten laut Statistik*
Steinkohle	*11*	*-195 856,0*	*-38,8*	*Daten laut Statistik*
Steinkohle	*12*	*-10 543,4*	*-44,0*	*Daten laut Statistik*
Steinkohle	*15*	*-14 367,0*	*-22,5*	*Daten laut Statistik*
Rohbraunkohle	*1*	*-276 709,8*	*-23,2*	*Daten laut Statistik*
Rohbraunkohle	*11*	*-246 423,7*	*-24,2*	*Daten laut Statistik*
Erdöl, roh	*3*	*17 847,7*	*100,0*	*Daten laut Statistik*
Erdöl, roh	*41*	*-10 048,7*	*-63,8*	*Daten laut Statistik*
Ottokraftstoffe	*2*	*70 520,3*	*88,3*	*Daten laut Statistik*
Ottokraftstoffe	*3*	*18 599,2*	*100,0*	*Daten laut Statistik*
Rohbenzin	*2*	*- 108 480,9*	*-33,9*	*Daten laut Statistik*
Rohbenzin	*43*	*- 78 667,2*	*-28,1*	*Daten laut Statistik*
Dieselkraftstoffe	*3*	*18 872,0*	*1646,2*	*Daten laut Statistik*
Heizöl, schwer	*43*	*- 12 522,2*	*-26,7*	*Daten laut Statistik*
Gicht- und Konv.gas	*54*	*13 146,3*	*21,2*	*Daten laut Statistik*
Erdgas, Erdölgas	*2*	*-1 523 746,3*	*-32,2*	*Daten laut Statistik*
Erdgas, Erdölgas	*5*	*-1 127 188,0*	*-61,3*	*Daten laut Statistik*
Erdgas, Erdölgas	*7*	*- 314 032,9*	*-94,8*	*Daten laut Statistik*
Strom	*2*	*71 911,8*	*40,5*	*Daten laut Statistik*
Strom	*5*	*- 59 411,9*	*-21,5*	*Daten laut Statistik*

Strom	*23*	*- 198 940,7*	*-22,5*	*Daten laut Statistik*
Strom	*25*	*- 98 977,1*	*-79,2*	*Kernenergieausstieg der Bundesregierung*
Strom	*55*	*- 12 222,3*	*-21,6*	*Daten laut Statistik*
Kernenergie	*2*	*- 299 930,5*	*-79,2*	*Kernenergieausstieg der Bundesregierung*
Kernenergie	*13*	*- 299 930,5*	*-79,2*	*Kernenergieausstieg der Bundesregierung*

VERGLEICH DER ENDGÜLTIGEN ENERGIEBILANZ 2023 (STAND: JANUAR 2025) MIT DER SCHÄTZBILANZ 2023 (STAND: SEPTEMBER 2024, „EARLY ESTIMATES“)

Zur Identifikation signifikanter Abweichungen zwischen Energiebilanzen, die jeweils gesondert zu erläutern sind, werden absolute und relative Abweichungen berechnet. Aus einer Kombination der Kriterien „Abweichungen in TJ“ und „Abweichungen in %“ werden auffällige Positionen nach Energiebilanzspalten und –zeilen analysiert. Als Schwellenwerte werden Abweichungen von 10.000 TJ und 20 % zugrunde gelegt.

Für den Vergleich der early-estimates-Schätzbilanz 2023 (Stand September 2024) mit der endgültigen Energiebilanz 2023 (Stand Januar 2025) resultiert bei diesen Kriterien keine Position.

Die Differenzen zwischen der Schätzbilanz 2023 und der Energiebilanz 2023 entsprechen den zum Zeitpunkt der Erstellung der Bilanz auftretenden Veränderungen im Vergleich zur Schätzung vier Monate früher. Ursachen solcher Änderungen bestehen generell u.a. in Konjunkturentwicklung, Strukturänderungen, Preisänderungen, Witterungseinflüssen und Sonderentwicklungen wie der Ausstieg aus der Kernenergie.

Darüber hinaus ist zu beachten, dass zur Erstellung der Schätzbilanzen zum Teil andere Datenquellen als für die endgültigen Energiebilanzen verwendet werden müssen und die Angaben deshalb voneinander abweichen können. Außerdem können Differenzen u.U. auch auf methodischen Änderungen beruhen.

Der Vergleich der Energiebilanzen dient insbesondere der Kontrolle und Dokumentation der Plausibilität von auffälligen Veränderungen. Bei einigen Bilanzpositionen sind allerdings Änderungen, die mit den oben genannten Kriterien erfasst werden, nicht ungewöhnlich. Dies betrifft z.B. Bestandsänderungen, die sich naturgemäß von Jahr zu Jahr deutlich unterscheiden.

Übersicht: Auffällige Positionen beim Vergleich der Schätzbilanz 2023 mit der Energiebilanz 2023

EB-Spalte	*EB-Zeile*	*TJ*	*%*	*Erläuterungen*

Anhang 6.5 Aktionsplan Energiedaten Inventarverbesserung

Seit 2012 erarbeitet das Umweltbundesamt in Zusammenarbeit mit BMWE, AGEB und StBA einen Aktionsplan Energiedaten Inventarverbesserung, in dem dargelegt wird, wie den Beanstandungen aus der Inventarüberprüfung Rechnung getragen werden soll. Damit wird der Forderung aus Paragraph 39 des Überprüfungsberichts 2011 (FCCC/ARR/2011/DEU) nach einem Aktionsplan entsprochen. Punkte, die in der vorangegangenen Berichterstattung abgeschlossen waren bzw. als erledigt gekennzeichnet wurden, werden hier nicht erneut aufgeführt.

Tabelle 488: Aktionsplan Energiedaten Inventarverbesserung

Nr	Thema	Zuständigkeit	Verantwortlich für die Durchführung	Bezug (Absatz)	Zitat aus Überprüfungsbericht 2011 (FCCC/ARR/2011/DEU)	Instrument zur Umsetzung / Veröffentlichung	Aktivität zur Verbesserung	geplantes / erreichtes Ergebnis	Zeitliche Perspek-tive	Anmerkung
1	Aktionsplan Energiedaten zur Inventarver-besserung	BMWK/UBA/ AGEB/StBA	UBA	39	address review relevant issues in an action plan in the 2011 submission. […] The ERT reiterates the recommendation of the previous review report that Germany prepare a plan for the remaining abovementioned issues, and to report on it and on any progress achieved in its next annual submission	Aktionsplan; NIR	Für den Inventarbericht 2013 wird erstmals dieser Aktionsplan aufgestellt	abgestimmter Aktionsplan Energiedaten Inventarverbesserung liegt für die Inventarüberprüfung 2012 vor und wird jährlich aktualisiert	laufend	
3.1	Abweichungen vorläufige und endgültige EB	BMWK/AGEB / StBA/StaLas	AGEB; UBA	39	significant differences between the preliminary and final NEB	QK-Bericht; NIR	Energiedatenkonsistenzana lyse (EDKA)	Feststellung und Klärung der Abweichungen sowie Unterscheidung und Adressierung von a) Informationsdefiziten b) Dokumentationsbedarfen c) Datenproblemen d) methodische Änderungen	fortlaufend	
3.2	Abweichungen vorläufige und endgültige EB	AGEB	AGEB	39	significant differences between the preliminary and final NEB	QK	Von der AGEB wird angestrebt, eine Verringerung der Schätzfehler zu erreichen. Seit dem Auftrag zur Erstellung der Energiebilanzen für die Jahre 2018 bis 2020 ist festgelegt, dass die vorhandenen Schätzverfahren und Überleitungsmodelle ständig zu optimieren und schriftlich niederzulegen sind..	Berichte der AGEB zu Plausibilitätschecks. Die AGEB prüft neue Verfahren und Methoden zur Erstellung der Schätzbilanz. Konkrete Vorschläge dazu wurden vorgelegt (vgl. Bericht des EEFA-Forschungsinstituts zum Thema Schätz - u. Modellansätze zur Erstellung vorl. Energiebilanzen).	fortlaufend	
3.3	Abweichungen vorläufige und endgültige EB	AGEB, UBA	UBA	39	significant differences between the preliminary and final NEB	Inventar-beschreibung	Im Rahmen der Arbeiten an Inventar und Nationalem Inventarbericht 2015 (NIR) werden Abweichungen beschrieben und die Ergebnisse werden im Rahmen einer	Arbeitsstand ist in der Inventarbeschreibung 2015 dokumentiert: Dokumentation, Datenrevision für frühere Jahre, Verringerung von Schätzfehlern	seit 2012 fortlaufend	

Nr	Thema	Zuständigkeit	Verantwortlich für die Durchführung	Bezug (Absatz)	Zitat aus Überprüfungsbericht 2011 (FCCC/ARR/2011/DEU)	Instrument zur Umsetzung / Veröffentlichung	Aktivität zur Verbesserung	geplantes / erreichtes Ergebnis	Zeitliche Perspek-tive	Anmerkung
							Differenzendiskussion dargestellt.			
4	komplexes Nationales System	BMWK/UBA/ AGEB	UBA	39	The previous review report noted several issues related to Germany's NEB (such as […] the complexity of the NEB compiling process that may contribute to the problems with regard to timeliness and quality.	NaSE	Austausch über die Ergebnisse der Inventar-überprüfung und Ableitung von Handlungsbedarfen	Jährliche Energiedatenworkshops seit 2010	seit 2010 fortlaufend	
5	Qualitäts-sicherung	EEFA/ DIW/ StBA/ AGEB / UBA	AGEB/UBA	39	lack of QA/QC procedures in place for some data sources used to compile the NEB	NIR	gemeinsamen Qualitätsbericht der AGEB in neuen Anhang 2 des NIR 2012 und folgende	the NEB is subject to QA/QC procedures in accordance with the national system	seit 2012 fortlaufend	
6.1	Abweichungen EB mit IEA-Daten	BMWK, AGEB, Fragebogenbeauftragte	BMWK	39	low comparability with the IEA data		gemeinsam im Rahmen des Aktionsplans festzuschreiben	Einführung eines Überleitungsverfahrens zur Sicherstellung der Kompaitibilität zwischen Energiebilanz und Fragebogen im Bereich Strom und Wärme (vgl. dazu im Einzelnen Bericht des EEFA-Forschungsinstituts an AGEB bzw. BMWK. Die Überleitung wurde im Zuge der umfassenden Revision der Fragebögen erfolgreich umgesetzt. In anderen Bereichen der Fragebögen bzw. Bilanz werden die Bemühungen zur Mininierung von Abweichungen weiter fortgesetzt. Berichte der AGEB zu Plausibilitätschecks Revision des Questionnaires 2003-2011. Revision der NEB 2023 wurde durchgeführt	Abgeschlos sen bzw. Fortlaufend	
6.2	Abweichungen EB mit IEA-Daten	BMWK, AGEB, Fragebogenbeauftragte	BMWK	45	The ERT also noted differences between the inventory data and the corresponding IEA data (e.g. for solid fuels exports, the data show differences of over 60 per cent in some recent years […] Germany has provided some		gemeinsam im Rahmen des Aktionsplans festzuschreiben	Siehe 6.1	fortlaufend	

Nr	Thema	Zuständigkeit	Verantwortlich für die Durchführung	Bezug (Absatz)	Zitat aus Überprüfungsbericht 2011 (FCCC/ARR/2011/DEU)	Instrument zur Umsetzung / Veröffentlichung	Aktivität zur Verbesserung	geplantes / erreichtes Ergebnis	Zeitliche Perspek-tive	Anmerkung
					explanations for the divergences and informed the ERT that it is continuing to investigate these differences. The ERT considers that the differences cause no underestimation of emissions, but reiterates the recommendation of the previous review report that Germany explain the reasons for these differences between its inventory data and the corresponding IEA data in its next annual submission.					

Anhang 6.6 CO_2-Emissionsfaktoren

Die CO_2 Emissionsfaktoren wurden für die Berichterstattung 2015 vollständig überarbeitet. Dabei konnte erstmals in großem Umfang auf Daten des Emissionshandels zurückgegriffen werden. Es lagen Daten zu Heizwerten, Emissionsfaktoren, Brennstoffmengen und der Datenqualität vor. Diese Daten wurden einer gründlichen Qualitätskontrolle unterzogen. So wurden nur die Faktoren der Ebene 3 (Messung) in die Rechnung einbezogen. Weiterhin wurden Emissionsfaktoren ersetzt, die offensichtlich aus Listenwerten stammten. Manche Stoffströme werden im Emissionshandel nicht eindeutig benannt, was zu fehlerhaften Materialzuordnungen bei festen Brennstoffen führt. Bezüglich der Kohlen konnten diese Fehlallokationen über den Heizwert eindeutig identifiziert und nachträglich umsortiert werden. Braunkohlen und Steinkohlen lassen sich über den Heizwert eindeutig unterscheiden. Aus den qualitätsgeprüften Daten wurden jährlich gewichtete Mittelwerte berechnet. Um überprüfen zu können, ob die ermittelten Faktoren repräsentativ sind, wurden die dahinterliegenden Brennstoffmengen mit denen der Energiebilanz verglichen. Außerdem wurde auf eine weitestgehende Konsistenz zwischen Heizwerten und Emissionsfaktoren geachtet.

Zusätzlich zu den Daten des Emissionshandels wurden noch weitere Datenquellen ausgewertet, Archivdaten gesichtet und eigene Messungen durchgeführt. Für die Rückrechnungen bis 1990 wurden je nach Sachverhalt sehr unterschiedliche Verfahren gewählt. Damit sollte zum einen die Zeitreihenkonsistenz gesichert werden und zum anderen möglichst realitätsnahe Lösungen gefunden werden. Die Herausforderung bestand gut dokumentierte Archivdaten für das Jahr 1990 zu finden, da Dokumente aus dieser Zeit nur in Papierform an unterschiedlichen Institutionen vorlagen. Außerdem werden Daten nur selten über einen Zeitraum von über 20 Jahren aufbewahrt.

Da zum verbleibenden Kohlenstoffgehalt in der Asche keine belastbaren und repräsentativen Daten vorliegen, wird als Oxydationsfaktor 1 angenommen. Das entspricht dem Default-Wert der 2006 IPCC Guidelines (IPCC, 2006a).

Eine ausführlichere Beschreibung findet sich im Bericht: CO_2-Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe - Aktualisierung 2022 (Juhrich, 2022).

Anhang 6.6.1 Steinkohlen

Für die Steinkohlen wird ein sektorübergreifender Emissionsfaktor berechnet, was in diesem Fall sicherstellt, dass die Gesamtemissionen möglichst genau ermittelt werden. Eine Ausnahme bilden die Kokskohlen für die Eisen & Stahlindustrie, die sich deutlich von den Kesselkohlen unterscheiden. Eine weitere Ausnahme bilden die in den Haushalten und übrigen Kleinfeuerungsanlagen eingesetzten Anthrazitkohlen, die deutlich höhere Heizwerte und Kohlenstoffgehalte aufweisen.

Für die übrigen Steinkohlen wurden Emissionshandelsdaten für die Jahre 2005–2014 ausgewertet. Es gibt jeweils Stoffströme, die einem bestimmten Herkunftsgebiet zugeordnet werden können. Dadurch ist es möglich, herkunftsspezifische CO_2-Emissionsfaktoren und Heizwerte zu ermitteln. Neben den herkunftsspezifischen Daten gibt es noch eine Menge gemischter Kohlen bzw. Kohlen unklarer Herkunft. Für alle einzelnen Kohlefraktionen (Deutschland, Südafrika, Australien, Indonesien, Kolumbien, Norwegen, Polen, Tschechien, Russland, USA und Venezuela) wurden CO_2-Emissionsfaktoren und Heizwerte bestimmt. Für die nicht spezifizierbaren sonstigen Steinkohlen wurden ebenfalls gewichtete Mittelwerte berechnet. Um die Emissionsfaktoren zurückrechnen zu können, wurden für die Steinkohlen

zwei verschiedenen Rechenvarianten geprüft. Zum einen wurde mit Hilfe der Daten zu den einzelnen Herkunftsgebieten sowie über die Importströme der Steinkohlenstatistik, ein gewichteter Mittelwert für jedes Jahr berechnet. Zum anderen wurde aus den gesamten im Emissionshandel gemeldeten und geprüften Emissionsfaktoren für Steinkohlen ein gewichteter Mittelwert gebildet. Die folgende Abbildung zeigt das Ergebnis des Vergleiches:

Tabelle 489: Vergleich der CO_2-Emissionsfaktoren für die Steinkohlen

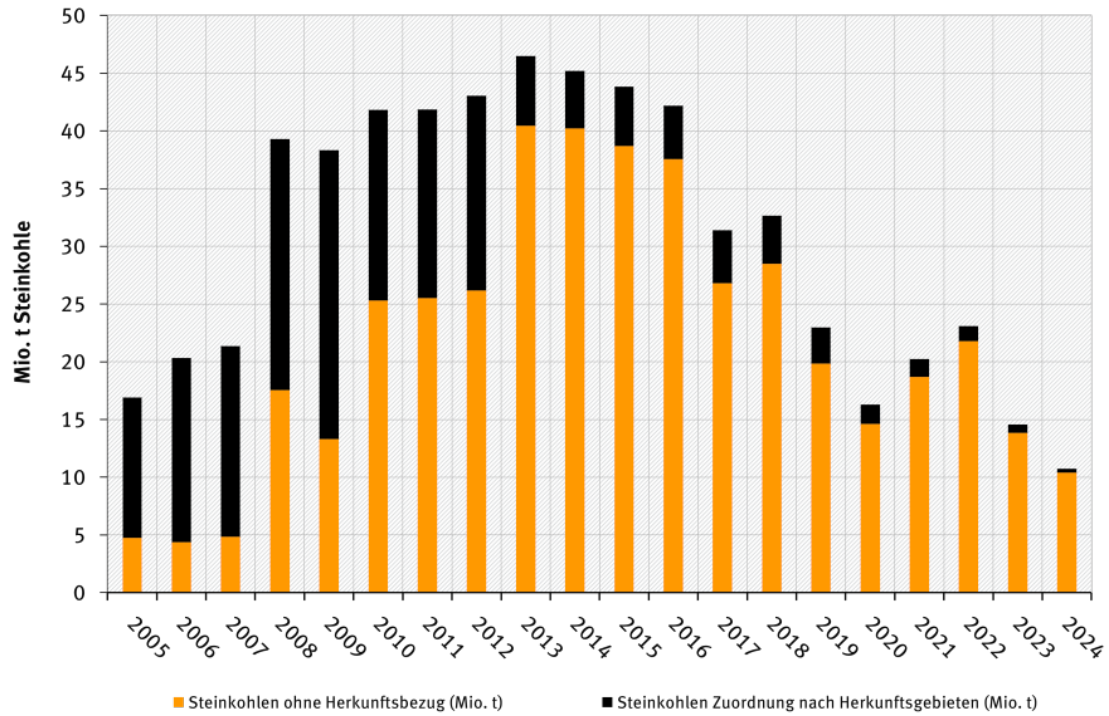
[t CO_2/TJ]	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Rechnung über Importe	93,874	93,976	93,865	93,924	93,993	94,003	94,181	93,652	93,276	93,888
gewichteter EF aller ETS-Daten	93,606	93,940	93,792	94,317	94,121	94,032	94,228	93,675	93,363	93,560
Differenz	0,29%	0,04%	0,08%	-0,42%	-0,14%	-0,03%	-0,05%	-0,02%	-0,09%	0,35%

Da die Differenzen in den meisten Jahren sehr gering sind, können ab dem Jahr 2006 die gewichteten Emissionsfaktoren von allen im Emissionshandel gemeldeten Steinkohlen (außer Eisen & Stahl) verwendet werden - unabhängig vom Herkunftsgebiet. Für die Rückrechnung bis 1990 werden die aus den Emissionshandelsdaten gebildeten herkunftsspezifischen Emissionsfaktoren mit den jeweiligen Importströmen kombiniert. Dadurch entsteht eine konsistente Zeitreihe.

Zwischen 2014 und 2021 lagen die CO_2 Emissionsfaktoren für die Steinkohle immer unterhalb von 94 t CO_2/TJ. Im Jahr 2022 lag der Wert mit 94,3 t CO_2/TJ darüber, da sich in dem Jahr aufgrund des Importverbotes für russische Steinkohle die Struktur der Kohleimporte deutlich änderte. Die russische Steinkohle, die bis dato einen relevanten Anteil hatte, musste innerhalb kurzer Zeit durch Steinkohle aus anderen Herkunftsgebieten ersetzt werden. Auch im Jahr 2023 lag der Emissionsfaktor mit 94,1 t CO_2/TJ noch über dem Niveau von 2014-2021.

Die folgende Abbildung zeigt die auswertbaren Steinkohlemengen für die im Emissionshandel gemessene Emissionsfaktoren und Heizwerte vorlagen.

Abbildung 134: Steinkohlemengen für die im Emissionshandel gemessene Emissionsfaktoren und Heizwerte vorliegen

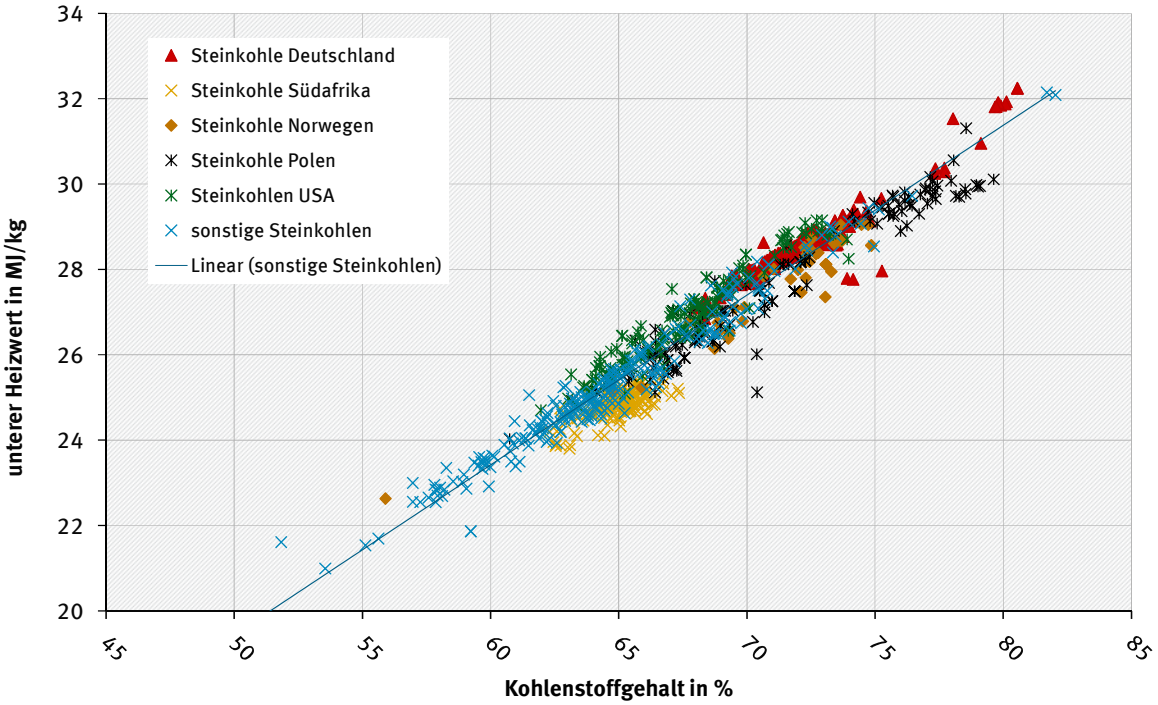


Quelle: eigene Darstellung, UBA

Dabei zeigt sich, dass aufgrund der Änderung der Regelungen die Qualität der Werte, vor allem ab dem Jahr 2008 deutlich ansteigt. Zum anderen fällt auf, dass die Menge der Steinkohlen, die sich eindeutig einem bestimmten Abbaugebiet zuordnen lässt, deutlich abnimmt. Von daher ist die Bildung eines gewichteten Mittelwertes über alle Steinkohlen, unabhängig von der Herkunft, die fachlich sinnvollste Lösung. Nur so kann sichergestellt werden, dass die Emissionsfaktoren repräsentativ sind.

Insgesamt wurden sehr gründliche Qualitätsprüfungen durchgeführt und zahlreiche Auswertungen vorgenommen. Die folgende Abbildung zeigt beispielhaft, dass sich zum einen mehr oder weniger deutliche Herkunftsprofile erstellen lassen, zum anderen ein klarer Zusammenhang zwischen Kohlenstoffgehalt und Heizwert besteht.

Abbildung 135: Verhältnis zwischen Kohlenstoffgehalten und Heizwerten für verschiedene Steinkohlenqualitäten



Quelle: eigene Darstellung, UBA

Die meisten Steinkohlen haben einen Kohlenstoffgehalt (bezogen auf die Originalsubstanz) zwischen 60 und 75 %. Der Durchschnitt liegt je nach Jahr zwischen 65 und 66 %. Die Steinkohlen im unteren Bereich bis zu einem Kohlestoffgehalt von rund 56 % und einem Heizwert von maximal 22 MJ/kg können als Ballaststeinkohlen bezeichnet werden. Die Steinkohlen im oberen Bereich, ab einem Heizwert von ca. 30 MJ/kg weisen Kokskohlenqualität auf. Die höchsten Kohlenstoffgehalte kommen bei Anthrazit vor.

Die Werte der in Deutschland eingesetzten Kokskohlen sind in dieser Grafik nicht enthalten. Die Kokskohlen wurden aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften separat ausgewertet. Außerdem werden für die Eisen & Stahl Industrie bezüglich der Kohlen im Emissionshandel keine auswertbaren Heizwerte gemeldet, so dass für diesen Bereich nur massebezogene Emissionsfaktoren ermittelt wurden. Dementsprechend werden die Kohlemengen ebenfalls in Tonnen bilanziert. Da für diesen Sektor in der Statistik Heizwertangaben größtenteils fehlen, erscheint es sinnvoll, mit natürlichen Einheiten zu rechnen. Nach intensiven Gesprächen mit den zuständigen Fachexperten der Deutschen Emissionshandelsstelle konnten repräsentative Emissionsfaktoren für die in der Eisen & Stahlindustrie eingesetzten Steinkohlen ermittelt werden. Aus dem gleichen Datensatz konnten Emissionsfaktoren für Steinkohlenkoks, Steinkohlenteer sowie Benzol generiert werden..

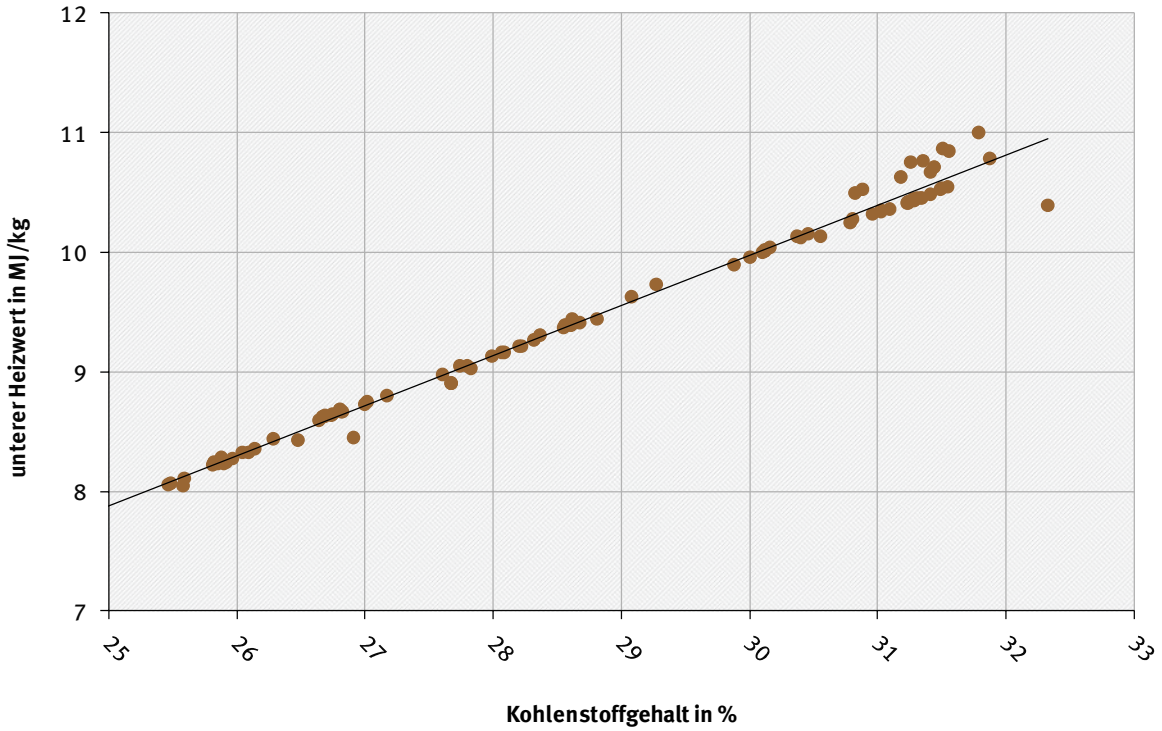
Bezüglich Steinkohlenkoks wurde für alle anderen Industriezweige eine energiebezogener Emissionsfaktor als Mittelwert aus den Emissionshandelsdaten für die Jahre 2005–2013 berechnet. Für die Folgejahre weichen die Emissionsfaktoren nur geringfügig ab, so dass mit dem Mittelwert weiter gerechnet werden kann.

Da die in den Kleinfeuerungsanlagen eingesetzten Steinkohlenbriketts über den Emissionshandel nicht erfasst werden, wurden für diesen Bereich im Rahmen eines Projektes eigene Analysen durchgeführt. Die Werte werden bis zum Jahr 1990 zurückgeschrieben, da für das Basisjahr keine repräsentativen Werte vorliegen.

Anhang 6.6.2 Braunkohlen

Die Rohbraunkohlen, die in der öffentlichen Versorgung eingesetzt werden, können über die Braunkohlenstatistik revierspezifisch zugeordnet werden. Die Emissionsfaktoren werden ab dem Jahr 2005 aus den Emissionshandelsdaten ermittelt. Die Kohlenstoffgehalte (bezogen auf die Originalsubstanz) liegen ebenfalls revierspezifisch vor. Die folgende Abbildung soll ein Beispiel geben:

Abbildung 136: Verhältnis zwischen Kohlenstoffgehalten und Heizwerten am Beispiel einer Rohbraunkohlequalität



Quelle: eigene Darstellung, UBA

Bezüglich der Braunkohlen sind die Unterschiede beim Schwefelgehalt größer als bei den Steinkohlen. Da der Schwefelgehalt einen merklichen Einfluss auf den Heizwert und damit auf das Verhältnis zwischen Kohlenstoffgehalt und Heizwert hat, muss die Braunkohle revierspezifisch ausgewertet werden. Die Abbildung 136 zeigt, dass es eine eindeutige Korrelation zwischen Heizwert und Kohlenstoffgehalt gibt. Somit kann über die entsprechende Formel und den für die jeweiligen Jahre bekannten Heizwert, der entsprechende Kohlenstoffgehalt und anschließend der energiebezogene CO_2-Emissionsfaktor berechnet werden. Dadurch ist eine Rückrechnung bis 1990 und somit die Bildung einer konsistenten Zeitreihe möglich. Sicherlich gibt es Unschärfen, da 1990 vermutlich noch kleinere Gruben in Betrieb waren, die andere Schwefelgehalte aufwiesen. Das lässt sich aber im Nachhinein nicht mehr herausfinden. 1990 wurden kaum Kohlenstoffanalysen durchgeführt, weil dieses Thema damals noch nicht relevant war. Es gibt nur wenige Einzelanalysen, die nicht unbedingt repräsentativ sind. So liegen zum Beispiel für die Hessische Braunkohle, welche bis 2003 gefördert wurde, nur Angaben zum Heizwert vor. Für die Rückrechnung wurde hier ein mittlerer Schwefelgehalt angenommen, der zwischen dem Mitteldeutschen und dem Rheinischen Revier liegt. Mengenmäßig ist diese Kohle kaum relevant. Der Emissionsfaktor ändert sich zwischen 1991 und 1992 sehr stark, weil in diesem Revier zwei Kraftwerke vom Netz gingen, die zwischenzeitlich mit minderwertiger Kohle versorgt wurden.

Für den Rohbraunkohleeinsatz in den Fernheizwerken wird ein gewichteter Emissionsfaktor aus dem Braunkohleeinsatz in der öffentlichen Versorgung berechnet. Für die Industrie und die Kleinverbraucher wurde aus der Absatzstatistik des DEBRIV (Deutscher Braunkohlen Industrie Verein) ein gewichteter Emissionsfaktor berechnet, der sich aus der Verteilung der Reviere ergibt.

Zur Ermittlung der Emissionsfaktoren für die Braunkohlenbriketts werden ab dem Jahr 2005 Emissionshandelsdaten verwendet. Daraus werden Jahres- und revierspezifische Mittelwerte gebildet, aus denen mit Hilfe der Absatzstatistik (DEBRIV) ein gewichteter Mittelwert berechnet wird. Die Emissionshandelsdaten können nicht direkt verwendet werden, da sie den Berichtskreis nicht vollständig abdecken. Die Haushalte und Kleinverbraucher nehmen nicht am Emissionshandel teil. Um sicherzustellen, dass die Brennstoffqualitäten gleich sind, wurden die Datenauswertungen aus dem ETS mit eigenen Analysen für Briketts aus dem Haushaltsbereich verglichen. Die Werte passen gut zusammen. Braunkohlenbriketts sind zwar ein standardisiertes Produkt, für das bestimmte Qualitätsmerkmale gelten, trotzdem gibt es revierspezifische Unterschiede, abhängig vom Kohlenstoff- oder Schwefelgehalt der eigesetzten Rohbraunkohlen. Die Rückrechnung bis zum Jahr 1990 erwies sich als deutlich komplizierter als die Berechnung der Rohbraunkohlen. Lediglich für die Rheinischen Braunkohlenbriketts konnten aus ETS Daten 2005 – 2013 ein mittlerer CO_2 Emissionsfaktor berechnet werden, der auch für die Jahre 1990 – 2004 verwendet werden kann. In den Neuen Bundesländern wurden Anfang der 1990er Jahre sehr viele Brikettfabriken geschlossen, so dass sich die Qualität der Brennstoffe deutlich verändert hat. Aus mitteldeutscher Braunkohle werden gar keine Briketts mehr hergestellt. Dementsprechend sind auch keine aktuellen Messwerte vorhanden. Von daher musste auf Archivdaten zurückgegriffen werden. Es lagen Analysedaten von Mohry 1986 sowie Daten aus dem „Jahresbericht der Kohleindustrie der DDR“ aus dem Jahre 1986 vor. Es stellte sich heraus, dass der bisher für die mitteldeutschen Briketts angenommene Kohlenstoffgehalt deutlich zu hoch war. Bei der Berechnung der Mittelwerte wurde darauf geachtet, dass die Emissionsfaktoren mit den vom DEBRIV veröffentlichten Heizwerten zusammenpassen. Somit konnte für jedes Revier ein jährlicher CO_2 Emissionsfaktor berechnet werden. Daraus konnten mit Hilfe der vom DEBRIV verfügbaren Absatzstatistik jährliche, gewichtete Emissionsfaktoren berechnet werden.

Bezüglich der Braunkohlenstaub- und Wirbelschichtkohle ist die Datenlage deutlich einfacher, da aus allen Revieren Daten im Emissionshandel vorliegen. Für die Rückrechnung bis 1990 wurden hier - abhängig von der Datenqualität - Mittelwerte aus den Jahren 2005 bzw. 2008–2013 verwendet. Analog zu Rohbraunkohlen und Briketts, wurde auch für die Braunkohlenstaub- und Wirbelschichtkohlen mit Hilfe der Absatzstatistik (DEBRIV) ein gewichteter Emissionsfaktor berechnet. Ab dem Jahr 2005 werden die Emissionsfaktoren aus dem Emissionshandel direkt in die Berechnung eingefügt. Mit Hilfe der Revierspezifischen Absatzstatistik werden dann wie bisher gewichtete Faktoren berechnet.

Braunkohlenkoks wird gegenwärtig nur noch in einem Revier hergestellt. Der Herdofenkoks dient im Wesentlichen der stofflichen Nutzung. Da die Brennstoffqualität nur äußerst geringe Schwankungen aufweist, wurde aus den ETS Daten 2008–2013 ein Mittelwert gebildet, der bis 1990 zurückgerechnet wurde. Für die neuen Bundesländer lag nur eine Datenquelle vor. Es handelt sich um Analysen aus der Ingenieursschule für Bergbau und Energetik „Ernst Thälmann“ in Senftenberg. Es erscheint aber plausibel, dass der Kohlenstoffgehalt deutlich geringer war, während Asche- und Schwefelgehalt im Vergleich zum rheinischen Koks deutlich höher lagen. Folgerichtig ist der für die neuen Bundesländer berechnete Emissionsfaktor auch niedriger.

Der für 2014 aus den Emissionshandelsdaten ermittelte Emissionsfaktor liegt mit 109,317 t CO_2/TJ dicht an dem für 2005–2013 berechneten Mittelwert von 109,578 t CO_2/TJ.

Der Datensatz aus der Ingenieursschule für Bergbau und Energetik „Ernst Thälmann“ in Senftenberg enthielt auch Analysen für Torf, lufttrocken. Der Heizwert stimmt mit dem in der Energiebilanz verwendeten Heizwert überein. Die Werte für das in den Raffinerien der neuen Bundesländer eingesetzte Braunkohlenteeröl, stammen aus derselben Datenquelle.

Für den in den Neuen Bundesländern verwendeten Braunkohlenteer lagen keine Daten vor. Alternativ wurden Analysedaten aus dem Forschungsbericht Vertrag Nr. 7220-EB/106 (DEBRIV 1980) verwendet. Braunkohlenteer wird seit dem Jahr 1991 nicht mehr eingesetzt.

Die CO_2 Emissionsfaktoren für die Hartbraunkohlen können ab dem Jahr 2008 aus ETS Daten generiert werden. In Deutschland werden derzeit nur sehr geringe Mengen an Hartbraunkohle eingesetzt. Um die Emissionsfaktoren bis 1990 zurückrechnen zu können, wurde aus den vorhandenen ETS Daten das Kohlenstoff/ Heizwertverhältnis ermittelt. Mit Hilfe der aus der Braunkohlestatistik (DEBRIV) bekannten Heizwerte konnte dann eine konsistente Zeitreihe erstellt werden.

Anhang 6.6.3 Mineralöle

Rohöl und Rohbenzin werden in Deutschland nicht in Verbrennungsanlagen eingesetzt. Deshalb liegen für diese Rohstoffe im Emissionshandel keine Kohlenstoffgehalte vor. Auch aus anderen Quellen liegen keine Analysewerte vor. Von daher werden die Default-Werte aus den 2006 Guidelines verwendet. Die Faktoren werden nur für das Referenzverfahren sowie für die Raffinerie-Umwandlungsbilanz benutzt. Für Flugbenzin und Schmierstoffe kommen ebenfalls Default-Werte zur Anwendung.

Zur Berechnung der CO_2-Emissionsfaktoren für Ottokraftstoff wurde eine umfangreiche Auswertung des DGMK Forschungsberichts 502-1 „Zusammensetzung von Ottokraftstoffen aus deutschen Raffinerien“ (Schmiedel, 2003) vorgenommen. Im Rahmen der Studie wurden die Bestandteile der Kraftstoffe sehr detailliert untersucht. Als Ergebnis liegt die Konzentration von 113 Einzelsubstanzen sowie 16 Stoffgruppen als Mittelwerte für Normalbenzin, Super und Super Plus aus allen deutschen Raffinerien vor. Über die Kohlenstoffgehalte der angegebenen Stoffe und der dazugehörigen Konzentration konnte für die drei Kraftstoffqualitäten jeweils ein gewichteter Kohlenstoffgehalt berechnet werden, aus dem wiederum ein massebezogener Emissionsfaktor abgeleitet wurde.

Eine Überprüfung und Aktualisierung der Faktoren erfolgte im Rahmen des Projektes: „Analyse von Ottokraftstoffen und Flugbenzin zur Validierung der Faktoren“ im Jahr 2020 durch PetroLab. Die Ergebnisse, die sich nur auf den fossilen Brennstoffanteil beziehen, ähneln denen der DGMK Studie. Die folgende Tabelle zeigt die Mittelwerte der Faktoren, aus den bisherigen Projekten:

Tabelle 490: Vergleich der CO_2-Emissionsfaktoren für den fossilen Kraftstoffanteil

	Einheit	Normal	Super	Super verbleit	Super Plus
Petrolab 2022	t CO_2/t	-	3,171	-	3,137
DGMK 2002	t CO_2/t	3,183	3,185	-	3,141
DGMK 1994	t CO_2/t	3,179	3,188	3,193	3,156
max. Differenz	%	0,129	-0,551		-0,618

Die Höhe des Emissionsfaktors hängt im Wesentlichen vom Anteil der Aromaten, Parafine, Ether und sonstiger Sauerstoffverbindungen ab, die unterschiedliche Kohlenstoffgehalte aufweisen.

Während der Untersuchungen der DGMK Studie waren im Ottokraftstoff noch keine Biokomponenten enthalten. Daher musste keine Unterscheidung der Kraftstoffkomponenten vorgenommen werden. In der Studie von PetroLab 2022 mussten dagegen biogene und fossile Kraftstoffkomponenten unterschieden werden, weil diese getrennt berichtet werden müssen.

Die Ableitung des innerhalb der Inventare verwendeten energiebezogenen Emissionsfaktors erfolgt über von der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB) jährlich veröffentlichte Heizwerte (AGEB, 2025d).

Da sich aus den Analysdaten in den verschiedenen Projekten kein Heizwert ermittelbar war, der sich nur auf den fossilen Brennstoffanteil bezog, wird zunächst mit dem in Tabelle 490 angegebenen massespezifischen Emissionsfaktoren gerechnet. Für die Umrechnung in Energieeinheiten wird der von der Arbeitsgemeinschaft verwendetet untere Heizwert von 43.543 kJ / kg verwendet. Entsprechend liegt der abgeleitete energiebezogene Emissionsfaktor bei 72.787 kg CO_2 / TJ (für 2022)– und liegt damit innerhalb der Bandbreite gemäß IPCC-Guidelines.

Die in der Studie von PetroLab ermittelten Faktoren werden ab dem Jahr 2005 verwendet, da in 2005 aufgrund der Fuel Quality Directive Novelle die Absenkung des Aromatengehaltes von 42 auf 35% vorgeschrieben wurde. Es ist davon auszugehen, dass die Umsetzung nicht jahresscharf sondern gleitend erfolgte. Aus diesem Grund wird zwischen den Jahren 2002 und 2005 interpoliert.

Als Grundlage zur Berechnung des Emissionsfaktors für Dieselkraftstoff dient der DGMK Forschungsbericht 583: „Zusammensetzung von Dieselkraftstoffen aus Deutschen Raffinerien 1999-2002“. Dabei wurden Proben aus 13 Raffinerien für Sommer- und Winterqualitäten untersucht. Aus den Analyseergebnissen wurden jeweils ein Mittelwert für die Sommer- und ein Mittelwert für die Winterqualität berechnet. In Deutschland ist die Verfügbarkeit von Winterdiesel gesetzlich geregelt. Danach müssen die Tankstellen vom 15.11. bis zum 28.02. Winterdiesel anbieten. Zusätzlich muss noch eine Umstellungsphase berücksichtigt werden, so dass mit einer Nutzung von Winterdiesel von ca. 4 Monaten zu rechnen ist. Demnach fahren die Dieselfahrzeuge 8 Monate lang mit Sommerdiesel. Über diese Verteilung wurde aus den Analyseergebnissen zum Sommer- und Winterdiesel ein gewichteter Emissionsfaktor berechnet.

Die CO_2 Emissionsfaktoren für Heizöl leicht, Petrolkoks, Heizöl schwer und Andere Mineralölprodukte werden aus Emissionshandelsdaten berechnet. Die jeweiligen Mittelwerte aus den Jahren 2005–2013 wurden bis 1990 zurückgeschrieben. Für Petrolkoks, Heizöl, schwer und Andere Mineralölprodukte werden ab 2005 bzw. 2008 jeweils jahresspezifische, gewichtete Mittelwerte aus dem Emissionshandel verwendet. Die Grenze zwischen schwerem Heizöl und Anderen Mineralölprodukten ist nicht leicht zu ziehen. Gemäß der Mineralölstatistik wurden die Anderen Mineralölprodukte als Reststoffe aus den Raffinerien definiert und der Emissionsfaktor entsprechend berechnet.

Für das Raffineriegas wird aus den ETS Daten ein massebezogener CO_2-Emissionsfaktor berechnet. Da die jährlichen Schwankungen gering sind, wird hier ein über alle Jahre gleicher Faktor verwendet, der aus den Durchschnittswerten der Jahre 2005–2013 gebildet wird. Während die im Emissionshandel angegebenen unteren Heizwerte nur geringe jährliche Schwankungen aufweisen, schwanken die in der Energiebilanz verwendeten Heizwerte teilweise erheblich und weichen von den ETS Daten ab. Die in der Energiebilanz berichteten Raffineriegasmengen stammen aus der Mineralölstatistik. Diese Werte stimmen gut mit den ETS Daten überein. Aus Konsistenzgründen werden zur Inventarerstellung die in der Energiebilanz benutzten unteren Heizwerte verwendet. Der Emissionsfaktor wird dann entsprechend angepasst.

Um die Emissionsfaktoren für Flüssiggas ermitteln zu können, wurde zunächst über die molare Masse der Kohlenstoffgehalt für Butan und Propan berechnet. Der jeweilige Anteil der beiden Komponenten wird im Jahresbericht des Deutschen Verbandes Flüssiggas e.V. veröffentlicht. Auch die Daten bis 1990 wurden vom Verband zur Verfügung gestellt. Über den jeweiligen Anteil der beiden Komponenten wird für alle ein gewichteter Emissionsfaktor berechnet, der durch den in der Energiebilanz verwendeten unteren Heizwert geteilt wird. Die im NID veröffentlichten Emissionsfaktoren für Flüssiggas gelten nur für den energetischen Verbrauch. Die Daten für die stoffliche Nutzung unterscheiden sich, da in diesem Fall im Gemisch durchschnittlich mehr Butan als Propan enthalten ist. Bei der energetischen Nutzung ist mehr Propan als Butan enthalten. Leider ist diese Aufteilung seit dem Berichtsjahr 2017 nicht mehr verfügbar. Daher wird das Verhältnis Butan zu Propan zukünftig fortgeschrieben. Ein großer Effekt wird dadurch nicht erwartet. Die Anteile schwankten über die Jahre nur unwesentlich.

Anhang 6.6.4 Gase

Gemäß IPCC Definition der Brennstoffe werden einige gasförmige Brennstoffe den festen Brennstoffen zugeordnet, da diese nach Logik der Guidelines aus festen Brennstoffen entstehen bzw. hergestellt werden. Das gilt für Kokerei- und Stadtgas, Gicht- und Konvertergas sowie für Brenngas. Die sonstigen hergestellten Gase werden den flüssigen Brennstoffen zugeordnet, da diese Gase im Wesentlichen in der Chemischen Industrie entstehen, aus dem Nichtenergetischen Verbrauch von Naphtha und anderen Mineralölprodukten. Diese Zuordnung ist notwendig, um im Referenzverfahren sinnvolle Ergebnisse zu erzielen.

Zur Ermittlung der Emissionsfaktoren für Kokereigas, Gichtgas, Konvertergas und Erdölgas werden Emissionshandelsdaten verwendet. Für die Rückrechnung bis 1990 wurden aus den ETS Daten 2005–2013 Mittelwerte berechnet, die dann für die Jahre 1990–2004 verwendet werden. Da in der Energiestatistik Gicht- und Konvertergas nur als Gasgemisch berichtet werden, wird aus den für beide Gase einzeln ermittelten Emissionsfaktoren und dem Gicht- und Konvertergasaufkommen ein gewichteter Emissionsfaktor berechnet. In den einzelnen Verwendungsbereichen gibt es sicherlich Unterschiede im Mischungsverhältnis. Da die Gicht- und Konvertergasverbrennung im Emissionshandel nur teilweise abgedeckt wird, wird durch die hier angewendete Berechnungsmethode sichergestellt, dass die Gesamtemissionen korrekt berechnet werden.

Bis zum Jahr 1996 wurde in Deutschland noch Stadtgas eingesetzt, das in der Energiebilanz mit dem Kokereigas zusammengefasst wird. Genau wie bei der Gicht- und Konvertergasverbrennung ist auch hier der Anteil vom Kokereigas und Stadtgas bei der Verwendungsseite nicht ablesbar. Deshalb wird auch in diesem Fall über das Kokereigas- und das Stadtgasaufkommen ein gewichteter Emissionsfaktor berechnet. Die Werte für das Stadtgas stammen von der GASAG und DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH Leipzig. Es liegen detaillierte Analysen für die Jahre 1989 bis 1991 vor. Diese unterschiedlichen Gase wurden zu einer einigermaßen gleichbleibenden Stadtgasqualität zusammengemischt. Zum jeweiligen Mischungsverhältnis der Gasfraktionen für die Sommer- und Winterqualität liegen ebenfalls Information der DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH Leipzig vor. Die Emissionsfaktoren wurden entsprechend gewichtet. Die Werte für das ausschließlich in den Neuen Bundesländern verwendete Brenngas stammen aus dem Datensatz der Ingenieursschule für Bergbau und Energetik „Ernst Thälmann“ in Senftenberg. Der Begriff Brenngas ist nicht klar definiert. Da dieses Gas vornehmlich in den Grubenkraftwerken eingesetzt wurde, ist davon auszugehen, dass sich um ein braunkohlebasiertes Gas handelt. Die Zusammensetzung dieser Gase kann aber sehr unterschiedlich sein. Dementsprechend sind auch die Emissionsfaktoren sehr unterschiedlich.

Sie liegen in einem Bereich von 118,6 – 131 t CO_2/TJ. Im Sinne eines konservativen Ansatzes, um die Basisjahremissionen nicht zu überschätzen, wird für die Inventarerstellung der niedrigste Emissionsfaktor verwendet. Im Energiewirtschaftlichen Jahresbericht 1989 wird für sonstiges Gas ein Heizwert von 5,3 MJ/Nm^3 ausgewiesen, was auf einen höheren Emissionsfaktor hinweist. Da in der Energiebilanz Kokereigas, Stadtgas und Brenngas zusammengefasst berichtet werden, sind die Heizwerte der einzelnen Gase nicht mehr feststellbar.

Sonstige hergestellte Gase werden im Wesentlichen in der Chemischen Industrie eingesetzt. Unter diesem Begriff werden sowohl hochkalorische Gase, mit einem hohen Wasserstoffanteil, als auch niederkalorische Fackelgase mit einem hohen Stickstoffanteil zusammengefasst. Der Emissionsfaktor wird aus Emissionshandelsdaten für die Chemische Industrie berechnet. Dabei wird jährlich die Summe aus den Emissionen aus dem Einsatz sonstiger Gase im ETS gebildet. Brennstoffeinsatzmengen können aus den Emissionshandelsdaten nicht ermittelt werden, da ein Teil der Betreiber den Brennstoffeinsatz in Tonnen und ein anderer Teil in m^3 angibt. Heizwerte werden nur in Einzelfällen angegeben. In der Energiestatistik sind vergleichsweise niedrige Brennstoffeinsätze zu finden, deren jährliche Entwicklung nicht immer plausibel erscheint. Daher werden die Brennstoffmengen aus der Berichterstattung für Großfeuerungsanlagen (GFA) verwendet. Das sichert auch die Konsistenz zum Luftschadstoffinventar. Letztlich wird die aus dem ETS ermittelte CO_2-Menge, die aus der verbrennung sonstiger Gase entstanden ist, durch den Brennstoffeinsatz aus der GFA Berichterstattung geteilt, um einen CO_2 Emissionsfaktor zu berechnen. Die auf diese Weise ermittelten CO_2-Faktoren liegen in der gleichen Größenordnung wie Raffineriegas. Das erscheint plausibel, weil die sonstigen hergestellten Gase in der chemischen Industrie dem Raffineriegas sehr ähnlich sind. Daher geben viele Betreiber in der Energiestatistik diese Gase auch als Raffineriegas an.

Für Grubengas wird über die vom Steinkohlenverband angegebene verwertete Methanmenge und die in der Energiebilanz angegebene Gesamtmenge in Kubikmetern ein Methangehalt ausgerechnet. Über die entsprechende Gaszusammensetzung wird ein CO_2-Emissionsfaktor berechnet. Da sich in einigen Jahren statistische Differenzen ergeben, wird, im Sinne eines konservativen Ansatzes mit dem niedrigsten Methangehalt gerechnet.

Da die im Emissionshandel verbuchte Erdgasmenge nicht repräsentativ ist und häufig Default-Emissionsfaktoren verwendet werden, wurden in dem Projekt: „Messungen der Erdgasqualität an verschiedenen Stellen im Netz zur Ableitung bzw. Verifizierung von durchschnittlichen Emissionsfaktoren und Heizwerte von Erdgas“ (2014), von der DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH Leipzig eigene Analysen durchgeführt. Dabei wurden an 32 Standorten Deutschlandweit Messungen vorgenommen. Die Messstellen wurden so ausgewählt, dass alle wichtigen Importgase sowie die Eigenförderung erfasst wurden. Außerdem wurde ein in Deutschland verteiltes Gemisch analysiert. In den Fällen, in denen die Messung an einem Grenzübergabepunkt nicht möglich war, wurden alternative Messstellen gefunden. Die Schwankungsbreite der Emissionsfaktoren innerhalb der Gasqualitäten ist sehr gering. Aber auch insgesamt schwanken die Werte nur geringfügig. Analog zu anderen Brennstoffen werden auch beim Erdgas keine sektorspezifischen Emissionsfaktoren ermittelt. Das ist in diesem Fall aufgrund der Datenlage nicht möglich. Von daher erscheint es realistischer, auf nationaler Ebene gewichtete Emissionsfaktoren zu ermitteln. Die Berechnung erfolgt auf Grundlage der vorgenommenen Messungen und der Importströme sowie der Eigenproduktion. Diese Berechnungsmethode ist seit dem Jahr 2015 nicht mehr anwendbar, da größere Importmengen der Geheimhaltung unterliegen. Somit werden ab 2015 die aus den Emissionshandelsdaten berechneten gewichteten Mittelwerte verwendet, auch wenn diese nicht ganz representativ sind. In den Vorjahren liegen die Faktoren dicht beieinander.

Im Jahr 2022 hat sich der Emissionsfaktor für Erdgas merklich geändert und ist erstmalig seit Beginn der Zeitreihe, in 1990, über die Marke von 56 t CO_2/TJ gestiegen. Grund dafür ist ein deutlicher Rückgang der Erdgaslieferungen aus Russland, die durch andere Gasqualitäten ersetzt werden mussten. Der neue Emissionsfaktor von 56,2 t CO_2/TJ liegt dichter an dem Emissionsfaktor für norwegisches Erdgas, das in größerem Umfang bereitsgestellt wurde, um die Lieferausfälle zu ersetzen. Dieser Trend setzt sich 2023 fort.

Anhang 6.6.5 Abfall und Sonderbrennstoffe

Für den Abfall wird gemäß VDI 3460 ein Kohlenstoffgehalt angenommen. Die Datenquelle für die Heizwerte ist die Energiestatistik. Die Daten für die Sonderbrennstoffe stammen aus dem Projekt: „Einsatz von Sekundärbrennstoffen“ (Lechtenböhmer, Nanning, et al. (2006b), FKZ 204 42 203/02). Diese Daten müssen noch mit Hilfe der Emissionshandelsdaten überprüft und gegebenenfalls korrigiert werden. Für Brennstoffe mit einem relevanten Biomasseanteil ist ein Vergleich mit ETS-Daten generell schwierig, da der Emissionsfaktor nicht in jedem Fall den Biomasseanteil berücksichtigt. Außerdem sind die Bezeichnungen im ETS nicht immer eindeutig. Da die Heizwerte der Sonderbrennstoffe deutlich stärker variieren als die der konventionellen Brennstoffe, ist eine eindeutige Identifikation über den Heizwert nicht möglich. Von daher ist ein solcher Vergleich deutlich aufwendiger. Während für die konventionellen Brennstoffe weitestgehend sektorübergreifende Emissionsfaktoren ermittelt werden, muss bei den Sonderbrennstoffen sektorspezifisch gerechnet werden.

Für wenige Sonderbrennstoffe konnten bereits Emissionshandelsdaten ausgewertet werden. Das betrifft Altöl und Altkunststoff. Diese Werte werden für die Kohlenstoffbilanz der Eisen & Stahlindustrie verwendet. Der Emissionsfaktor für Altreifen wurde aus ETS Daten aus dem Jahr 2010 berechnet.

Anhang 6.6.6 Biomassebrennstoffe

Die Emissionsfaktoren für die Biomassebrennstoffe, die als Ersatzbrennstoffe in der Industrie eingesetzt werden, stammen ebenfalls aus dem Projekt: „Einsatz von Sekundärbrennstoffen“ (Lechtenböhmer, Nanning, et al. (2006b), FKZ 204 42 203/02). Die CO_2 Emissionsfaktoren für Holz stammen aus dem Forschungsbericht „Effiziente Bereitstellung aktueller Emissionsdaten für die Luftreinhaltung“ (Struschka et al., 2008).

Für die Ablaugen aus der Zellstofferzeugung wurden auf Grundlage von Betreiberangaben zur stofflichen Zusammensetzung jeweils Emissionsfaktoren für Sulfat- und Sulfitablaugen berechnet. Aus diesen beiden Werten wird jährlich über die produzierten Mengen an Sulfit- und Sulfatzellstoff ein gewichteter Mittelwert gebildet.

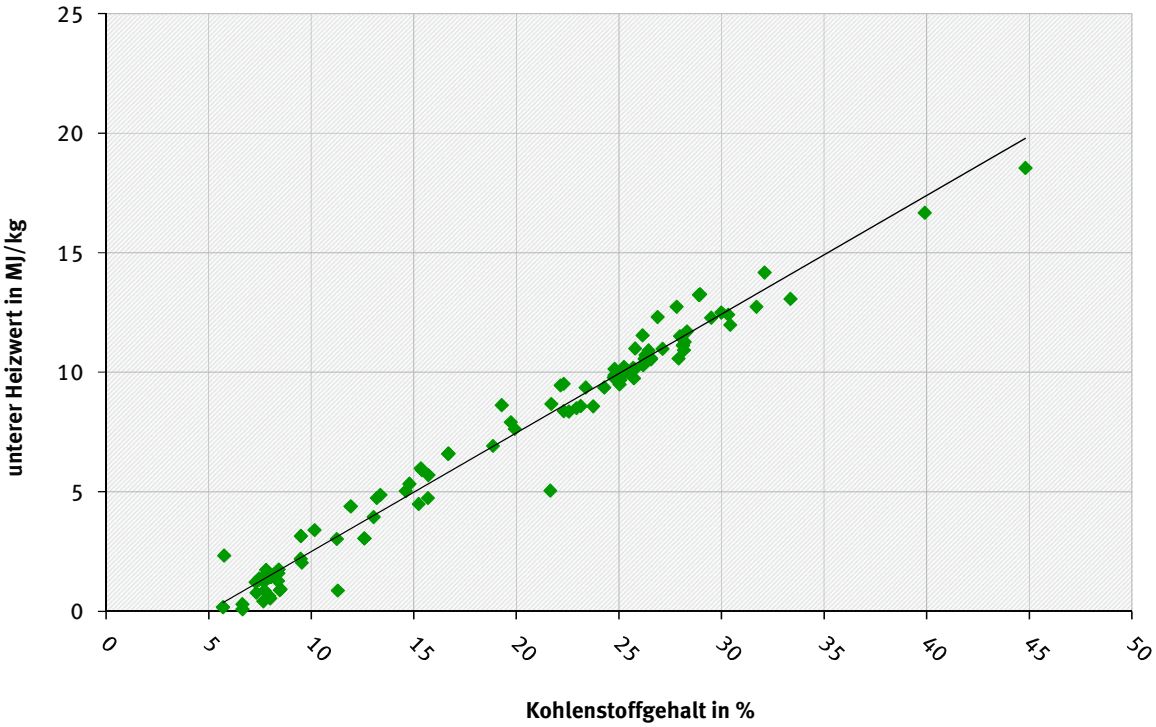
Zur Berechnung der CO_2-Emissionsfaktoren für Biogas, Deponiegas und Klärgas wurden zunächst Heizwerte aus der Energiestatistik ausgewertet. Aus den Heizwerten für die Jahre 2009 – 2011 wurden jeweils Mittelwerte berechnet. Aus diesem Heizwert wurde jeweils ein Methangehalt bestimmt. Da diese Gase neben Methan hauptsächlich aus Kohlendioxid und zu einem geringen Anteil aus Stickstoff bestehen, wird der Heizwert durch den Methangehalt bestimmt. Außerdem sind in den Biogasen noch Sonstige Kohlenwasserstoffe enthalten, deren Anteil ca. 1 % beträgt. Mit Hilfe dieser Gaszusammensetzung wurde ein CO_2 Emissionsfaktor berechnet.

Der Emissionsfaktor für Bioethanol wurde über die Anzahl der Kohlenstoffatome sowie die molare Masse von Ethanol berechnet. Der Heizwert wird vom Bundesverband der Deutschen

Bioethanolwirtschaft veröffentlicht. Für Biodiesel liegen keine eigenen Analysen vor. Deshalb wird der Default-Emissionsfaktor aus den 2006 IPCC Guidelines (IPCC, 2006a) verwendet.

Zur Bestimmung der CO_2-Emissionsfaktoren von Klärschlamm, Altholz und Tiermehl wurden Daten aus dem Emissionshandel ausgewertet. Für Tiermehl und Altholz wurde aus den von 2005 bis 2014 vorliegenden Daten zu Kohlenstoffgehalt und Heizwert der Median gebildet. Für Klärschlamm wurden zusätzlich Daten von kommunalen Entsorgern in die Auswertung einbezogen. Da Klärschlämme sowohl im Originalzustand als auch im getrockneten Zustand eingesetzt werden, reicht das Heizwertspektrum von < 1 MJ/kg bis 18 MJ/kg. Daraus folgend ist die Standardabweichung für die Emissionsfaktoren so hoch, dass die Bildung eines Mittelwertes oder Median nicht zielführend wäre. Da der Kohlenstoffgehalt sehr gut mit dem Heizwert korreliert, kann aus der graphischen Darstellung eine entsprechende Formel abgeleitet werden (siehe folgende Abbildung).

Abbildung 137: Verhältnis zwischen Kohlenstoffgehalten und Heizwerten für verschiedene Klärschlämme



Quelle: eigene Darstellung, UBA

Dadurch können mit Hilfe der in der Energiestatistik angegebenen Heizwerte für die Mitverbrennung und den Heizwerten für die Monoverbrennung die dazugehörigen Kohlenstoffgehalte und Emissionsfaktoren berechnet werden.

Anhang 6.6.7 Liste der abgeleiteten Kohlendioxid-Emissionsfaktoren für Energie & Industrieprozesse

In den folgenden Tabellen geben einen Überblick über die im Inventar verwendeten Kohlendioxid-Emissionsfaktoren.

Tabelle 491: Für die Emissionsberichterstattung abgeleitete Emissionsfaktoren für CO_2 ab 1990, Energie

Brennstoffbezogene Emissionsfaktoren	Einheit	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023	2024
Kohlen												
Steinkohle												
Steinkohle roh (Kraftwerke, Industrie)	t CO_2/TJ	93,1	93,1	93,5	93,9	94,0	93,5	93,6	93,9	94,3	94,1	94,4
Steinkohlenbriketts	t CO_2/TJ	95,9	95,9	95,9	95,9	95,9	95,9	95,9	95,9	95,9	95,9	95,9
Steinkohlenkoks (ohne Eisen & Stahl)	t CO_2/TJ	108,1	108,1	108,1	108,1	108,1	108,1	108,3	107,8	108,6	108,6	109,6
Steinkohlenkoks Eisen & Stahl	t CO_2/ t	3,29	3,3	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2
Anthrazit (Wärmemarkt Haushalte, Kleinverbrauch)	t CO_2/TJ	97,6	97,6	97,6	97,6	97,6	97,6	97,6	97,6	97,6	97,6	97,6
Balaststeinkohle *Alte Bundesländer*	t CO_2/TJ	95,2										
Kokskohlen *Deutschland*	t CO_2/ t	2,96	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,8	2,8	2,8
Steinkohlen Eisen & Stahl	t CO_2/ t	2,92	2,9	2,9	3,0	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9
Andere Steinkohlenprodukte	t CO_2/ t	3,30	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3
Steinkohlenteer	t CO_2/ t	3,27	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3
Benzol	t CO_2/ t	3,38	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,3	3,4
Braunkohle												
Rohbraunkohlen												
öffentliche Fernheizwerke *Deutschland*	t CO_2/TJ		111,7	110,8	111,1	110,7	111,0	110,6	110,8	110,8	109,4	109,4
Alte Bundesländer	t CO_2/TJ	113,8										
Neue Bundesländer	t CO_2/TJ	110,0										
Industrie, Kleinverbrauch *Deutschland*	t CO_2/TJ		106,0	109,8	108,2	106,3	104,0	105,9	105,8	105,4	104,4	103,6
Alte Bundesländer	t CO_2/TJ	114,7										
Neue Bundesländer	t CO_2/TJ	107,7										
öffentliche Kraftwerke Revier:												
Rheinland	t CO_2/TJ	114,8	113,9	113,1	113,2	113,3	113,1	113,3	113,1	113,1	113,9	113,8
Helmstedt	t CO_2/TJ	98,7	98,7	98,7	98,7	96,7	99,5	NO	NO	NO	NO	NO
Hessen	t CO_2/TJ	112,2	103,2	103,5	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Lausitz	t CO_2/TJ	111,2	111,3	111,5	111,2	110,6	110,9	110,2	111,0	111,1	107,5	107,4
Mitteldeutschland	t CO_2/TJ	105,7	103,9	102,9	104,0	103,4	102,9	103,6	103,2	103,2	101,7	101,6
Braunkohlenbriketts *Deutschland*	t CO_2/TJ		98,3	99,0	99,3	99,0	99,4	99,2	99,2	98,1	99,4	101,0
Alte Bundesländer	t CO_2/TJ	99,5										
Neue Bundesländer	t CO_2/TJ	96,6										
Braunkohlenteer *Neue Bundesländer*	t CO_2/TJ	82,9										
Braunkohlenteeröl *Neue Bundesländer*		78,6										
Braunkohlenstaub und -wirbelschichtkohle *Deutschland*	t CO_2/TJ		97,6	98,1	98,1	98,0	98,0	97,5	97,5	97,4	97,2	97,4
Alte Bundesländer	t CO_2/TJ	98,3										
Neue Bundesländer	t CO_2/TJ	96,1										
Braunkohlenkoks *Deutschland*	t CO_2/TJ		109,6	109,6	109,6	109,6	109,6	109,6	109,6	109,6	109,6	109,6
Alte Bundesländer	t CO_2/TJ	109,6										
Neue Bundesländer	t CO_2/TJ	100,2										
Torf Alte Bundesländer, *Deutschland*		101,8	101,8	101,8	101,8	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Hartbraunkohle	t CO_2/TJ	96,4	96,4	96,5	NO	94,9	94,5	94,4	93,6	94,0	93,4	93,7
Mineralöle												
Erdöl roh [4)]	t CO_2/TJ	73,3	73,3	73,3	73,3	73,3	73,3	73,3	73,3	73,3	73,3	73,3
Ottokraftstoff	t CO_2/TJ	73,1	73,1	73,1	72,9	72,8	72,8	72,8	72,8	72,8	72,8	72,8
Rohbenzin *Deutschland* [4)]	t CO_2/TJ		73,3	73,3	73,3	73,3	73,3	73,3	73,3	73,3	73,3	73,3
Alte Bundesländer [4)]	t CO_2/TJ	73,3										
Neue Bundesländer [4)]	t CO_2/TJ	73,3										

Brennstoffbezogene Emissionsfaktoren	Einheit	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023	2024
Kerosin [4]	t CO_2/TJ	73,3	73,3	73,3	73,3	73,3	73,3	73,3	73,3	73,3	73,3	73,3
Flugbenzin	t CO_2/TJ	71,2	71,2	71,2	71,2	71,2	71,2	71,2	71,2	71,2	71,2	71,2
Dieselkraftstoff *Deutschland*	t CO_2/TJ		74,0	74,0	74,0	74,0	74,0	74,0	74,0	74,0	74,0	74,0
Alte Bundesländer	t CO_2/TJ	74,0										
Neue Bundesländer	t CO_2/TJ	74,0										
Heizöl leicht *Deutschland*	t CO_2/TJ		74,0	74,0	74,0	74,0	74,0	74,0	74,0	74,0	74,0	74,0
Alte Bundesländer	t CO_2/TJ	74,0										
Neue Bundesländer	t CO_2/TJ	74,0										
Heizöl schwer	t CO_2/TJ	79,8	79,8	79,8	79,6	79,7	80,9	79,7	79,5	79,5	79,6	80,6
Petroleum	t CO_2/TJ	74,0	74,0	74,0	74,0	74,0	74,0	74,0	74,0	74,0	74,0	74,0
Petrolkoks (ohne Katalysatorabbrand)	t CO_2/TJ	94,8	94,8	94,8	94,8	94,6	97,6	103,4	101,8	99,6	100,6	99,3
Flüssiggas Deutschland (energetischer Verbrauch)	t CO_2/TJ		65,3	64,4	65,3	65,3	66,3	66,3	66,3	66,3	66,3	66,3
Alte Bundesländer	t CO_2/TJ	65,6										
Neue Bundesländer	t CO_2/TJ	65,6										
Raffineriegas *Deutschland*	t CO_2/TJ		56,9	56,7	57,0	66,4	62,0	57,2	57,1	57,3	57,1	56,4
Alte Bundesländer	t CO_2/TJ	54,6										
Neue Bundesländer	t CO_2/TJ	54,6										
Andere Mineralölprodukte *Deutschland*	t CO_2/TJ		82,1	82,1	82,1	82,5	82,3	80,4	81,9	82,1	82,5	81,9
Alte Bundesländer	t CO_2/TJ	82,1										
Neue Bundesländer	t CO_2/TJ	82,1										
Schmierstoff [4]		73,3	73,3	73,3	73,3	73,3	73,3	73,3	73,3	73,3	73,3	73,3
Gase												
Kokereigas *Deutschland*	t CO_2/TJ		41,0	41,0	40,7	40,3	41,3	41,0	41,5	40,9	40,5	40,8
Alte Bundesländer	t CO_2/TJ	41,0										
Neue Bundesländer	t CO_2/TJ	43,6										
Kokerei- und Stadtgas *Deutschland*	t CO_2/TJ		42,6									
Alte Bundesländer	t CO_2/TJ	43,2										
Neue Bundesländer	t CO_2/TJ	58,3										
Gicht- und Konvertergas *Deutschland*	t CO_2/TJ		257,1	258,7	252,9	259,7	261,3	256,4	254,5	257,6	257,7	256,1
Alte Bundesländer	t CO_2/TJ	264,6										
Neue Bundesländer	t CO_2/TJ	264,6										
Brenngas *Neue Bundesländer*	t CO_2/TJ	118,4										
sonstige hergestellte Gase *Deutschland*	t CO_2/TJ	61,5	61,5	61,5	61,5	61,5	63,7	56,0	55,6	54,3	57,7	57,5
Naturgase												
Erdgas *Deutschland*	t CO_2/TJ		55,8	55,8	55,9	55,9	55,9	55,8	55,8	56,2	56,3	56,4
Alte Bundesländer	t CO_2/TJ	55,7										
Neue Bundesländer	t CO_2/TJ	55,5										
Erdölgas	t CO_2/TJ	61,9	61,9	61,9	61,9	61,4	61,6	61,0	61,1	61,1	60,8	61,0
Grubengas	t CO_2/TJ	68,1	68,1	68,1	68,1	68,1	68,1	68,1	68,1	68,1	68,1	68,1
Abfall [2]												
Hausmüll, Siedlungsabfall	t CO_2/TJ	109,6	96,9	91,5	91,5	91,5	91,5	91,5	91,5	91,5	91,5	91,5
Industriemüll *Deutschland*	t CO_2/TJ		71,1	71,1	71,1	71,1	71,1	71,1	71,1	71,1	71,1	71,1
Alte Bundesländer	t CO_2/TJ	73,9										
Neue Bundesländer	t CO_2/TJ	74,9										
Sonderabfall Deutschland	t CO_2/TJ		83,0	83,0	83,0	83,0	83,0	83,0	83,0	83,0	83,0	83,0
Sonderbrennstoffe [1]												
Altöl	t CO_2/TJ	75,7	75,7	75,7	75,7	75,9	75,3	76,9	82,4	81,3	81,9	71,9
Altkunststoff	t CO_2/TJ	80,9	80,9	80,9	80,9	80,9	80,9	80,9	80,9	80,9	80,9	80,9
Altreifen	t CO_2/TJ	88,4	88,4	88,4	88,4	88,4	88,4	88,4	88,4	88,4	88,4	88,4
Bleicherde	t CO_2/TJ	NO	78,2	78,2	78,2	78,2	78,2	78,2	78,2	78,2	78,2	78,2

Brennstoffbezogene Emissionsfaktoren	Einheit	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023	2024
Klärschlamm (2 MJ/kg)	t CO_2/TJ	NO	NO	NO	168,9	168,9	168,9	168,9	168,9	168,9	168,9	168,9
Klärschlamm (4 MJ/kg)	t CO_2/TJ	NO	NO	NO	120,4	120,4	120,4	120,4	120,4	120,4	120,4	120,4
Klärschlamm (6 MJ/kg)	t CO_2/TJ	NO	NO	NO	104,2	104,2	104,2	104,2	104,2	104,2	104,2	104,2
Klärschlamm (8 MJ/kg)	t CO_2/TJ	NO	NO	NO	96,1	96,1	96,1	96,1	96,1	96,1	96,1	96,1
Klärschlamm (10 MJ/kg)	t CO_2/TJ	NO	NO	NO	91,3	91,3	91,3	91,3	91,3	91,3	91,3	91,3
Lösemittel (Abfall)	t CO_2/TJ	74,2	74,2	74,2	74,2	74,2	74,2	74,2	74,2	74,2	74,2	74,2
Biomasse-Brennstoffe [3]												
Ablaugen Zellstoffherstellung	t CO_2/TJ	121,1	121,1	110,3	104,8	98,3	97,8	95,4	97,8	97,8	94,7	94,0
Faser-/Deinking-Rückstände	t CO_2/TJ	54,9	54,9	54,9	54,9	54,9	54,9	54,9	54,9	54,9	54,9	54,9
Brennholz naturbelassen	t CO_2/TJ	102,1	102,1	102,1	102,1	102,1	102,1	102,1	102,1	102,1	102,1	102,1
Holzabfälle, Resthölzer (Industrie)	t CO_2/TJ	107,8	107,8	107,8	107,8	107,8	107,8	107,8	107,8	107,8	107,8	107,8
Holzabfälle, Resthölzer (Kleinverbraucher)	t CO_2/TJ	101,4	101,4	101,4	101,4	101,4	101,4	101,4	101,4	101,4	101,4	101,4
Rinde	t CO_2/TJ	80,6	80,6	80,6	80,6	80,6	80,6	80,6	80,6	80,6	80,6	80,6
Tiermehle und -fette	t CO_2/TJ	85,8	85,8	85,8	85,8	85,8	85,8	85,8	85,8	85,8	85,8	85,8
Biogas	t CO_2/TJ	90,6	90,6	90,6	90,6	90,6	90,6	90,6	90,6	90,6	90,6	90,6
Deponiegas	t CO_2/TJ	111,4	111,4	111,4	111,4	111,4	111,4	111,4	111,4	111,4	111,4	111,4
Klärgas	t CO_2/TJ	104,9	104,9	104,9	104,9	104,9	104,9	104,9	104,9	104,9	104,9	104,9
Bio-Ethanol	t CO_2/TJ	NO	NO	NO	71,6	71,6	71,6	71,6	71,6	71,6	71,6	71,6
Biodiesel [4]	t CO_2/TJ	NO	70,8	70,8	70,8	70,8	70,8	70,8	70,8	70,8	70,8	70,8
Sonstige Faktoren Einheit [kg/t]												
Rauchgasentschwefelung	kg/t	440,0	440,0	440,0	440,0	440,0	440,0	440,0	440,0	440,0	440,0	440,0

1) Brennstoffe nach Definition der Inventardaten können bei den Bezeichnungen von anderen Normen abweichen und sind nur bei Inventarausweisung benannt und mit EF unterlegt.

2) Die CO2 Emissionsfaktoren für den Abfall beziehen sich auf den gesamten Kohlenstoffehalt (fossil und biogen). Die Biomasse wird entsprechend dem Massenanteil definiert.

3) Nennung für ausgewählte Brennstoffe, wobei errechnete CO_2-Emissionen nur nachrichtlich übermittelt werden und nicht in die Gesamtmengen des Inventars eingehen, Biomasseanteile aus Sonderbrennstoffen (s.o.) sind nicht gesondert aufgeführt, weil die CO_2-EF nicht unterschieden werden.

4) Defaultwerte

Anm.: Bei der Verwendung von Stoffwerten aus dem NID im Rahmen des ETS sind die Hinweise und FAQ der Deutschen Emissionshandelsstelle (DEHSt) zu beachten.

Tabelle 492: Für die Emissionsberichterstattung abgeleitete Emissionsfaktoren für CO_2 ab 1990, Industrieprozesse

[kg CO_2/ t (Rohstoff oder Produkt)]	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023	2024
2.A.1 Produktion von Zementklinker	530,00	530,00	530,00	530,00	530,00	530,00	530,00	530,00	530,00	530,00	530,00
2.A.2 Produktion von Branntkalk	746,00	746,00	746,00	746,00	746,00	746,00	746,00	746,00	746,00	746,00	746,00
2.A.2 Produktion von Dolomitkalk	867,00	867,00	867,00	867,00	867,00	867,00	867,00	867,00	867,00	867,00	867,00
2.A.3 Produktion von Behälterglas	193,00	193,00	193,00	193,00	193,00	193,00	193,00	193,00	193,00	193,00	193,00
2.A.3 Produktion von Flachglas	208,00	208,00	208,00	208,00	208,00	208,00	208,00	208,00	208,00	208,00	208,00
2.A.3 Produktion von Wirtschaftsglas	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00	120,00
2.A.3 Produktion von Spezialglas	113,00	113,00	113,00	113,00	113,00	113,00	113,00	113,00	113,00	113,00	113,00
2.A.3 Produktion von Glasfasern	198,00	198,00	198,00	198,00	198,00	198,00	198,00	198,00	198,00	198,00	198,00
2.A.3 Produktion von Steinwolle	299,00	299,00	299,00	299,00	299,00	299,00	299,00	299,00	299,00	299,00	299,00
2.A.3 Produktion von Glas[1]	118,94	115,64	112,76	115,53	122,23	117,62	115,82	116,47	115,06	113,96	114,19
2.A.4.a Produktion von Keramik[2]	71,79	74,93	69,47	61,55	59,24	54,77	53,26	53,61	53,34	49,55	48,69
2.A.4.b Verwendung von Soda	415,00	415,00	415,00	415,00	415,00	415,00	415,00	415,00	415,00	415,00	415,00
2.B.1 Produktion von Ammoniak[3]	2227,63	2246,17	2160,68	2190,69	2171,33	1507,97	1380,36	1387,44	1428,54	1447,93	1353,99

[kg CO_2/ t (Rohstoff oder Produkt)]	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023	2024
2.B.5 Produktion von Calciumcarbid	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
2.B.7 Produktion von Soda	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
2.B.8 Petrochemie	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00	28,00
2.B.8.f Produktion von Ruß	1.960	1.960	1.960	1.960	1.960	1.960	1.960	1.960	1.960	1.960	1.960
2.C.1 Produktion von Elektrostahl	8,50	7,40	7,40	7,40	7,40	7,40	7,40	7,40	7,40	7,40	7,40
2.C.1 Produktion von Oxygenstahl, Kalksteineinsatz	440,00	440,00	440,00	440,00	440,00	440,00	440,00	440,00	440,00	440,00	440,00
2.C.2 Produktion von Ferrolegierungen	1500,00	110,00	110,00	110,00	110,00	110,00	110,00	110,00	110,00	110,00	110,00
2.C.3 Produktion von Hüttenaluminium	1367,00	1367,00	1367,00	1367,00	1367,00	1367,00	1367,00	1367,00	1367,00	1367,00	1367,00
2.C.5 Produktion raff. Blei (D)		371,00	220,00	220,00	220,00	220,00	220,00	220,00	220,00	220,00	220,00
2.C.5 Produktion raff. Blei (ABL)	434,00										
2.C.5 Produktion raff. Blei (NBL)	200,00										
2.C.6 Zinkproduktion: Hütten- und Umschmelzzink	1720,00	1720,00	1720,00	1720,00	1720,00	1720,00	1720,00	1720,00	1720,00	1720,00	1720,00

C = Vertrauliche Daten

ABL/ NBL/ D: Bezugsangabe für alte Bundesländer/ neue Bundesländer/ Deutschland gesamt

1) 2.A.3 über alle Glasarten: CO_2-EF = (EM-Summe inkl. Altglaseinsatz)/ AR

2) 2.A.4.a über alle Produkte: CO_2-EF = EM-Summe/ AR

3) 2.B.1: CO_2-EF = (EM - Recovery amount)/ AR

Anm.: Bei der Verwendung von Stoffwerten aus dem NIR im Rahmen des ETS sind die Hinweise und FAQ der Deutschen Emissionshandelsstelle (DEHSt) zu beachten.

Anhang 7 Weitere detaillierte methodische Beschreibungen für einzelne Quell- und Senkenkategorien

Anhang 7.1 Weitere detaillierte methodische Beschreibungen für CRF 1 (Energie)

Anhang 7.1.1 Energiewirtschaft (1.A.1)

Anhang 7.1.1.1 Methodische Aspekte der Ermittlung der Emissionsfaktoren (Kapitel 3.2.4.2)

Dieser Abschnitt im NIR 2022 erläutert die wesentlichen Schritte in den Forschungsvorhaben Rentz et al. (2002) und Fichtner et al. (2011) zur Bestimmung von Emissionsfaktoren unter Ausschluss der CO_2-Emissionsfaktoren.

Anhang 7.1.2 Verkehr (1.A.3)

Anhang 7.1.2.1 Verkehr - Ziviler Luftverkehr (1.A.3.a)

Anhang 7.1.2.1.1 Ableitung der weiteren Emissionsfaktoren (1.A.3.a)

Kerosin

Die Emission von Schwefeldioxid ist direkt abhängig vom Schwefelgehalt des Kerosins, der regionalen und zeitlichen Schwankungen unterliegt. IPCC (2006a) geht hier mit einem EF von 1 kg SO_2/t Kerosin von einem Schwefelgehalt von 0,05 Gew.% aus. Nach Angaben des Fachausschusses für Mineralöl- und Brennstoff-Normung[119] (FAM) liegt der typische Wert für den Gesamtschwefelgehalt von Kerosin in Deutschland derzeit bei etwa 0,01 Gew.%, also einem Fünftel des Ansatzes des IPCC. Im Inventarbericht 2009 wird ein Schwefelgehalt von 0,021 Gew.% für Kerosin angesetzt, basierend auf Messungen aus dem Jahre 1998 (Döpelheuer, 2002). Da ein durch verbesserte Verfahren und gesunkene Grenzwerte mit der Zeit abnehmender Emissionsfaktor plausibel erscheint, wird hier eine lineare Abnahme zwischen den Stützjahren 1990 (1,08 g SO_2/kg Kerosin), 1998 (0,4 g) und 2009 (0,2 g) vorgesehen. Dabei wird von einer vollständigen Umsetzung des Schwefels in Schwefeldioxid ausgegangen. - Wegen der direkten Abhängigkeit des Emissionsfaktors allein vom Schwefelgehalt des Kerosins wird dieser für beide Flugphasen verwendet.

NO_X- und CO-Emissionen werden mit Hilfe von impliziten Emissionsfaktoren berechnet, die auf TREMOD-AV-Berechnungen beruhen. Diesen unterliegen Flugzeugtyp- und Betriebszustand-spezifische EF, die zu einem Großteil der EMEP/EEA-Datenbank entstammen. Wenn einzelne Flugzeugtypen nicht direkt und auch nicht unter Verwendung von Flugzeugtypen mit ähnlichen technischen Daten zugeordnet werden können, muss stellenweise mit angepassten Emissionsfaktoren gearbeitet werden. Dazu wurden Regressionsberechnungen durchgeführt, bei denen Emissionsfaktoren über Emissionsfunktionen ermittelt wurden, die den Emissionsfaktor je Triebwerkstyp in Abhängigkeit des Startgewichts berechnen. Als Basis dieser Funktionen dienen die Emissionsfaktoren der vorhandenen Typen gemäß Knörr et al. (2012).

Die NMVOC-Emissionsfaktoren ergeben sich jeweils aus der Differenz der EF für Kohlenwasserstoffe und Methan.

[119] Persönliche E-mail-Kommunikation mit Dr. Feuerhelm, FAM Hamburg, 9.Juni 2009

Flugbenzin

Analog zum Kerosin werden die nachfolgenden Emissionfaktoren dem Modell TREMOD AV entnommen:

Tabelle 493: Emissionsfaktoren 2024 für Flugbenzin, in [kg/TJ]

	1.A.3.a (Inlandsflüge)		1.D.1.a (Auslandsflüge)	
	L/TO	Reiseflug	L/TO	Reiseflug
CO_2	71.199			
CH_4	162	0,00	153	0,00
N_2O	2,30			
SO_2	0,46			
NO_X	98,9	148	85,5	142
NMVOC	650	590	613	585
CO	16.766	20.433	18.812	21.247

Quelle: TREMOD AV (Knörr, Allekotte, et al., 2025)

Tabelle 494: Übersicht der Emissionsfaktoren für Kerosin, in [kg/TJ]

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023	2024
CO_2	73.256										
SO_2	19,7	19,5	19,5	19,5	19,6	19,6	19,6	19,6	19,6	19,6	19,6
Kerosin, L/TO, national (1.A.3.a)											
CH_4	9,02	9,05	9,06	9,71	9,88	9,65	11,2	20,1	23,1	18,2	12,2
N_2O	2,81	2,79	2,79	2,79	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80	2,80
NO_X	290	320	282	282	273	300	308	286	272	288	305
NMVOC	36,1	36,2	36,2	38,8	39,5	38,6	44,8	80,4	92,2	72,8	48,7
CO	227	225	273	293	305	273	280	402	442	372	369
Kerosin, Reiseflug, national (1.A.3.a)											
CH_4	0,00										
N_2O	2,34										
NO_X	330	367	336	340	334	368	379	357	358	375	376
NMVOC	16,0	17,6	17,7	18,6	20,1	21,1	23,7	36,3	35,8	28,2	21,2
CO	150	152	177	194	205	198	217	272	310	237	305
Kerosin, L/TO, international (1.D.1.a)											
CH_4	15,4	9,37	9,13	6,76	5,92	5,49	5,33	5,17	4,77	4,72	4,46
N_2O	2,11	2,09	2,09	2,09	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10	2,10
NO_X	296	306	287	302	323	342	352	368	367	365	365
NMVOC	61,7	37,5	36,5	27,0	23,7	21,9	21,3	20,7	19,1	18,9	17,8
CO	253	230	251	240	221	204	198	189	189	187	184
Kerosin, Reiseflug, international (1.D.1.a)											
CH_4	0,00										
N_2O	2,34										

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023	2024
NO_X	313	316	313	328	337	351	365	379	378	378	375
NMVOC	13,5	9,09	9,15	6,13	5,33	4,72	4,44	4,49	4,13	4,21	4,13
CO	74,4	62,1	61,0	48,5	42,6	38,1	36,5	35,1	34,8	34,6	37,4

Quelle:TREMOD AV (Knörr, Allekotte, et al., 2025)

[a] gemäß IPCC (2006a): Band 2, Kapitel 3.6, Tabelle 3.6.5: Methan-Emissionen während Reiseflug vernachlässigbar gering

Anhang 7.1.2.2 Ableitung der Aktivitätsraten zum Straßenverkehr (1.A.3.b)

Anhang 7.1.2.2.1 Abgleich auf die Energiebilanz

Als Basis der ZSE-Datenerfassung des Straßenverkehrs wird der Endenergieverbrauch entsprechend den Angaben der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen zugrunde gelegt. Die Summe der Aktivitätsraten der einzelnen Strukturelemente muss für jedes Jahr den Angaben der Energiebilanz in Terajoule (TJ) entsprechen. Die Eckdaten der Energiebilanz sind in folgender Tabelle 495 dargestellt.

Tabelle 495: Energieeinsätze im Straßenverkehr seit 1990

Jahr	Benzin	Diesel	Biokraftstoffe	CNG, LPG & LNG	Petroleum	Schmierstoffe [a]
Energieeinsatz gemäß Energiebilanzen 1990-2024 (Stand: 10/2025) in TJ						
1990	1.330.479	735.920		138		2.543
1991	1.332.285	785.174		137		1.702
1992	1.344.129	853.502		229		1.299
1993	1.350.617	907.787		184	473	872
1994	1.276.637	932.060		184	559	596
1995	1.299.982	964.013	1.504	138	610	455
1996	1.299.879	964.580	2.046	115	638	372
1997	1.297.487	979.586	3.652	106	357	266
1998	1.300.463	1.022.794	4.081	106	637	206
1999	1.300.602	1.097.036	5.370	100	637	116
2000	1.237.055	1.108.105	12.276	94,0	414	82,7
2001	1.199.318	1.097.416	16.740	98,0	471	74,5
2002	1.166.381	1.105.842	20.460	607	472	77,3
2003	1.107.428	1.069.729	29.948	3.185		72,8
2004	1.073.174	1.102.318	40.029	4.666		72,4
2005	1.002.361	1.081.211	78.865	5.496		79,3
2006	967.016	1.125.137	143.944	10.845		79,6
2007	891.408	1.065.886	155.699	14.607		79,7
2008	852.680	1.090.704	126.100	22.616		83,6
2009	827.600	1.113.086	113.751	29.078		88,7
2010	790.544	1.155.828	120.289	28.478		82,5
2011	787.483	1.182.061	115.903	28.916		80,1
2012	739.581	1.211.695	120.012	26.644		75,4

Jahr	Benzin	Diesel	Biokraftstoffe	CNG, LPG & LNG	Petroleum	Schmierstoffe [a]
2013	738.174	1.267.041	109.168	28.556		77,7
2014	741.983	1.287.335	113.191	25.920		74,2
2015	731.258	1.342.885	105.665	24.546		80,4
2016	732.014	1.380.618	106.023	23.136		82,6
2017	735.005	1.427.136	108.141	20.936		79,5
2018	713.836	1.385.288	112.512	22.034		78,5
2019	720.708	1.391.411	111.583	19.587		79,6
2020	649.012	1.244.496	134.924	14.932		82,6
2021	653.665	1.255.404	120.783	17.567		73,0
2022	674.363	1.252.038	122.597	16.912		78,1
2023	690.409	1.189.167	128.297	14.865		68,9
2024	703.886	1.175.978	117.701	10.090		68,8

Quellen: Auswertetabellen der Energiebilanzen, Amtliche Mineralöldaten (BAFA, 2025b).

[a] Biodiesel, Bioethanol und Biomethan, [b] als Bestandteil von Zweitakter-Kraftstoffgemisch 1:50

Die Energiebilanz wird auch zur Modellierung der Verkehrsmengengerüste in TREMOD herangezogen. So führt das DIW zur Ableitung der Gesamtfahrleistung eine Kraftstoffverbrauchsberechnung durch Heilwig (2002). Die Ergebnisse der Berechnung werden für den PKW-Verkehr z.T. in TREMOD übernommen. Da das DIW mit der Kraftstoffverbrauchsberechnung die Inländerfahrleistung abbildet, werden in TREMOD zur Abschätzung der Inlandsfahrleistung – insbesondere für den Güterverkehr – z.T. andere Quellen und Annahmen verwendet (siehe ausführliche Beschreibung in Knörr et al. (2002). Auch diese Abschätzung berücksichtigt die Eckwerte der Energiebilanz.

Allerdings ist es aufgrund der zahlreichen Abhängigkeiten und Unsicherheiten in der Modellierung sowie der zu berücksichtigenden Eckdaten nicht mit vernünftigem Aufwand möglich, Fahrleistung und Energieverbrauch für jedes Jahr und jede Fahrzeugschicht so abzugleichen, dass die Ergebnisse einerseits die Summe der Energiebilanz ergeben und andererseits die Fahrleistungen und durchschnittlichen Energieverbräuche in der Zeitreihe plausibel sind. Aus diesem Grunde werden die TREMOD-Ergebnisse für den Energieverbrauch am Ende so korrigiert, dass sie jedes Bezugsjahr in der Summe den Werten der Energiebilanz entsprechen.

Da TREMOD den Energieverbrauch in Tonnen berechnet müssen die Ergebnisse zunächst in [TJ] umgerechnet werden. Dazu werden die Heizwerte der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen angesetzt. Während hier für Ottokraftstoff über alle Jahre ein einheitlicher Wert von 43,542 MJ/kg angenommen wird, kommen für die Dieselkraftstoffe jahresspezifische Werte zum Einsatz (siehe Tabelle 496).

Tabelle 496: mittlere Heizwerte Dieselkraftstoffe und Flüssiggas im Straßenverkehr, in MJ/kg

Geltungszeitraum	Dieselkraftstoff	Flüssiggas
1990-1992	42,70	
ab 1993	42,96	
2003	42,83	46,33

Geltungszeitraum	Dieselkraftstoff	Flüssiggas
2004	42,43	46,32
2005	42,22	46,12
2010	42,68	45,84
2015	42,57	45,12
2016	42,24	45,90
2017	42,70	44,75
2018	42,89	45,78
2019	42,69	45,53
2020	42,97	46,08
2021	42,67	46,05
2022	42,72	45,97
2023	42,76	45,96
2024	42,85	45,91

Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB)

Die Korrekturfaktoren werden in TREMOD separat für die einzelnen Fahrzeugkategorien wie folgt abgeleitet:

- Zunächst wird ein Korrekturfaktor für Ottokraftstoff aus dem berechneten Ottokraftstoff-Verbrauch aller Fahrzeugkategorien und dem Absatz an Ottokraftstoff gemäß der Energiebilanz abgeleitet.
- Der Korrekturfaktor für den Ottokraftstoff wird auch für Diesel verbrauchende Fahrzeuge der PKW und sonstigen Fahrzeuge ≤ 3,5 t (Leichte Nutzfahrzeuge (LNF), Wohnmobile, motorisierte Zweiräder (MZR)) zur Kraftstoffanpassung an die Energiebilanz verwendet.
- Die Differenz zwischen dem korrigierten Dieselkraftstoff-Verbrauch der PKW sowie der sonstigen Fahrzeuge ≤ 3,5 t und der Energiebilanz wird den schweren Nutzfahrzeugen und Bussen zugeordnet.
- Der Korrekturfaktor für die schweren Nutzfahrzeuge und Busse berechnet sich damit aus deren nach dem Inlandsprinzip berechneten Energieverbrauch und der für diese Gruppe berechneten Differenz zur Energiebilanz.

Die folgende Tabelle fasst die verwendeten Anpassungsfaktoren zusammen.

Tabelle 497: Korrekturfaktoren zur Anpassung an die Energiebilanz

	Ottokraftstoffe [a]	Dieselkraftstoffe [a]	
	Pkw, Leichte Nutzfahrzeuge, motorisierte Zweiräder	Pkw, leichte Nutzfahrzeuge	Schwere Nutzfahrzeuge, Busse
1990	1,09	1,09	0,98
1995	1,05	1,05	0,93
2000	1,00	1,00	0,96
2005	0,95	0,95	0,78
2010	0,87	0,87	0,88
2011	0,88	0,88	0,85
2012	0,86	0,86	0,92
2013	0,88	0,88	0,93
2014	0,89	0,89	0,87
2015	0,89	0,89	0,89
2016	0,90	0,90	0,87
2017	0,90	0,90	0,89
2018	0,88	0,88	0,86
2019	0,87	0,87	0,87
2020	0,91	0,91	0,90
2021	0,91	0,91	0,85
2022	0,93	0,93	0,84
2023	0,92	0,92	0,83
2024	0,92	0,92	0,80

[a] jeweils inklusive biogene Beimischungen

Quelle: (Knörr, Heidt, et al., 2025)

Anhang 7.1.2.2.2 Zuordnung von Bio-Kraftstoffen, Petroleum sowie Erd- und Flüssiggas auf die Strukturelemente

Die Energiebilanz enthält für die einzelnen Verkehrsträger auch Angaben zu Biomasse sowie weiteren Kraftstoffen. Diese werden wie folgt weiter zugeordnet:

- Biodiesel und Bioethanol werden gemäß dem Anteil des jeweiligen Verkehrsträgers (mit Ausnahme des Schiffsverkehrs) am Verbrauch des entsprechenden fossilen Kraftstoffs aufgeteilt.
- Biomethan wird in den Energiebilanzen nicht separat, sondern als Erdgasbestandteil ausgewiesen. Die konkreten Mengen sind aber aus der Erneuerbare-Energien-Statistik (EE-Stat) verfügbar und werden gemäß dem Anteil des jeweiligen Verkehrsträgers am Erdgas-Verbrauch aufgeteilt.
- Petroleum wird den Bussen auf Außerortsstraßen entsprechend ihrem Anteil am Verbrauch von konventionellem Dieselkraftstoff zugeordnet.

Anhang 7.1.2.2.3 Aktivitätsrate für Verdunstung

Als Aktivitätsrate für die Verdunstungsemissionen wird der gesamte Ottokraftstoff-Verbrauch innerorts angesetzt, bei Mopeds der Gesamtverbrauch. Es werden die Energiebilanz korrigierten Werte verwendet.

Anhang 7.1.2.3 Ableitung der Emissionsfaktoren

Anhang 7.1.2.3.1 Emissionsfaktoren aus TREMOD

Im ZSE werden für Antrieb und Verdunstung aus spezifischeren TREMOD-Daten erzeugte implizite Emissionsfaktoren in [kg/TJ] bzw. [kg/t] angegeben. Für Ottokraftstoffe und Diesel können diese Werte direkt aus TREMOD abgeleitet werden. Hierfür werden die Emissionen in [t] sowie der Energieeinsatz in [TJ] (umgerechnet aus den Ergebnissen „Energieverbrauch in t“ mit den Heizwerten nach Tabelle 495) aus den TREMOD-Ergebnissen abgeleitet und entsprechend zugeordnet. Die impliziten Emissionsfaktoren (IEF) ergeben sich als Quotient aus den spezifischen Emissionen in [t] dividiert durch den spezifischen Energieverbrauch in [TJ].

Gleichung 105:

$$IEF\ [kg\ pro\ TJ]_{\ Inventar} = EM\ [kg]_{\ spezifisch,TREMOD} \div AR\ [TJ]_{\ spezif.Verbrauch,TREMOD}$$

Hinsichtlich der impliziten Emissionsfaktoren für die Verdunstung wird analog vorgegangen:

Gleichung 106:

$$IEF\ [kg\ pro\ t]_{\ Inventar} = EM\ [kg]_{\ spezifisch,TREMOD} \div AR\ [t]_{\ spezif.Verbrauch,TREMOD}$$

Grundsätzlich werden für diese Ableitung die nicht auf die Energiebilanz korrigierten TREMOD-Daten verwendet. Eine Verwendung der korrigierten Emissionen und Energieverbräuche würde allerdings, da sich der Korrekturfaktor bei der Berechnung der IEF gemäß

Gleichung 107:

$$EM_{korr.} \div AR_{korr.} = EM_{TREMOD} \div AR_{TREMOD}$$

aufhebt, zu identischen Ergebnissen führen.

Anhang 7.1.2.3.2 Emissionsfaktoren für Biodiesel, Bio-Ethanol, Petroleum, Erd- und Flüssiggas

Die Emissionsfaktoren für Biodiesel und Petroleum werden durchweg denjenigen von konventionellem Diesel gleichgesetzt, die für Bioethanol verwendeten Werte dagegen denjenigen von konventionellem Ottokraftstoff.

Ausnahmen:

- Als EF(CO_2) von Biodiesel wird mit 70,8 t/TJ ein default gemäß IPCC (2006a): Band 2, Kap. 2 - Stationary Combustion, S. 2.20, Tab. 2.4 angesetzt.
- Der EF(SO_2) von Petroleum wird in den Jahren, in denen Dieselkraftstoff einen höheren Wert aufweist, mit 24 kg/TJ angesetzt. In allen anderen Jahren wird der niedrigere Wert von Dieselkraftstoff übernommen.

Wie für Diesel und Ottokraftstoffe werden auch für Flüssig- und Erdgas die Emissionsfaktoren aus dem „Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs 4.2“ (Keller et al., 2017) verwendet.

Anhang 7.1.2.3.3 länderübergreifender Vergleich der (impliziten) Emissionsfaktoren

Die nachfolgenden Tabellen stellen die für das deutsche Emissionsinventar und für das Jahr 2024 abgeleiteten impliziten Emissionsfaktoren für Methan und Distickstoffoxid aus PKW (1.A.3.b i), leichten (1.A.3.b ii) und schweren Nutzfahrzeugen (1.A.3.b iii, inkl. Bussen) sowie motorisierten Zweirädern (1.A.3.b iv) mit den entsprechenden impliziten Emissionsfaktoren anderer Berichtsstaaten gemäß Submission 2023 gegenüber. Die internationalen Vergleichswerte wurden dabei dem GHG Locator (UNFCCC, 2023a) entnommen.

Tabelle 498: implizite Emissionsfaktoren für CH_4 und N_2O aus PKW, in kg/TJ

	Ottokraftstoff		Dieselkraftstoff		CNG		LPG	
	CH_4	N_2O	CH_4	N_2O	CH_4	N_2O	CH_4	N_2O
Deutschland	4,49	0,29	3,61	3,57	16,80	0,25	1,90	0,82
Belgien	6,11	0,44	0,05	2,52	20,90	0,35	7,35	0,90
Dänemark	4,04	0,63	0,06	2,77	12,90	0,37	10,30	2,66
Frankreich	11,90	0,98	0,25	3,36	30,10	0,72	11,70	0,90
Italien	9,88	0,91	0,10	2,74	20,20	0,47	8,69	0,73
Niederlande	8,93	0,73	0,35	2,21	92,00	3,00	2,33	0,84
Spanien	7,73	0,81	0,19	3,31	22,10	0,55	8,13	0,64
EU-27	7,35	0,72	0,91	3,16	21,40	0,51	9,37	1,40
Großbritannien	5,68	0,60	0,08	2,99	IE	IE	IE	IE

Tabelle 499: implizite Emissionsfaktoren für CH_4 und N_2O aus leichten Nutzfahrzeugen, in kg/TJ

	Ottokraftstoff		Dieselkraftstoff		CNG	
	CH_4	N_2O	CH_4	N_2O	CH_4	N_2O
Deutschland	9,59	0,57	2,47	2,81	7,43	0,17
Belgien	5,02	0,75	0,05	1,78	IE	IE
Dänemark	5,37	2,02	0,08	2,01	12,8	0,40
Frankreich	11,7	0,94	0,10	2,47	21,9	0,71
Italien	6,09	1,46	0,11	1,84	NO	NO
Niederlande	4,04	1,86	0,68	1,48	92,0	3,00
Spanien	18,8	1,74	0,24	2,11	NO	NO
EU-27	10,6	1,64	0,46	2,29	26,0	0,89
Großbritannien	3,92	0,97	0,05	2,29	IE	IE

Tabelle 500: implizite Emissionsfaktoren für CH_4 und N_2O aus schweren Nutzfahrzeugen, in kg/TJ

	Dieselkraftstoff		CNG & LNG	
	CH_4	N_2O	CH_4	N_2O
Deutschland	0,09	4,27	34,8	NA
Belgien	0,69	4,04	50,1	NE
Dänemark	0,63	4,60	26,8	3,08
Frankreich	0,58	2,38	60,3	NO
Italien	1,94	3,23	56,4	NO
Niederlande	0,43	3,99	92,0	3,00
Spanien	1,59	3,46	49,6	NO
EU-27	1,18	3,47	57,8	1,24
Großbritannien	0,77	4,52	53,2	0,10

Tabelle 501: implizite Emissionsfaktoren für CH_4 und N_2O aus motorisierten Zweirädern, in kg/TJ

	Ottokraftstoff	
	CH_4	N_2O
Deutschland	120	1,16
Belgien	41,3	1,25
Dänemark	71,5	1,22
Frankreich	24,0	1,16
Italien	61,0	1,35
Niederlande	99,3	1,10
Spanien	69,0	1,43
EU-27	72,1	1,29
Großbritannien	41,5	1,21

Anhang 7.1.3 CO_2-Emissionen aus der Schmierstoff-Mitverbrennung in Zweitakt-Ottomotoren

Innerhalb des deutschen Treibhausgas-Inventars werden für sämtliche mobilen Quellen CO_2-Emissionen aus der Schmierstoff-Mitverbrennung erfasst. Gemäß den Anforderungen an die Emissionsberichterstattung werden dabei die auf Zweitakt-Ottomotoren entfallenden Emissionen direkt der jeweiligen Emissionsquelle zugeordnet, da hier der Schmierstoff als Teil des Zweitakter-Kraftstoffgemisches betrachtet wird. Alle nicht von Zweitaktern verursachten Mitverbrennungs-Emissionen werden dagegen unter CRF 2.D.1 (Produktanwendung) berichtet. (siehe Kapitel 4.5.1)

Für die gesamte Zeitreihe ab 1990 wird vereinfacht davon ausgegangen, dass das in Deutschland getankte Zweitakt-Gemisch aus 49 Teilen Ottokraftstoff und einem Teil Schmiermittel zusammengesetzt ist (Gemisch 1:50). Zumindest für die Mehrzahl der Zweitakt-Fahrzeuge stellt dieses Mischungsverhältnis seit den Achtzigerjahren den Standard dar. Zu Motoren, die mit einem Verhältnis von 1:100 auskommen (neuere mobile Geräte wie Kettensägen, Rasenmäher etc.) liegen keine belastbaren Anwendungsdaten vor.

Zweitakt-Fahrzeuge kommen aktuell in Form von Mopeds und kleineren Motorrädern lediglich im Straßenverkehr zum Einsatz. Bis Ende der Neunzigerjahre bestand zudem ein Teil der PKW- und Nutzfahrzeug-Flotte aus noch in der DDR produzierten Zweitaktern.

Innerhalb TREMOD liegen entsprechende separate Verbrauchsangaben für PKW und leichte Nutzfahrzeuge (bis 1999) sowie Zweiräder vor.

Angaben zum Einsatz mobiler Zweitakt-Geräte stehen aktuell sowohl für Haushalte (1.A.4.b ii) als auch die Forstwirtschaft (1.A.4.c ii) aus TREMODD MM heraus zur Verfügung.

Die Angaben zum Ottokraftstoffverbrauch im Straßenverkehr wie auch in den mobilen Quellen in Gewerbe, Handel und Dienstleistungen bzw. in den Haushalten entsprechen den Angaben der Energiebilanz.

Um die auf Zweitakter entfallenden Kraftstoffverbräuche vollständig abzubilden, müssen daher – gemäß dem Mischungsverhältnis von 1:50 – die Mengen hinzugefügter Schmierstoffe berechnet werden. Ausgehend von einem Anteil r_V von 2 Volumen-% muss dazu, über das Verhältnis der mittleren Dichten (ρ) und Heizwerte (H_i) beider Komponenten, der auf die Energiemenge in Terajoule bezogene Anteil r_E ermittelt werden:

Gleichung 108:

$$r_{E\%} = r_{V\%} \times \frac{\rho_{Schmierstoff}}{\rho_{Kraftstoff}} \times \frac{\mathrm{H_i}_{\mathrm{Schmierstoff}}}{\mathrm{H_i}_{\mathrm{Kraftstoff}}}$$

Gleichung 109:

$$r_{E\%} = 2\,\% \times \frac{0{,}875\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{l}}}{0{,}750\,\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{l}}} \times \frac{40{,}000\,\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg}}}{43{,}543\,\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg}}} = 2{,}1435\,\%$$

Aus den jährlich auf Zweitakter entfallenden Energieeinsätzen in [TJ] und Anteil r_E werden dann die als Teil des Zeitaktgemisches mitverbrannten Schmierstoffmengen in [TJ] berechnet.

Die CO_2-Emissionen aus der Schmieröl-Mitverbrennung in Zweitaktern des Straßenverkehrs können somit gesondert ausgewiesen werden (siehe Kapitel 3.2.8.2 & Anhang 7.1.2.2). In den CRT-Tabellen erfolgt dies unter CRF *1.A.3.b v – Other (please specify): CO_2 from lubricant co-incineration in 2-stroke road vehicles.*

Hinsichtlich mobiler Maschinen und Geräte wird keine gesonderte Schmierstoffmenge in Terajoule berechnet, sondern vereinfacht der auf diese Zweitakter entfallende Energieeinsatz um 2,1435 % nach oben korrigiert. Die CO_2-Emissionen aus der Schmieröl-Mitverbrennung in Zweitaktern in mobilen Maschinen und Geräten sind damit in den Gesamtemissionen der entsprechenden Sektoren enthalten (siehe Kapitel 3.2.10). Auch innerhalb der CRT-Tabellen entfällt damit eine gesonderte Ausweisung.

Emissionsfaktoren

Um die CO_2-Emissionen aus dem verbrannten Zweitakt-Gemisch im Inventar abzubilden, wurden für die gesamte Zeitreihe gewichtete implizite Emissionsfaktoren gebildet, die zu 49/50 aus dem jahresspezifischen EF(CO_2) für Ottokraftstoff (bzw. dem tier1-EF für Bioethanol) sowie zu 1/50 aus dem default-Wert von 73.300 kg CO_2/TJ für Schmierstoff gemäß (IPCC, 2006a): Band 2, Kap. 2 - *Stationary Combustion*, Seite 2.20, Tabelle 2.4 zusammengesetzt sind.

Diese IEF inkl. 2 Vol.% Schmierstoff liegen damit geringfügig über den für die reinen Kraftstoffe (Ottokraftstoff, Bioethanol) angesetzten Werten.

Tabelle 502: Ableitung der EF(CO_2) für Zweitaktgemische, in kg/TJ

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023	2024
Ottokraftstoff	73.069	73.075	73.094	72.875	72.810	72.832	72.779	72.778	72.787	72.782	72.782
Bioethanol	71.607										
Schmierstoffe[a]	73.300										
Zweitaktmix											
fossil	73.074	72.841	72.790	72.883	72.820	72.841	72.790	72.788	72.797	72.797	72.797
biogen	71.607										

Quelle: eigene Berechnungen

[a] Default-Emissionsfaktor gemäß IPCC (2006a): Band 2, Kapitel 2 - *Stationary Combustion*, Seite2.20, Tabelle 2.4

Tabelle 503: CO_2 aus in Zweitakt-Ottomotoren mitverbrannten Schmierstoffen, in Kilotonnen

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023	2024
1.A.3.b	186	33,3	6,06	5,81	6,05	5,89	6,06	5,35	5,72	5,05	5,04
1.A.4.b ii	2,35	1,90	1,33	1,65	1,26	1,05	0,95	0,95	0,95	0,90	0,89
1.A.4.c ii	4,52	4,39	4,86	4,43	2,72	2,55	3,73	3,78	3,59	3,37	2,89
Summe	193	39,6	12,3	11,9	10,0	9,50	10,7	10,1	10,3	9,32	8,83

Quelle: eigene Berechnungen, basierend auf (Heidt et al., 2025; Knörr, Heidt, et al., 2025)

Rückrechnungen gegenüber Submission 2025

Gegenüber der vorangegangenen Berichterstattung erfolgt eine Neuberechnung der Kraftstoffverbräuche von Zweitaktern in Straßenverkehr und Haushalten (1.A.4.b ii) für die Jahre ab 2003.

Tabelle 504: revidierte Mengen mitverbrannter Schmierstoffe ab 2003, in Terajoule

	2003	2004	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
Submission 2026	158	157	163	137	130	147	138	141	128
Submission 2025	158	157	161	172	157	161	154	158	144
Änderung absolut	-0,02	-0,01	1,40	-34,9	-27,4	-14,2	-15,7	-17,7	-16,4
Änderung relativ	-0,01%	0,00%	0,87%	-20,3%	-17,4%	-8,79%	-10,2%	-11,2%	-11,4%

Quelle: eigene Berechnungen

Gleichzeitig erfolgte eine Konsolidierung der Kohlendioxid-Emissionsfaktoren für das Zweitaktgemisch sowie des Emissionsfaktors für fossilen Ottoktraftstoff 2023.

Tabelle 505: revidierte Emissionensfaktoren, in [kg/TJ]

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
für fossilen Ottokraftstoff in Viertakt-Motoren										
Submission 2026	73.069	73.075	73.094	72.875	72.810	72.832	72.779	72.778	72.787	72.782
Submission 2025	73.069	73.075	73.094	72.875	72.810	72.832	72.779	72.778	72.787	72.787
Änderung absolut	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-4,16
Änderung relativ	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,01%

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
daraus abgeleitet: für fossilen Ottokraftstoff in Zweitakt-Motoren, inkl. 2% Schmierstoff (EF = 73.300 kg/TJ)										
Submission 2026	73.074	72.841	72.790	72.883	72.820	72.841	72.790	72.788	72.797	72.797
Submission 2025	73.074	73.079	73.098	72.883	72.820	72.841	72.790	72.788	72.797	72.797
Änderung absolut	0,00	-238	-309	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Änderung relativ	0,00%	-0,33%	-0,42%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Quelle: eigene Berechnungen

Aus diesen Revisionen resultieren neu berechnete Kohlendioxid-Emissionen.

Tabelle 506: revidierte Kohlendioxid-Emissionen, in Kilotonnen

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023
Submission 2026	193	39,6	12,3	11,9	10,0	9,50	10,74	10,1	10,3	9,32
Submission 2025	193	39,6	12,3	11,8	12,6	11,5	11,8	11,2	11,6	10,5
Änderung absolut	0,000	-0,007	-0,006	0,10	-2,54	-1,99	-1,03	-1,14	-1,29	-1,19
Änderung relativ	0,00%	-0,02%	-0,05%	0,87%	-20,2%	-17,3%	-8,7%	-10,2%	-11,2%	-11,3%

Kohlendioxid aus der Schmierstoff-Mitverbrennung in Viertakt-Ottomotoren sowie sonstigen Motoren in Verkehrsträgern und mobilen Maschinen und Geräten wird dagegen als Emission aus der Produktanwendung separat unter CRF 2.D.1 berichtet. (siehe Kapitel 4.5.1)

Anhang 7.1.4 Fossiles CO_2 aus Biokraftstoffen

Im Folgenden wird das Vorgehen zur Berechnung der fossilen Anteile der eingesetzten Biokraftstoffe sowie der aus deren Einsatz resultierenden Kohlendioxid-Emissionen vorgestellt.

Methodische Aspekte

Grundlage der Berechnung sind die in den einzelnen Quellgruppen aus dem Einsatz von Biodiesel und Biobenzin resultierenden CO_2-Emissionen.

Tabelle 507: CO_2 aus dem Einsatz von Biodiesel und Bioethanol, in Kilotonnen

	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023	2024
aus Bioethanol	NO	NO	496	2.223	2.240	2.096	2.200	2.272	2.389	2.399
aus Biodiesel	106	895	5.517	6.895	5.670	7.975	6.746	6.686	6.849	5.584
SUMME	106	895	6.012	9.118	7.910	10.071	8.946	8.959	9.238	7.982

Quelle: eigene Berechnungen

In einem nächsten Schritt werden die fossilen Anteile dieser Emissionen berechnet. Dabei werden mehrere konservative Annahmen getroffen:

- 100 % des Biodiesels werden aus FAME erzeugt.
- 5,50 % des in diesen FAME enthaltenen Kohlenstoffs sind fossilen Ursprungs.[120]

[120] WG I - Note on fossil carbon content in biofuels; Calculating the fossil fuel content of biofuels that replace fossil diesel (biodiesel)

- 90 % des Biobenzins werden aus Bioethanol erzeugt, 10 % aus ETBE.
- 66,67 % des im ETBE enthaltenen Kohlenstoffs sind fossilen Ursprungs.[121]

Daraus ergeben sich folgende prozentuale Anteile fossilen Kohlenstoffs im eingesetzten Biodiesel und Biobenzin[122]:

- 5,50 % des in Deutschland eingesetzten Biodiesels sind fossilen Ursprungs.
- 6,66 % des in Deutschland eingesetzten Biobenzins sind fossilen Ursprungs.

Ausgehend von den oben dargestellten Gesamtemissionen ergeben sich so die in nachfolgender Tabelle aufgeführten Mengen an fossilem Kohlendioxid, die den nationalen Gesamtemissionen zugerechnet werden.

Tabelle 508: CO_2 aus den fossilen Anteilen der eingesetzten Biokraftstoffe, in Kilotonnen

	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2021	2022	2023	2024
aus Bioethanol	NA	NA	33,0	148	149	140	147	151	159	160
aus Biodiesel	5,86	49,3	303	379	312	439	371	368	377	307
SUMME	5,86	49,3	336	527	461	578	518	519	536	467

Quelle: eigene Berechnungen

Unsicherheiten und Zeitreihenkonsistenz

Die hier zugrunde gelegten Unsicherheitenangaben entsprechen den in den einzelnen Quellkategorien für die eigentlichen Biokraftstoffe gemachten Angaben und werden über die gesamte Zeitreihe hinweg konsistent angewendet.

Spezifische Qualitätssicherung/-kontrolle und Verifizierung

Eine über die hinsichtlich der in den einzelnen Quellkategorien eingesetzten eigentlichen Biokraftstoffe hinaus gehende allgemeine Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung ist nicht erfolgt. Dies wird erst nach erfolgreicher Implementierung der landesspezifischen Methodik erfolgen.

Spezifische Rückrechnungen

Gegenüber Submission 2024 erfolgen Rückrechnungen aufgrund innerhalb der einzelnen CRF-Kategorien korrigierter Biokraftstoff-Einsatzmengen für alle Jahre ab 2004. Der wesentliche Grund für diese umfassenden Korrektur liegt in der Revision der nationalen Energiebilanzen 2003ff.

Tabelle 509: revidierte fossile CO_2-Emissionen aus Biokraftstoffen 2004-2023, in Kilotonnen

	2004	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
	Fossiles CO_2 aus Bioethanol											
Submission 2026	5,53	33,0	148	149	150	147	151	146	140	147	151	159
Submission 2025	5,53	33,0	147	149	150	147	151	146	140	147	151	159
Änderung absolut	0,00	0,00	0,94	-0,05	-0,04	-0,02	-0,02	-0,03	-0,01	0,00	0,00	0,01

[121] WG I - Note on fossil carbon content in biofuels; Table 1 - Carbon content and fossil fraction of carbon content of biogasoline
[122] Fossiler Kohlenstoff gelangt entweder in Form von Methanol oder Isobutylen in die Biokraftstoffe: Das Metahnol wird dabei zur Umesterung, also der Umwandlung von pflanzlichen und tierischen Ölen in Fettsäuremethylester (FAME) benötigt. Isobutylen wird dagegen zur Synthese von ETBE (Ethyl-tert-butylether) genutzt, welches dem Bioethanol beigemengt wird, um dessen Oktanzahl zu erhöhen.

	2004	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Änderung relativ	-0,32%	-0,20%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,14%
Fossiles CO_2 aus Biodiesel												
Submission 2026	164	303	379	312	312	321	337	334	439	371	368	377
Submission 2025	164	304	379	312	312	321	337	334	439	371	368	377
Änderung absolut	-0,53	-0,60	-0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,54
Änderung relativ	-0,32%	-0,20%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,14%
Fossiles CO_2 aus Biokraftstoffen gesamt												
Submission 2026	169	336	527	461	462	468	488	480	578	518	519	536
Submission 2025	170	337	526	461	462	468	488	480	578	518	519	536
Änderung absolut	-0,53	-0,59	0,90	-0,05	-0,04	-0,02	-0,03	-0,03	-0,01	0,00	0,00	-0,53
Änderung relativ	-0,31%	-0,18%	0,17%	-0,01%	-0,01%	0,00%	-0,01%	-0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	-0,10%

Quelle: eigene Berechnungen

Geplante Verbesserungen

Aktuell sind keine über die alljährliche Revision der zugrundeliegenden Modelle hinaus gehenden Verbesserungen geplant.

Sofern in vorhergehenden Berichterstattungen in diesem Kapitel Verbesserungen benannt wurden, sind diese in Form einer Übersicht unter Kapitel 10.4 Verbesserungen des Inventars, Tabelle 468 zu finden. Sind diese bereits erledigt, sind sie im selben Kapitel in Tabelle 467 abgebildet.

Anhang 7.2 Weitere detaillierte methodische Beschreibungen für CRF 2 (Industrieprozesse)

Dieses Kapitel wird derzeit nicht benötigt.

Anhang 7.3 Weitere detaillierte methodische Beschreibungen für CRF 3 (Landwirtschaft)

Anhang 7.3.1 Verteilungen von Haltungs-, Lager- und Ausbringungsverfahren sowie Weidegangdaten (3.B, 3.D)

Tabelle 510 bis Tabelle 513 zeigen (gerundet auf ganze Prozentwerte) die auf nationaler Ebene aggregierten Verteilungen von Haltungs- Lager- und Ausbringungsverfahren sowie Angaben zum Weidegang.

Die Emissionsberechnungen wurden nicht mit den Daten aus Tabelle 510 bis Tabelle 513 durchgeführt, sondern mit den dahinter stehenden Daten in Bundesland-Auflösung, siehe Kap. 2.5 in (Vos et al., 2026). Die Tabellen umfassen auch Angaben zu Emissionsfaktoren (u. a. auch für NH_3).

Tabelle 510: Häufigkeitsverteilungen von Tierhaltungsverfahren(in %) sowie zugehörige Einstreumengen und NH_3-Emissionsfaktoren

livestock category	housing type	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	bedding material (straw) kg place d^{-1}	NH_3-N EF for housing, kg NH_3-N per kg TAN in excreta
dairy cows	tied systems, straw based	32	15	13	11	8	5	5	4	4	3	3	3	3	3	3	5.0	0.066
	tied systems, slurry based	38	36	33	24	17	12	11	10	9	9	9	9	9	9	9		0.066
	loose housing, straw based	2	3	4	7	8	7	7	6	6	6	6	6	6	6	6	5.0	0.169
	loose housing, slurry based	29	46	50	58	65	73	74	76	77	78	78	78	78	78	78		0.169
	loose housing, deep bedding	0	0	0	0	1	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	8.0	0.169
	time spent on pastures (in % of year)	20	15	12	11	10	9	8	8	8	7	7	7	7	7	7		
male beef cattle	tied systems, straw based	4	2	2	5	6	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3	2.0	0.066
	tied systems, slurry based	7	4	4	8	9	7	6	5	5	4	4	4	4	4	4		0.066
	loose housing, slurry based	83	89	87	69	53	55	56	56	57	57	57	57	57	57	57		0.169
	loose housing, sloped floor	6	4	6	17	27	21	20	19	18	17	17	17	17	17	17	2.5	0.169
	Loose housing, deep bedding, straw based	0	0	1	2	4	12	14	15	17	19	19	19	19	19	19	5.0	0.169
	time spent on pastures (in % of year)	4	4	3	3	4	8	9	9	10	11	11	11	11	11	11		
female beef cattle	tied systems, straw based	8	9	9	10	11	7	7	6	5	5	5	5	5	5	5	2.0	0.066
	tied systems, slurry based	14	18	17	14	11	9	8	8	8	8	8	8	8	8	8		0.066
	loose housing, slurry based	45	50	51	47	44	47	48	49	50	51	51	51	51	51	51		0.169
	loose housing, straw based	33	23	23	27	30	24	22	21	19	18	18	18	18	17	17	3.0	0.169
	Loose housing, deep bedding, straw based	0	0	0	2	5	13	15	16	18	19	19	19	19	19	19	6.0	0.169
	time spent on pastures (in % of year)	20	19	20	19	17	16	16	16	15	15	15	15	15	15	15		
dairy heifers	tied systems, straw based	8	8	8	9	9	7	6	5	5	4	4	4	4	4	4	2.0	0.066
	tied systems, slurry based	16	17	16	13	9	7	7	7	6	6	6	6	6	6	6		0.066
	loose housing, slurry based	49	49	49	46	45	48	49	50	51	51	51	51	51	52	52		0.169
	loose housing, straw based	27	26	26	30	32	25	23	22	20	19	19	19	19	19	19	3.0	0.169
	Loose housing, deep bedding, straw based	0	0	0	2	5	13	15	16	18	20	20	20	20	20	20	6.0	0.169
	time spent on pastures (in % of year)	20	20	20	20	20	18	18	18	17	17	17	17	17	17	17		
calves	tied systems, straw based	50	50	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.5	0.066
	loose housing, deep bedding	50	50	50	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	2.5	0.169
	time spent on pastures (in % of year)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
suckler cows	tied systems, straw based	9	8	8	10	12	9	8	8	7	7	7	7	7	7	7	5.0	0.066
	tied systems, slurry based	3	3	3	4	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	3		0.066
	loose housing, slurry based	6	6	7	11	15	15	15	15	15	15	16	16	16	16	16		0.169
	Loose housing, straw based	0	0	5	29	48	41	40	38	37	35	35	35	35	35	35	8.0	0.169
	loose housing, deep bedding	82	83	79	45	22	32	34	36	37	39	39	39	39	39	39	8.0	0.169
	time spent on pastures (in % of year)	43	43	45	46	49	53	54	55	56	56	56	56	56	56	56		

																	bedding material	NH_3-N EF for housing,
mature males > 2 years	tied systems, straw based	14	15	15	14	12	9	8	7	7	6	6	6	6	6	6	5.0	0.066
	tied systems, slurry based	7	8	9	8	7	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4		0.066
	loose housing, slurry based	32	35	35	32	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30		0.169
	loose housing, straw based	47	42	39	38	36	31	29	29	28	27	27	27	27	27	27	5.0	0.169
	Loose housing, deep bedding, straw based	0	0	1	7	15	25	27	29	31	33	33	33	33	33	33	8.0	0.169
	time spent on pastures (in % of year)	35	33	32	33	35	41	42	43	44	46	45	45	45	45	45		
fattening pigs	fully slatted floor, slurry	47	57	63	68	73	78	79	80	81	82	81	82	82	82	82		0.29
	partly slatted floor, slurry	41	34	31	26	22	18	17	16	15	15	15	15	15	15	15		0.29
	plane floor with bedding	8	6	5	4	4	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	0.3	0.40
	deep bedding, straw based	3	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,0	0.40
	free ventilated, kennel house, slurry based	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0.20
	free ventilated, kennel house, straw based	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0.20
	free ventilated, deep bedding, straw based	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1.0	0.35
	free ventilated kennel house, slurry based, with yard	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0.29
	Free ventilated, plane floor, straw based with yard	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0.29
	time spent on pastures (in % of year)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
weaners	fully slatted floor, slurry	52	57	63	67	72	77	78	79	80	81	81	81	81	81	81		0.29
	partly slatted floor, slurry	36	33	29	26	22	18	18	17	16	15	15	15	15	15	15		0.29
	plane floor with bedding	9	7	5	5	5	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	0.15	0.40
	deep bedding, straw based	3	3	3	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,20	0,40
	free ventilated, kennel house, slurry based	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0,20
	free ventilated, kennel house, straw based	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,15	0,20
	free ventilated, deep bedding, straw based	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.20	0.35
	free ventilated kennel house, slurry based, with yard	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0.29
	Free ventilated, plane floor, straw based with yard	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0.29
	time spent on pastures (in % of year)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
sows	straw based	43	26	24	19	13	10	9	9	8	7	7	7	7	7	7	0.5	0.34
	Slurry based	57	74	76	81	87	90	91	91	92	93	93	93	93	93	93		0.34
	time spent on pastures (in % of year)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
boars	straw based	36	23	22	18	16	11	10	10	9	9	9	9	9	9	7	0.5	0.34
	slurry based	64	77	78	82	84	89	90	90	91	91	91	91	91	91	93		0.34
	time spent on pastures (in % of year)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
laying hens	cages; ≥2010: small group housing systems	94	94	87	74	20	10	9	9	8	7	5	5	5	4	4		*)

																	bedding material	NH_3-N EF for housing,
	floor management, aviary	5	4	7	14	61	63	62	64	61	61	62	62	60	60	59	0.5 / 0.2 (from 2010) kg per place a^{-1}	*)
	free range, organic farming	1	2	6	12	20	28	29	27	31	32	33	33	35	36	37	0.5 / 0.3 (from 2010) kg per place a^{-1}	*)
	time spent on pastures (in % of year)	0	0	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3		
broilers	floor management	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	1.0 / 0.48 (from 2010) kg per place a^{-1}	0.09 kg per kg of total N excreted
pullets	floor management	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0.20 kg per place a^{-1}	0.09 kg per kg of total N excreted
ducks	floor management	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	22 kg per place a^{-1}	0.16 kg per kg of total N excreted
geese	floor management	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	9.0 kg per place a^{-1}	0.57
turkeys,female	floor management	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	12 kg per place a^{-1}	0.222 kg per kg of total N excreted
turkeys, male	floor management	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	18 kg per place a^{-1}	0.222 kg per kg of total N excreted
horses	straw based system	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	8.0 / 5.0	0.22
	time spent on pastures (in % of year)	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21		
sheep without lambs	straw based system	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0.40	0.22
	time spent on pastures (in % of year)	55	55	55	55	55	55	55	55	56	55	55	56	56	56	55		
lambs	straw based system	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0.16	0.22
	time spent on pastures (in % of year)	57	57	57	57	55	55	55	55	56	55	55	56	56	56	55		
goats	straw based system	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0.40	0.22
	time spent on pastures (in % of year)	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34		
deer	time spent on pastures (in % of year)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100		
rabbits	straw based system	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0,01	0,22
	time spent on pastures (in % of year)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
ostriches	straw based system	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0,40	0,57
	time spent on pastures (in % of year)	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80		
Fur animals	straw based system	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0,00	0,27
	time spent on pastures (in % of year)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		

*) s. Tabelle 513: Legehennen, haltungsspezifische partielle NH_3-Emissionsfaktoren

Tabelle 511: Häufigkeitsverteilungen von Lagerverfahren (in %), Mengen an vergorenen Energiepflanzen sowie zugehörige Emissionsfaktoren

livestock category	storage type	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	NH_3-N EF for storage kg NH_3-N per kg TAN in storage system	NH_3-N EF for storage kg NH_3-N per kg TAN in storage system (leachate / urine)	N_2O EF for storage kg N2O-N per kg N in storage system	N_2O EF for storage kg N_2O-N per kg N in storage system	CH_4 MCF for storage % von Bo < 10 °C	maximum CH_4 producing capacity (Bo) m^3 CH_4 per kg VS
cattle, untreated slurry	open tank (% of total untreated slurry)	1	1	1	5	8	10	10	11	11	12	12	12	12	12	12	0.150		0.000		17.0	0.23
	solid cover (% of total untreated slurry)	22	21	21	23	23	20	19	19	18	18	18	18	18	18	18	0.015		0.005		17.0	0.23
	natural crust (% of total untreated slurry)	42	44	43	39	37	37	38	38	38	38	38	38	38	38	38	0.045		0.005		10.0	0.23
	plastic film (% of total untreated slurry)	0	1	1	2	3	4	4	5	5	5	5	5	5	5	5	0.023		0.005		17.0	0.23
	artificial crust (chaff) (% of total untreated slurry)	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.030		0.005		17.0	0.23
	storage below animal confinements > 1 month (% of total untreated slurry)	36	34	33	31	30	28	27	27	26	26	26	26	26	26	26	0.045		0.002		17.0	0.23
cattle, digestion of slurry	Gg N	0,03,	0,34,	2,99,	19	80	122	121	122	119	115	117	123	118	107	107						
cattle, digestion of solid manure	Gg N	0,00,	0,03,	0,23,	2	6	10	10	10	9	9	9	10	11	9	9						
cattle, storage of digestates	gas tight storage (% of slurry)	0	5	9	15	41	61	63	64	65	69	73	76	77	80	80	0.000		0.000		2.683	0.23
cattle, storage of digestates	open tank (% of slurry)	100	95	91	85	59	39	37	36	35	31	27	24	23	20	20	0.045		0.005		3.090	0.23
cattle, storage of digestates	gas tight storage (% of solid manure)	0	5	9	15	41	61	63	64	65	69	73	76	77	80	80	0.000		0.000		1.198	0.23
cattle, storage of digestates	open tank (% of solid manure)	100	95	91	85	59	39	37	36	35	31	27	24	23	20	20	0.045		0.005		1.611	0.23
dairy cows, solid manure	heap (% of total solid manure)	100	99	99	99	97	82	79	75	71	67	67	67	67	67	67	0.600	0.013	0.010	0.005	2.0	0.23
	Deep bedding (% of total solid manure)	0	1	1	1	3	18	21	25	29	33	33	33	33	33	33	0.000		0.010		17.0	0.23
male beef cattle, solid manure	heap (% of total solid manure)	98	95	94	93	88	68	63	59	55	51	51	51	51	51	51	0.600	0.013	0.010	0.005	2.0	0.23
	Deep bedding (% of total solid manure)	2	5	6	7	12	32	37	41	45	49	49	49	49	49	49	0.000		0.010		17.0	0.23
female beef cattle, solid manure	heap (% of total solid manure)	100	100	99	96	89	71	67	63	58	54	54	54	54	54	54	0.600	0.013	0.010	0.005	2.0	0.23
	Deep bedding (% of total solid manure)	0	0	1	4	11	29	33	37	42	46	46	46	46	46	46	0.000		0.010		17.0	0.23
dairy heifers, solid manure	heap (% of total solid manure)	100	100	99	95	89	71	67	63	58	54	54	54	54	54	54	0.600	0.013	0.010	0.005	2.0	0.23
	Deep bedding (% of total solid manure)	0	0	1	5	11	29	33	37	42	46	46	46	46	46	46	0.000		0.010		17.0	0.23
calves, solid manure	heap (% of total solid manure)	50	50	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.600	0.013	0.010	0.005	2.0	0.23
	deep bedding (% of total solid manure)	50	50	50	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0.000		0.010		17.0	0.23
suckler cows, solid manure	heap (% of total solid manure)	10	9	14	47	73	61	59	56	54	51	51	51	51	51	51	0.600	0.013	0.010	0.005	2.0	0.23
	deep bedding (% of total solid manure)	90	91	86	53	27	39	41	44	46	49	49	49	49	49	49	0.000		0.010		17.0	0.23
mature males, solid	heap (% of total solid manure)	100	100	98	88	76	61	58	55	52	50	50	50	50	50	50	0.600	0.013	0.010	0.005	2.0	0.23
	Deep bedding (% of total solid manure)	0	0	2	12	24	39	42	45	48	50	50	50	50	50	50	0.000		0.010		17.0	0.23
pigs, untreated slurry	open tank (% of total untreated slurry)	47	27	25	16	9	10	10	11	11	11	11	11	11	11	11	0.150		0.000		25.0	0.30

livestock category	storage type	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	NH_3-N EF for storage kg NH_3-N per kg TAN in storage system	NH_3-N EF for storage kg NH_3-N per kg TAN in storage system (leachate / urine)	N_2O EF for storage kg N2O-N per kg N in storage system	N_2O EF for storage kg N_2O-N per kg N in storage system	CH_4 MCF for storage % von Bo < 10 °C	maximum CH_4 producing capacity (Bo) m^3 CH_4 per kg VS
	solid cover (% of total untreated slurry)	18	22	22	20	18	17	17	17	17	16	16	16	16	16	16	0.015		0.005		25.0	0.30
	natural crust (% of total untreated slurry)	3	13	15	22	28	23	22	21	20	20	20	19	20	19	19	0.105		0.005		15.0	0.30
	plastic film (% of total untreated slurry)	0	6	6	6	7	9	10	10	11	11	11	11	11	11	11	0.023		0.005		25.0	0.30
	artificial crust (chaff) (% of total untreated slurry)	0	1	1	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0.030		0.005		25.0	0.30
	storage below animal confinements > 1 month (% of total untreated slurry)	32	32	32	33	34	37	37	37	38	38	38	38	38	38	38	0.105		0.002		25.0	0.30
pigs, digested slurry	Gg N	0,01,	0,13,	1,11,	8	32	53	52	53	51	49	49	47	49	42	42,39						
pigs, storage of digestates	gas tight storage (% of digestates)	0	5	9	15	41	61	63	64	65	69	73	76	77	80	80	0.000		0.000		3.475	0.30
pigs, storage of digestates	open tank (% of digestates)	100	95	91	85	59	39	37	36	35	31	27	24	23	20	20	0.045		0.005		3.879	0.30
fattening pigs / weaners, solid manure	heap (% of total solid manure)	74	70	69	72	73	67	65	64	62	60	60	60	60	59	55	0.600	0.030	0.010	0.005	3.0	0.30
	deep bedding (% of total solid manure)	26	30	31	28	27	33	35	36	38	40	40	40	40	41	45	0.000		0.010		25.0	0.30
sows / boars, solid manure	heap (% of total solid manure)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0.600	0.030	0.010	0.005	3.0	0.30
laying hens	heap (% of total solid manure)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0.140		0.001		1.5	0.39
broilers	heap (% of total solid manure)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0.170		0.001		1.5	0.36
pullets	heap (% of total solid manure)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0.170		0.001		1.5	0.39
ducks	heap (% of total solid manure)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0.240		0.001		1.5	0.36
geese	heap (% of total solid manure)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0.160		0.001		1.5	0.36
turkeys, female	heap (% of total solid manure)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0.240		0.001		1.5	0.36
turkeys, male	heap (% of total solid manure)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0.240		0.001		1.5	0.36
poultry, digested solid manure	Gg N	0,00,	0,05,	0,41,	3	11	24	24	24	23	23	24	23	26	25	24,69						
poultry, storage of digestates	gas tight storage (% of digestates)	0	5	9	15	41	61	63	64	65	69	73	76	77	80	80	0.000		0.000		1.149	0.36/0.39 (see animal-specific values above)
poultry, storage of digestates	open tank (% of digestates)	100	95	91	85	59	39	37	36	35	31	27	24	23	20	20	0.045		0.005		1.562	0.36/0.39 (see animal-specific values above)
horses	heap (% of total solid manure)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0.350		0.010		2.0	0.30
sheep	heap (% of total solid manure)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0.320		0.010		2.0	0.19
goats	heap (% of total solid manure)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0.280		0.010		2.0	0.18
deer	heap (% of total solid manure)	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO		NO		NO	0.18
rabbits	heap (% of total solid manure)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0.09		0.010		2.0	0.32
ostriches	heap (% of total solid manure)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0.16		0.001		.1.5	0.25
Fur animals	heap (% of total solid manure)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0.350		0.010		2.0	0.25

livestock category	storage type	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	NH_3-N EF for storage kg NH_3-N per kg TAN in storage system	NH_3-N EF for storage kg NH_3-N per kg TAN in storage system (leachate / urine)	N_2O EF for storage kg N2O-N per kg N in storage system	N_2O EF for storage kg N_2O-N per kg N in storage system	CH_4 MCF for storage % von Bo < 10 °C	maximum CH_4 producing capacity (Bo) m^3 CH_4 per kg VS
digestion of energy crops	amount of energy crops digested (kt dry matter)	3	42	366	3089	11164	20118	20011	19683	19397	19400	19815	19440	20881	20223	20223						
	gas tight storage (% of digestates)	0	5	9	16	42	65	67	69	71	75	79	83	82	86	86	0.000		0.000		1.0	0.38
	open tank (% of digestates)	100	95	91	84	58	35	33	31	29	25	21	17	18	14	14	0.045		0.005		1.414	0.38

*) digestion of slurry, solid manure, poultry manure and energy crops: MCFs are overall values for the system “pre-storage (if existent) + digester + storage of digestates”

Tabelle 512: Häufigkeitsverteilungen von Ausbringungsverfahren (in %) sowie zugehörige Emissionsfaktoren

livestock category	application type	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	NH3-N EF for application, kg NH3-N per kg TAN applied
cattle, untreated slurry	broadcast, without incorporation	10	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.50
	broadcast, incorporation < 1 h	4	4	4	5	5	11	10	10	10	9	9	9	9	9	9	0.10
	broadcast, incorporation < 4h	0	2	2	7	11	7	6	5	4	3	3	3	3	3	3	0.26
	broadcast, incorporation < 6h	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.35
	broadcast, incorporation < 8h	0	0	1	3	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.40
	broadcast, incorporation < 12h	0	21	20	9	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.43
	broadcast, incorporation < 24h	33	9	8	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.46
	broadcast, incorporation < 48h	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.50
	broadcast, vegetation	0	0	2	10	16	14	12	10	8	6	0	0	0	0	0	0.50
	broadcast, grassland	44	43	41	42	43	44	42	40	38	36	36	36	36	37	37	0.60
	trailing hose, without incorporation	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.46
	trailing hose, incorporation < 1 h	0	2	2	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0.04
	trailing hose, incorporation < 4h	0	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.15
	trailing hose, incorporation < 6h	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.20
	trailing hose, incorporation < 8h	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.24
	trailing hose, incorporation < 12h	0	9	8	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.30
	trailing hose, incorporation < 24h	1	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.39
	trailing hose, incorporation < 48h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.46
	trailing hose, vegetation	0	0	0	3	4	4	4	5	5	5	11	11	11	11	11	0.35
	trailing hose, short vegetation	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.46
	trailing hose, grassland	0	0	0	2	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0.54
	Trailing shoe, without incorporation	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.46
	trailing shoe, incorporation < 1 h	0	0	0	0	0	1	2	3	4	4	4	4	4	4	4	0.04
	trailing shoe, incorporation < 4 h	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.15
	trailing shoe, incorporation < 8 h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.24
	trailing shoe, incorporation < 12 h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.30
	trailing shoe, vegetation	0	0	0	0	0	2	3	4	6	7	7	7	7	7	7	0.36
	trailing shoe, grassland	0	1	1	1	1	4	5	7	9	11	11	11	11	11	11	0.36

																	NH3-N EF for application,
	injection (open slot), bare soil	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0.24
	injection (open slot), vegetation	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.24
	injection (open slot), grassland	0	2	2	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	0.24
	grubber and injection, bare soil	0	1	1	2	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0.04
	grubber and injection, vegetation	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0.24
	grubber and injection, grassland	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.24
cattle, solid manure	broadcast, without incorporation	11	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0.90
	broadcast, incorporation < 1 h	6	11	11	12	13	14	15	15	15	15	15	15	15	15	15	0.09
	broadcast, incorporation < 4h	0	8	9	15	21	28	30	32	33	35	35	35	35	35	35	0.45
	broadcast, incorporation < 12h	9	30	32	32	30	26	23	21	18	15	15	15	15	15	15	0.81
	broadcast, incorporation < 24h	49	24	22	13	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.90
	broadcast, incorporation < 48h	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.90
	broadcast, arable land, vegetation	0	0	1	3	6	9	10	10	10	11	11	11	11	11	11	0.90
	broadcast, grassland	19	25	23	22	20	19	20	20	20	21	21	21	21	21	21	0.90
pigs, untreated slurry	broadcast, without incorporation	7	4	4	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.25
	broadcast, incorporation < 1 h	4	8	8	7	6	8	7	6	5	4	4	4	4	4	4	0.04
	broadcast, incorporation < 4h	0	1	2	6	9	5	4	3	2	1	1	1	1	1	1	0.09
	broadcast, incorporation < 6h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.11
	broadcast, incorporation < 8h	0	0	0	3	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.13
	broadcast, incorporation < 12h	0	28	25	12	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.16
	broadcast, incorporation < 24h	48	4	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.21
	broadcast, incorporation < 48h	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.25
	broadcast, vegetation	31	23	24	23	22	19	15	11	8	4	0	0	0	0	0	0.25
	broadcast, grassland	0	0	0	2	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0.30
	trailing hose, without incorporation	1	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.18
	trailing hose, incorporation < 1 h	0	5	5	4	4	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	0.02
	trailing hose, incorporation < 4h	0	1	2	4	6	4	4	4	3	3	3	3	3	3	3	0.06
	trailing hose, incorporation < 6h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.08
	trailing hose, incorporation < 8h	0	0	0	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0925
	trailing hose, incorporation < 12h	0	10	9	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.11

																	NH3-N EF for application,
	trailing hose, incorporation < 24h	4	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.14
	trailing hose, incorporation < 48h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.17
	trailing hose, vegetation	0	0	3	18	31	35	35	37	37	38	42	42	43	42	42	0.125
	trailing hose, short vegetation	2	8	8	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.175
	trailing hose, grassland	0	0	0	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0.21
	trailing shoe, without incorporation	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.175
	trailing shoe, incorporation < 1 h	0	0	0	0	0	1	2	3	4	5	5	5	5	5	5	0.02
	trailing shoe, incorporation < 4 h	0	0	0	0	0	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	0.06
	trailing shoe, incorporation < 8 h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0925
	trailing shoe, incorporation < 12 h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.11
	trailing shoe, vegetation	0	0	0	1	1	4	8	11	14	18	17	18	17	18	17	0.12
	trailing shoe, grassland	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0.12
	injection (open slot), bare soil	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.06
	injection (open slot), vegetation	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0.06
	injection (open slot), grassland	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.06
	grubber and injection, bare soil	0	3	3	4	4	6	6	7	7	7	7	7	7	7	7	0.02
	grubber and injection, vegetation	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.06
	grubber and injection, grassland	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.06
pigs, solid manure	broadcast, without incorporation	38	30	30	18	9	2	3	3	4	5	5	5	5	5	5	0.90
	broadcast, incorporation < 1 h	4	16	16	16	16	17	17	17	18	18	18	18	18	18	18	0.09
	broadcast, incorporation < 4h	0	2	4	14	24	35	36	36	37	37	37	37	37	37	37	0.45
	broadcast, incorporation < 12h	0	18	20	23	24	23	19	16	12	9	9	9	9	9	9	0.81
	broadcast, incorporation < 24h	50	34	30	20	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.90
	broadcast, incorporation < 48h	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.90
	broadcast, arable land, vegetation	0	0	2	9	15	22	23	24	25	27	27	27	27	27	27	0.90
	broadcast, grassland	0	0	0	1	1	2	2	3	3	4	4	4	4	4	4	0.90
cattle and pigs, leachate	broadcast, without incorporation	50	50	45	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.20
	broadcast, incorporation < 1 h	0	0	0	2	3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	0.02
	broadcast, incorporation < 4h	0	0	1	5	8	10	8	7	5	4	4	4	4	4	4	0.07
	broadcast, incorporation < 8h	0	0	1	4	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.116

																	NH3-N EF for application,
	broadcast, incorporation < 12h	0	0	0	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.144
	broadcast, vegetation	0	0	2	9	15	13	11	10	8	7	0	0	0	0	0	0.20
	broadcast, grassland	50	50	50	49	47	48	47	46	45	44	44	44	44	44	44	0.20
	trailing hose, without incorporation	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.18
	trailing hose, incorporation < 1 h	0	0	0	0	1	2	3	3	4	4	4	4	4	4	4	0.01
	trailing hose, incorporation < 4h	0	0	0	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0.05
	trailing hose, incorporation < 8h	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.09
	trailing hose, incorporation < 12h	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.12
	trailing hose, vegetation	0	0	0	2	4	9	10	11	12	12	19	19	19	19	19	0.10
	trailing hose, grassland	0	0	0	2	3	4	4	5	6	7	7	7	7	7	7	0.14
	Trailing shoe, without incorporation	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.18
	trailing shoe, incorporation < 1 h	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.01
	trailing shoe, incorporation < 4 h	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0.05
	trailing shoe, incorporation < 8 h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.09
	trailing shoe, incorporation < 12 h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.12
	trailing shoe, vegetation	0	0	0	0	0	1	2	3	4	5	5	5	5	5	5	0.08
	trailing shoe, grassland	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0.08
	injection (open slot), bare soil	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.04
	injection (open slot), vegetation	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0.04
	injection (open slot), grassland	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.04
	grubber and injection, bare soil	0	0	0	2	3	2	2	3	3	4	4	4	4	4	4	0.01
	grubber and injection, vegetation	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.04
	grubber and injection, grassland	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.04
	broadcast, without incorporation	9	7	7	5	3	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	0.90
	broadcast, incorporation < 1 h	0	0	1	9	16	23	24	25	27	28	28	28	27	28	28	0.00
	broadcast, incorporation < 4h	0	0	3	17	32	46	44	42	39	37	37	37	37	37	37	0.18
poultry, solid manure	broadcast, incorporation < 12h	0	20	18	17	14	10	9	7	6	4	4	4	4	4	4	0.40
	broadcast, incorporation < 24h	91	73	69	45	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.45
	broadcast, arable land, vegetation	0	0	1	6	12	17	18	20	22	23	23	23	23	23	23	0.90
	broadcast, grassland	0	0	0	1	2	3	3	4	5	6	6	6	6	6	6	0.90

																	NH3-N EF for application,
	broadcast, without incorporation	100	100	94	64	33	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0.90
	broadcast, incorporation < 1 h	0	0	1	4	7	11	11	12	13	13	13	13	13	13	13	0.09
	broadcast, incorporation < 4h	0	0	2	10	19	27	28	29	30	31	31	31	31	31	31	0.45
other animals, solid manure	broadcast, incorporation < 12h	0	0	2	9	17	25	23	20	18	15	15	15	15	15	15	0.81
	broadcast, incorporation < 24h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.90
	broadcast, arable land, vegetation	0	0	1	4	7	10	11	11	12	13	13	13	13	13	13	0.90
	broadcast, grassland	0	0	1	9	16	23	24	24	24	25	25	25	25	25	25	0.90
	broadcast, without incorporation	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.50
	broadcast, incorporation < 1 h	5	5	5	6	5	7	7	6	5	5	5	5	5	5	5	0.10
	broadcast, incorporation < 4h	8	9	8	9	9	5	4	3	2	2	2	2	2	2	2	0.26
	broadcast, incorporation < 8h	6	6	6	6	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.40
	broadcast, incorporation < 12h	1	2	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.43
	broadcast, vegetation	13	14	13	14	14	10	8	6	4	3	0	0	0	0	0	0.50
	broadcast, grassland	12	13	12	13	13	8	8	8	7	6	6	6	6	6	6	0.60
	trailing hose, without incorporation	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.46
	trailing hose, incorporation < 1 h	3	3	3	3	3	9	9	9	9	8	8	8	8	8	8	0.04
	trailing hose, incorporation < 4h	6	7	7	8	7	5	5	4	4	3	3	3	3	3	3	0.15
	trailing hose, incorporation < 8h	5	5	5	5	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.24
Digested manure and digested energy crops	trailing hose, incorporation < 12h	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.30
	trailing hose, vegetation	17	17	17	18	17	18	18	17	17	17	19	19	19	19	19	0.35
	trailing hose, grassland	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0.54
	trailing shoe, without incorporation	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.46
	trailing shoe, incorporation < 1 h	0	0	0	0	0	2	3	4	5	6	6	6	6	6	6	0.04
	trailing shoe, incorporation < 4 h	0	0	0	0	0	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	0.15
	trailing shoe, incorporation < 8 h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.24
	trailing shoe, incorporation < 12 h	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.30
	trailing shoe, vegetation	1	1	1	1	1	5	7	9	11	12	13	12	13	13	13	0.36
	trailing shoe, grassland	1	1	1	1	1	3	4	5	6	7	7	7	7	7	7	0.36
	injection (open slot), bare soil	1	1	1	0	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	0.24
	injection (open slot), vegetation	1	1	1	1	1	2	2	2	3	3	3	3	3	2	2	0.24

																	NH3-N EF for application,
	injection (open slot), grassland	1	1	1	1	1	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	0.24
	grubber and injection, bare soil	12	10	11	7	9	14	14	15	16	16	16	16	15	16	16	0.04
	grubber and injection, vegetation	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0.24
	grubber and injection, grassland	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.24

Tabelle 513: Legehennen, haltungsspezifische partielle NH_3-Emissionsfaktoren

[in kg NH_3-N per excreted kg N]	≤ 2000	2001 - 2009	≥2010	2011 - 2019	≥2020
cage housing; as of 2010: small-group housing	0.164	0.164	0.066	0.066	0.066
floor management, aviary	0.351	linear interpolation	0.090	linear interpolation	0.071
intensive outdoor management, free-range management, organic production	0.351	linear interpolation	0.090	linear interpolation	0.071

Anhang 7.4 Weitere detaillierte methodische Beschreibungen für CRF 4 (LULUCF)

Dieses Kapitel wird derzeit nicht benötigt.

Anhang 7.5 Weitere detaillierte methodische Beschreibungen für CRF 5 (Abfall und Abwasser)

Dieses Kapitel wird derzeit nicht benötigt.

11 Referenzen

ADAC. (2025). *Erdgas: CNG-Antrieb ohne Zukunft*. Retrieved 18.11.2025 from https://www.adac.de/verkehr/tanken-kraftstoff-antrieb/alternative-antriebe/erdgas/

AGEB. (2003). *Energiebilanzen der Bundesrepublik Deutschland - Jahre 1990-1999* (Verlags- und Wirtschaftsgesellschaft der Elektrizitätswerke; Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB) e.V.

AGEB. (2015). Vorwort zu den Energiebilanzen für die Bundesrepublik Deutschland [Elektronischer Artikel]. 22. Retrieved 03.02.2025, from https://ag-energiebilanzen.de/wp-content/uploads/2021/11/vorwort.pdf

AGEB. (2016). *Umsetzung eines Verfahrens zur regelmäßigen und aktuellen Ermittlung des Energieverbrauchs in nicht von der amtlichen Statistik erfassten Bereichen* [Bericht](I C 4 - 73/15). https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Studien/umsetzung-verfahren-ermittlung-energieverbrauch-nicht-amtliche-statisik-langfassung.html

AGEB. (2019). *Energie in Zahlen – Arbeit und Leistungen der AG Energiebilanzen* [Bericht](ISBN 978-3-9814271-2-7). A. E. e. V. (AGEB). https://ag-energiebilanzen.de/medium/energie-in-zahlen/

AGEB. (2025a). *Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen: Energieverbrauch in Deutschland - Daten für das 1. bis 4. Quartal 2020* (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB). https://ag-energiebilanzen.de/daten-und-fakten/bilanzen-1990-bis-2030/?_jahresbereich-bilanz=2021-2030

AGEB. (2025b). *Energiebilanzen der Bundesrepublik Deutschland - 1990 bis 2030* (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB). https://ag-energiebilanzen.de/daten-und-fakten/bilanzen-1990-bis-2030/?wpv-jahresbereich-bilanz=2021-2030

AGEB. (2025c). *Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2024* ([Datenbank]. Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB). https://ag-energiebilanzen.de/daten-und-fakten/bilanzen-1990-bis-2030/?wpv-jahresbereich-bilanz=2021-2030

AGEB. (2025d). *Heizwerte der Energieträger und Faktoren für die Umrechnung von spezifischen Mengeneinheiten in Wärmeinheiten (2005-2023)* (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB). https://web.archive.org/web/20210420001344/https://ag-energiebilanzen.de/index.php?article_id=29&fileName=heizwerte2005bis2019.pdf

Allekotte, M., Hausberger, S., Knörr, W., Kräck, J., Notter, B., Schadler, D., Schäppi, B., Soini, M., & Tödling, M. (2023). *Neubewertung der Unsicherheiten der mit den zur Berechnung der Luftschadstoffemissionen im Verkehrssektor verwendeten Parameter und Methoden: Abschlussbericht* (U. (UBA), Ed. Abschlussdatum: November 2022 ed.) [Forschungsbericht]. Umweltbundesamt (UBA). https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/neubewertung-der-unsicherheiten-der-den-zur

Allekotte, M., Heidt, C., & Knörr, W. (2022). *Modellintegration des Transport-Visualisierungsmodells (TraViMo) und dem Transport Emission Model (TREMOD) : Endbericht* [Forschungsbericht](Texte, Issue 49/2022). U. (UBA). https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/modellintegration-des-transport

Anderl, M., Bürgler, M., Colson, J., Gangl, M., Kuschel, V., Makoschitz, L., Matthews, B., Mayer, M., Mayer, S., Moldaschl, E., Pazdernik, K., Poupa, S., Purzner, M., Rockenschaub, A. K., Roll, M., Schieder, Wolfgang, Schmid, C., Schmidt, G., Schodl, B.,…Zechmeister, A. (2025). *Austrias National Inventory Report 2025: Submission under the UNFCCC and under the*
Paris Agreement [Report]. U. GmbH. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/AT_NID-2025.pdf

Anderl, M., Kampel, E., Köther, T., Muik, B., Pazdernik, K., Schodl, B., Poupa, S., Wappel, D., & Wieser, M. (2008). *Austria's Informative Inventory Report (IIR) 2008 - Submission under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution* (B. Read, Ed.) [Bericht]. Umweltbundesamt (UBA) (Österreich). https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0133.pdf

Andreas, L. (2000). *Langzeitemissionsverhalten von Deponien für Siedlungsabfälle in den neuen Bundesländern* [Dissertation, Technische Universität]. Dresden.

ATV-DVWK. (2004). *Produktionsspezifische Abwässer und Abfälle aus der Glas- und Mineralfaserindustrie* [Buch]. GFA.

Austermann-Haun, U., & Carozzi, A. (2011). *Bereitstellung einer qualitätsgesicherten Datengrundlage für die Emissionsberichterstattung zur Umsetzung von internationalen Luftreinhalte- und Klimaschutzvereinbarungen für ausgewählte Industriebranchen – hier: N2O Emissionsfaktoren aus der Abwasserreinigung der vier relevantesten Industriebereiche* [Bericht]. U. (UBA).

Austermann-Haun, U., & Witte, H. (2014). *Liste der großtechnischen Anaerobanlagen zur Industrieabwasserreinigung in Deutschland* [Unveröffentlichtes Werk]. Hochschule Ostwestfalen-Lippe.

Axe, M. S., Grange, I. D., & Conway, J. S. (2017). Carbon storage in hedge biomass—A case study of actively managed hedges in England. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *250*, 81-88. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880917303584

Bachmaier, J., & Gronauer, A. (2007). *Klimabilanz von Biogasstrom* (Klimabilanz der energetischen Nutzung von Biogas aus Wirtschaftsdüngern und nachwachsenden Rohstoffen. LfL-Information Issue.

BAFA. (2025a). *Amtliche Mineralöldaten für die Bundesrepublik Deutschland - Dezember 2024* (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA). https://www.bafa.de/SharedDocs/Downloads/DE/Energie/Mineraloel/moel_amtliche_daten_2024_12.html

BAFA. (2025b). *Mineralölstatistik* (Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA). https://www.bafa.de/DE/Energie/Rohstoffe/Mineraloelstatistik/mineraloel_node.html

Ballabio, C., Panagos, P., & Monatanarella, L. (2016). Mapping topsoil physical properties at European scale using the LUCAS database [Zeitschriftenaufsatz]. *Geoderma*, *261*, 110-123. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706115300173

Barghorn, M., Gössele, P., & Kaworski, W. (1986). *Laufende Aktualisierung des Datenmaterials aus der Bundesweiten Hausmuellanalyse = Bundesweite Hausmuellanalyse 1983-1985* (U.-. Umweltbundesamt, Ed.) [Buch]. RGUS - Arbeitsgruppe Umweltstatistik im Institut für Quantitative Methoden der Technischen Universität Berlin.

Barrett, T., Dowle, M., Srinivasan, A., Gorecki, J., Chirico, M., Hocking, T., Schwendinger, B., Stetsenko, P., Short, T., Lianoglou, S., Antonyan, E., Bonsch, M., Parsonage, H., Ritchie, S., Ren, K., Tan, X., Saporta, R., Seiskari, O., Dong, X.,…Krylov, I. (2025). *data.table: Extension of 'data.frame'*. In https://cran.r-project.org/web/packages/data.table/index.html

Bauer, S., Polcher, A., & Greßmann, A. (2010). *Evaluierung der Anforderungen der 20. BImSchV für Binnentankschiffe im Hinblick auf die Wirksamkeit der Emissionsminderung klimarelevanter Gase* [Forschungsbericht](FKZ 3709 45 326). B. B. f. i. Problemlösungen.

BBSR, Meinel, G., Krüger, T., Eichler, L., Wurm, M., Tenikl, J., Frick, A., Wagner, K., & Fin, S. (2022). *Wie grün sind deutsche Städte?* [Bericht](BBSR-Online-Publikation, Issue 03/2022). S.-u. R. B. i. B. f. B. u. R. B. Bundesinstitut für Bau-. https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2022/bbsr-online-03-2022-dl.pdf?__blob=publicationFile&v=2

BDB. (2025). Informationen des Bundesverbandes Deutscher Bestatter e.V. zum Anteil der Feuerbestattungen. In: Bundesverband Deutscher Bestatter e.V.

BDZ. (2005). *Zement-Jahresbericht 2004/2005* [Jahresbericht]. Bundesverband der Deutschen Zementindustrie (BDZ). https://www.vdz-online.de/wissensportal?tx_vdzknowledgebase_pi1%5Bcontroller%5D=Article&tx_vdzknowledgebase_pi1%5Bfilter%5D%5BcategoryArea%5D%5Bid%5D=3&cHash=7570838e965ee097162275ecadd737f9

BDZ. (2017). *Betriebs- und Leistungsfähigkeit von vollbiologischen Kleinkläranlagen bis 50 EW - Abschlussbericht 06/2013 –12/2014* [Bericht]. I. f. W. u. S. a. d. H. Leipzig. https://docplayer.org/71803733-Betriebs-und-leistungsfaehigkeit-von-vollbiologischen-kleinklaeranlagen-bis-50-ew.html

Bechtold, M., Tiemeyer, B., Laggner, A., Leppelt, T., Frahm, E., & Belting, S. (2014). Large-scale regionalization of water table depth in peatlands optimized for greenhouse gas emission upscaling [Zeitschriftenaufsatz]. *Hydrology and Earth System Sciences*, *18*(9), 21. https://doi.org/10.5194/hess-18-3319-2014

Becker, A., Düputell, D., Gärtner, A., Hirschberger, R., & Oberdörfer, M. (2012). Emissionen klimarelevanter Gase aus Kläranlagen [Zeitschriftenaufsatz]. *Immissionsschutz*(4). https://doi.org/doi.org/10.37307/j.1868-7776.2012.04.07

Bender, M. (2009). *Aufbereitung von Daten der Emissionserklärungen gemäß 11. BImSchV aus dem Jahre 2004 für die Verwendung bei der UNFCC- und UNECE-Berichterstattung - Bereich Lageranlagen* [Bericht](Bericht Nr. M74 244/7, UBA FKZ 3707 42 103/01).

Bender, M., & Langer, D. (2009). *Inventarverbesserung 2008, Verbesserung und Ergänzung der aktuellen Inventardaten, IPCC-Kategorie (1996) 1.B.2 Diffuse Emissionen aus Erdöl und Erdgas* [Buch](UBA FKZ 360 16 012).

Bender, M., & Langer, D. (2012). *Ermittlung von Emissionsfaktoren und Aktivitätsraten im Bereich IPCC (1996) 1.B.2.b.iii: Diffuse Emissionen aus der Erdgasspeicherung* [Forschungsbericht](Bericht Nr. M96023/01, UBA FKZ 360 16 035). Müller-BBM.

Bender, M., & von Müller, G. (2019a). *Emissionsfaktoren zu Raffinerien für die nationale Emissionsberichterstattung* (FKZ 3716 41 107 0).

Bender, M., & von Müller, G. (2019b). *Konsolidierung der Treibhausgasemissionsberechnungen unter der 2. Verpflichtungsperiode des Kyoto-Protokolls und der neuen Klimaschutz-Berichterstattungspflichten an die EU* (FKZ 3716 41 107 0).

Betzenbichler, W., Kolmetz, S., Randall, S., Starckx, S., & Lengyel, Z. (2016). *Erarbeitung wissenschaftlich-methodischer Grundlagen zur Umsetzung der Empfehlungen aus den internationalen Inventarüberprüfungen - Verbesserung des Qualitätsmanagements und der Verifikation der deutschen Emissionsinventare* [Forschungsbericht]. v. SCE. https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Pools/Forschungsdatenbank/fkz_3713_19_101_inventarueberpruefungen_emissionswerte_bf.pdf

Beyer, M., & Jentsch, W. (2004). *Rostocker Futterbewertungssystem: Kennzahlen des Futterwertes und Futterbedarfs auf der Basis von Nettoenergie* [Buch]. Forschungsinstitut für die Biologie Landwirtschaftlicher Nutztiere. Forschungsbereich Ernährungsphysiologie Oskar Kellner.

Zweite Verordnung zur Durchführung des Bundes Immissionsschutzgesetzes (Verordnung zur Emissionsbegrenzung von leichtflüchtigen halogenierten organischen Verbindungen - 2. BImSchV), (1990). https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_2_1990/2._BImSchV.pdf

31. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung zur Begrenzung der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen bei der Verwendung organischer Lösungsmittel in

bestimmten Anlagen - 31. BImSchV), (2024). https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_31_2024/BJNR0070A0024.html
30. BImSchV: Dreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Anlagen zur biologischen Behandlung von Abfällen - 30. BImSchV), (2017). https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_30/BJNR031700001.html
BGR. (1995 & 1997). *Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland 1: 1 000 000* [Karte]. Hannover (Digitales Archiv FISBo BGR), BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.
BGR. (1997). *Digitale Bodenübersichtskarte der BRD (BUEK 1000)* [Karte]. Hannover, BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.
BGR. (1998). *Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland 1:1.000.000 (BÜK 1000° N)* [Karte]. Hannover, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR).
BGR. (2007). *Geomorphographische Karte Deutschlands (GMK1000)* [Karte]. Hannover, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR).Retrieved 29.03.2025 from https://numis.niedersachsen.de/trefferanzeige?docuuid=60ab5e4e-9493-44b0-9cae-d9ce603de742
BGR & SDG. (2019). *Hydrogeologische Karte Deutschlands 1 : 250.000 (HÜK250)* [Karte]. Hannover, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR);
Staatliche Geologische Dienste Deutschlands (SDG).
Biertümpfel, A., Rudel, H., Werner, A., & Vetter, A. (2009). *15 Jahre Energieholzversuche in Thüringen* [Bericht]. T. L. f. Landwirtschaft. https://www.tlllr.de/www/daten/pflanzenproduktion/nawaro/feste_bio/ehol1009.pdf
Bittkau, O. (2017). Telefongespräch zu CO2-Emissionen aus Erdölpipelines. In P. Hoffmann (Ed.): MWV.
Bittman, S., Dedina, M., Howard, C. M., Oenema, O., & Sutton, M. A. (2014). *Options for Ammonia Mitigation: Guidance from the UNECE Task Force on Reactive Nitrogen* [Bericht]. https://www.inms.international/sites/inms.international/files/AGD_final_file.pdf
BKF. (2020). Telefongespräch des UBA mit Jens Fellhauer (fellhauer@fliesenverband.de vom Bundesverband Keramische Fliesen e.V.) am 19.08.2020. In.
BLE. (2024). *Waldbrandstatistik der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2023* [Statistik]. B. f. L. u. E. (BLE). https://www.bmel-statistik.de/forst-holz/waldbrandstatistik/
BLE. (2025). *Waldbrandstatistik der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 2024*. Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE). https://www.bmel-statistik.de/forst-holz/waldbrandstatistik
Blum, U., & Heinbach, R. (2006). *Endbericht zum BZE Ringversuch Humus 2006* [Bericht]. B. L. f. W. u. F. (LWF).
Blum, U., & Heinbach, R. (2007a). *Endbericht zum BZE Ringversuch Mineralboden 2007*. B. L. f. W. u. F. (LWF).
Blum, U., & Heinbach, R. (2007b). *Endbericht zum BZE Ringversuch Mineralboden 2007 - Teil 1* [Bericht]. L.-B. L. f. W. u. Forstwirtschaft. https://www.yumpu.com/de/document/read/19086737/teil-1
BMEL. (2024a). Ergebnisse der Waldzustandserhebung 2023 [Elektronischer Artikel]. https://www.bmel.de/DE/themen/wald/wald-in-deutschland/waldzustandserhebung.html
BMEL. (2024b). *Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten der Bundesrepublik Deutschland 2024* [Jahresbericht](Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten der Bundesrepublik Deutschland, Issue. B. f. Ernährung & u. Landwirtschaft. https://www.ble-medienservice.de/0908
BMEL. (2024c). Weiter massive Schäden - Einsatz für Wälder und Waldumbau nötig. Retrieved 17.04.2025, from https://www.bmel.de/DE/themen/wald/wald-in-deutschland/wald-trockenheit-klimawandel.html
BMELF. (1994). *Der Wald in den neuen Bundesländern - Eine Auswertung vorhandener Daten nach dem Muster der Bundeswaldinventur* [Bericht]. E. u. L. B. Bundesministerium für Verbraucherschutz.
BMELF. (2008). *Aufnahmeanweisung für die Inventurstudie 2008 (IS08) im Rahmen der Treibhausgasberichterstattung* [Bericht]. https://www.wald.sachsen.de/Aufnahmeanweisung_IS08_Aufl_1_20080124.pdf
BMELV. (2005). *Die zweite Bundeswaldinventur – BWI²: Der Inventurbericht* [Bericht]. L. u. V. B. Bundesministerium für Ernährung.
BMELV. (2016). *Konzept zur Erstellung von THG Emissions- und Kohlenstoffinventaren der Quell- und Senkengruppen Landwirtschaft und LULUCF durch das Johann Heinrich von Thünen-Institut (TI) im Zuständigkeitsbereich des BMEL* (AZ: 521-65408/0002)[Unveröffentlichtes Werk]. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV).
Einundzwanzigste Verordnung zur Durchführung des BundesImmissionsschutzgesetzes (Verordnung zur Begrenzung der Kohlenwasserstoffemissionen bei der Betankung von Kraftfahrzeugen - 21. BImSchV), (1992). https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_21/
BMJ, & BfJ. (1998a). *Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz - BBodSchG); „Bundes-Bodenschutzgesetz vom 17. März 1998 (BGBl. I S. 502), das zuletzt durch Artikel 101 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist“*. Bundesamts für Justiz
Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz Retrieved from https://www.gesetze-im-internet.de/bbodschg/BBodSchG.pdf

Zwanzigste Verordnung zur Durchführung des BundesImmissionsschutzgesetzes (Verordnung zur Begrenzung der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen beim Umfüllen oder Lagern von Ottokraftstoffen, Kraftstoffgemischen oder Rohbenzin), (1998b). https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_20_1998/

20. BImSchV: Zwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung zur Begrenzung der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen beim Umfüllen oder Lagern von Ottokraftstoffen, Kraftstoffgemischen oder Rohbenzin) in der Fassung der Bekanntmachung vom 18. August 2014 (BGBl. I S. 1447), die durch Artikel 2 der Verordnung vom 24. März 2017 (BGBl. I S. 656) geändert worden ist, (2017a). https://www.umwelt-online.de/recht/luft/bimschg/vo/20bv_ges.htm

21. BImSchV: Verordnung zur Begrenzung der Kohlenwasserstoffemissionen bei der Betankung von Kraftfahrzeugen in der Fassung der Bekanntmachung vom 18. August 2014 (BGBl. I S. 1453), die zuletzt durch Artikel 3 der Verordnung vom 24. März 2017 (BGBl. I S. 656) geändert worden ist, (2017b). https://www.umwelt-online.de/recht/luft/bimschg/vo/21bv_ges.htm

Richtlinie des Rates vom 21.Mai 1991 über die Behandlung von kommunalem Abwasser, 17 (1991). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:31991L0271

BMU. (1990). *Eckwerte der oekologischen Sanierung und Entwicklung in den neuen Laendern = Umweltpolitik* [Buch]. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU).

BMVg. (2024). *Nachhaltigkeitsbericht 2024 des Bundesministeriums der Verteidigung und der Bundeswehr: Berichtszeitraum 2022-2023* [Bericht]. B. d. Verteidigung. https://www.bmvg.de/resource/blob/5887346/252b576e8e0e2c2f1cce968a68992230/nachhaltigkeitsbericht-2024-data.pdf

BNetzA, & BKartA. (2025). *Monitoringbericht 2024: Monitoringbericht gemäß § 63 Abs. 3 i. V. m. § 35 EnWG und § 48 Abs. 3 i. V. m. § 53 Abs. 3 GWB* [Bericht]. G. Bundesnetzagentur für Elektrizität, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (BNetzA); Bundeskartellamt (BKartA). https://data.bundesnetzagentur.de/Bundesnetzagentur/SharedDocs/Mediathek/Monitoringberichte/MonitoringberichtEnergie2024.pdf

Boelcke, B. (2007). *Ertragspotenzial und Ertragsaufbau von Weiden (Salix) in Kurzumtriebsplantagen* [Bericht]. L. f. L. u. F. Mecklenburg-Vorpommern. https://www.landwirtschaft-mv.de/Fachinformationen/Nawaro/?id=63&processor=processor.sa.lfaforenbeitrag

Bolte, A., Hertel, D., Ammer, C., Schmid, I., Nörr, R., Kuhr, M., & Redde, N. (2003). Freilandmethoden zur Untersuchung von Baumwurzeln [Zeitschriftenaufsatz]. *Forstarchiv*, *74*(6), 240-262.

Börjesson, P., & Berglund, M. (2007). Environmental systems analysis of biogas systems—Part II: The environmental impact of replacing various reference systems [Journal Article]. *Biomass and Bioenergy*, *31*(5), 326-344. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.01.004

Borrelli, P., Van Oost, K., Meusburger, K., Alewell, C., Lugato, E., & Panagos, P. (2018). A step towards a holistic assessment of soil degradation in Europe: Coupling on-site erosion with sediment transfer and carbon fluxes. *Environmental research*, *161*, 291-298. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013935117308137

Bösch, B., & Kändler, G. (2013). *Methodenentwicklung für die 3. Bundeswaldinventur: Modul 3 Überprüfung und Neukonzeption einer Biomassefunktion - Abschlussbericht* [Bericht]. F. V.-u. F. Baden-Württemberg.

Böttcher, C. (2022). *Aktualisierung der Emissionsfaktoren für Methan für die Erdgasbereitstellung* [Forschungsbericht](Texte, Issue 159/2022). U. (UBA). https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/aktualisierung-der-emissionsfaktoren-fuer-methan

Böttcher, C. (2025). *Aktualisierung der VOC-Emissionen für die Bereitstellung von Mineralölprodukten: Aktualisierung 2025* [Bericht](Texte, Issue 119). Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/aktualisierung-der-voc-emissionen-fuer-die

Böttcher, C., & Lillie, J. (2023). Telefonischer Austausch über den Reingasstrom Großenkneten. In.

Bouwman, A. F. (1996). Direct emission of nitrous oxide from agricultural soils. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* (46), 53-70. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/bf00210224.

Brandes, F. (2022). *Entwicklung der Methanemissionen in der Gasanwendung (G 201908)*. DVGW. https://www.dvgw.de/themen/forschung-und-innovation/forschungsprojekte/dvgw-forschungsprojekt-megan

BSRIA Limited. (Versch. Jahrgänge). *World Market for Air Conditioning* (Version Versch. Jahrgänge).

BTF. (2024). *Entwicklung der Tankstellenanzahl in Deutschland*. Bundesverband Freier Tankstellen und unabhängiger deutscher Mineralölhändler e.V. (BTF). Retrieved 16.04.2025 from https://www.bft.de/daten-und-fakten/entwicklung-tankstellenanzahl

DirektZahlVerpflV: Direktzahlungen-Verpflichtungenverordnung vom 4. November 2004 (BGBl. I S. 2778), zuletzt geändert durch Artikel 3 der Verordnung vom 15. Dezember 2011 (eBAnz 2011 AT144 V1); Verordnung über die Grundsätze der Erhaltung landwirtschaftlicher Flächen in einem guten landwirtschaftlichen und ökologischen Zustand, (2004). http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBl&jumpTo=bgbl104058.pdf

Baugesetzbuch in der Fassung der Bekanntmachung vom 23.September 2004 (BGBl. I S. 2414), das zuletzt durch Artikel 6 des Gesetzes vom 20. Oktober 2015 (BGBl. I S. 1722) geändert worden ist, (2015).

Bundesgesetzblatt. (2004). *Verordnung über die Grundsätze der Erhaltung landwirtschaftlicher Flächen in einem guten landwirtschaftlichen und ökologischen Zustand (Direktzahlungen-Verpflichtungenverordnung - DirektZahlverpflV)*. Bonn: Bundesgesetzblatt (BGBl) Retrieved from http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBl&jumpTo=bgbl104058.pdf https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/text.xav?SID=&tf=xaver.component.Text_0&tocf=&qmf=&hlf=xaver.component.Hitlist_0&bk=bgbl&start=%2F%2F*%5B%40node_id%3D%27952641%27%5D&skin=pdf&tlevel=-2&nohist=1&sinst=5373C4B6

Bundesgesetzblatt. (2012). Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 27. Februar 2007 (BGBl. I S. 221), die zuletzt durch Artikel 5 Absatz 36 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212) geändert worden ist). In *Teil I Nr. 58*: Bonn.

Bundesverband Glasindustrie e.V. (2025). Produktion von Glas und Glaswaren nach Branchensektoren: 2023 und 2024 | Production of glass and glassware by industriall sector 2023 and 2024. In B. G. e. V. (Ed.). Düsseldorf.

Burschel, P., Kürsten, E., & Larson, B. C. (1993). *Die Rolle von Wald und Forstwirtschaft im Kohlenstoffhaushalt : eine Betrachtung für die Bundesrepublik Deutschland* (U. M. F. Forstwissenschaft & B. F. V.-u. Forschungsanstalt, Eds.) [Band].

BV Glas. (2025). Scherbeneinsatz in der Behälterglasindustrie 2024. In.

BV Kalk. (2025). Mitteilung per E-Mail von BV-Kontakt Philip Nuyken. In.

BVEG. (2016). *Leitfaden zu Erfassung der Umweltdaten der Mitgliedsfirmen* [unveröffentlichtes Werk].

BVEG. (2022). *Jahresbericht 2021 des Bundesverband Erdgas, Erdöl und Geoenergie e.V., Statistischer Bericht* [Jahresbericht]. E. u. G. e. V. B. Bundesverband Erdgas. https://www.bveg.de/der-verband/publikationen/

BVEG. (2024). *Jahresbericht des Bundesverband Erdgas, Erdöl und Geoenergie e.V., Statistischer Bericht* [Bericht]. E. u. G. e. V. B. Bundesverband Erdgas. http://www.erdoel-erdgas.de/

BVL. (2022). *Absatzmengen von Wirkstoffen in Pflanzenschutzmitteln von 1987 bis 2020* (Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (BVL). https://www.bvl.bund.de/DE/Arbeitsbereiche/04_Pflanzenschutzmittel/01_Aufgaben/02_ZulassungPSM/03_PSMInlandsabsatzAusfuhr/psm_PSMInlandsabsatzAusfuhr_node.html

Gesetz zur Erhaltung des Waldes und zur Förderung der Forstwirtschaft (Bundeswaldgesetz), (2015). https://www.gesetze-im-internet.de/bwaldg/BJNR010370975.html

Cambou, A., Shaw, R. K., Huot, H., Vidal-Beaudet, L., Hunault, G., Cannavo, P., Nold, F., & Schwartz, C. (2018). Estimation of soil organic carbon stocks of two cities, New York City and Paris. *Science of the total environment*, *644*(10), 452-464. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969718323982?via%3Dihub

CBS. (2025). *Livestock manure; production, transport and use, key figures Changed on: 26 June 2025* (https://opendata.cbs.nl/#/CBS/en/dataset/83981ENG/table

Cech, M., Davis, P., Gambardella, F., Haskamp, A., González, P. H., Spence, M., & Larivé, J.-F. (2017). *Performance of European cross-country oil pipelines - Statistical summary of reported spillages in 2015 and since 1971*. CONCAWE. https://www.concawe.eu/publication/performance-european-cross-country-oil-pipelines-statistical-summary-reported-spillages-2015-since-1971/

Chevallier, F. (2020). *Description of the CO2 inversion production chain - version 1.0* [Report]. E. CAMS. https://atmosphere.copernicus.eu/sites/default/files/FileRepository/Resources/Documentation/Fluxes/CAMS73_2015SC1_D73.1.3_201603_CO2_Inversion_Production_Chain.pdf

Clodic, D., & Barrault, S. (2011). *1990 to 2010 Refrigerant inventories for Europe - Previsions on banks and emissions from 2006 to 2030 for the European Union - Part A 1990 to 2010 refrigerant inventories for Europe* [Final report].

Clodic, D., Barrault, S., & Saba, S. (2012). *Global inventories of the worldwide fleets of refrigerating and airconditioning equipment in order to determine refrigerant emissions - The 1990 to 2006 Updating* [Final Report].

Coleman, K., & Jenkinson, D. S. (1999). *RothC 26.3–A Model for the Turnover of Carbon in Soil: Model description and Windows Users Guide* [Report].

Commonwealth of Australia. (2023). *Australia's national inventory report 2021: The Australian Government Submission to the United Nations Framework Convention on Climate Change Australian National Greenhouse Accounts* [Bericht]. D. o. C. C. Australian Government, Energy, the Environment and Water. https://unfccc.int/documents/627765

Cools, N., Verschelde, P., Hinsch Mikkelsen, J., De Vos, B., & Quataert, P. (2006). *Quality assurance and quality control in forest soil analysis:4th fscc interlaboratory comparison* [Buch]. Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek. https://purews.inbo.be/files/5428726/Cools_etal_2006_QualityAssuranceQualityControlForestSoilAnalysis.pdf

Directive 91/676/EEC of 12 December 1991 concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources, Pub. L. No. 31, L 375/1 European Communities 12 (1991). http://data.europa.eu/eli/dir/1991/676/oj

Crippa, M., Guizzardi, D., Pagani, F., Banja, M., Muntean, M., Schaaf, E., Quadrelli, R., Risquez Martin, A., Taghavi-Moharamli, P., Köykkä, J., Grassi, G., Rossi, S., Melo, J., Oom, D., Branco, A., Suárez-Moreno, M., Sedano, F., San-Miguel, J., Manca, G.,…Pekar, F. (2025). *GHG emissions of all world countries: 2025* [Report]. P. Office. https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/09f00a92-8df7-11f0-bfe2-01aa75ed71a1/language-en

Crippa, M., Monforti-Ferrario, F., Guizzardi, D., Pagani, F., Banja, M., Muntean, M., Schaaf, E., Becker, W., Grassi, G., Rossi, S., Brandao De Melo, J., Jacome Felix Oom, D., Branco, A., San-Miguel, J., & Vignati, E. (2022). *Emissions Database for Global Atmospheric Research, version v8.0_FT_2022* ([Dataset]. https://data.jrc.ec.europa.eu/dataset/809d7b72-55ef-4e52-8bd4-7d33f2f9916b

Crossland, M. (2015, 2015). The carbon sequestration potential of hedges managed for woodfuel.

Cuhls, C., & Kühle-Weidemeier, M. (2013). *Ermittlung der besten verfügbaren Techniken bei Abfallbehandlungsanlagen im Rahmen des Sevilla Prozesses zur Novellierung des BVT-Merkblattes Abfallbehandlung* [Bericht]. gewitra & Wasteconsult.

Cuhls, C., Mähl, B., Clemens, J., & Herrmann, T. (2015). *Ermittlung der Emissionssituation bei der Verwertung von Bioabfällen* (Umweltbundesamt & g. I. f. W. mbH, Eds.) [Forschungsbericht]. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_39_2015_ermittlung_der_emissionssituation_bei_der_verwertung_von_bioabfaellen.pdf

Dalelane, C., Früh, B., Steger, C., & Walter, A. (2018). A Pragmatic Approach to Build a Reduced Regional Climate Projection Ensemble for Germany Using the EURO-CORDEX 8.5 Ensemble. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *57*(3), 477-491. https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0141.1

Dämmgen, U., Amon, B., Gyldenkærne, S., Hutchings, N. J., Kleine Klausing, H., Haenel, H.-D., & Rösemann, C. (2011). Reassessment of the calculation procedure for the volatile solids excretion rates of cattle and pigs in the Austrian, Danish and German agricultural emission inventories. *Landbauforschung Völkenrode*, *61*, 115-126.

Dämmgen, U., Amon, B., Hutchings, N. J., Haenel, H.-D., & Rösemann, C. (2012). Data sets to assess methane emissions from untreated cattle and pig slurry and solid manure storage systems in the German and Austrian emission inventories. *Landbauforschung*, *62*, 1-20.

Dämmgen, U., & Hutchings, N. J. (2005). *The assessment of emissions of nitrogen species from agriculture using the methodology of the atmospheric emission inventory guidebook* (9076998787). (Emissions from European agriculture. , Issue.

Dämmgen, U., Lüttich, M., Döhler, H., Eurich-Menden, B., & Osterburg, B. (2002). GAS-EM–ein Kalkulationsprogramm für Emissionen aus der Landwirtschaft. *Landbauforschung Völkenrode*, *1*(52), 19-42.

Dämmgen, U., Rösemann, C., Haenel, H.-D., & Hutchings, N. J. (2012). Enteric methane emissions from German dairy cows. *Landbauforschung*, *62*, 21-31.

Dämmgen, U., Schulz, J., Kleine Klausing, H., Hutchings, N. J., Haenel, H.-D., & Rösemann, C. (2012). Enteric methane emissions from German pigs. *Landbauforschung*, *62*, 83-96.

Daschner, R., Faulstich, M., Quicker, P., & Binder, S. (2010). *Überprüfung der Emissionsfaktoren für die Abfallverbrennung* (U. (UBA), Ed.) [Forschungsbericht]. Applikations- und Technikzentrum für Energieverfahrens-, Umwelt- und Strömungstechnik.

DAV. (2016). Anzahl der Asphaltmischwerke in Deutschland. http://dipbt.bundestag.de/dip21/btd/18/094/1809414.pdf

DAV. (2025). Asphaltproduktion in Deutschland. https://asphalt.de/fachinformationen-asphaltproduktion/

DBU. (2010). *Kurzumtriebsplantagen: Handlungsempfehlungen zur naturverträglichen Produktion von Energieholz in der Landwirtschaft - Ergebnisse aus dem Projekt NOVALIS* [Bricht]. D. B. U. (DBU). https://edocs.tib.eu/files/e01fn12/690161034.pdf

DEBRIV. (2004). Mitteilung vom Deutscher Braunkohlen-Industrie-Verein e.V. an das IKP Stuttgart. In I. Stuttgart (Ed.): DEBRIV.

Debriv. (2023). Mitteilung per E-Mail von Yvonne Dyllong an (Fachgebiet V 1.5) am 02.08.2024 und 08.08.2024. In.

DEBRIV. (2024). *Braunkohlereviere*. Retrieved 04.11.2025 from https://braunkohle.de/braunkohle-in-deutschland/braunkohlereviere/

Debriv. (2025). Mail an Petra Icha von Frau Dyllong vom 18.07.2025. In P. Icha & Y. Dyllong (Eds.).

Dechow, R., Franko, U., Kätterer, T., & Kolbe, H. (2019). Evaluation of the RothC model as a prognostic tool for the prediction of SOC trends in response to management practices on arable land. *Geoderma*, *337*, 463-478. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.10.001

Dechow, R., & Freibauer, A. (2011). Assessment of German nitrous oxide emissions using empirical modelling approaches. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, *91*(3), 235-254. https://doi.org/10.1007/s10705-011-9458-9

DEhSt. (2016). Mitteilung per E-Mail von Detlef Bittner (Fachgebiet E 1.2) am 25.7.2016. In.

DEhSt. (2021). Mitteilung per E-Mail von Daniela Malsch (Fachgebiet V 2.2) am 29.6.2021. In.

DEhSt. (2022). Mitteilung per E-Mail von Daniela Malsch (Fachgebiet V 2.2) am 25.4.2022. In.

DEhSt. (2023). Mitteilung per E-Mail von Daniela Malsch (Fachgebiet V 2.1) am 12.7.2023. In.
DEhSt. (2024). Mitteilung per E-Mail von Daniela Malsch (Fachgebiet V 2.2) 24.04.2024. In.
DEhSt. (2025a). Mitteilung per E-Mail von Daniela Malsch (Fachgebiet V 2.1) im 2025. In.
DEHSt. (2025b). Produktion Zementklinker: Mitteilung per E-Mail an Fachverantwortliche. In.
Deichnik, K. (2025). *Aktualisierung und Revision des Modells zur Berechnung der spezifischen Verbräuche und Emissionen des von Deutschland ausgehenden Seeverkehrs* (Bundesamts fur Seeschifffahrt und Hydrographie.
Demetrescu, M., Golosnoy, V., & Titova, A. (2020). Bias corrections for exponentially transformed forecasts: Are they worth the effort? *International Journal of Forecasting*, *36*(3), 761-780. https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2019.09.001
Detzel, A., Vogt, R., Fehrenbach, H., Knappe, F., & Gromke, U. (2003). *Anpassung der deutschen Methodik zur rechnerischen Emissi-onsermittlung an internationalen Richtlinien (F+E-Vorhaben 299 42 245)* [Bericht]. I.-I. f. E.-u. U. GmbH & Ö.-I. e.V.
DGMK. (1992). *Ansatzpunkte und Potentiale zur Minderung des Treibhauseffektes aus Sicht der fossilen Energieträger* (Forschungsbericht 448-2; Seite II-89, Issue.
Diaz-Valbuena, L. R., Leverenz, H. L., Cappa, C. D., Tchobanoglous, G., Horwath, W. R., & Darby, J. L. (2011). Methane, Carbon Dioxide, and Nitrous Oxide Emissions
from Septic Tank Systems [Zeitschriftenaufsätze]. *Environmental Science and Technology*, *45*(7), 7. https://doi.org/10.1021/es1036095
DLG (Ed.). (2005). *Bilanzierung der Nährstoffausscheidungen landwirtschaftlicher Nutztiere* (1 ed., Vol. Band 199). DLG-Verlag.
DLG (Ed.). (2014). *Bilanzierung der Nährstoffausscheidungen landwirtschaftlicher Nutztiere.* (2 ed., Vol. Band 199). DLG-Verlag.
Döpelheuer, A. (2002). Anwendungsorientierte Verfahren zur Bestimmung von CO, HC und Ruß aus Luftfahrttriebwerken. In: DLR.
Drexhage, M., & Colin, F. (2001). Estimating root system biomass from breast-height diameters. *Forestry*, *74*(5), 7. https://academic.oup.com/forestry/article/74/5/491/534840/Estimating-root-system-biomass-from-breast-height
Drexler, S., Gensior, A., & Don, A. (2021). Carbon sequestration in hedgerow biomass and soil in the temperate climate zone [Journal Article]. *Regional Environmental Change*, *21*(3), 74. https://doi.org/10.1007/s10113-021-01798-8
Drexler, S., Thiessen, E., & Don, A. (2023). Carbon storage in old hedgerows: The importance of below-ground biomass. *Gcb Bioenergy*, *16*, n/a-n/a. https://doi.org/10.1111/gcbb.13112
DüV: Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen, 221 Düngeverordnung-DüV (2007).
DüV: Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen Düngeverordnung – DüV (2017).
Düwel, O., Siebner, C. S., Utermann, J., & Krone, F. (2007). *Gehalte an organischer Substanz in Oberböden Deutschlands - Bericht über länderübergreifende Auswertungen von Punktinformationen im FISBo BGR* [Bericht]. B.-B. f. G. u. Rohstoffe. https://download.bgr.de/bgr/Boden/HUMUS1000OB/Bericht/humus1000_ob_Bericht.pdf
DWA. (2007). Merkblatt DWA-M 381 - Eindickung von Klärschlamm. In (Vol. M 381, pp. 39). Hennef DWA – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.
DWA. (2022). Merkblatt DWA-M 230-1, Treibhausgasemissionen bei der Abwasserbehandlung. Teil 1, Direkte Treibhausgasemissionen - Messen und Bewerten. In *DWA-M 230-1* (pp. 64). Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (Verlag).
DWA. (seit 1988). *Leistungsvergleich kommunaler Kläranlagen* [Bericht].
DWD. (2024a). Persönliche Mitteilung von Herrn Janssen am 15.07.2024 "Mittlere Bodentemperaturen in Deutschland für Emissionsberichterstattung". In A. Roskosch (Ed.), (AW: Mittlere Bodentemperaturen in Deutschland für Emissionsberichterstattung ed.): Deutscher Wetterdienst (DWD).
DWD. (2024b). *Phenological observations of crops from sowing to harvest (annual reporters, historical), Version v010* ([Datensatz]. https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/phenology/annual_reporters/crops/recent/DESCRIPTION_obsgermany-phenology-annual_reporters-crops-recent_en.pdf
DWD Climate Data Center. (2020a). *Gridded monthly sums of incoming shortwave radiation (global radiation)on the horizontal plain for Germany based on ground and satellite measurements, Version V003* (
DWD Climate Data Center. (2020b). *Raster der Monatsmittel der Lufttemperatur (2m) für Deutschland - Version v1.0* (https://dwd-geoportal.de/products/GRD_DEU_P1M_T2M-X/
DWD Climate Data Center. (2020c). *Raster der Monatssumme der Niederschlagshöhe für Deutschland - Version v1.0* (https://dwd-geoportal.de/products/GRD_DEU_P1M_RR/
DWD Climate Data Center. (2020d). *REGNIE grids of daily precipitation* (

EC. (2025). *Emissions Data and Maps*. EDGAR - Emissions Database for Global Atmospheric Research. Retrieved 06.02.2026 from https://edgar.jrc.ec.europa.eu/emissions_data_and_maps

Ecofys & Environment Agency Austria. (2017). *Member State recommendations on reporting systems for cropland & grazing land management emissions & removals*

Germany : 2016 and 2017 Submission [Report].

Eddelbuettel, D., & François, R. (2011). Rcpp: Seamless R and C++ integration [Journal Article]. *Journal of statistical software*, *40*(8), 18. https://doi.org/10.18637/jss.v040.i08

Edelmann, S. (2013). *Organischer Kohlenstoff in terrestrischen und semiterrestrischen Stadtböden - Eine Bilanzierung der organischen Kohlenstoffgehalte und -mengen in Abhängigkeit von der Flächennutzung im Berliner Stadtgebiet* [Dissertation, Humboldt Universität zu Berlin]. Berlin.

Edmondson, J. L., Davies, Z. G., McCormack, S. A., Gaston, K. J., & Leake, J. R. (2014). Land-cover effects on soil organic carbon stocks in a European city [Journal Article]. *Science of the total environment*, *472*, 10. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.11.025

Edmondson, J. L., Davies, Z. G., McHugh, N., Gaston, K. J., & Leake, J. R. (2012). Organic carbon hidden in urban ecosystems [Journal Article]. *Scientific reports*, *2*, 7. https://www.nature.com/articles/srep00963

EEA. (2010a). *Raster data on land cover for the CLC 1990 inventory* [Map]. Kopenhagen, Europäische Umweltagentur.

EEA. (2010b). *Raster data on land cover for the CLC 2006 inventory* [Map]. Kopenhagen, Europäische Umweltagentur (EEA).

EEA. (2016). *EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2016: Technical Guidance to Prepare National Emission Inventories* (978-92-9213-806-6

1977-8449). (EEA Report, Issue. P. O. o. t. E. Union. https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/f85b9212-9ace-11e6-868c-01aa75ed71a1/language-en#

EEA. (2019). *Final Review Report 2019: annual review of national greenhouse gas inventory data pursuant to Article 19(2) of Regulation (EU) No 525/2013. Germany.* [Verordnung].

EEA. (2020). *Final Review Report 2020: Comprehensive Review of National greenhouse gas inventory data pursuant to Article 4(3) of Regulation (EU) No 2018/842 and to Article 3 of Decision No 406/2009/EC. Germany.*

EEA. (2021). *Final Review Report 2021 - annual review of national greenhouse gas inventory data pursuant to ARticle 19(2) of Regulation (EU) No 525/2013 - Germany* [Report].

EEA. (2022). *Final Review Report 2022: annual review of national greenhouse gas inventory data pursuant to ARticle 19(2) of Regulation (EU) No 525/2013. Germany.*

Comprehensive Review of National Greenhouse Gas Inventory Data, pursuant to Article 38(1a) of Regulation (EU) No 2018/1999 and Article 4(4) of Regulation (EU) No 2018/841: Germany, (2025).

EEA/EuTL. (2025). *European Union Emissions Trading System (EU ETS) data from the Union Registry* (https://www.eea.europa.eu/en/datahub/datahubitem-view/98f04097-26de-4fca-86c4-63834818c0c0?activeAccordion=

ElektroG: Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten vom 20. Oktober 2015, (2015).

EMEP. (2009). *EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook – 2009*. EMEP. http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-emission-inventory-guidebook-2009

EMEP. (2019). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019* (EEA Report No 13/2019). (EEA Report, Issue. EMEP. https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019

EMEP. (2023). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023 - Technical guidance to prepare national emission inventories* [Report](EEA Report Issue 06/2023). E. E. A. (EEA). https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2023

EMEP/EEA. (2023). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023: Technical guidance to prepare national emission inventories* [Report](EEA Report, Issue 06/2023). P. O. o. t. E. Union. file:///C:/Users/tarakji/Downloads/Introduction_to_EEA_EMEP-Guidebook2023_TH-AL-23-005-EN-N.pdf

En2x. (2024). *Minralölzahlen 2023 (vorläufige Zahlen)* [Bericht]. W. F. u. E. e. V. (En2x). https://en2x.de/service/publikationen/

Entrup, N. L., Bodner, G., Hötte, S., Kivelitz, H., Laser, H., & Stemann, G. (2018). *Zwischen-und Zweitfrüchte im Pflanzenbau. Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung* (2. Auflage ed.) [Buch]. Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung.

erdgas-mobil. (2025). *Autobegeistert*. Retrieved 04.11.2025 from http://www.erdgas-mobil.de/tankstellenbetreiber/erdgas-als-kraftstoff/

ERK. (2024). *Technisches Begleitdokument zum Prüfbericht zur Berechnung der deutschen Treibhausgasemissionen für das Jahr 2023: Prüfung und Bewertung der Emissionsdaten gemäß § 12 Abs. 1 BundesKlimaschutzgesetz* [Bericht]. https://expertenrat-klima.de/content/uploads/2024/05/ERK2024_Pruefbericht-Emissionsdaten-des-Jahres-2023_Technisches-Begleitdokument.pdf

ETS. (2023). Daten über Austausserver zwischen V1.6 und V3.3 (Christian Donath). In F. V. 1.6 (Ed.).

Regulation (EU) No 525/2013 of the European Parliament and of the Council of 21 May 2013 on a mechanism for monitoring and reporting greenhouse gas emissions and for reporting other information at national and

Union level relevant to climate change and repealing Decision No 280/2004/EC Text with EEA relevance, (2013a). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:32013R0525&qid=1765448475075

Verordnung (EU) Nr. 525/2013 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Mai 2013 über ein System für die Überwachung von Treibhausgasemissionen sowie für die Berichterstattung über diese Emissionen und über andere klimaschutzrelevante Informationen auf Ebene der Mitgliedstaaten und der Union und zur Aufhebung der Entscheidung Nr. 280/2004/EG Text von Bedeutung für den EWR, (2013b). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX:32013R0525

Directive (EU) 2016/2284 of the European Parliament and of the Council of 14 December 2016 on the reduction of national emissions of certain atmospheric pollutants, (2016). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2016.344.01.0001.01.ENG&toc=OJ:L:2016:344:TOC

Regulation (EU) 2018/842 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 on binding annual greenhouse gas emission reductions by Member States from 2021 to 2030 contributing to climate action to meet commitments under the Paris Agreement and amending Regulation (EU) No 525/2013 (Text with EEA relevance), (2018a). https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2018/842/oj/eng

Verordnung (EU) 2018/1999 des Europäischen parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 über das Governance-System für die Energieunion und für den Klimaschutz, zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 663/2009 und (EG) Nr. 715/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates, der Richtlinien 94/22/EG, 98/70/EG, 2009/31/EG, 2009/73,/EG, 2010/31/EU, 2012/27/EU und 2013/30/EU des Europäischen Parlaments und des Rates, der Richtlinien 2009/119/EG und (EU) 2015/652 des Rates und zur Aufhebung der Verordnung (EU) Nr. 525/2013 des Europäischen Parlaments und des Rates (Text von Bedeutung für den EWR.), (2018b). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/de/TXT/?uri=CELEX%3A32018R1999

Regulation (EU) 2024/1787 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 on the reduction of methane emissions in the energy sector and amending Regulation (EU) 2019/942 (Text with EEA relevance), (2024a). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32024R1787

Verordnung (EU) 2024/573 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 7. Februar 2024 über fluorierte Treibhausgase, zur Änderung der Richtlinie (EU) 2019/1937 und zur Aufhebung der Verordnung (EU) Nr. 517/2014, (2024b). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32024R0573

European Candle Association. (2017, September 2017). *Consumption of candles in the European Union (EU 28)* http://eca.ral-candles.eu/index.php?rubrik=19&topnav=8

European Commission (EC). (2007a). *Reference document on best available techniques (BAT) reference document (BREF) in the ceramic manufacturing industry*. European Commission Retrieved from http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/

European Commission (EC). (2007b). *Reference document on best available techniques for the Manufacture of large volume inorganic chemicals - Solids and others industry.*: European Commission Retrieved from https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/lvic-s_bref_0907.pdf

European Commission Decision of 27 April 2011 determining transitional Union-wide rules for harmonised free allocation of emission allowances pursuant to Article 10a of Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council (2011/278/EU), (2011). http://data.europa.eu/eli/dec/2011/278/oj

European Parliament and Council of the European Union: Regulation (EC) No 1165/2008 concerning livestock and meat statistics and repealing Council directives 93/23/EEC, 93/24/EEC and 93/25/EEC, § Article 4 (2008). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:32008R1165&from=EN

European Parliament and Council of the European Union DIRECTIVE 2010/75/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control), (2010). http://data.europa.eu/eli/dir/2010/75/oj

European Parliament and Council of the European Union Regulation (EU) 2018/842 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 on binding annual greenhouse gas emission reductions by Member States from 2021 to 2030 contributing to climate action to meet commitments under the Paris Agreement and amending Regulation (EU) No 525/2013, (2018). https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2018/842/oj

EXXON. (2014). *Förderung von Erdgas in Deutschland*. EXXON. http://www.erdgassuche-in-deutschland.de/erkundung_foerderung/produktion_von_erdgas/index.html

Eysholdt, M., Kunkel, R., Rösemann, C., Wendland, F., Wolters, T., Zinnbauer, M., & Fuß, R. (2022). Amodel-based estimate of nitrate leaching in Germany for

GHG reporting. *J. Plant Nutr. Soil Sci*, 1-14. https://doi.org/DOI: 10.1002/jpln.202200119

F-GasV: Verordnung (EU) Nr. 517/2014 des europäischen Parlaments und des Rates vom 16. April 2014 über fluorierte Treibhausgase und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 842/2006, (2014).

Falloon, P. D., & Smith, P. (2000). Modelling refractory soil organic matter [Zeitschriftenaufsatz]. *Biology and Fertility of Soils*, *30*(5), 388-398. https://doi.org/10.1007/s003740050019

FAO. (1990). *Soil Map of the World. Revised Legend. Reprinted with corrections* [Karte]. Roma, Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FAO. (2022). *FAOSTAT-Forestry Production and Trade* [Database]. https://www.fao.org/home/en

FAO. (2024). *FAOSTAT* [Database]. http://www.fao.org/faostat/en/#data/QA

FAO. (2025). *FAOSTAT-Forestry Database* [Online Datenbank]. http://www.fao.org/faostat/en/#data/FO

Farrenkopf, M. (2009). Verwendung von Steinkohle - Historische Entwicklung. *Kohleheft*, 36. https://gvst.de/wp-content/uploads/2019/04/Kohleheft.pdf (PdN-ChiS 1/58. Jg. 2009)

Fehrenbach, H., Köppen, S., Markwardt, S., & Vogt, R. (2016). *Aktualisierung der Eingangsdaten und Emissionsbilanzen biogener Energienutzungspfade (BioEm)* (Texte, Issue 09/2016). Umweltbundesamt.

Feller, C., Fink, M., Laber, H., Maync, A., Paschold, P. J., Scharpf, H. C., Schlaghecken, J., Strohmeyer, K., Weier, U., & Ziegler, J. (2011). *Düngung im Freilandgemüsebau* (Schriftenreihe des Institutes für Gemüse- und Zierpflanzenbau, Issue 3). I. f. G.-u. Z. G. u. E. Matthias Fink. https://www.igzev.de/publikationen/IGZ_Duengung_im_Freilandgemuesebau.pdf

Fichtner, W., Karl, U., & Hartel, R. (2011). *Fortschreibung der Emissionsfaktoren für Feuerungs- und Gasturbinenanlagen nach 13./17. BImSchV und TA Luft : Endbericht* [Forschungsbericht]

Forsell, N., Korosuo, A., Federici, S., Gusti, M., Rincón-Cristóbal, J. J., Rüter, S., Sánchez-Jiménez, B., Dore, C., Brajterman, O., & Gardiner, J. (2018). *Guidance on developing and reporting Forest Reference Levels in accordance with Regulation (EU) 2018/841* [Report]. https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/5ef89b70-8fba-11e8-8bc1-01aa75ed71a1/language-en

Forsell, N., Korosuo, A., Gusti, M., Rüter, S., Havlik, P., & Obersteiner, M. (2019). Impact of modelling choices on setting the reference levels for the EU forest carbon sinks: how do different assumptions affect the country-specific forest reference levels? [Journal Article]. *Carbon balance and management*, *14*(1), 18. https://doi.org/10.1186/s13021-019-0125-9

Franko, U., Kolbe, H., Thiel, E., & Ließ, E. (2011). Multi-site validation of a soil organic matter model for arable fields based on generally available input data [Journal Article]. *Geoderma*, *166*(1), 16. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.07.019

Fraver, S., Wagner, R. G., & Day, M. (2002). Dynamics of coarse woody debris following gap harvesting in the Acadian forest of central Maine, USA [Journal Article]. *Canadian Journal of Forest research*, *32*(12), 12. https://doi.org/10.1139/x02-131

Fritsche, U. R., Rausch, L., & Schmidt, K. (2006). *Kurzstudie: Stand und Entwicklung von Treibhausgasemissionen in den Vorketten für Erdöl und Erdgas - für das Institut für wirtschaftliche Oelheizung e.V. (IWO)* [Endbericht]. Öko-Institut.

GAFA. (2006). *Handbuch Forstliche Analytik: Eine Loseblatt-Sammlung der Analysemethoden im Forstbereich.* [Loseblatt-Sammlung]. B. f. E. u. Landwirtschaft.

Gärtner, S., Münch, J., Reinhardt, G., & Vogt, R. (2008). Materialband E: Ökobilanzen. In *Optimierungen für einen nachhaltigen Ausbau der Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland*.

GASUNIE. (2014). *Verdichterstationen*. GASUNIE. Retrieved 17.04.2025 from https://web.archive.org/web/20120128174756/http://www.erdgas-fuer-morgen.de/hoofdmenu/verdichterstationen

Gebauer, A., Sakhaee, A., Don, A., Poggio, M., & Ließ, M. (2022). Topsoil Texture Regionalization for Agricultural Soils in Germany—An Iterative Approach to Advance Model Interpretation [Journal Article]. *Frontiers in Soil Science*, *1*, 21. https://doi.org/10.3389/fsoil.2021.770326

Gesellschaft für Ernährungsphysiologie. (2006). *Energie- und Nährstoffbedarf landwirtschaftlicher Nutztiere. Nr. 10. Empfehlungen zur Energie- und Nährstoffversorgung von Schweinen.* Gesellschaft für Ernährungsphysiologie / Ausschuß für Bedarfsnormen.

GFZ. (2018). *Pilotstandort Ketzin*. Deutsches GeoForschungsZentrum - (GFZ). http://www.co2ketzin.de/startseite/

Gibbs, M. J., & Woodbury, J. W. (1993). Methane from livestock manure. In A. R. v. Amstel (Ed.), *International IPCC workshop methane and nitrous oxide : methods in national emissions inventories and options for control ; proceedings ; EUROASE Hotel, Amersfoort, The Netherlands, 3-5 February, 1993* (pp. 12). Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu. https://www.gbv.de/dms/tib-ub-hannover/184870518.pdf

Gitzhofer, K. (2021). *Überarbeitung der Emissionsfaktoren für Luftschadstoffe in den Branchen Zementklinkerproduktion und Glasherstellung : in der Systematik der Genfer Luftreinhaltekonvention: NFR 2.A.1 und NFR 2.A.3 ; Teilbericht* [Überarbeitung der Emissionsfaktoren für Luftschadstoffe in den Branchen Zementklinkerproduktion und Glasherstellung] (Abschlussdatum: November 2020 ed.) [Forschungsbericht]. Umweltbundesamt. http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/ueberarbeitung-der-emissionsfaktoren-fuer

Gottwald, J., Dobritz, F., & Schneider, L. (2017). *Prüfung der Vollständigkeit der Berichterstattungskategorie 'Keramische Erzeugnisse' insbesondere Emissionsrelevanz feinkeramischer Teilbranchen (Evaluierung in CRF 2.A.4.a/NFR 2.A.6 AR-Keramik)* [Bericht](Dokumentationen, Issue 1/2017). U. (UBA). http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/pruefung-der-vollstaendigkeit-der

Graf, T., Beck, M., Mauermeier, M., Ismann, D., Portner, J., P., D., & Schmidhalter, U. (2014). Humulus lupulus – The Hidden Half [Journal Article]. *BrewingScience*, *67*(11-12), 6. https://www.researchgate.net/profile/Urs-Schmidhalter-2/publication/298694030_Humulus_lupulus_-_The_hidden_half/links/593e99a2a6fdcc8065777c13/Humulus-lupulus-The-hidden-half.pdf

Graf, T. M. (2016). *Tröpfchenbewässerung im Hopfenbau - Feldversuche, Physiologie und Rhizosphäre.* [Dissertation, Technische Universität München]. München. https://mediatum.ub.tum.de/doc/1304504/1304504.pdf

Graichen, V., Cludius, J., & Gores, S. (2019). *ETC/CME Report 1/2019: Estimate of 2005-2012 emissions for stationary installations to reflect the current scope (2013 - 2020) of the EU ETS* [Report](Eionet Report

ETC/CME, Issue 2019/1). ETC/CME. https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-cme/products/etc-cme-reports/estimate-of-2005-2012-emissions-for-stationary-installations-to-reflect-the-current-scope-2013-2020-of-the-eu-ets

Grebe, S., Wulf, S., & Häußermann, U. (2024). *Dokumentation zur Datenaufbereitung der Aktivitätsdaten Biogas für den Nationalen Inventarbericht - Submission 2025* [unveröffentlicht]. Kuratorium für Technik und Bauen in der Landwirtschaft (KTBL).

Grebe, S., Wulf, S., & Häußermann, U. (2025). *Dokumentation zur Datenaufbereitung der Aktivitätsdaten Biogas für den Nationalen Inventarbericht - Submission 2026* [unveröffentlicht]. Kuratorium für Technik und Bauen in der Landwirtschaft (KTBL).

Greiner, B., Barghoorn, M., & Dobberstein, J. (1983). *Chemisch-physikalische Analyse von Hausmuell* (A.-A. U. Technische Universität Berlin . Institut fuer Quantitative Methoden & U.-. Umweltbundesamt, Eds.) [Buch].

Grosse, C. (2021). *Qualitätsprüfung der Texte für den Nationalen Inventarbericht 2022 und Datenerhebung in der Quellgruppe 1.B.2.b* (PNr. 156 527).

Grosse, C. (2022). *Qualitätsprüfung der Texte für die nationalen Inventarberichte 2023 und 2024 und Datenerhebung in der Quellgruppe 1.B.2.b - Zwischenbericht 2022*.

Grosse, C. (2023). *Qualitätsprüfung der Texte für den nationalen Inventarbericht und Datenerhebung in der Quellgruppe 1.B.2.b* (PNr. 51 122 /23).

Große, C., Eyßer, M., Lehmann, S., Sammueller, J., & Behnke, M. (2022). *Ermittlung von Methanemissionen des Gasverteilnetzes (ME DSO): Inventur der Datenlage zur Abschätzung von Methanemissionen aus dem deutschen Gasverteilnetz, Entwicklung und Durchführung eines repräsentativen Messprogramms zur Erhebung der erforderlichen Daten: Abschlussbericht* [Bericht].

Grosz, B., Dechow, R., Gebbert, S., Hoffmann, H., Zhao, G., Constantin, J., Raynal, H., Wallach, D., Coucheney, E., Lewan, E., Eckersten, H., Specka, X., Kersebaum, K.-C., Nendel, C., Kuhnert, M., Yeluripati, J., Haas, E., Teixeira, E., Bindi, M.,…Ewert, F. (2017). The implication of input data aggregation on up-scaling soil organic carbon changes [Journal Article]. *96*. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.046

Grün, E., Schmelz, K.-G., & Schild, L. (2013). Klimarelevante Emissionen des Emschersystems [Zeitschriftenaufsatz]. *KA Korespondenz Abwasser, Abfall*, *60*(3).

Grundner, F., & Schwappach, A. F. (1952). *Massentafeln zur Bestimmung des Holzgehaltes stehender Waldbäume und Waldbestände* (10. Auflage ed.) [Buch]. Verlag von Paul Parey.

Grüneberg, E., Ziche, D., & Wellbrock, N. (2014). Organic carbon stocks and sequestration rates of forest soils in Germany [Journal Article]. *Global Change Biology*, *20*(8), 19. https://doi.org/10.1111/gcb.12558

Gschrey, B., Warncke, K., & Osterheld, S. (2018). *Inventarermittlung der F-Gase 2017/2018 - Daten von HF(C)KW, FKW, SF6, NF3, SF5CF3, H(C)FE und PFPMIE für die nationale Emissionsberichterstattung gemäß Klimarahmenkonvention für die Berichtsjahre 2017 und 2018*.

Gschrey, B., Winfried, S., Kimmel, T., Zeiger, B., & Reitz, S. (2015). *Implementierung der ab dem Berichtsjahr 2013 gültigen IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories 2006 in die Inventarerhebung fluorierter Treibhausgase (HFKW, FKW, SF6, NF3)* [Bericht](1862-4359). (Climate Change, Issue. U.-. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/implementierung-der-ab-dem-berichtsjahr-2013

Gujer, W. (2006). *Siedlungswasserwirtschaft* (3., bearbeitete Auflage ed.) [Buch]. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-34330-1

Gunnarsson, U. (2005). Global patterns of Sphagnum productivity. *Journal of Bryology*, *27*, 269-279. https://doi.org/10.1179/174328205X70029

Gurgel, A. (2011). *Ergebnisse der Versuche mit schnellwachsenden Baumarten nach 18 Jahren Bewirtschaftung in Gülzow* [Beitrag zu einer Tagung]. Tagungsband, https://www.landwirtschaft-mv.de/Fachinformationen/Nawaro/?id=66&processor=processor.sa.lfaforenbeitrag

Haas, W. (2015). *Kraftstoffpermeation an Zapfsäulen*.

Haenel, H.-D., Dämmgen, U., & Rösemann, C. (2011). Estimating numbers of piglets, weaners and fattening pigs for the German agricultural emission inventory. *Landbauforsch*, *61*, 229-236.

Haenel, H.-D., Rösemann, C., Dämmgen, U., Döring, U., Wulf, S., Eurich-Menden, B., Freibauer, A., Döhler, H., Schreiner, C., Osterburg, B., & Fuß, R. (2020). *Berechnung von gas- und partikelförmigen Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft 1990 – 2018* [Bericht](Thünen Report, Issue. J. H. v. Thünen-Institut. https://www.thuenen.de/media/publikationen/thuenen-report/Thuenen_Report_77.pdf

Haenel, H.-D., & Wulf, S. (2016). *Berechnung von CH_4-, N_2O-, NO-, N_2- und NH_3-Emissionen durch Vergärung von Gülle, Mist und Energiepflanzen ab Emissionsberichterstattung 2015.* Thünen-Institut, Braunschweig, und KTBL, Darmstadt. .

Hafner, I. A., Gabrielii, C., & Widell, K. (2019). *Refrigeration units in marine vessels: Alternatives to HCFCs and high GWP HFCs*. Nordic Council of Ministers.

Handke, V., Degel, M., Hohlfeld, A., & Kathöfer, V. (2013). *International Workshop "Comparing ETS and NIR Monitoring Data" : 26th and 27th September 2011* [Forschungsbericht]. http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/international-workshop-comparing-ets-nir-monitoring

Handke, V., Joerss, W., Pfitzner, R., Brinkschneider, F., & Schollenberger, H. (2004). *Das Qualitäts-System-Emissionsinventare: Handbuch* [Bericht]. U. (UBA).

Harrison, M. R., Shires, T. M., Baker, R. A., & Loughran, C. J. (1999). *Methane Emissions from the U. S. Petroleum Industry* [Report](EPA- 600 / R- 99-010). U. S. E. P. AGENCY. https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/radian-petroleum-1999.pdf

Harthan, R. O., Anderson, G., & Böttcher, H. (2017). *Methodische Anpassung der deutschen THG-Emissionsinventare an die überarbeiteten "UNFCCC" reporting guidelines on annual inventories for Parties included in Annex I to the Convention* [Forschungsbericht].

Hasenbalg, C., & Sohnke, R. (2021). *Recherche des Festbrennstoffeinsatzes in deutschen Dampfbahnen 2019 & 2020* [Unveröffentlichtes Werk]. Probst & Consorten.

Hausmann, K., Zagroski, A., & Mielke, C. (2021). *Convert {ePRTR} data to {CLRTAP} {LPS} submission*. Umweltbundesamt.

Hedel, R., & Kunze, J. (2012). *Recherche des jährlichen Kohleeinsatzes in historischen Schienenfahrzeugen seit 1990* [Unveröffentlichtes Werk]. Probst & Consorten Marketing-Beratung.

Heidt, C., Knörr, W., & Bergk, F. (2025). *TREMOD Mobile Machinery (TREMOD MM) 2025* (Ifeu Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH.

Heilwig, R. (2002). Fahrleistungen und Kraftstoffverbrauch im Straßenverkehr [article]. *DIW Wochenbericht*(51/52), 881. http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsrep&AN=edsrep.a.diw.diwwob.69.520.10&lang=de&site=eds-live

Hensmann, M., Haardt, S., & Ebert, D. (2011). *Emissionsfaktoren zur Eisen- und Stahlindustrie für die Emissionsberichterstattung* (FKZ 3707 42 301). http://www.uba.de/uba-info-medien/4362.html

Hensmann, M., Haardt, S., & Ebert, D. (2012). *Emissionsfaktoren zur Eisen- und Stahlindustrie für die Emissionsberichterstattung* (Stand: Juli 2012 ed.). http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/emissionsfaktoren-zur-eisen-stahlindustrie-fuer
http://webde/gruppen/bibliothek/Onlinebuecher/EB004995.pdf

Herold, A., Anderson, G., & Jörß, W. (2016). *Implications of the changed reporting requirements of the Effort Sharing Decision for the EU ETS and the national GHG inventory : work package 1: comparison of ETS and IPCC* http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_13_2016_implications_of_changed_reporting_requirements.pdf
http://webde/gruppen/bibliothek/Onlinebuecher/EB012194.pdf

Herold, A., Jörß, W., Koch, M., & Scheffler, M. (2014). *Methodische Anpassung der deutschen THG-Emissionsinventare an die überarbeiteten „UNFCCC reporting guidelines on annual inventories for Parties included in Annex I to the Convention“* (FKZ: 3712 41 103-2).

Hoehn, E., Riedmüller, U., Eckert, B., Tworeck, A., & Leßmann, D. (2009). *Ökologische Bewertung von künstlichen und erheblich veränderten Seen sowie Mittelgebirgsseen anhand der biologischen Komponente Phytoplankton nach den Anforderungen der EU-Wasserrahmenrichtlinie - Bewertungsmodul für Mittelgebirgsseen und Verfahrensanpassungen für Baggerseen, pH-neutrale Tagebauseen, Talsperren und Sondertypen im Tiefland - Abschlussbericht zum LAWA-Projekt O 3.06* [Abschlussbericht]. https://www.gewaesserfragen.de/pdfs/Abschlbericht_LAWA_O3_06_Feb_09.pdf

Hoffmann, G., Wünsch, C., Schnapke, A., & Sieck, M. (2011). *Nutzung der Potenziale des biogenen Anteils im Abfall zur Energieerzeugung* [Forschungsbericht]. http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/4116.pdf
http://ubanet/Gruppen/bibliothek/Onlinebuecher/EB002171.pdf

Honig, A. C., Bosch, A., Ettle, T., Spiekers, H., & Baltissen, I. (2024, 24. – 27. 09.2024). Vorträge zum Generalthema: Qualität landwirtschaftlicher Erzeugnisse in der Wertschöpfungskette:

Verbraucheranspruch und nachhaltige Erzeugung In V. D. L. U.-u. F. e. V., *VDLUFA-Schriftenreihe* 135. VDLUFA-Kongress, Darmstadt.

Horn, H. (2013). *Ertragspotenziale von Kurzumtriebsplantagen in Sachsen* [PowePoint-Präsentation]. https://www.landwirtschaft.sachsen.de/download/2013_11_28_Vortrag_Horn_Nossen.pdf

Houghton, J. T., Meira Filho, L. G., Lim, B., Treanton, K., & Mamaty, I. (1997). *Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. v. 1: Greenhouse gas inventory reporting instructions.-v. 2: Greenhouse gas inventory workbook.-v. 3: Greenhouse gas inventory reference manual*. I. P. o. C. C. (IPCC). http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs1.html

Idoine, N. E., Raycraft, E. R., Hobbs, S. F., Everett, P., Shaw, R. A., Evans, E. J., Mills, A. J., Shaw, I. R., & Watkins, I. (2025). *World Mineral Production 2019-2023* [Bericht]. British Geological Survey (BGS). https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/539285/1/WMP_2019-2023_COMPLETE.pdf

Illichmann, S. (2016). *Recherche des Festbrennstoffeinsatzes historischer Schienenfahrzeuge in Deutschland 2015*. Probst & Consorten Marketing-Beratung.

Institut für Umweltschutz. (1990). *Umweltbericht der DDR : Information zur Analyse der Umweltbedingungen in der DDR und zu weiteren Massnahmen / Institut für Umweltschutz* [Bericht]. Visuell-Verlag.

IPCC. (2000). *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories* [Report]. http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english/index.html

IPCC. (2003). *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*. I. I. P. o. C. C. Secretariat. http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gpglulucf/gpglulucf.html

IPCC. (2006a). *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories* [Report]. S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, & K. Tanabe. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/

IPCC. (2006b). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use* (S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, & K. Tanabe, Eds. Vol. 4) [Report]. IGES. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html

IPCC. (2014). *2013 Revised Supplementary Methods and Good Practice Guidance Arising from the Kyoto Protocol* (T. S. U. National Greenhouse Gas Inventories Programme (IPCC), Trans.; T. Hiraishi, T. Krug, K. Tanabe, N. Srivastava, B. Jamsranjav, M. Fukuda, & T. G. Troxler, Eds. Vol. 4) [Report]. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Secretariat. http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/kpsg/index.html

IPCC. (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (E. Calvo, D. Romano, S. Guendehou, B. Limmeechokchai, R. Pipatti, Y. Rojas, R. Sturgiss, K. Tanabe, T. Wirth, J. Witi, A. Garg, M. M. Weitz, B. Cai, D. A. Ottinger, H. Dong, J. D. MacDonald, S. M. Ogle, M. T. Rocha, M. J. S. Sanchez, D. M. Bartram, & S. Towprayoon, Eds.) [Report]. IPCC. https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/

IPCC. (2023). *Climate change 2023: the Synthesis Report of the Sixth Assessment Report* (R. K. Pachauri, L. Mayer, & I. P. o. C. Change, Eds.). Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

IPCC, Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Jamsranjav, B., Fukuda, M., & Troxler, T. G. (2014). *2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands.* I. I. P. o. C. C. Secretariat. http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/wetlands/index.html

IPSOS. (2001). Marktanalyse Pferdesportler in Deutschland.

IPSOS. (2019). Pferdesport in Deutschland.

Irving, W. N., & Branscome, M. (1999). *HFC-23 Emissions from HCFC-22 Production. Background Paper for Expert Group Meeting on Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories* [Report]. I. O. I. P. o. N. G. G. Inventories. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/bgp/3_8_HFC-23_HCFC-22_Production.pdf?utm_source=chatgpt.com

Jacobs, A., Flessa, H., Don, A., Heidkamp, A., Prietz, R., Dechow, R., Gensior, A., Poeplau, C., Riggers, C., Schneider, F., Tiemeyer, B., Vos, C., Wittnebel, M., Müller, T., Säurich, A., Fahrion-Nitschke, A., Gebbert, S., Hopfstock, R., Jaconi, A.,…Freibauer, A. (2018). *Landwirtschaftlich genutzte Böden in Deutschland - Ergebnisse der Bodenzustandserhebung* [Report](Thünen Report, Issue 64). J. H. v. Thünen-Institut. https://www.thuenen.de/media/publikationen/thuenen-report/Thuenen_Report_64.pdf

Jacobs, A., Poeplau, C., Weiser, C., Fahrion-Nitschke, A., & Don, A. (2020). Exports and inputs of organic carbon on agricultural soils in Germany. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, *118*(3), 249-271. https://doi.org/10.1007/s10705-020-10087-5

Jamet, M., & Knörr, W. (2022). *Überleitung der Fahrleistungserhebung nach TREMOD: Forschungsprojekt FE 84.0523/2016 der Bundesanstalt für Straßenwesen* [Bericht](Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen, Reihe F: Fahrzeugtechnik, Issue. I. f. E.-. und & U. (ifeu). https://bast.opus.hbz-nrw.de/frontdoor/index/index/searchtype/collection/id/661/start/13/rows/25/doctypefq/report/docId/2719

JARN. (Versch. Jahrgänge). Special Edition “World Air Conditioner Market". *Japan Air Conditioning, Heating & Refrigeration News*, *Tokyo 107-0052*.

Järvenpää, M., Repo, A., Akujärvi, A., Kaasalainen, M., & Liski, J. (2018). Soil carbon model Yasso15-Bayesian calibration using worldwide litter decomposition and carbon stock data [Journal Article]. *Manuscript in preparation]. Geoscientific Model Development*, 19. https://en.ilmatieteenlaitos.fi/documents/31422/0/Yasso15+manuscript/a3cd1a95-11a6-431e-ac81-6c1470fa7e1d

Jarvis, S. C., & Pain, B. F. (1994). Greenhouse gas emissions from intensive livestock systems: their estimation and technologies for reduction. *Climate Change: Significance for Agriculture and Forestry*, *27*, 27-38.

Joas, R., Potrykus, A., Schott, R., & Wenzel, S. (2004). *VOC-Minderungspotenzial beim Transport und Umschlag von Mineralölprodukten mittels Kesselwagen* [Forschungsbricht](FKZ 202 44 372). (UBA Texte 12/2004, Issue. U. (UBA). https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/voc-minderungspotenzial-beim-transport-umschlag-von

Johansson, T., & Hjelm, B. (2012). Stump and root biomass of poplar stands. *Forests*, *3*(2), 166-178.

Jörß, W., & Gronewäller, L. (2010). *Aufbereitung von Daten der Emissionserklärungen gemäß 11. BImSchV aus dem Jahre 2004 für die Verwendung bei der UNFCCC- und UNECE-Berichterstattung : Schlussbericht* [Forschungsbericht].

Juhrich, K. (2022). *CO2-Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe : Aktualisierung 2022* [Bericht](Climate Change / Umweltbundesamt, Issue. http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/co2-emissionsfaktoren-fuer-fossile-brennstoffe-0

Juhrich, K., & Wachsmann, U. (2007a). *Dokumentation der Datenqualität von Aktivitätsdaten für die Berichte über Emissionen aus stationären Feuerungen im Rahmen des Nationalen Inventarberichtes und des Monitoring Mechanismus nach RL EG 99/296* [Forschungsbericht].

Juhrich, K., & Wachsmann, U. (2007b). *Dokumentation der Datenqualität von Aktivitätsdaten für die Berichte über Emissionen aus stationären Feuerungen im Rahmen des Nationalen Inventarberichtes und des Monitoring Mechanismus nach RL EG 99/296* [Forschungsbericht].

Kaltschmitt, M. (2007). *Umwelteffekte einer geothermischen Stromerzeugung - Analyse und Bewertung der klein- und großräumigen Umwelteffekte der geothermischen Stromerzeugung* (FKZ 205 421 10).

Keller, M., Hausberger, S., Matzer, C., Wüthrich, P., & Notter, B. (2017). *Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA) Version 3.3* [Handbuch]. https://cdn.prod.website-files.com/6207922a2acc01004530a67e/625eb52f0de9e093549625c6_HBEFA33_Hintergrundbericht.pdf

Kern, J., Hellebrand, H. J., Scholz, V., & Linke, B. (2010). Assessment of nitrogen fertilization for the CO 2 balance during the production of poplar and rye. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *14*(5), 1453-1460.

Kirchgessner, M., Roth, F. X., Schwarz, F. J., & Stangl, G. (2008). *Tierernährung*. DLG - Verlags Union Agrar.

Kirchgessner, M., Windisch, W., & Müller, H.-L. (1994). *Methane release from dairy cows and pigs* Proc XIII Symp on energy metabolism of farm animals.,

Kis-Kovács, G., Labancz, K., Ludányi, E. L., Lovas, K., Kis-Csatári, E., Tóth, V., Zubor-Nemes, A., Somogyi, Z., Tobisch, T., király, É., Horváth, K., & Ilona király, É. (2023). *Hungary's national inventory report for 1958-2021* [Bericht]. H. M. Service. https://unfccc.int/documents/627849

Klingenfuß, C., Klein, D.-P., Thrum, T., Fell, H., Klemm, J., & Zeitz, J. (2020). Natürliche Kohlenstoffspeicher in Berlin.

Knörr, W., Allekotte, M., & Gores, S. (2025). *TREMOD Aviation (TREMOD AV) 2025 - Revision des Modells zur Berechnung des Flugverkehrs (TREMOD-AV)* (Ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung GmbH Öko-Institut e.V.

Knörr, W., Heidt, C., Gores, S., & Bergk, F. (2025). *TREMOD - Daten- und Rechenmodell: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2035* (Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (Ifeu).

Knörr, W., Heldstab, J., & Kasser, F. (2009). *Ermittlung der Unsicherheiten der mit den Modellen TREMOD und TREMOD-MM berechneten Luftschadstoffemissionen des landgebundenen Verkehrs in Deutschland : Endbericht* [Bericht].

Knörr, W., Höpfner, U., & Lambrecht, U. (2002). *Aktualisierung des "Daten- und Rechenmodells":Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1980-2020 : Endbericht* [Bericht].

Knörr, W., Schacht, A., & Gores, S. (2015). *TREMOD Aviation (TREMOD AV) 2015 - Revision des Modells zur Berechnung des Flugverkehrs (TREMOD-AV)* (Institut für Energie- und Umweltforschung GmbH (Ifeu) Öko-Institut e.V.

Knörr, W., Schacht, A., Gores, S., Kotzulla, M., & Wetzel, F. (2012). *Entwicklung eines eigenständigen Modells zur Berechnung der Energieeinsätze und Emissionen des zivilen Flugverkehrs - (TREMOD-AV)* [Bericht](Texte, Issue. U.-. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/entwicklung-eines-modells-zur-berechnung

Kohlenwirtschaft, S. d. (2025). *Herstellung von Braunkohlenbriketts, Braunkohlenkoks, Staub-, Trocken- und Wirbelschichtkohle nach Revieren*. Statistik der Kohlenwirtschaft e.V. Retrieved 04.11.2025 from https://kohlenstatistik.de/daten-fakten/

Koj, H. (2024). Persönliche Mitteilung Hr. Koj (BAFA) zur Tanklagererhebung. In K. U. Pannier (Ed.), (Mineralöltanklager-Erhebung Stand 31.12.23; TL-DE-18 ed.): BAFA.

König, H. C. (2007). *Waldbrandschutz-Kompendium für Forest und Feuerwehr*. F. M. Grimm.

König, N., Blum, U., Symossek, F., Bussian, B., Ellinghaus, R., Furtmann, K., Gärtner, A., Gutwasser, F., Hauenstein, M., & Kiesling, G. (2005). *Handbuch forstliche Analytik*. Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft.

König, N., & Wolff, B. (1993). *Abschlussbericht über die Ergebnisse und Konsequenzen der im Rahmen der bundesweiten Bodenzustandserhebung im Wald (BZE) durchgeführten Ringanalysen. Forschungszentrum Waldökosysteme* [Abschlussbericht].

Kraftfahrtbundesamt. (Versch. Jahrgänge). *Fahrzeugzulassungen Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Fahrzeugalter* (Kraftfahrtbundesamt.

Kreißig, J. (1996). *Ganzheitliche Bilanzierung von Dachbahnen aus Bitumen : Kurzbericht*. http://ubanet/Gruppen/bibliothek/Onlinebuecher/UM381318.pdf

KrWG: Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen, 1324 (2012).

Lange, A., Stich, G., Niederste-Hollenberg, J., & Dorgeloh, E. (2021). *Ermittlung der Relevanz von Treibhausgas-Emissionen aus abflusslosen Gruben (Abwassersammelgruben) sowie aeroben und anaeroben Kleinkläranlagen und Erarbeitung eines detaillierten Messkonzepts: Abschlussbericht* [Abschlussbericht](Forschungskennzahl 3719 41 599 0). (CLIMATE CHANGE Issue 34/2023). U. (UBA) & B.-u. D. D. I. B. e.V. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/34_2023_cc_ermittlung_der_relevanz_von_treibhausgas-emissionen_.pdf

LAWA. (2019). *Wasserwirtschaftliche Anforderungen an die Lagerung von Silage und Festmist auf landwirtschaftlichen Flächen unter sechs Monaten.* https://www.lawa.de/documents/lawa-merkblatt-lagerung-festmist-und-silage_1578302310.pdf

Lechtenböhmer, S., Nanning, S., & Buttermann, H.-G. (2006). *Umsetzung des Inventarplanes und nationale unabhängige Überprüfung der Emissionsinventare für Treibhausgase : Teilvorhaben 02 "Bilanzierung der Gewinnung und Verwendung von Kalkstein und Ausweisung der CO2-Emissionen"* (20/06). (UBA-Texte, Issue. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3102.pdf

Lechtenböhmer, S., Nanning, S., Buttermann, H.-G., & Hillebrand, B. (2006a). *Bilanzierung der Gewinnung und Verwendung von Kalkstein und Ausweisung der CO2-Emissionen* [Umsetzung des Inventarplanes und nationale unabhängige Überprüfung der Emissionsinventare für Treibhausgase Teilvorhaben 02 "Bilanzierung der Gewinnung und Verwendung von Kalkstein und Ausweisung der CO2-Emissionen"].

Lechtenböhmer, S., Nanning, S., Buttermann, H.-G., & Hillebrand, B. (2006b). *Einsatz von Sekundärbrennstoffen : Umsetzung des Inventarplanes und nationale unabhängige Überprüfung der Emissionsinventare für Treibhausgase, Teilvorhaben 02* [Bericht](Texte, Issue. U. (UBA). http://ubanet/Gruppen/bibliothek/Onlinebuecher/UM100185-06-07.pdf

http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3011.pdf

Lenk, T., Vogelbusch, F., & Falken, C. (2004). *Auswirkungen des Tanktourismus auf das deutsche Steueraufkommen – eine finanzwissenschaftliche Bestandsaufnahme* UNITI Bundesverband mittelständischer Mineralölunternehmen e. V. - Mitgliederversammlung 2004, München.

Leverenz, H., & Tchobanoglous, G. (2011). *Evaluation of Greenhouse Gas Emissions from Septic Systems: WERF Report DEC1R09* [Report]. IWA Publishing.

Liebetrau, J., Daniel-Gromke, J., Oehmichen, K., Weiland, P., Friehe, J., Clemens, J., & Hafermann, C. (2011). *Emissionsanalyse und Quantifizierung von Stoffflüssen durch Biogasanlagen im Hinblick auf die ökologische Bewertung der landwirtschaftlichen Biogasgewinnung und Inventarisierung der deutschen Landwirtschaft* [Endbericht]. L. u. V. B. Bundesministerium für Ernährung.

Lingner, S., Thiessen, E., & Hartung, E. (2018). Aboveground biomass estimation in linear forest objects: 2D- vs. 3D-data [Zeitschriftenaufsatz]. *Journal of Forest Science*, *64*, 523-532. https://doi.org/10.17221/106/2018-JFS

Lingner, S., Thiessen, E., Müller, K., & Hartung, E. (2018). Dry Biomass Estimation of Hedge Banks: Allometric Equation vs. Structure from Motion via Unmanned Aerial Vehicle. *Journal of Forest Science*, *64*(4), 149-156. https://doi.org/10.17221/152/2017-JFS

Liski, J. (1995). *Variation in soil organic carbon and thickness of soil horizons within a boreal forest stand–effect of trees and implications for sampling* (0037-5330). S. Fennica.

Lubenau, U., & Schuetz, S. (2014). *Messungen der Erdgasqualität an verschiedenen Stellen im Netz zur Ableitung bzw. Verifizierung von durchschnittlichen Emissionsfaktoren und Heizwerten von Erdgas* [Unveröffentlichtes Werk]. DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH.

Ludwig, W.-D., Mühlbauer, B., & Seifert, R. (2022). *Arzneiverordnungs-Report 2022: Aktuelle Daten, Kosten, Trends und Kommentare* [Bericht]. Springer.

Luftfahrt-Bundesamt. (Versch. Jahrgänge). *Bestand an Luftfahrzeugen in der Bundesrepublik Deutschland* (

Maier, J., & Vetter, R. (2004). Erträge und Zusammensetzung von Kurzumtriebs-Gehölzen (Weide, Pappel, Blauglockenbaum). In I. f. A. B. e.V., *Bornimer Agrartechnische Berichte* Energieholzproduktion in der Landwirtschaft : Potenzial, Anbau, Technologie, Ökologie und Ökonomie, Postdam.

Mathivanan, G. P., Eysholdt, M., Zinnbauer, M., Rösemann, C., & Fuß, R. (2021). New N2O emission factors for crop residues and fertiliser inputs to agricultural soils in Germany. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, *322*, 12 https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880921003443?via%3Dihub

Matthäi, M., Gutberlet, H., Feller, K.-H., Schimmelpfennig, M., & Stübiger, M. (2010). Messung der Lichtstärke von Kerzen unterschiedlicher Zusammensetzung. In: Westdeutsche Dochtfabrik GmbH; Sasol Wax GmbH; FH Jena.

Matthäi, M., & Petereit, N. (2004). Die Qualitätskerze. In *Sonderdruck*. Jahrbuch für den Praktiker 2004: ECA.

Mauersberger, R., & Kopp, D. (2006). *Klassifikation der Seen für die Naturraumerkundung des nordost-deutschen Tieflandes* [Bericht]. A. f. N. u. Landschaftsforschung. https://uckermaerkische-seen.de/files/foerderverein/downloads/Archiv_2006_3_Mauersberger.pdf

Meiners, H. (2005). Persönliche Mitteilung am 28.09.2005 - basierend auf dem Forschungsbericht FKZ 203 41 253/05 "Teilbereich 1 – Prognostische Emissionsfaktoren für Feuerungsanlagen". In M. Hüllenkrämer (Ed.). Gelsenkirchen: DMT.

Meiners, H. (2014). *Potential zur Freisetzung und Verwertung von Grubengas*.

Meiners, H. O., Michael; Kerber, Vitali. (2018). *Vertwerten von Grubengas als Beitrag zur Emissionsvermeidung und zur Gefahrenabwehr*. DMT. http://www.grubengas.de/german/DMT_Gutachten%20Emissionsvermeidung+Anlagen.pdf

Meinshausen, M., Smith, S. J., Calvin, K., Daniel, J. S., Kainuma, M. L. T., Lamarque, J. F., Matsumoto, K., Montzka, S. A., Raper, S. C. B., Riahi, K., Thomson, A., Velders, G. J. M., & van Vuuren, D. P. P. (2011). The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change*, *109*(1), 213. https://doi.org/10.1007/s10584-011-0156-z

Mell, W.-D. (2008). *Strukturen im Bootsmarkt*.

Metzger, M. J., Bunce, R. G. H., Jongman, R. H. G., Mücher, C. A., & Watkins, J. W. (2005). A climatic stratification of the environment of Europe. *Global Ecology and Biogeography*, *14*(6), 549-563. https://doi.org/10.1111/j.1466-822x.2005.00190.x

Minister of Environment and Climate Change. (2023). *Canada's national inventory report 1991-2021: greenhouse gas sources and sinks in canada - canada's submission to the united nations framework convention on climate change* [Bericht]. E. a. C. C. Canada. https://unfccc.int/documents/627833

Minx, J. C., Lamb, W. F., Andrew, R. M., Canadell, J. G., Crippa, M., Döbbeling, N., Forster, P. M., Guizzardi, D., Olivier, J., Peters, G. P., Pongratz, J., Reisinger, A., Rigby, M., Saunois, M., Smith, S. J., Solazzo, E., & Tian, H. (2021). A comprehensive and synthetic dataset for global, regional, and national greenhouse gas emissions by sector 1970–2018 with an extension to 2019 [Journal Article]. *Earth System Science Data*, *13*(11). https://doi.org/10.5194/essd-13-5213-2021

Mokany, K., Raison, R., & Prokushkin, A. S. (2006a). Critical analysis of root: shoot ratios in terrestrial biomes. *Global Change Biology*, *12*(1), 84-96.

Mokany, K., Raison, R. J., & Prokushkin, A. S. (2006b). Critical analysis of root: shoot ratios in terrestrial biomes [Journal Article]. *Global Change Biology*, *12*(1), 84-96. http://reddcr.go.cr/sites/default/files/centro-de-documentacion/mokany_et_al._2006_-_critical_analysis_root_to_shoot_ratios.pdf

Molitor, R., Hausberger, S., & Benke, G. (2004). *Abschätzung der Auswirkungen des Tanktourismus auf den Treibstoffverbrauch und die Entwicklung der CO2-Emissionen in Österreich - Endbricht* [Endbericht]. U. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft & u. W. (BMLFUW).

Moore, T. R., Bubier, J. L., Frolking, S. E., Lafleur, P. M., & Roulet, N. T. (2002). Plant Biomass and Production and CO2 Exchange in an Ombrotrophic Bog. *Journal of Ecology*, *90*(1), 25-36. https://www.jstor.org/stable/3072316

Müller-Using, S., & Bartsch, N. (2009). Decay dynamic of coarse and fine woody debris of a beech (Fagus sylvatica L.) forest in Central Germany. *European Journal of Forest Research*, *128*(3), 287-296. https://link.springer.com/article/10.1007/s10342-009-0264-8

Müller, R. (2016). Anteil Dolomit an der Düngekalkgesamtmenge, Düngekalkhauptgemeinschaft. Persönliche Mitteilung. In.

Murphy, J. M., Booth, B. B. B., Collins, M., Harris, G. R., Sexton, D. M. H., & Webb, M. J. (2007). A methodology for probabilistic predictions of regional climate change from perturbed physics ensembles [Journal Article]. *Philos trans R Soc London a math. Phys Eng Sci*, *365*(1857). https://doi.org/https://doi.org/10.1098/rsta.2007.2077

NaSE-Workshop. (2004). NaSe Workshop 2004. In M. Hüllenkrämer (Ed.). Berlin: Umweltbundesamt.

Neubauer, M., & Demant, B. (2016). Wurzeln als Kohlenstoffspeicher: Untersuchungen zur unterirdischen Biomasse von Birke, Eiche und Kiefer. In. Germany, Europe: Universitätsdruckerei Freiburg, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Nielsen, M., Nielsen, O.-K., & Thomsen, M. (2010). *Emissions from decentralised CHP plants 2007 - Energinet.dk Environmental project no. 07/1882: Project report 5 - Emission factors and emission inventory for decentralised CHP production* [Bericht]. N. E. R. Institute. https://web.archive.org/web/20220120070417/http://www.dmu.dk/Pub/FR786.pdf

Normung, D. I. f. (2022). DIN ISO 5725-2:2022-05: Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen - Teil 2: Grundlegende Methode für die Ermittlung der Wiederhol- und Vergleichpräzision eines vereinheitlichten Messverfahrens (ISO 5725-2:2019). In.

Notter, B., Keller, M., Althaus, H.-J., Cox, B., Knörr, W., Heidt, C., Biemann, K., Räder, D., & Jamet, M. (2019). *Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs (HBEFA) 4.1*. I.-R. a. Consulting. https://cdn.prod.website-files.com/6207922a2acc01004530a67e/625e8c74c30e26e022b319c8_HBEFA41_Development_Report.pdf

Nowak, D. J., & Crane, D. E. (2002). Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA [Journal Article]. *Environmental Pollution*, *116*(3). https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00214-7

Nowak, D. J., Crane, D. E., Stevens, J. C., Hoehn, R. E., Walton, J. T., & Bond, J. (2008). A Ground-Based Method of Assessing Urban Forest Structure and Ecosystem Services [Journal Article]. *Arboriculture & Urban Forestry*, *34*(6). https://www.itreetools.org/documents/13/08%20UFORE.pdf

Nowak, D. J., Crane, D. E., Stevens, J. C., & Ibarra, M. (2002). *Brooklyn's Urban Forest* [Report]. U. F. SERVICE. https://www.fs.usda.gov/ne/newtown_square/publications/technical_reports/pdfs/2002/gtrne290.pdf

Nowak, D. J., Greenfield, E. J., Hoehn, R. E., & Lapoint, E. (2013). Carbon storage and sequestration by trees in urban and community areas of the United States [Journal Article]. *Environmental Pollution*, *178*, 229-236. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749113001383?via%3Dihub

Oestmann, J., Tiemeyer, B., Düvel, D., Grobe, A., & Dettmann, U. (2022). Greenhouse Gas Balance of Sphagnum Farming on Highly Decomposed Peat at Former Peat Extraction Sites. *Ecosystems*, *25*(2), 350-371. https://doi.org/10.1007/s10021-021-00659-z

Öko-Institut. (2006). *Datenaustausch zwischen Emissionshandel und Nationaler Klimaschutzberichterstattun - Abschlussbericht zum F+E-Vorhaben - FKZ 205 41 521* [Unveröffentlichtes Werk].

Oonk, H., & Lambert, C. (2017). *Greenhouse Gas Emissions from Biological Treatment of Waste - Overwiew of Existing Measurements* [Unpublished Work].

Ornellas, D. L. (1982). Calorimetric Determinations of the Heat and Products of Detonation for Explosives: October 1961 to April 1982. In U. o. C.-L. L. N. Laboratory (Ed.), *Technical Report* (pp. 87). Livermore.

Osowski, S., Neumann, J., & Fahlenkamp, H. (2004). Nutzung biogener Festbrennstoffe in Vergasungsanlagen. *Chemie Ingenieur Technik*, *76*(7), 1004-1012.

Papierindustrie. (2025). *Leistungsbericht Papier 2025, Tabelle N 16a* [Bericht]. D. P. e.V. https://www.papierindustrie.de/papierindustrie/statistik

Patterson, T., & Kelso, N. V. (2022). *Natural Earth - Free vector and raster map data at 1:10m, 1:50m, and 1:110m scales*. Retrieved 09.02.2026 from https://www.naturalearthdata.com/

Penman, J., Kruger, D., & Calbally, I. (Eds.). (2000). *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories : IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme*. Institute for Global Environmental Strategies.

Petrescu, A. M. R., McGrath, M. J., Andrew, R. M., Peylin, P., Peters, G. P., Ciais, P., Broquet, G., Tubiello, F. N., Gerbig, C., Pongratz, J., Janssens-Maenhout, G., Grassi, G., Nabuurs, G.-J., Regnier, P., Lauerwald, R., Kuhnert, M., Balkovič, J., Schelhaas, M.-J., Denier van der Gon, H. A. C.,…Dolman, A. J. (2021). The consolidated European synthesis of CO2 emissions and removals for the European Union and United Kingdom: 1990-2018 [Journal Article]. *Earth System Science Data*, *13*(5). https://doi.org/10.5194/essd-13-2363-2021

Pistorius, T., Zell, J., & Hartebrodt, C. (2007). *Untersuchungen zur Rolle des Waldes und der Forstwirtschaft im Kohlenstoffhaushalt des Landes Baden-Württemberg*.

Plinke, E., & Schonert, M. (2000). *Anwendung des IPCC-Referenzverfahrens zur Ermittlung der verbrennungsbedingten CO2-Emissionen in Deutschland* [Report/Review/Bericht].

Poeplau, C., Don, A., Flessa, H., Heidkamp, A., Jacobs, A., & Prietz, R. (2020). Erste Bodenzustandserhebung Landwirtschaft – Kerndatensatz. https://doi.org/10.3220/DATA20200203151139

Poeplau, C., Don, A., Vesterdal, L., Leifeld, J., Van Wesemael, B., Schumacher, J., & Gensior, A. (2011). Temporal dynamics of soil organic carbon after land-use change in the temperate zone -
carbon response functions as a model approach. *Global Change Biology*, *17*(7), 2415-2427. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02408.x

Polley, H. (2001). *Aufnahmeanweisung für die Bundeswaldinventur II: (2001-2002)* (2. korrigierte, überarbeitete Ausgabe ed.) [Buch]. BMVEL - Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft. https://bwi.info/Download/de/Methodik/Aufnahmeanweisung_BWI2.pdf

Pöpken, S. (2011). *Obstanbau, Weinanbau und Weihnachtsbaumkulturen in Deutschland: Zwischenbericht des Forschungsprojekts Methodenentwicklung zur Erfassung der Biomasse mehrjährig verholzter Pflanzen außerhalb von Waldflächen"* [Bericht]. J. H. v. Thünen-Institut & I. f. Weltforstwirtschaft.

Portner, J., Rossbauer, G., & Bauer, M. (2019). Nährstoffaufnahme des Hopfens. In.

Pouyat, R. V., Yesilonis, I. D., & Golubiewski, N. E. (2009). A comparison of soil organic carbon stocks between residential turf grass and native soil. *Urban Ecosystems*, *12*(1), 45-62. https://doi.org/10.1007/s11252-008-0059-6

Raciti, S. M., Hutyra, L. R., & Finzi, A. C. (2012). Depleted soil carbon and nitrogen pools beneath impervious surfaces. *Environmental Pollution*, *164*, 248-251.

Rentz, O., Karl, U., & Peter, H. (2002). *Ermittlung und Evaluierung von Emissionsfaktoren für Feuerungsanlagen in Deutschland für die Jahre 1995, 2000 und 2010* [Report/Review/Bericht].

Riedel, T., Stümer, W., Freibauer, A., Rüter, S., Dunger, K., Steuk, J., & Brötz, J.,, Hennnig, P., Dunger, K., & Bolte, A. (2019). *Wälder in Deutschland sind eine wichtige Kohlenstoffsenke* (AFZ-DerWald Issue.

Riedmüller, U., Mischke, U., Pottgiesser, T., Böhmer, J., Deneke, R., Ritterbusch, D., & Stelzer, D. (2013). Begleittext zu den Steckbriefen der deutschen Seetypen. In (pp. 25). Freiburg: LBH - Limnologie-Büro-Hoehm.

Riggers, C., Poeplau, C., Don, A., Bamminger, C., Höper, H., & Dechow, R. (2019). Multi-model ensemble improved the prediction of trends in soil organic carbon stocks in German croplands. *Geoderma*, *345*, 17-30. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.03.014

Rio, P. d. (2017). Coal Transition in Spain. 24. https://coaltransitions.files.wordpress.com/2016/09/coal_es_v04.pdf

Rock, J., Adam, S., Bender, S., Dunger, K., Rüter, S., & Stümer, W. (2025). *Effects of the 2018 – 2020 disturbances on the projected Carbon balance of German forests and LULUCF climate protection targets* [Working papier](Thünen Working Paper, Issue 268). T.-I. f. Waldökosysteme. https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn069665.pdf

Rock, J., Dunger, K., Rüter, S., & Stümer, W. (2021). *National Forestry Accounting Plan for Germany – annotated and revised edition.* (Thünen Working Paper Issue. https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn064291.pdf

Röhling, S., Dunger, K., Kändler, G., Klatt, S., Riedel, T., Stümer, W., & Brötz, J. (2016). Comparison of calculation methods for estimating annual carbon stock change in German forests under forest management in the German greenhouse gas inventory [Journal Article]. *Carbon balance and management*, *11*(1), 12. https://cbmjournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13021-016-0053-x

Röhling, S., & Kludt, R. (2010). *Ableitung der Kalksteinbilanz aus den statistischen Daten der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe für Zwecke der Emissionsberichterstattung nach Klimarahmenkonvention und Kyoto Protokoll (Kategorie CRF 2.A.3)* [Mitarbeiter-Veröffentlichung]. http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/4033.pdf

http://ubanet/Gruppen/bibliothek/Onlinebuecher/EB006594.pdf

Rösemann, C., Haenel, H.-D., Dämmgen, U., Freibauer, A., Wulf, S., Eurich-Menden, B., Döhler, H., Schreiner, C., & Osterburg, B. (2015). *Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990-2013*. Thünen Report.

Roskosch, A., Heidecke, P., Bannick, C.-G., Brandt, S., Bernicke, M., Dienemann, C., Gast, M., Hofmeier, M., Kabbe, C., Schwirn, K., Vogel, I., Völker, D., & Wiechmann, B. (2018). *Klärschlammentsorgung in der Bundesrepublik Deutschland* (U. (UBA), Ed.) [Bericht]. Umweltbundesamt (UBA). https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/klaerschlammentsorgung-in-der-bundesrepublik

Roßkopf, N., Fell, H., & Zeitz, J. (2015). Organic soils in Germany, their distribution and carbon stocks [Article]. *Catena*, *133*, 157-170. https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.05.004

Roth, U., Döhler, H., Hartmann, S., & Wulf, S. (2011). Treibhausgasbilanzen und CO2eq-Vermeidungskosten landwirtschaftlicher Biogasanlagen. *Biogas in der Landwirtschaft—Stand und Perspektiven. KTBL-Schrift*, *488*, 196-208.

Rothe, B. (2017). Keramik: ETS-Emissionsdaten. In.

Röthlisberger, R., Bass, A.-A., Schenker, S., Stettler, C., Bretscher, D., Schellenberger, A., Rihm, B., Rogiers, N., Leuenberger, D., Schilt, A., Guillevic, M., & Bock, M. (2025). *Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 1990–2023: National Inventory Document* [Report](CHE-2025-NID). F. O. f. t. E. FOEN. https://unfccc.int/sites/default/files/resource/NID-CHE-2024.pdf

Ruppert, J., Scheuer, W., & Schäfer, S. (2009). *Bereitstellung einer qualitätsgesicherten Datengrundlage für die Emissionsberichterstattung zur Umsetzung von internationalen Luftreinhalte- und Klimaschutzvereinbarungen für ausgewählte Industriebranchen: Teilvorhaben 03 Zementindustrie (FKZ 370742301/03)* (FKZ 370742301/03).

Rüter, S. (2011). *Projections of Net-Emissions From Harvested Wood Products in European Countries*. T.-I. o. W. Research. http://literatur.vti.bund.de/digbib_extern/dn048901.pdf

Rüter, S. (2017). *Der Beitrag der stofflichen Nutzung von Holz zum Klimaschutz – Das Modell WoodCarbonMonitor.* Technische Universität München]. https://mediatum.ub.tum.de/doc/1295127/1295127.pdf

Rüter, S., & Stümer, W. (2024). *Harvest data as interface between the forest and HWP*. https://forest.jrc.ec.europa.eu/media/filer_public/4c/53/4c535715-67ff-43b3-bf60-16366b88a840/45_sebastian_ruter_de.pdf

RVO. (2025). *Overzicht export dierlijke mest per jaar* (https://www.rvo.nl/sites/default/files/2025-07/Overzicht%20export%20mesttransporten%20Q1%202025.pdf

Sakhaee, A., Gebauer, A., Ließ, M., & Don, A. (2022). Spatial prediction of organic carbon in German agricultural topsoil using machine learning algorithms. *SOIL*, *8*(2), 587-604. https://doi.org/10.5194/soil-8-587-2022

Santana, E. J., Rodrigues dos Santos, F., Mastelini, S. M., Melquiades, F. L., & Barbon Jr, S. (2021). Improved prediction of soil properties with multi-target stacked generalisation on EDXRF spectra [Journal Article]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, *209*, 104231. https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2020.104231

Šavrič, B., Patterson, T., & Jenny, B. (2019). The Equal Earth map projection [Journal Article]. *International Journal of Geographical Information Science*, *33*(3). https://doi.org/10.1080/13658816.2018.1504949

Schäfer, S., Ruppert, J., Furth, G., & Kludt, R. (2022). *Überarbeitung der Emissionsfaktoren für Luftschadstoffe in den Branchen Zementklinkerproduktion und Glasherstellung : Teilbericht - Zementklinkerproduktion* (Abschlussdatum: Oktober 2021 ed.) [Forschungsbericht]. Deutschland. Umweltbundesamt. http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/ueberarbeitung-der-emissionsfaktoren-fuer-0

http://webde/gruppen/bibliothek/OnlineReports/FB000678.pdf

Scherstjanoi, M., & Dechow, R. (2024). sorcering: Soil ORganic Carbon & CN Ratio drIven Nitrogen modellinG framework. https://doi.org/10.32614/CRAN.package.sorcering

Scherstjanoi, M., & Dechow, R. (2025, 13.10.2025). *Sorcering: Soil Organic Carbon and CN Ratio Driven Nitrogen Modelling Framework*. Retrieved 21.11.2025 from https://cran.r-project.org/web/packages/sorcering/index.html

Scherstjanoi, M., Grüneberg, E., Ziche, D., Dechow, R., Stümer, W., Bienert, O., Liski, J., & Wellbrock, N. (in prep.). *Modelling Climate Change-Induced Dynamics of Soil Organic Carbon for German Forests*.

Schmiedel, H.-P. (2003). *Zusammensetzung von Ottokraftstoffen aus deutschen Raffinerien : Winterware 2001/2002* [Forschungsbericht](DGMK-Forschungsbericht, Issue 502-1). E. u. K. e. V. D. Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl.

Schmutz, B. (2009). Interessengemeinschaft für Esel und Maultiere, persönliche Mitteilung. In. IGEM.

Schön, M., Walz, R., Angerer, G., Bätcher, K., Böhm, E., Hillenbrand, T., Hiessl, H., Reichert, J., Paoli, M., & Sartorius, R. (1993). *Emissionen der Treibhausgase Distickstoffoxid und Methan in Deutschland : Emissionsbilanz, Identifikation von Forschungs- und Handlungsbedarf sowie Erarbeitung von Handlungsempfehlungen ; Phase 1* [Emissions of the Greenhouse Gases Nitrous Oxide and Methane in Germany]. E. Schmidt.

Schöning, I., Totsche, K. U., & Kögel-Knabner, I. (2006). Small scale spatial variability of organic carbon stocks in litter and solum of a forested Luvisol. *Geoderma*, *136*(3), 631-642.

Schoof, J., Fuß, R., Wulf, S., & Pacholski, A. (2025). Regionalized ammonia emission abatement by urease inhibitor treatment of urea for agro-environmental conditions of Western central Europe [Journal Article]. *Geoderma*, *457*. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2025.117285

Schrumpf, M., Schulze, E. D., Kaiser, K., & Schumacher, J. (2011). How accurately can soil organic carbon stocks and stock changes be quantified by soil inventories? [Journal Article]. *Biogeosciences*, *8*(5), 1193-1212. https://research.ebsco.com/c/ukvo6o/viewer/pdf/f6usoxdzsb

Schuhmann, K.-U. (2018). Technische Regel für Gasinstallationen – Die DVGW-TRGI 2018 [Zeitschriftenaufsatz]. *Energie- und Wasser-Praxis*, *2018*(9), 6. https://www.dvgw.de/medien/dvgw/gas/installation/trgi2018-1809schuhman.pdf

Schulz, S. (2012). *Einflüsse auf die Bauzeit im Hochbau: Ursachen und Folgen der Einflussfaktoren vor und während der*

Bauausführung von Neubauten. Brandenburgische Technische Universität Cottbus]. https://www.yumpu.com/de/document/view/32059575/masterarbeit-bki

Schwarz, W. (2007). *Daten von H-FKW, FKW und SF6 für die nationale Emissionsberichterstattung gemäß Klimarahmenkonvention für die Berichtsjahre 2004 und 2005 - F-Gas-Emissionen 2004/2005 und Unsicherheitsbestimmung im ZSE* [Schlussbericht zum Forschungsvorhaben FKZ 205 41 217/01, Teilvorhaben 1: Fluorierte Treibhausgase](Gutachten im Auftrag des Umweltbundesamtes, Issue. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/daten-von-h-fkw-fkw-sf6-fuer-nationale?anfrage=Kennummer&Suchwort=3439

Schwarz, W. (2009). *SF6 und NF3 in der deutschen Photovoltaik-Industrie - Inventarverbesserung 2008 – Verbesserung und Ergänzung der Daten für die nationale Emissionsberichterstattung gemäß Klimarahmenkonvention in der Quellgruppe Photovoltaik (2.F.8.h)* [Endbericht](FuE-Vorhaben FKZ 360 16 027). (Gutachten im Auftrag des Umweltbundesamtes, Issue.

Schwarz, W., & Harnisch, J. (2003). *Establishing the leakage rates of mobile air conditioners* [Bericht]. https://climate.ec.europa.eu/system/files/2016-11/leakage_rates_final_report_en.pdf

Schwarz, W., Kimmel, T., Gschrey, B., Leisewitz, A., & Sauer, J. (2012). *Modelle für die Inventarerhebung von F-Gasen* [Endbericht].

Schwarz, W., & Leisewitz, A. (1996). *Aktuelle und künftige Emissionen treibhauswirksamer fluorierter Verbindungen in Deutschland* [Forschungsbericht 106 01 074/01](Gutachten im Auftrag des Umweltbundesamtes, Issue. U.-. Umweltbundesamt.

Schwieder, M., Tetteh, G. O., Blickensdörfer, L., Gocht, A., & Erasmi, S. (2024). *Agricultural land use (raster) : National-scale crop type maps for Germany from combined time series of Sentinel-1, Sentinel-2 and Landsat data (2017 to 2021)* (Version (Version v202)). https://doi.org/doi.org/10.5281/zenodo.10640528

Schwitzgebel, F., Dunger, K., & Polley, H. (2009). Die Inventurstudie 2008. Ergebnisse einer Kohlenstoffinventur auf Bundeswaldinventur-Basis. Hintergrund, Methodik und Durchführung der Studie. *AFZ Waldwirtsch Umweltvorsorge*, *64*, 1070-1071.

Seegers, A., Houweling, S., & Tokaya, J. (2020). *Copernicus Atmosphere Monitoring Service: Description of the CH4 Inversion Production Chain* [Bericht]. E. CAMS. https://atmosphere.copernicus.eu/sites/default/files/2020-01/CAMS73_2018SC1_D73.5.2.2-2019_202001_production_chain_v1.pdf

Seitel, C., & Oberle, M. (2022). Erfassung der Teichflächen in Bayern [Zeitschriftenaufsatz]. *Fachzeitschrift für die Binnenfischerei Fischer und Teichwirt*, *73*(Heft 2), 2.

Shahhosseini, M., Hu, G., & Pham, H. (2022). Optimizing ensemble weights and hyperparameters of machine learning models for regression problems [Journal Article]. *Machine Learning with Applications*, *7*, 10. https://doi.org/10.1016/j.mlwa.2022.100251

Siegl, W., Wallington, T. J., Guenther, M. T., Henney, T., Pawlak, D., & Duffy, M. (2002). R-134a Emissions from Vehicles. *Environ. Sci. & Technol.*, *36*, 561-566. https://doi.org/10.1021/es011108x

SKM Enviros. (2010). *Eco-Efficiency Study of Supermarket Refrigeration - For the European Partnership for Energy and Environment (EPEE)* [Finalreport 3.1].

Skrebele, A., Treija, S., Lupkina, L., Cakars, I., Siņics, L., Lazdāne-Mihalko, J., Puļķe, A., Štelce, V., Klāvs, G., Gračkova, L., Bārdule, A., Butlers, A., Līcīte, I., Lazdiņš, A., Bērziņa, L., Gancone, A., & Dansone, B. (2023). *Latvia`s National Inventory Report: Greenhouse Gas Emissions in Latvia from 1990 to 2021 in Common Reporting Format (CRF)*. https://unfccc.int/documents/627724

Sobotik, M., Graf, T., Himmelbauer, M., Bodner, G., Bohner, A., & Loiskandl, W. (2018). In-situ Beschreibung des Wurzelsystems von Hopfen und Mais über Freilegung am Bodenprofil. . *Die Bodenkultur -Journal of Land Management, Food and Environment*, *69*(2), 121-130.

Spiekers, H. (2019). Experteninformation zu Nährstoffgehalten im Rinderfutter, persönliche Mittteilung. In.

Spielmanns, R. (2020). Tierzahlen Rinder, persönliche Mitteilung. In.

Spörl, R. (2009). *Revision des BVT-Merkblattes für die Papier- und Zellstoffherstellung: Vergleichbarkeit von Berichtsdaten : Teilbericht 2 / bearb.: Rainer Spörl* [Book]. Heidenau [u.a.] 2009.

Spyromitros-Xioufis, E., Tsoumakas, G., Groves, W., & Vlahavas, I. (2016). Multi-target regression via input space expansion: treating targets as inputs [Journal Article]. *Machine Learning*, *104*(1), 55-98. https://doi.org/10.1007/s10994-016-5546-z

Statistisches Bundesamt. *GENESIS Online : Die Datenbank des Statistischen Bundesamtes* [Online-Datenbank]. https://www-genesis.destatis.de/genesis/online

Statistisches Bundesamt. (2-Jährig). *Statistischer Bericht Abfallentsorgung EVAS-Nummer 32111* [Bericht]. S. Bundesamt. https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/_inhalt.html#sprg238672

Statistisches Bundesamt. (1992). *Statistisches Jahrbuch 1992 für die Bundesrepublik Deutschland* [Book](3824602385). (Statistisches Jahrbuch für die Bundesrepublik Deutschland: 1992, Issue. http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat04356a&AN=fuu.02025892&lang=de&site=eds-live

Statistisches Bundesamt. (1994). *Fachserie 19, Reihe 1.1: Umwelt, Öffentliche Abfallbeseitigung - 1990* (https://www.statistischebibliothek.de/mir/servlets/MCRFileNodeServlet/DEHeft_derivate_00064085/FS-19-1-1-1990.pdf

Statistisches Bundesamt. (2002). *Fachserie 19, Reihe 1: Umwelt Abfallentsorgung - 1996-1998* ([Datenbank].

Statistisches Bundesamt. (2003). *Klassifikation der Wirtschaftszweige*. Statistisches Bundesamt. Retrieved 15.12.2025 from https://www.destatis.de/DE/Methoden/Klassifikationen/Gueter-Wirtschaftsklassifikationen/klassifikation-wz-2003.html

Statistisches Bundesamt. (2005). *Fachserie 19, Reihe 1: Umwelt Abfallentsorgung - 2003* (

Statistisches Bundesamt. (2008). *Klassifikation der Wirtschaftszweige*. Statistisches Bundesamt. Retrieved 15.12.2025 from https://www.destatis.de/DE/Methoden/Klassifikationen/Gueter-Wirtschaftsklassifikationen/klassifikation-wz-2008.html

Statistisches Bundesamt. (2017). Persönliche Mitteilung von Herrn Kaiser; E 207: Deutschland - Erhebung über Gewinnung, Verwendung und Abgabe von Klärgas. In.

Statistisches Bundesamt. (2019). *Abfallentsorgung (ehemals Fachserie 19, Reihe 1: Umwelt, Abfallentsorgung)* (https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/_inhalt.html#sprg238672

Statistisches Bundesamt. (2020). *Ausgewählte Zahlen für die Bauwirtschaft* GENESIS-Online Datenbank. https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Bauen/Tabellen/baufertigstellungen.html

Statistisches Bundesamt. (2022a). Aquakulturbetriebe, Anlagengröße: Deutschland, Jahre, Anlagenarten. In. Wiesbaden.

Statistisches Bundesamt. (2022b). *Statistischer Bericht - Abfallentsorgung 2020* (https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Publikationen/Downloads-Abfallwirtschaft/statistischer-bericht-abfallentsorgung-2190100207005.xlsx

Statistisches Bundesamt. (2023). *Abfallentsorgung (ehemals Fachserie 19, Reihe 1: Umwelt, Abfallentsorgung)* ([Datenbank]. https://www-genesis.destatis.de/datenbank/online/statistic/32111*/details

Statistisches Bundesamt. (2024a). *Erhebung der öffentlichen Abwasserentsorgung - 2022* (Statistisches Bundesamt. https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Wasserwirtschaft/Publikationen/Downloads-Wasserwirtschaft/statistischer-bericht-wasserwirtschaft-abwasserentsorgung-oeffentlich-2190213229005.html

Statistisches Bundesamt. (2024b). *Erhebung über die Wassereigenversorgung und Abwassereigenentsorgung privater Haushalte - 2022* (https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Wasserwirtschaft/Publikationen/Downloads-Wasserwirtschaft/statistischer-bericht-wasserwirtschaft-abwasserentsorgung-oeffentlich-2190213229005.html

Statistisches Bundesamt. (2025a). *Erhebung über die Energieverwendung der Betriebe des Verarb. Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden (060)* [Unveröffentlichtes Werk].

Statistisches Bundesamt. (2025b). *Jahreserhebung über die Stromerzeugungsanlagen der Betriebe im Verarbeitenden Gewerbe sowie im Bergbau und in der Gewinnung von Steinen und Erden (067)* (Tabelle 3, 4, 5)[Unveröffentlichtes Werk]. Statistisches Bundesamt.

Statistisches Bundesamt. (2025c). *Produktionswert, -menge, -gewicht und Unternehmen der Vierteljährlichen Produktionserhebung: Deutschland, Jahre, Güterverzeichnis (9-Steller), bereit gestellt im Rahmen einer vereinbarten jährlichen Aktualisierung und Fortschreibung* (

Statistisches Bundesamt. (2025d). *Statistik der Sterbefälle: Gestorbene (Anzahl)* (https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Geburten/Tabellen/lebendgeborene-gestorbene.html

Statistisches Bundesamt. (ab 2012). Persönliche Mitteilung von DESTATIS-Mitarbeitern aus FG E 207: Deutschland - Erhebung über Gewinnung, Verwendung und Abgabe von Klärgas; jährlich. In.

Statistisches Bundesamt. (ab 2013). WasserwirtschaftWasser-wirtschaft: Klärschlamm-entsorgung aus der öffentlichen Abwasser-behandlung. In.

Statistisches Bundesamt. (fortlaufend). *Methoden: Energie - Branchen und Unternehmen* [Internetseite]. https://www.destatis.de/DE/Methoden/Qualitaet/Qualitaetsberichte/Energie/einfuehrung.html

Statistisches Bundesamt. (FS 3, R 3). *Land- und Forstwirtschaft, Fischerei, Landwirtschaftliche Bodennutzung und pflanzliche Erzeugung (div. Jgg.)* ([Datenbank]. https://www.destatis.de/DE/Service/Bibliothek/_publikationen-fachserienliste-3.html

Statistisches Bundesamt. (FS 3, R 3.1.2). *Land- und Forstwirtschaft, Fischerei,– Bodennutzung der Betriebe (Landwirtschaftlich genutzte Flächen) (div. Jgg.)* https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/LandForstwirtschaft/Bodennutzung/LandwirtschaftlicheNutzflaeche.html

Statistisches Bundesamt. (FS 3, R 3.1.4). *Land- und Forstwirtschaft, Fischerei,– Landwirtschaftliche Bodennutzung - Baumobstflächen* (https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/LandForstwirtschaft/ObstGemueseGartenbau/Baumobstflaechen.html

Statistisches Bundesamt. (FS 3, R 3.1.7). *Land- und Forstwirtschaft, Fischerei, Landwirtschaftliche Bodennutzung - Baumschulerhebung (div. Jgg.)* (https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Obst-Gemuese-Gartenbau/Publikationen/Downloads-Gartenbau/baumschulerhebung-2030317219004.html

Statistisches Bundesamt. (FS 3, R 3.2.1). *Land- und Forstwirtschaft, Fischerei, Wachstum und Ernte – Feldfrüchte (div. Jgg.)* https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/LandForstwirtschaft/Bodennutzung/LandwirtschaftlicheNutzflaeche.html

Statistisches Bundesamt. (FS 3, R 3.3.1). *Land- und Forstwirtschaft, Forstwirtschaftliche Bodennutzung - Holzeinschlagsstatistik* ([Datenbank]. https://www.destatis.de/DE/Service/Bibliothek/_publikationen-fachserienliste-3.html

Statistisches Bundesamt. (FS 3, R 4). *Land- & Forstwirtschaft, Fischerei Viehbestand und tierische Erzeugung (div. Jgg.)* (https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Tiere-Tierische-Erzeugung/Publikationen/Downloads-Tiere-und-tierische-Erzeugung/viehbestand-tierische-erzeugung-2030400177005.html

Statistisches Bundesamt. (FS 3, R 4.1). *Land- und Forstwirtschaft, Fischerei, Viehbestand* ([Datenbank]. https://www.destatis.de/DE/Service/Bibliothek/_publikationen-fachserienliste-3.html

Statistisches Bundesamt. (FS 4, R 3.1). *Produktion des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden (div. Jgg.)* https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/IndustrieVerarbeitendesGewerbe/Konjunkturdaten/ProduktionJ.html

Statistisches Bundesamt. (FS 4, R 8.1). *Produzierends Gewerbe - Eisen und Stahl (div. Jgg. bis 2009)* https://www.destatis.de/DE/Startseite.html

Statistisches Bundesamt. (FS 4, R 8.2). *Verarbeitendes Gewerbe (Düngemittel / Rohholz) - Düngemittelversorgung* ([Datenbank]. https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Industrie-Verarbeitendes-Gewerbe/_inhalt.html#_sndpeo3vm

Statistisches Bundesamt. (jährlich). Wasser-wirtschaft: Klärschlamm-entsorgung aus der öffentlichen Abwasser-behandlung. In (Stand: 2021 ed.).

Statistisches Bundesamt. (jährlich - FS 4, R. 3.1). *Fachserie. 4, Produzierendes Gewerbe. 3, Produktion im Produzierenden Gewerbe. 1, Produktion des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden.* ([Datenbank]. https://www.statistischebibliothek.de/mir/receive/DESerie_mods_00000058

Statistisches Bundesamt. (jährlich - FS 19, R. 1). *Fachserie 19, Reihe 1: Umwelt, Abfallentsorgung* ([Datenbank]. https://www.statistischebibliothek.de/mir/receive/DESerie_mods_00000202

Statistisches Bundesamt. (o.J.). Außenhandelsstatistik: Zeitreihen aus 51000BJ180. In. Wiesbaden.

StBA. (2010). *Landwirtschaftszählung 2010: Agrarstrukturen in Deutschland – Regionale Ergebnisse der Landwirtschaftszählung 2010*. Statistische Ämter des Bundes und der Länder (StBA). https://www.statistikportal.de/de/veroeffentlichungen/landwirtschaftszaehlung-2010

Stegmann, R. (2012). *Fachgutachten: „Methanemissionen aus der Ablagerung von mechanischbiologisch behandelten Abfällen“*.

Stegmann, R., Heyer, K.-U., Hupe, K., Rettenberger, G., & Schneider, R. (2023). *Überprüfung der methodischen Grundlagen zur Bestimmung der Methanbildung in Deponien* [Forschungsberict](3714343170). (Texte, Issue. I.-I. f. Abfallwirtschaft. https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/ueberpruefung-der-methodischen-grundlagen-zur

Stehfest, E., & Bouwman, L. (2006). N2O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation: summarizing available measurement data and modeling of global annual emissions. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, *74*(3), 207-228.

StMELF. (diverse Jahrgänge). *Herkunftssicherungs- und Informationssystem für Tiere* http://www.hi-tier.de

Stocker, T. F., Qin, D., & Plattner, G.-K. (Eds.). (2014). *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis : Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

Stolzenburg, K. (2006). Versuchsergebnisse, Weiden, Pappeln und Miscanthus der LAP Forchheim. In (pp. 63-80). Forchheim: Landesanstalt für Pflanzenbau.

Strauß, K. (1998). *Kraftwerkstechnik : zur Nutzung fossiler, nuklearer und regenerativer Energiequellen* (4. Aufl. ed.). Springer.

Struschka, M., Kilgus, D., Springmann, M., & Behnke, A. (2008). *Effiziente Bereitstellung aktueller Emissionsdaten für die Luftreinhaltung* [Forschungsbericht]. http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3677.pdf
http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-k/k3677.pdf
http://ubanet/Gruppen/bibliothek/Onlinebuecher/UM100185-08-44.pdf

Synowietz, C. (1974). *Chemikerkalender* (H. U. Vogel, Ed. 2. Auflage ed.) [Monographie]. Springer-Verlag. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-662-06237-1

TA Luft - Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft vom 27. Februar 1986 - Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz, Gemeinsames Ministerialblatt S. 95, ber. S. 202, S. 95-202 (1986).

TA Luft - Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft vom 24. Juli 2002 - Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz, S. 511-605 (2002).

Tao, F., Rötter, R. P., Palosuo, T., Díaz-Ambrona, C. G. H., Mínguez, M. I., Semenov, M. A., Kersebaum, K. C., Nendel, C., Specka, X., Hoffmann, H., Ewert, F., Dambreville, A., Martre, P., Rodríguez, L., Ruiz-Ramos, M., Gaiser, T., Höhn, J. G., Salo, T., Ferrise, R.,…Schulman , A. H. (2018). Contribution of crop model structure, parameters and climate projections to uncertainty in climate change impact assessments [Journal Article]. *Global Change Biology*, *24*(3). https://doi.org/https://doi.org/10.1111/gcb.14019

Tebert, C., Volz, S., & Töfge, K. (2016). *Ermittlung und Aktualisierung von Emissionsfaktoren für das nationale Emissionsinventar bezüglich kleiner und mittlerer Feuerungsanlagen der Haushalte und Kleinverbraucher* [Bericht].

Tetteh, G., Schwieder, M., Pham, V. D., Blickensdörfer, L., Gocht, A., Neuenfeldt, S., van der Linden, S., & Erasmi, S. (2024). *Agrarflächennutzung aus dem All kartiert: Daten zur Quantifizierung von Klimaschutzmaßnahmen* [Konferenz]. Agrarforschung zum Klimawandel : Konferenz der Deutschen Agrarforschungsallianz, 11.-14.03.2024, Potsdam, unter der Schirmherrschaft des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft ; Programm und Beiträge, Stand: 7. Mai 2024, Potsdam. https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn068079.pdf

The R Core Team. (2025). *R: A language and environment for statistical computing*. https://www.R-project.org/

Theloke, J., Kampffmeyer, T., Kugler, U., Friedrich, R., Wolf, L., Springwald, T., & Voß, A. (2013). *Ermittlung von Emissionsfaktoren und Aktivitätsraten im Bereich IPCC (1996) 1.B.2.a. i-vi - Diffuse Emissionen aus Mineralöl und Mineralölprodukten - Abschlussbericht* - [Abschlussbericht](360 16 033). I. f. E. u. R. Energieanwendung.

Theloke, J., Wagner, S., & Jepsen, D. (2008). *Emissionen aus der Nahrungsmittelindustrie / von Jochen Theloke* [Book]. Stuttgart [u.a.].

Thünen-Institut (TI). (2016). *Ausführungsbestimmung zur Erstellung von Emissions- und Kohlenstoffinventaren und deren Qualitätsmanagement für den Bereich der Quellgruppen Landwirtschaft und LULUCF. Anlage zum Konzept Emissions- und Kohlenstoffinventare im nachgeordneten Bereich des BMEL vom 14.09.2016. Version 2.01, Stand vom 14.09.2016* [Unveröffentlichtes Werk]. Johann Heinrich von Thünen-Institut (TI)

Tiemeyer, B., Freibauer, A., Borraz, E. A., Augustin, J., Bechtold, M., Beetz, S., Beyer, C., Ebli, M., Eickenscheidt, T., Fiedler, S., Förster, C., Gensior, A., Giebels, M., Glatzel, S., Heinichen, J., Hoffmann, M., Höper, H., Jurasinski, G., Laggner, A.,…Drösler, M. (2020). A new methodology for organic soils in national greenhouse gas inventories: Data synthesis, derivation and application [Journal Article]. *Ecological Indicators*, *109*, 14. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105838

Tietge, U., Dornoff, J., Diaz, S., & Jahn, H. (2020). *Erarbeitung einer Methode zur Ermittlung und Modellierung der CO2-Emissionen des Kfz-Verkehrs : Abschlussbericht* (Abschlussdatum: Februar 2019 ed.) [Forschungsbericht]. Deutschland. Umweltbundesamt. http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/erarbeitung-einer-methode-zur-ermittlung
http://webde/gruppen/bibliothek/OnlineReports/FB000242.pdf

Tuomi, M., Thum, T., Järvinen, H., Fronzek, S., Berg, B., Harmon, M., Trofymow, J. A. T., Sevanto, S. A., & Liski, J. (2009). Leaf litter decomposition—Estimates of global variability based on Yasso07 model. *Ecological Modelling*, *220*(23), 19. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2009.05.016

UBA. (2007). *Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen 2007 : Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990-2005* [NIR-Bericht](Climate Change, Issue 04/2007). Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/nationaler-inventarbericht-deutschen-0

UBA. (2009). *National Inventory Report for the German Greenhouse Gas Inventory 1990 - 2007: Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change 2009* [NIR-Report](Climate Change Issue. Umweltbundesamt. http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3755.pdf
http://ubanet/Gruppen/bibliothek/Onlinebuecher/KL500576-09-03.pdf

UBA, Adam, S., Ahrem, L., Bernicke, M., Bertram, A., Bolland, T., Böttcher, C., Brand, K., Can, Ö., Dreher, M., Drohsin, D., Elsner, C., Fiedler, T., Gohlisch, G., Gromke, U., Grübel, J., Günther, D., Hausmann, K., Hermann, T.,…Zheng, J. (2025). *Submission under the United Nations Framework Convention 2025: national inventory report for the German greenhouse gas inventory 1990 - 2023* [NID-Report](Climate Change, Issue 40/2025). Umweltbundesamt.

UBA, Günther, D., & Gniffke, P. (2021). *Submission under the United Nations Framework convention on Climate Change and the Kyoto Protocol 2021: National Inventory Report for the German Greenhouse Gas Inventory 1990 - 2019* [NIR-Report](Climate Change, Issue 2021/44). Umweltbundesamt.

UBA, Günther, D., Gniffke, P., Böttcher, C., Icha, P., Langenfeld, J., Hausmann, K., Kotzulla, M., Bernicke, M., Kludt, R., Reichel, J., Koska, A., Bolland, T., Leuthold, S., Pannier, K., Juhrich, K., Wetzel, F., Gores, S., Koppe, K.,…Laggner, B. (2022). *Submission under the United Nations Framework Convention on climate change and the Kyoto Protocol 2022: national inventory report for the German Greenhouse Gas Inventory 1990 - 2020* [NIR-Report](Climate Change, Issue 25/2022). Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/berichterstattung-unter-der-klimarahmenkonvention-7

UBA, Günther, D., Voigt, T., Schiller, S., Kludt, R., Kuntze, D., Hausmann, K., Icha, P., Langenfeld, J., Dreher, M., Juhrich, K., Kotzulla, M., Wetzel, F., Koppe, K., Plickert, S., Reichart, A., Gohlisch, G., Liesegang, C., Drosihn, D.,…Elsner, C. (2023). *Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol 2023: National Inventory Report for the German Greenhouse Gas Inventory 1990 - 2021* [NIR-Report](Climate Change, Issue 2023/29). U. (UBA). https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/submission-under-the-united-nations-framework-8

UBA, Strogies, M., & Gniffke, P. (2010). *Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol 2010: National Inventory Report for the German Greenhouse Gas Inventory 1990 - 2008* [NIR-Report](Climate Change, Issue 04/2010). Umweltbundesamt.

UBA, Strogies, M., & Gniffke, P. (2011). *Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol 2011: National Inventory Report for the German Greenhouse Gas Inventory 1990 - 2009* [NIR-Report](Climate Change, Issue 12/2011). Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/submission-under-united-nations-framework-0

UBA, Strogies, M., & Gniffke, P. (2012). *Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol 2012: National Inventory Report for the German Greenhouse Gas Inventory 1990 - 2010* [NIR-Report](Climate Change, Issue 09/2012). Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/submission-under-united-nations-framework-1

UBA, Strogies, M., & Gniffke, P. (2013). *Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol 2013: National Inventory Report for the German Greenhouse Gas Inventory 1990 - 2011* [NIR-Report](Climate Change, Issue 08/2013). Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/berichterstattung-unter-klimarahmenkonvention-2

UBA, Strogies, M., & Gniffke, P. (2015). *Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change 2015: National Inventory Report for the German greenhouse gas inventory 1990 - 2013* [NIR-Report](Climate Change, Issue 03/2016). Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/submission-under-the-united-nations-framework-0

UBA, Strogies, M., & Gniffke, P. (2020). *Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol 2020: National Inventory Report for the German Greenhouse Gas Inventory 1990 - 2018 : German Environment Agency - UNFCCC-Submission* [NIR-Report](Climate Change Issue 23/2020). Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/submission-under-the-united-nations-framework-5

UBA, Strogies, M., Schiller, S., Gniffke, P., & Dreher, M. (2005). *German Greenhouse Gas Inventory 1990-2003 : National Inventory Report 2005 - Submission under the United Framework Convention on Climate Change* [NIR-Report]. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/german-greenhouse-gas-inventory-1990-2003

UMEG. (2004). Emissionsfaktoren-Handbuch Emissionserklärung 2004 Baden-Württemberg. *Zentrum für Umweltmessung, Umwelterhebungen und Gerätesicherheit Baden-Württemberg (UMEG)*, *4-02/2004*.

United Nations Economic Commission for Europe: Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (CLRTAP), (1979).

Report of the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Kyoto Protocol on its first session, held at Montreal from 28 November to 10 December 2005, § 39 (2006).

UNFCCC. (2010a). *National Reports - GHG Inventories (Annex I) - Inventory Review Reports* [Report]. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/inventory_review_reports/items/4715.php

UNFCCC. (2010b). *Span's national inventory report: Inventario de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero de España e Información Adicional. Años 1990-2008: Comunicación a la Secretaría del Convenio Marco sobre Cambio Climático y Protocolo de Kioto* [Bericht]. y. M. R. y. M. Ministerio de Medio Ambiente. https://unfccc.int/process/transparency-and-reporting/reporting-and-review-under-the-convention/greenhouse-gas-inventories/submissions-of-annual-greenhouse-gas-inventories-for-2017/submissions-of-annual-ghg-inventories-2010

UNFCCC. (2011a). *Poland's national inventory report* [Bericht]. https://unfccc.int/process/transparency-and-reporting/reporting-and-review-under-the-convention/greenhouse-gas-inventories/submissions-of-annual-greenhouse-gas-inventories-for-2017/submissions-of-annual-ghg-inventories-2011

UNFCCC. (2011b). *Report of the technical assessment of the forest management reference level submission of Germany submitted in 2011* [Report]. U. N. F. C. o. C. C. (UNFCCC). https://unfccc.int/documents/6826

UNFCCC. (2013). *Methodological issues under the Convention: Revision of the UNFCCC reporting guidelines on annual inventories for Parties included in Annex I to the Convention* [Report]. U. N. F. C. o. C. C. (UNFCCC). http://www.unfccc.int/resource/docs/2013/sbsta/eng/l29a01.pdf

UNFCCC. (2014, 11 to 23 November 2013). *Revision of the UNFCCC reporting guidelines on annual inventories for Parties included in Annex I to the Convention, Decision 24/CP.19, Annex I, Guidelines for the preparation of national communications by Parties included in Annex I to the Convention* [Session and meeting reports]. Report of the Conference of the Parties on its nineteenth session, held in Warsaw from 11 to 23 November 2013. Addendum. Part two: Action taken by the Conference of the Parties at its nineteenth session., Warsaw. http://unfccc.int/resource/docs/2013/cop19/eng/10a03.pdf#page=2

UNFCCC. (2020). *National Inventory Submissions 2020* [Reports]. U. N. F. C. o. C. C. (UNFCCC). https://unfccc.int/ghg-inventories-annex-i-parties/2020

UNFCCC. (2021). *National Inventory Submissions 2021* [Reports]. U. N. F. C. o. C. C. (UNFCCC). https://unfccc.int/ghg-inventories-annex-i-parties/2021

UNFCCC. (2023a). *GHG Review Tools - Locator*. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). https://rt.unfccc.int/locator

UNFCCC. (2023b). *Greece's national inventory report for greenhouse and other gases for the years 1990-2021* [Bericht]. m. o. e. a. energy. https://unfccc.int/documents/627770

UNFCCC. (2023c). *National Inventory Submissions 2023* [Report]. U. N. F. C. o. C. C. (UNFCCC). https://unfccc.int/ghg-inventories-annex-i-parties/2023

UNFCCC. (2025). *National Inventory Submissions 2025* [Report]. https://unfccc.int/ghg-inventories-annex-i-parties/2025

UStatG: Umweltstatistikgesetz vom 16. August 2005 (BGBl. I S. 2446), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 5 des Gesetzes vom 5. Juli 2017 (BGBl. I S. 2234) geändert worden ist, § § 10 Erhebung bestimmter klimawirksamer Stoffe (2005).

Vasenev, I. I., Vasenev, V. I., & Stoorvogel, J. J. (2013). Urban soil organic carbon and its spatial heterogeneity in comparison with natural and agricultural areas in the Moscow region [Journal Article]. *Catena*, *107*, 7. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0341816213000386

VDA. (2013). AdBlue. In V. d. Automobilindustrie (Ed.). Berlin: Verband der Automobilindustrie (VDA).

VDD. (2009). *Berechnung auf Basis des Standes der Technik deutscher Hersteller* (

VDD. (2025). *Jährliche Datenübermittlung des Verbandes* ([xlsx]. Inventarbeschreibung in „Bitumen_AREF_Zeitreihen_und_Unsicherheiten_Archiv.zip“

VDI-Richtlinie 2440: Emissionsminderung - Mineralölraffinerien, (2000).

VDI. (2006). *Emissionsminderung - Keramische Industrie: VDI 2585* (Stand: Februar 2006 ed.) [Normschrift]. Beuth-Verlag GmbH.

VDI. (2013). *Emissionsminderung ; Aluminiumschmelzflußelektrolyse : VDI Richtlinie 2286, Bl. 1, Stand: Dezember 2013* [Book]. Berlin Beuth-Verlag GmbH.

VDI. (2017). *Emissionsminderung ; Glashütten : VDI Richtlinie 2578, Stand: Mai 2017* [Normschrift]. Beuth.

VDMA. (2011). *Energiebedarf für Kältetechnik in Deutschland*.

VDZ. (2016). Zement – Produktionsdaten der deutschen Zementindustrie. In: Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ).

Volk, F. (1986). Detonation gases and residues of composite explosives. *Journal of energetic Materials*, *4(1)*, p. 93-113.

von Winkler, M. (2004). Abschätzung von Emissionsfaktoren bei Transport und Lagerung von Mineralölprodukten [Zeitschriftenaufsatz]. *Trade Journal*, *120*(10).

Vos, C., Rösemann, C., Haenel, H.-D., Dämmgen, U., Döring, U., Wulf, S., Eurich-Menden, B., Freibauer, A., Döhler, H., Schreiner, C., Osterburg, B., & Fuß, R. (2026). *Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990 - 2024: Report on methods and data (RMD) - Submission 2026* [Report]. J. H. v. Thünen-Institut.

Wagner, J., & Steinmetzer, S. (2018). *Erhebung der Größen und Zusammensetzung von Brauchtums- und Lagerfeuern durch kommunale Befragungen* [Forschnungsbericht](Texte, Issue. U. (UBA). http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/erhebung-der-groessen-zusammensetzung-von

Wallfarth, B. (2014). E-Mail. In M. Kotzulla (Ed.). Hamburg

Dessau: Verband Schmierstoff-Industrie e. V. .

Wallmann, R. (1999). *Ökologische Bewertung der mechanisch-biologischen Restabfallbehandlung und der Müllverbrennung auf Basis von Energie-und Schadgasbilanzen*. ANS.

Walter, K., Don, A., & Flessa, H. (2015). No general soil carbon sequestration under Central European short rotation coppices [Journal Article]. *Gcb Bioenergy*, *7*(4), 727-740. https://doi.org/https://doi.org/10.1111/gcbb.12177

Wang, J., Meng, Q., Li, Y., Li, Z., Chang, W., Huo, L., Wang, G., & Pan, W. (2022). Potential reduction in emissions after replacement of automobile air conditioning refrigerants in China [Journal Article]. *Energy Reports Volume 8*, Pages 141-151. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.05.053

Warncke, K., & Gschrey, B. (2021). *Inventarermittlung der F-Gase 2019/2020 - Daten von HF(C)KW, FKW, SF6, NF3, SF5CF3, H(C)FE und PFPMIE für die nationale Emissionsberichterstattung gemäß Klimarahmenkonvention*

für die Berichtsjahre 2019 und 2020 [Bericht](Texte, Issue 164/2021). U. (UBA). https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/inventarermittlung-der-f-gase-20192020

Warncke, K., & Gschrey, B. (2024). *Inventarermittlung der F-Gase 2021/2022: Daten von HF(C)KW, FKW, SF6, NF3, SF5CF3, H(C)FE und PFPMIE für die nationale Emissionsberichterstattung gemäß Klimarahmenkonvention für die Berichtsjahre 2021 und 2022* [Abschlussbericht](Texte, Issue 50/2024). U. (UBA). https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/inventarermittlung-der-f-gase-20212022

Warncke, K., Schwarz, W., & Gschrey, B. (2018). *Emissionen fluorierter Treibhausgase in Deutschland 2016. Daten von HF(C)KW, FKW, SF6, NF3, SF5CF3, H(C)FE und PFPMIE für die nationale Emissionsberichterstattung gemäß Klimarahmenkonvention für das Berichtsjahr 2016* [Bericht]. U. (UBA).

Niedersächsische Verordnung über Meldepflichten und die Aufbewahrung von Aufzeichnungen in Bezug auf Wirtschaftsdünger, (2012). https://voris.wolterskluwer-online.de/browse/document/e13145d1-3c06-38d7-94d7-6175879330b0

WEG. (2008). *Erdgas-Erdöl, Entstehung-Suche-Förderung*. Wirtschaftsverband Erdöl- und Erdgasgewinnung (WEG). http://www.erdoel-erdgas.de/Erdgas_Erd%F6l___Entstehung___Suche___F%F6rderung-134-1-68b.html

Weilbacher. (1987). *Ausgasung von Zellgasen* [interner Laborbericht vom 17.08.87 (überreicht von der BASF AG, Ludwigshafen)]. B. AG.

Weiß, M., Neelis, M., & Patel, M. (2006). *Estimating CO2 Emissions from the Non-Energy Use of Fossil Fuels in Germany - Final Report* [Report]. Utrecht University (UU) - Copernicus Institute.

Weiss, P., Schieler, K., Schadauer, K., Englisch, M., & Radunsky, K. (2000). *Die Kohlenstoffbilanz des österreichischen Waldes und Betrachtungen zum Kyoto-Protokoll* [Buch]. Umweltbundesamt (UBA). https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/M106.pdf

Wellbrock, N., Aydin, C.-T., Block, J., Wolff, B., Evers, J., Gauer, J., Gehrmann, J., Kölling, C., König, N., Liesebach, M., Martin, J., Meiwes, K. J., Riek, W., D., F. K., Milbert, G., Raben, G., Schäffer, W., Bussian, B., Deckert, M., & Diekmann, O. (2006). *Bodenzustandserhebung im Wald (BZE II), Arbeitsanleitung für die Außenaufnahmen* [Bericht]. L. u. V. B. Bundesministerium für Ernährung.

Wellbrock, N., Bolte, A., & Flessa, H. (2016). *Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland: Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald 2006 bis 2008* [Bericht](978-3-86576-161-3). (Thünen Report, Issue. J. H. v. T. Institute. https://ideas.repec.org/p/zbw/jhtire/43.html

Wendland, M., & Attenberger, E. (2009). *Wirtschaftsdünger und Gewässerschutz: Lagerung und Ausbringung von Wirtschaftsdüngern in der Landwirtschaft* [Bericht]. https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/informationen/p_34348.pdf

Wickham, H., Müller, K., & Consortium, R. (2025). *DBI: R Database Interface*. In https://cran.r-project.org/web/packages/DBI/index.html

Wickham, H., Ooms, J., Müller, K., Rstudio, Consortium, R., & Nishiyama, T. (2025). *RPostgres: C++ Interface to PostgreSQL*. In https://cloud.r-project.org/web/packages/RPostgres/index.html

Wirth, C., Schulze, E. D., Schwalbe, G., Tomczyk, S., Weber, G., Weller, E., Böttcher, H., Schumacher, J., & Vetter, M. (2004). *Dynamik der Kohlenstoffvorräte in den Wäldern Thüringens : Abschlussbericht zur 1. Phase des BMBF-Projektes "Modelluntersuchung zur Umsetzung des Kyoto-Protokolls* [Bericht](Mitteilungen Issue 23). J. u. F. Thüringer Landesanst. für Wald. https://www.researchgate.net/profile/Christian-Wirth-4/publication/42088487_Dynamik_der_Kohlenstoffvorrate_in_den_Waldern_Thuringens_Abschlussbericht_zur_1_Phase_des_BMBF-Projektes_Modelluntersuchung_zur_Umsetzung_des_Kyoto-Protokolls/links/56196d6708ae78721f9d0172/Dynamik-der-Kohlenstoffvorraete-in-den-Waeldern-Thueringens-Abschlussbericht-zur-1-Phase-des-BMBF-Projektes-Modelluntersuchung-zur-Umsetzung-des-Kyoto-Protokolls.pdf

Wirtschaftsvereinigung Stahl. (2025a). BGS-Bogen Mitteilung per Mail von Jörg Schweisthal an Petra Icha vom 08.07.2025. In P. V. Icha (Ed.).

Wirtschaftsvereinigung Stahl. (2025b). *Monatliche Pressemeldung auf Seite der Wirtschaftsvereinigung Stahl* [monatliche Pressemitteilung]. https://www.wvstahl.de/pressemitteilungen/

Wittnebel, M., Frank, S., & Tiemeyer, B. (2023). *Aktualisierte Kulisse organischer Böden in Deutschland* [Bericht]. OpenAgrar. https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn066305.pdf

WMO. (2025). *State of the Global Climate 2024* [Report](WMO, Issue 1368). https://library.wmo.int/records/item/69455-state-of-the-global-climate-2024

Wolff, B., & Riek, W. (1997). *Deutscher Waldbodenbericht 1996-Ergebnisse der bundesweiten Bodenzustandserhebung in Wald (BZE) 1987-1993* [Bericht](Bundesministerium fur Ernahrung Landwirtschaft und Forsten, Issue. L. u. F. Bundesministerium für Ernährung.

Wutzler, T., Wirth, C., & Schumacher, J. (2008). Generic biomass functions for Common beech (Fagus sylvatica) in Central Europe: predictions and components of uncertainty [Journal Article]. *Canadian Journal of Forest research*, *38*(6), 1661-1675. https://doi.org/10.1139/X07-194

Zander, F., & Merten, D. (2006). *Teilvorhaben A: Überarbeitung und Dokumentation der Brennstoffeinsätze für stationäre Feuerungsanlagen in den neuen Bundesländern für das Jahr 1990* [Teilbericht](FKZ 205 41 115). I. f. E. u. Umwelt & I. f. Z. u. Technologiebewertung.

Ziche, D., Grüneberg, E., Hilbrig, L., Höhle, J., Kompa, T., Liski, J., Repo, A., & Wellbrock, N. (2019). Comparing soil inventory with modelling: Carbon balance in central European forest soils varies among forest types.

Science of the total environment, *647*, 1573-1585. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.327

Zimmermann, T., & Jepsen, D. (2018). *Entwicklung von Methoden zur Berechnung von Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen aus der Verwendung von Schmierstoffen und Wachsen* (Ö.-I. f. Ö. u. Politik, Ed.) [Forschungsbericht]. Umweltbundesamt (UBA).

Zimmermann, T., Tebert, C., & Memelink, R. (2025). *Ist-Analyse der VOCEmissionen bei der Reinigung von Transportmitteln und Tanks: Ist-Analyse der VOC-Emissionen von Mineralölprodukten bei der Reinigung von Eisenbahnkesselwagen, Binnentankschiffen, Straßentankfahrzeugen, Pipelines, Lagertanks und Tankcontainern* [Abschlussbericht](TEXTE 103/2025, Issue. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/ist-analyse-der-voc-emissionen-bei-der-reinigung

Zinnbauer, M., Eysholt, M., Henseler, M., Herrmann, F., Kreins, P., Kunkel, R., Nguyen, H., Tetzlaff, B., Venohr, M., Wolters, T., & Wendland, F. (2023). *Quantifizierung aktueller und zukünftiger Nährstoffeinträge und Handlungsbedarfe für ein deutschlandweites Nährstoffmanagement – AGRUM-DE.* (Thünen-Report, Issue. https://www.thuenen.de/media/publikationen/thuenen-report/Thuenen_Report_108.pdf

ZIV. (2024). *Erhebungen des Schornsteinfegerhandwerks 2024*. E. V. GmbH. https://www.schornsteinfeger.de/sites/default/files/downloads/erhebungen-2024.pdf

Zöllner, S. (2014). *Überführung der Bestands- und Ereignisdaten des DVGW in die Emissionsdatenbank des Umweltbundesamts*