

CLIMATE CHANGE

04/2020

Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland - GreenLife

Abschlussbericht

CLIMATE CHANGE 04/2020

Ressortforschungsplan des Bundesministerium für
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3715411150
FB000439/4

Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland - GreenLife

Abschlussbericht

von

Dr. Monika Dittrich, Frank Dünnebeil, Susanne Köppen,
Dr. Amany von Oehsen, Regine Vogt, Dr. Kirsten
Biemann, Horst Fehrenbach, Birte Ewers, Sonja
Limberger
ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung gGmbH,
Heidelberg

Norman Gerhardt, Dr. Sarah Becker, Dr. Diana Böttger,
Felix Frischmuth
IEE – Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und
Energiesystemtechnik, Kassel

Dr. Karl Schoer
SSG, Wiesbaden

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

■/umweltbundesamt.de

🏠/umweltbundesamt

Durchführung der Studie:

Ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH
Wilckensstr. 3
69120 Heidelberg

Abschlussdatum:

September 2020

Redaktion:

Fachgebiet V 1.2 "Strategien und Szenarien zu Klimaschutz und Energie"
Katja Purr

Fachgebiet I 1.1 „Grundsatzfragen, Nachhaltigkeitsstrategien und -szenarien,
Ressourcenschonung“
Jens Günther

Publikationen als pdf:
<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, Dezember 2020

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Publikationen im Rahmen des RESCUE-Projektes

„RESCUE“ (Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität) ist ein interdisziplinäres Projekt des Umweltbundesamtes (UBA) mit einem hohen Anteil an „Eigenforschung“ des UBA und einer intensiven Einbindung externer Wissenschaftler. Folgende Publikationen sind Stand November 2020 hierzu erfolgt und ergänzen sich:

UBA (2017): Den Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland ressourcenschonend gestalten. Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/190215_uba_fachbrosch_rtd_bf.pdf; 2. Auflage erschien 2019 (verfügbar in Deutsch und Englisch)

Dittrich, M.; Dünnebeil, F.; Biemann, K., von Oehsen, A.; Mellwig, P., Neumann, K., Gerhardt, N., Sschoer, K. (2017): Konsistenz im Modellverbund im Projekt RTD. In: Sicherung der Konsistenz und Harmonisierung von Annahmen bei der kombinierten Modellierung von Ressourceninanspruchnahme und Treibhausgasemissionen. UBA-Domunetationen 04/2017, S. 83-96.

Günther, J.; Lehmann, H.; Lorenz, U.; Pfeiffer, D.; Purr, K. (2018): Towards a Resource Efficient and Greenhouse Gas Neutral Germany 2050. In: Factor X: Challenges, Implementation Strategies and Examples for a Sustainable Use of Natural Resources (Lehmann H., ed.), pp. 417-425. Springer International Publishing, Cham. ISBN: 978-3-319-50079-9. DOI: 10.1007/978-3-319-50079-9_30

UBA (2019): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität. RESCUE-Studie. Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/rescue_studie_cc_36-2019_wege_in_eine_ressourcenschonende_treibhausgasneutralitaet.pdf.

UBA (2019): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität. RESCUE-Studie. Kurzfassung. Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/rescue_kurzfassung_dt.pdf (verfügbar in Deutsch und Englisch)

UBA (2019): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität: Executive Summary der RESCUE-Studie. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/uba_hgp_wege_in_ress_treibhausgasneutralitat_11-11-2019_bf.pdf (verfügbar in Deutsch und Englisch)

UBA (2019): Erneuerbare Energien für ein treibhausgasneutrales Deutschland. Politikpapier zur RESCUE-Studie. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/uba_hgp_erneuerbareenergien_treibhausneutdt_11-11-2019_bf.pdf

UBA (2019): Treibhausgasneutralität in Deutschland bis 2050. Politikpapier zur RESCUE-Studie. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/uba_hgp_treibhausgas_2050_11-11-2019_bf.pdf (verfügbar in Deutsch, Englisch und Chinesisch)

Günther, J.; Nuss, P.; Purr, K.; Dittrich, M., Lehmann, H. (2020): Pathways to a resource-efficient and greenhouse-gas -neutral Germany. In: Lehmann, H. (2020): Sustainable Development and Resource Productivity - The Nexus Approaches. Routledge Publishing. ISBN 9780367429546

Dittrich, M., Schoer, Günther, J., Nuss, P., Purr, K., K., Lehmann, H. (2020): Resource Use in a Post-fossil Green Germany. In: Lehmann, H. (2020): Sustainable Development and Resource Productivity - The Nexus Approaches. Routledge Publishing. ISBN 9780367429546

Lorenz, U. (2020): Systemic analysis of the nexus of greenhouse gas emissions and material use in the energy sector. In: Lehmann, H. (2020): Sustainable Development and Resource Productivity - The Nexus Approaches. Routledge Publishing. ISBN 9780367429546

Dittrich, M.; Gerhardt, N.; Schoer, K.; Dünnebeil, F.; Becker, S.; Oehsen, A. von; Vogt, R.; Köppen, S.; Biemann, K.; Böttger, D.; Ewers, B.; Limberger, S.; Frischmuth, F.; Fehrenbach, H. (2020): Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland - GreenEe. UBA Climate Change 01/2020.

Dittrich, M.; Gerhardt, N.; Schoer, K.; Dünnebeil, F.; Becker, S.; Oehsen, A. von; Vogt, R.; Köppen, S.; Biemann, K.; Böttger, D.; Ewers, B.; Limberger, S.; Frischmuth, F.; Fehrenbach, H. (2020): Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland - GreenLate. UBA Climate Change 02/2020.

Dittrich, M.; Gerhardt, N.; Schoer, K.; Dünnebeil, F.; Becker, S.; Oehsen, A. von; Vogt, R.; Köppen, S.; Biemann, K.; Böttger, D.; Ewers, B.; Limberger, S.; Frischmuth, F.; Fehrenbach, H. (2020): Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland - GreenMe. UBA Climate Change 03/2020.

Dittrich, M.; Gerhardt, N.; Schoer, K.; Dünnebeil, F.; Becker, S.; Oehsen, A. von; Vogt, R.; Köppen, S.; Biemann, K.; Böttger, D.; Ewers, B.; Limberger, S.; Frischmuth, F.; Fehrenbach, H. (2020): Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland - GreenLife. UBA Climate Change 04/2020.

Dittrich, M.; Gerhardt, N.; Schoer, K.; Dünnebeil, F.; Becker, S.; Oehsen, A. von; Vogt, R.; Köppen, S.; Biemann, K.; Böttger, D.; Ewers, B.; Limberger, S.; Frischmuth, F.; Fehrenbach, H. (2020): Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland - GreenSupreme. UBA Climate Change 05/2020.

Dittrich, M.; Gerhardt, N.; Schoer, K.; Dünnebeil, F.; Becker, S.; Oehsen, A. von; Vogt, R.; Köppen, S.; Biemann, K.; Böttger, D.; Ewers, B.; Limberger, S.; Frischmuth, F.; Fehrenbach, H. (2020): Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland – Vergleich der Szenarien. UBA Climate Change 06/2020.

Kurzbeschreibung: Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland - GreenLife

Das Umweltbundesamt (UBA) untersucht schon seit vielen Jahren, wie eine nachhaltige Entwicklung sowie eine treibhausgasneutrale und ressourcenschonende Lebensweise erreicht werden kann. Hierfür wurde ein interdisziplinäres Projekt gestartet: „RESCUE“ (Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität). Dieses Projekt ist mit einem hohen Anteil an „Eigenforschung“ des UBA und einer intensiven Einbindung externer Wissenschaftler über das hier berichtete Forschungsvorhaben (FKZ 3715411150) gelungen. Dabei wurden sechs Szenarien zur Transformation entwickelt. Die Green-Szenarien beschreiben unterschiedlich ambitionierte Transformationspfade zu einem ressourcenschonenden und treibhausgasneutralen Deutschland bis 2050.

Das Szenario GreenLife (Germany – resource efficient and GHG neutral – Lifestyle changes) ist sehr ambitioniert bezüglich der gesellschaftlichen Transformation hin zu einem nachhaltigen Konsum und Verhalten. Dies betrifft nahezu alle Konsumbereiche von der Nahrung, über die Wohnnachfrage und die Mobilität bis zum Konsum von Kleidung und anderen Waren und Dienstleistungen. Der Endenergiebedarf kann von 2.500 TWh in 2015 auf nur 1.200 TWh mehr als halbiert werden (ohne rohstoffliche Bedarfe), der Anteil der erneuerbaren Energien steigt auf 75 % in 2030 und 100 % in 2050.

Im Ergebnis wird in diesem Szenario im Jahr 2050 der Primärrohstoffkonsum gegenüber 2010 um 63 % reduziert. Der Anteil der Sekundärmaterialien am gesamten Primär- und Sekundärrohstoffbedarf steigt auf 31 %. Pro Person werden nur noch rund 7 Tonnen Rohstoffe konsumiert, davon 2,1 Tonnen Biomasse, die überwiegend für die Ernährung gebraucht werden. Der nachhaltige Konsum reduziert die Nachfrage nach einer Vielzahl von Rohstoffen, darunter Eisen, Aluminium und Kupfer.

Die Treibhausgasemissionen in Deutschland (ohne Senken) können bis 2050 um 96,6 % gegenüber 1990 reduziert werden. Allerdings können nur im Energie- und Verkehrssektor die Treibhausgase vollständig vermieden werden. In den anderen Quellgruppen Industrie, Landwirtschaft, Abfall und LULUCF (ohne Wald) verbleiben Treibhausgasemissionen, die nach dem heutigen Wissensstand noch nicht vollständig vermeidbar sind. In 2050 ist unter Einbeziehung natürlicher Senken Treibhausgasneutralität sicher erreichbar.

Abstract: Resource-Efficient Pathways towards Greenhouse-Gas-Neutrality - GreenLife

The German Environment Agency has been investigating for many years how sustainable development and a greenhouse-gas-neutral and resource-efficient lifestyle can be achieved. In this context, the inter-disciplinary research project “RESCUE” (Resource-Efficient Pathways towards Greenhouse-Gas-Neutrality) was started. The project was implemented successfully with a high proportion of own re-search by the German Environment Agency and intensive involvement of external scientists through the research project to which this report belongs (FKZ 3715411150). Six transformation scenarios were developed. The ‘Green’-scenarios describe transformation pathways towards a resource-efficient and greenhouse gas-neutral Germany by 2050 with different levels of ambition.

The scenario GreenLife (‘Germany – Resource-efficient and GHG-neutral – Lifestyle changes’) is very ambitious with regard to the societal transformation towards sustainable consumption and behavior. Nearly all areas of consumption from food, housing and mobility to the consumption of clothing and other goods and services are affected. Final energy demand can be halved from 2,500 TWh in 2015 to just 1,200 TWh (without raw material demand), the share of renewable energies increases to 75 % in 2030 and 100 % in 2050.

As a result, primary raw material consumption is reduced by 63 % in 2050 compared to 2010. The share of secondary materials of total (primary and secondary) raw material demand increases to 31 %. Only around 7 tons of raw materials are consumed per person, of which 2.1 tons are biomass mainly used for nutrition. Sustainable consumption reduces the demand for a variety of raw materials, including iron, aluminum and copper.

Greenhouse gas emissions in Germany (without sinks) can be reduced by 96.6 % by 2050 compared to 1990. However, greenhouse gases can only be completely avoided in the energy and transport sectors. Some emissions from industry, agriculture, waste and LULUCF (without forest) cannot be completely avoided as far as we know today. In 2050, greenhouse gas neutrality can be achieved with certainty by including natural sinks.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	13
Tabellenverzeichnis	15
Abkürzungsverzeichnis.....	18
Zusammenfassung.....	21
Summary	30
1 Einleitung.....	38
1.1 Herausforderung Klimawandel und die Green-Szenarien	38
1.2 GreenLife: Leitlinien und Ausrichtung	39
1.3 Aufbau des Berichts	40
2 Methodik	42
3 Allgemeine Annahmen	44
3.1 Rahmendaten.....	44
3.1.1 Bevölkerungsentwicklung	44
3.1.2 Wirtschaftliche Entwicklung	44
3.1.3 Technologische Entwicklung und Materialeffizienz.....	44
3.1.4 Entwicklung in Europa und im Rest der Welt	44
3.1.5 Nutzung von Biomasse.....	45
3.1.6 CCS und CCU	45
3.2 Emissionsziel 2030 und 2040	46
4 Sektorale Annahmen	47
4.1 Landwirtschaft	47
4.2 Flächennutzung und LULUCF (ohne Wald)	49
4.3 Industrie	49
4.3.1 Stahlindustrie	49
4.3.2 Nicht-Eisen –Metallindustrie	50
4.3.3 Gießereiindustrie	51
4.3.4 Chemische Industrie	52
4.3.5 Zementindustrie.....	53
4.3.6 Kalkindustrie	54
4.3.7 Glasindustrie	54
4.3.8 Zellstoff- und Papierindustrie	55
4.3.9 Nahrungsmittelindustrie.....	56
4.3.10 Textilindustrie	56

4.4	Abfall und Abwasser	57
4.5	Gebäude.....	58
4.5.1	Entwicklung des Gebäudewärmeverbrauchs	59
4.5.1.1	Entwicklungen von Wohn- und Nutzflächen	59
4.5.1.2	Entwicklung von Sanierungsraten und –tiefen.....	60
4.5.1.3	Annahmen zu Innentemperaturen und Nutzerverhalten in GreenLife.....	60
4.5.1.4	Ausstattung mit Wärmerückgewinnungsanlagen	60
4.5.1.5	Resultierender Nutz- und Endenergiebedarf im Zielpunkt 2050.....	60
4.5.2	Vorgaben für die Entwicklung des Heizungsanlagenbestandes	65
4.5.3	Optimierung der Wärmebereitstellung	65
4.5.3.1	Optimierung der Wärmebereitstellung in Wärmenetzen	66
4.5.3.2	Objektversorgung	67
4.6	Verkehr.....	68
4.6.1	Vermeidung und Verlagerung im Personenverkehr	68
4.6.2	Entwicklung der Pkw-Flotten	70
4.6.3	Vermeidung und Verlagerung im nationalen Güterverkehr.....	72
4.6.4	Entwicklung der Fahrzeugflotten im Güterverkehr	73
4.6.5	Internationaler Verkehr	73
4.7	Weitere Sektoren und nachhaltiger Konsum.....	74
4.7.1	Weitere Sektoren.....	74
4.7.1.1	Fahrzeugbau	74
4.7.1.2	Sonstige THG-Emissionen	74
4.7.1.3	Sonstige Produktions- und Dienstleistungssektoren.....	75
4.7.2	Konsumänderungen.....	75
4.7.2.1	Kleidung	75
4.7.2.2	IKT-Geräte	75
4.7.2.3	Möbel, Spielzeuge und sonstige Waren	76
4.7.2.4	Staatliche Dienstleistungen	76
4.7.3	Stromnetze.....	76
4.7.4	Sonstige Infrastrukturen	77
4.8	Energieversorgung	77
4.8.1	Festlegung verschiedener Parameter	77
4.8.2	Markthochlauf von Wind-Onshore und Photovoltaik	78
4.8.3	Markthochlauf von PtG/L und Zuordnung auf Anwendungsbereiche.....	78

4.8.4	Herkömmlicher Stromverbrauch	78
4.8.5	Biomassenutzung	79
4.8.6	Sonstige Rest- und Abfallströme	81
5	Ergebnisse	82
5.1	Energie	82
5.1.1	Endenergiebedarfe	82
5.1.2	Stromsektor	83
5.1.2.1	Strombilanz in Deutschland	83
5.1.2.2	Installierte Leistungen in Deutschland	85
5.1.3	Wärmesektor	88
5.1.3.1	Gebäudewärme Haushalte und GHD	88
5.1.3.2	Prozesswärme Industrie und GHD sowie Industriegebäude	91
5.1.4	Verkehrssektor	92
5.1.5	Gas- und PtL-Versorgung	94
5.1.6	Europäischer Rahmen	97
5.1.6.1	Strombilanz	97
5.1.6.2	Installierte Leistungen	99
5.2	Entwicklung der Treibhausgasemissionen	99
5.2.1	Übersicht über die Entwicklung aller Treibhausgasemissionen	99
5.2.2	Emissionen nach Quellgruppen	101
5.2.2.1	Emissionen im Energiesektor, einschließlich Verkehr	101
5.2.2.2	Treibhausgasemissionen der Industrie	102
5.2.2.3	THG-Emissionen der Landwirtschaft	104
5.2.2.4	THG-Emissionen im Abfallsektor	105
5.2.2.5	THG-Emissionen im Bereich LULUCF (ohne Wald)	105
5.2.3	Emissionen einschließlich Vorketten	106
5.2.4	Kumulierte Treibhausgasemissionen	108
5.2.5	Vergleich der Treibhausgasemissionen mit den GreenEe-Szenarien	109
5.3	Der Konsum von Rohstoffen	111
5.3.1	Der gesamtwirtschaftliche Konsum von Primärrohstoffen	111
5.3.1.1	Der Konsum von Primärrohstoffen nach Rohstoffarten	111
5.3.1.2	Die Veränderung der Rohstoffproduktivität	114
5.3.1.3	Der Pro-Kopf-Rohstoffkonsum in 2050	116

5.3.1.4	Der Rohstoffkonsum nach Kategorien der letzten Verwendung und Bedürfnisfeldern in 2050	117
5.3.1.5	Der kumulierte Rohstoffkonsum	120
5.3.1.6	Substitution von Primärrohstoffen.....	120
5.3.2	Rohstoffkonsum nach ausgewählten Rohstoffen.....	122
5.3.2.1	Primär- und Sekundärbedarf von Eisen, Kupfer und Aluminium	122
5.3.2.2	Primäreinsatz ausgewählter Technologie- und Edelmetalle	123
5.3.2.3	Der Einsatz von Holz	124
5.3.2.4	Die Nutzung von Sand, Kies und Schotter	125
5.3.2.5	Knappheit von Rohstoffen	125
5.3.3	Vergleich des Rohstoffkonsums mit GreenEe2	128
5.4	Flächenentwicklung	129
6	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	131
7	Quellenverzeichnis	136
A	Anhang	139

Abbildungsverzeichnis

Abbildung Z- 1:	Entwicklung der Endenergiebedarfe in GreenLife.....	23
Abbildung Z- 2:	Nettostromerzeugung und Verbrauch Deutschland in GreenLife	24
Abbildung Z- 3:	Primärrohstoffkonsum (RMC) nach Rohstoffarten, 2010 bis 2050	26
Abbildung Z- 4:	Treibhausgasemissionen nach Quellgruppen, 1990 bis 2050	28
Figure Z- 1:	Development of final energy consumption in GreenLife	32
Figure Z- 2:	Electricity generation and consumption in Germany, GreenLife	33
Figure Z- 3:	Raw material consumption (RMC) by raw material groups, 2010 to 2050.....	34
Figure Z- 4:	GHG emissions by source groups, 1990 – 2050	36
Abbildung 1:	Verlauf der bewohnten Wohnfläche im GreenLife-Szenario	59
Abbildung 2:	Unterteilung der Wohngebäude in Effizienzklassen in GreenLife – Endenergie.....	61
Abbildung 3:	Unterteilung der Nichtwohngebäude Teil 1 in Effizienzklassen in GreenLife – Endenergie	62
Abbildung 4:	Unterteilung der Nichtwohngebäude Teil 2 in Effizienzklassen in GreenLife – Endenergie	63
Abbildung 5:	Unterteilung der Wohngebäude in Effizienzklassen in GreenLife – relative Anzahl bzw. Anteil Flächen.....	64
Abbildung 6:	Unterteilung der Nichtwohngebäude Teil 1 in Effizienzklassen in GreenLife – relative Anzahl bzw. Anteil Flächen	64
Abbildung 7:	Unterteilung der Nichtwohngebäude Teil 2 in Effizienzklassen in GreenLife – relative Anzahl bzw. Anteil Flächen	65
Abbildung 8:	Pkw-Neuzulassungen, -Bestände und –Fahrleistungen in GreenLife und den GreenEe-Szenarien	72
Abbildung 9:	Entwicklung der Endenergiebedarfe in GreenLife.....	82
Abbildung 10:	Nettostromerzeugung und Verbrauch Deutschland in GreenLife	84
Abbildung 11:	Installierte Leistungen Deutschland in GreenLife	86
Abbildung 12:	Potenzialausschöpfung Wind und PV im Jahr 2050 in GreenLife.....	87
Abbildung 13:	Zeitliche Entwicklung des Bedarfs an Raum- und Trinkwarmwasserwärme in Wohn- und gewerblich genutzten Gebäuden (GHD) – GreenLife	89
Abbildung 14:	Deckung der Wärmenachfrage in GreenLife	89
Abbildung 15:	Zeitliche Entwicklung des Bedarfs der Industrie an Raum-, Trinkwarmwasser- und Prozesswärme sowie GHD- Prozesswärme – GreenLife	91

Abbildung 16:	Zeitliche Entwicklung der Zusammensetzung der Wärmebedarfsdeckung Industrie und GHD-Prozesswärme – GreenLife	92
Abbildung 17:	Entwicklung der Gas- und Kraftstoffnachfrage und Versorgung in GreenLife	94
Abbildung 18:	Notwendiger Markthochlauf für eine PtG/L-Import-Infrastruktur in GreenLife.....	95
Abbildung 19:	Zeitliche Entwicklung des PtG/L-Einsatzes in Deutschland (nur Importe) – GreenLife	96
Abbildung 20:	Zeitliche Entwicklung des PtG/PtL-Einsatzes (national und importiert)	97
Abbildung 21:	Stromerzeugung und Verbrauch Europa 2050 in GreenLife	98
Abbildung 22:	Relativer Anteil von Stromerzeugung und Verbrauch Europa 2050 in GreenLife	98
Abbildung 23:	Installierte Leistungen Europa 2050 in GreenLife	99
Abbildung 24:	Treibhausgasemissionen nach Quellgruppen, 1990 bis 2050	100
Abbildung 25:	THG-Emissionsgehalte der Im- und Exporte, 2010 bis 2050	107
Abbildung 26:	THG-Emissionen der Güter der letzten inländischen Verwendung	108
Abbildung 27:	Kumulierte THG-Emissionen nach Quellgruppen, 1990 – 2050	109
Abbildung 28:	Primärrohstoffkonsum nach Rohstoffarten, 2010 bis 2050.....	113
Abbildung 29:	Letzte inländische Verwendung der Basismetalle gegenüber Technologie- und Edelmetallen, 2010 bis 2050	114
Abbildung 30:	Entwicklung von ausgewählten Rohstoffindikatoren und BIP, 1994 bis 2050	115
Abbildung 31:	Rohstoffproduktivität und Komponenten der Rohstoffproduktivität	116
Abbildung 32:	Primärrohstoffkonsum (RMC) pro Person in 2010, 2030, 2040 und 2050.....	117
Abbildung 33:	Der Primärrohstoffkonsum (RMC) nach Verwendungskategorien in 2050	118
Abbildung 34:	Der Primärrohstoffkonsum (RMC) der privaten Haushalte nach Bedürfnisfelder	119
Abbildung 35:	Kumulierter Primärrohstoffkonsum, 2010 bis 2050.....	120
Abbildung 36:	Gesamtrohstoffaufwand einschließlich Primär- und Sekundärrohstoffen und substituierte fossile Energieträger, 2010 – 2050	121
Abbildung 37:	Primär- und Sekundärbasismetallmengen in der letzten inländischen Verwendung, 2010 bis 2050.....	123
Abbildung 38:	Nachfrage nach ausgewählten Rohstoffen im Vergleich zur Produktion 2018	126
Abbildung 39:	Kumulierte Nachfrage ausgewählter Primärrohstoffe als Anteil der Reserven in 2018.....	127

Tabellenverzeichnis

Tabelle Z- 1:	Das Ambitionsniveau der Green-Szenarien im Vergleich.....	21
Table Z- 1:	The level of ambition of the ‘Green’ scenarios in comparison.....	30
Tabelle 1:	Das Ambitionsniveau der Green-Szenarien im Vergleich.....	39
Tabelle 2:	Annahmen zur Bevölkerungsentwicklung	44
Tabelle 3:	Energetische Nutzung der Restbiomassepotenziale bis 2050.....	45
Tabelle 4:	Entwicklung der Viehbestände im GreenLife-Szenario	48
Tabelle 5:	Annahmen Stahlindustrie im GreenLife-Szenario	49
Tabelle 6:	Annahmen Nicht-Eisen-Metallindustrie im GreenLife-Szenario	50
Tabelle 7:	Annahmen Gießereiindustrie im GreenLife-Szenario.....	51
Tabelle 8:	Annahmen chemische Industrie im GreenLife-Szenario	52
Tabelle 9:	Annahmen Zementindustrie im GreenLife-Szenario.....	53
Tabelle 10:	Annahmen Kalkindustrie im GreenLife- Szenario.....	54
Tabelle 11:	Annahmen Glasindustrie im GreenLife-Szenario	55
Tabelle 12:	Annahmen Zellstoff- und Papierindustrie im GreenLife-Szenario für das Zieljahr 2050.....	55
Tabelle 13:	Annahmen Nahrungsmittelindustrie im GreenLife-Szenario für das Zieljahr 2050.....	56
Tabelle 14:	Annahmen Textilindustrie im GreenLife-Szenario	56
Tabelle 15:	Annahmen Abfall und Abwasser im GreenLife- Szenario.....	57
Tabelle 16:	Überblick Annahmen im Gebäudewärmebereich GreenLife	58
Tabelle 17:	Modellierter Nutzenergie- und Endenergiebedarf in Wohn- und Nichtwohngebäuden 2050	60
Tabelle 18:	Maximales Versorgungspotenzial der Wärmenetzversorgung in 2050 als Input für SCOPE	66
Tabelle 19:	Anteil von Wärmenetzen und JAZ (gemittelter Wert für TWW und RW) von Wärmepumpen in 2050 je Gebäudetyp in GreenLife	67
Tabelle 20:	GreenLife-Annahmen zur Nah- und Fernmobilität der Bevölkerung im urbanen Raum	69
Tabelle 21:	Nationale Personenverkehrsleistungen in GreenLife im Vergleich zu GreenEe2.....	70
Tabelle 22:	Nationale Güterverkehrsleistungen in GreenLife im Vergleich zu GreenEe2.....	73
Tabelle 23:	Überblick Annahmen zur Energieversorgung in GreenLife	77
Tabelle 24:	Klassischer Stromverbrauch GreenLife im Vergleich zu GreenEe2	79
Tabelle 25:	Stromerzeugung in GreenLife im Vergleich zu GreenEe2	80
Tabelle 26:	Biomethan-Gasnetzeinspeisung in den GreenEe-Szenarien	80

Tabelle 27:	Endenergie aus biogenen Strömen (inkl. Klärgas, ohne industriellen Reststoffen) in GreenLife im Vergleich zu GreenEe2	80
Tabelle 28:	Nutzung von Müllheizkraftwerken in GreenLife im Vergleich mit GreenEe.....	81
Tabelle 29:	Endenergiebedarfe differenziert nach Energieträger und Sektoren in GreenLife	83
Tabelle 30:	Nettostromverbrauch zuzüglich Verluste in GreenLife und GreenEe2	84
Tabelle 31:	Nettostromerzeugung in GreenLife und GreenEe2.....	85
Tabelle 32:	Markthochlauf Wind-Onshore und PV	87
Tabelle 33:	Installierte Leistungen in GreenLife.....	88
Tabelle 34:	Ergebnis der SCOPE-Optimierung der Wärmenetzversorgung	90
Tabelle 35:	Ergebnis der SCOPE-Optimierung der dezentralen Wärmeversorgung.....	90
Tabelle 36:	EEV nach Verkehrsmitteln GreenLife im Vergleich zu GreenEe2	92
Tabelle 37:	EEV nach Energieträgern	93
Tabelle 38:	Gas- und Kraftstoffbilanz in GreenLife im Vergleich zu GreenEe2	94
Tabelle 39:	Entwicklung der PtG/L-Importmengen im Vergleich zwischen GreenEe2 und GreenLife	96
Tabelle 40:	Emissionsminderungen GreenLife in 2030 und 2050 gegenüber 1990	100
Tabelle 41:	Energiebedingte THG-Emissionen nach Anlagentyp in Mio. t CO ₂ Äq	101
Tabelle 42:	Prozessbedingte THG-Emissionen nach Industriesektoren in t CO ₂ Äq	102
Tabelle 43:	THG-Emissionen aus Produktion und Einsatz fluorierter Treibhausgase in t CO ₂ Äq.....	103
Tabelle 44:	THG-Emissionen von Lösemitteln und anderen Produktanwendungen sowie Lachgas in t CO ₂ Äq	103
Tabelle 45:	THG-Emissionen Sektor Landwirtschaft im GreenLife-Szenario in t CO ₂ Äq	104
Tabelle 46:	Emissionen der Quellgruppe Landwirtschaft nach Treibhausgasen im GreenLife-Szenario Szenario in t CO ₂ Äq	105
Tabelle 47:	THG-Emissionen im Abfallsektor nach Untergruppen in t CO ₂ Äq.....	105
Tabelle 48:	Treibhausgasemissionen in LULUCF (ohne Wald) nach Untergruppen in t CO ₂ Äq	105
Tabelle 49:	Vergleich der Treibhausgasemissionen in GreenLife und GreenEe1 in Mio. Tonnen CO ₂ Äq	110
Tabelle 50:	Vergleich der Treibhausgasemissionen in GreenLife und GreenEe2 in Mio. Tonnen CO ₂ Äq	110

Tabelle 51:	Übersicht über die Rohstoffflüsse in 2010, 2030, 2040 und 2050	111
Tabelle 52:	Nachgefragte Menge ausgewählter Technologie- und Edelmetalle (LIV), 2030, 2040 und 2050	124
Tabelle 53:	Nachgefragte Mengen ausgewählter Rohstoffe in PV-Anlagen und Batterien, 2030, 2040 und 2050.....	124
Tabelle 54:	Der Rohstoffkonsum (RMC) in GreenMe und GreenEe im Vergleich in Tsd. Tonnen RME.....	128
Tabelle 55:	Flächennutzung in Deutschland in 2030, 2040 und 2050	129
Tabelle A- 1:	Unterteilung der Gebäude in Effizienzklassen – Endenergie 2030.....	139
Tabelle A- 2:	Unterteilung der Gebäude in Effizienzklassen – Endenergie 2040.....	140
Tabelle A- 3:	Unterteilung der Gebäude in Effizienzklassen – Endenergie 2050.....	141
Tabelle A- 4:	Unterteilung der Gebäude in Effizienzklassen – Gesamtfläche	142

Abkürzungsverzeichnis

ALMOD	Agriculture and LULUCF Model
BEV	Battery Electric Vehicle - Elektrofahrzeug
bevOH-Lkw	Oberleitungs-Lkw mit zusätzlichem Batteriespeicher (rein elektrischer Betrieb)
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
CBA	Cost-benefit analysis
CCS	Carbon Capture and Storage – Kohlenstoffsammlung und Lagerung
CCU	Carbon Capture and Use – Kohlenstoffsammlung und Nutzung
CO₂	Kohlendioxid
CO₂Äq	Kohlendioxid-Äquivalente
CH₄	Methan
Csyn	synthetisch erzeugter Kohlenstoff
DE	Domestic Extraction – heimische Rohstoffentnahme
Destatis	Statistisches Bundesamt
DMI	Domestic Material Input – heimischer Materialinput
EBS	Ersatzbrennstoff
EFH	Einfamilienhäuser
EGS	Ecosystem Goods and Services
EST	Eisen-, Stahl- und Temperguss
F-Gase	Fluorierte Treibhausgase
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen
GEMOD	Gebäude-Modell
Ggü.	Gegenüber
GreenEe	Germany – Resource efficient and Greenhouse gas neutral – Energy Efficiency
GreenLate	Germany – Resource efficient and Greenhouse gas neutral – Late Transition
GreenLife	Germany – Resource efficient and Greenhouse gas neutral – Lifestyle Changes
GreenMe	Germany – Resource efficient and Greenhouse gas neutral – Material Efficiency
GreenSupreme	Germany – Resource efficient and Greenhouse gas neutral – Minimierung von Treibhausgas-Emissionen und Rohstoffverbrauch im Betrachtungszeitraum
GW	Gigawatt
GWP	Großwärmepumpe
HELCOM	Kommission zum Schutz der Meeresumwelt im Ostseeraum (Convention on the Protection of the Marine Environment of the Baltic Sea Area).

ALMOD	Agriculture and LULUCF Model
JAZ	Jahresarbeitszahl
KRA	Kumulierter Rohstoffaufwand
KSP	Klimaschutzplan
LKW	Lastkraftwagen
LNF	Leichte Nutzfahrzeuge
LULUCF	Land use, land use change and forestry – Landnutzung, Landnutzungswandel und Forstwirtschaft
LV	Letzte Verwendung
LIV	Letzte inländische Verwendung
MBA	Mechanisch-biologische Behandlungsanlage
MBS	Mechanisch-biologische Stabilisierungsanlage
MFH	Mehrfamilienhäuser
MIV	Motorisierter Individualverkehr
NE-Metalle	Nichteisenmetalle
NEP	Netzentwicklungsplan
OH-LKW	Oberleitungs-Lastkraftwagen
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PHEV	Plug-in hybrid electric vehicle - extern aufladbares Hybridelektrofahrzeug
PGM	Platingruppenmetalle
Pkm	Personenkilometer
Ppm	Pars per million – Anteil pro Million
PtG	Power-to-Gas - auf Basis von erneuerbarem Strom hergestellte gasförmige Kraftstoffe wie Wasserstoff oder Methan
PtL	Power-to-Liquid, auf Basis von erneuerbarem Strom hergestellte Flüssigkraftstoffe
PV	Photovoltaik
RESCUE	Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität
RMC	Raw Material Consumption – Rohmaterialkonsum
RME	Raw Material Equivalents – Rohmaterialäquivalente
RMI	Raw Material Input – Rohmaterialinput
RW	Raumwärme
SCOPE	Sektorübergreifende Einsatz- und Ausbauoptimierung für Analysen des zukünftigen Energieversorgungssystems
THG	Treibhausgase
THGND	Treibhausgasneutrales Deutschland (UBA-Publikation von 2014)
Tkm	Tonnenkilometer

ALMOD	Agriculture and LULUCF Model
TWh	Terrawattstunden
TREMOD	Transport-Emissions-Modell
UBA	Umweltbundesamt
URMOD	Umweltökonomisches Treibhausgas- und Rohstoffmodell
WEA	Windenergieanlagen
WP	Wärmepumpe
WW	Warmwasser
ZFH	Zweifamilienhäuser

Zusammenfassung

Hintergrund und Zielsetzung

Der Klimawandel ist eine zentrale Herausforderung der Gegenwart. Die Staatengemeinschaft, darunter Deutschland, bekennt sich dazu, den Temperaturanstieg auf unter 2 Grad zu begrenzen. Dies bedeutet, dass Deutschland den Ausstoß von Treibhausgasen signifikant reduzieren und eine sogenannte Treibhausgasneutralität erreichen muss. Weitestgehende Treibhausgasneutralität wird im Projekt RESCUE dahingehend definiert, dass im Jahr 2050 die Treibhausgasemissionen um (mindestens) 95 % gegenüber 1990 reduziert werden, eine 100 % Reduktion entspricht einer (vollständigen) Treibhausgasneutralität. Eine Reduktion in dem Ausmaß ist nur möglich, wenn die THG-Emissionen in allen Sektoren verringert werden und die Energieversorgung, die Einfluss auf alle Bereiche der Wirtschaft hat, grundlegend verändert wird. Darüber hinaus müssen auch alle natürlichen Ressourcen viel sparsamer als heute in allen Bereichen der Wirtschaft eingesetzt werden. Hier setzt das Projekt RESCUE (Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität) an und untersucht folgende Fragestellungen:

1. Welche Optionen bestehen, um in 2050 eine mindestens 95 %ige Minderung von Treibhausgasemissionen zu erreichen?
2. Wie kann bzw. muss der Weg dorthin gestaltet werden?
3. Welcher Rohstoffkonsum ist mit den Transformationswegen verbunden?

Zur Beantwortung der Fragen wurden in enger Zusammenarbeit zwischen dem Umweltbundesamt und der Autorenschaft insgesamt sechs Szenarien entworfen, die unterschiedliche Ambitionsniveaus und Veränderungsgeschwindigkeiten beinhalten. Die folgende Tabelle Z- 1 zeigt die Green-Szenarien und ihre jeweiligen Ambitionsniveaus im Vergleich. Das Umweltbundesamt hat auf den Arbeiten dieses Projektes aufbauend auch entsprechende Publikationen erstellt, siehe www.uba.de/rescue-projekt. Dieser Bericht dokumentiert das Szenario Germany – Resource efficient and Greenhouse gas neutral – Lifestyle changes, kurz: GreenLife.

Tabelle Z- 1: Das Ambitionsniveau der Green-Szenarien im Vergleich

	GreenEe1	GreenEe2	Green-Late	GreenMe	GreenLife	Green-Supreme
Energieeffizienz	Sehr hoch	Sehr hoch	Mittel	Sehr hoch	Sehr hoch	Sehr hoch
Materialeffizienz	Hoch	Hoch	Mittel	Sehr hoch	Hoch	Sehr hoch
Technikinnovation	Hoch	Hoch	Gering	Sehr hoch	Hoch	Sehr hoch
Nachhaltiges Handeln	Mittel	Mittel	Gering	Mittel	Sehr hoch	Sehr hoch
Wachstumsbefreiung	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Sehr hoch
Ausgleich des globalen Technologieniveaus	Niedrig	Niedrig	Niedrig	Hoch	Niedrig	Hoch

	GreenEe1	GreenEe2	Green-Late	GreenMe	GreenLife	Green-Supreme
Verringerung der Flächenneuersiegelung	Hoch	Hoch	Hoch	Hoch	Sehr hoch	Sehr hoch
Klimaschutzbestreben im Pfad	Hoch	Hoch	Niedrig	Hoch	Hoch	Sehr hoch

Quelle: eigene Darstellung auf der Basis von UBA (2019a)

Ausrichtung des Szenarios GreenLife

Wie alle Green-Szenarien beschreibt auch das GreenLife-Szenario eine Transformation zu einem treibhausgasneutralen Deutschland in 2050. GreenLife zeichnet sich durch ambitionierte Änderungen im Lebensstil der Menschen in Deutschland aus. Dies betrifft alle Bereiche des Konsumverhaltens. Dazu gehört eine Ernährungsweise, die weniger tierische Produkte als in den GreenEe-Szenarien und mehr regionale Produkte beinhaltet. Menschen ändern ferner ihr Mobilitätsverhalten, sie nutzen treibhausgasintensive Verkehrsträger seltener und anstelle dessen stärker Angebote des ÖPNV und von Sharing-Diensten. Auch Fernreisen werden weniger nachgefragt. Menschen leben in kleineren Wohnungen und kaufen vermehrt nachhaltige und langlebige Produkte. Menschen sparen im Vergleich zu den GreenEe-Szenarien zusätzlich Energie und verursachen weniger Abfälle.

Die Einsparungen an Treibhausgasemissionen (insbesondere im Vergleich zu GreenEe 2 bei vergleichbarem Außenhandel) werden somit durch das Konsumverhalten direkt bzw. indirekt in Folge von Konsumänderungen verursacht. Die technische Transformation ist identisch zu denen der GreenEe-Szenarien.

In GreenLife verläuft die technologische Entwicklung im Rest der Welt wie bei GreenEe. Während sich die europäischen Länder wie Deutschland zu einer treibhausgasneutralen Wirtschaftsweise weiterentwickeln, verläuft die Transformation außerhalb Europas ambitioniert, jedoch etwas langsamer. Der Rest der Welt erreicht den technologischen Stand von Deutschland und Europa mit zehn Jahre Verzug erst in 2060.

Wie in GreenMe sind die Produktionsmengen wichtiger Basisindustrien (wie Eisen & Stahl bzw. Zement) nicht vorgegeben, sondern sie werden auf der Basis der angenommenen Nachfrageänderungen ermittelt. Dadurch verzeichnet Deutschland, im Gegensatz zu GreenEe1 und GreenLate, keinen ansteigenden Handelsüberschuss.

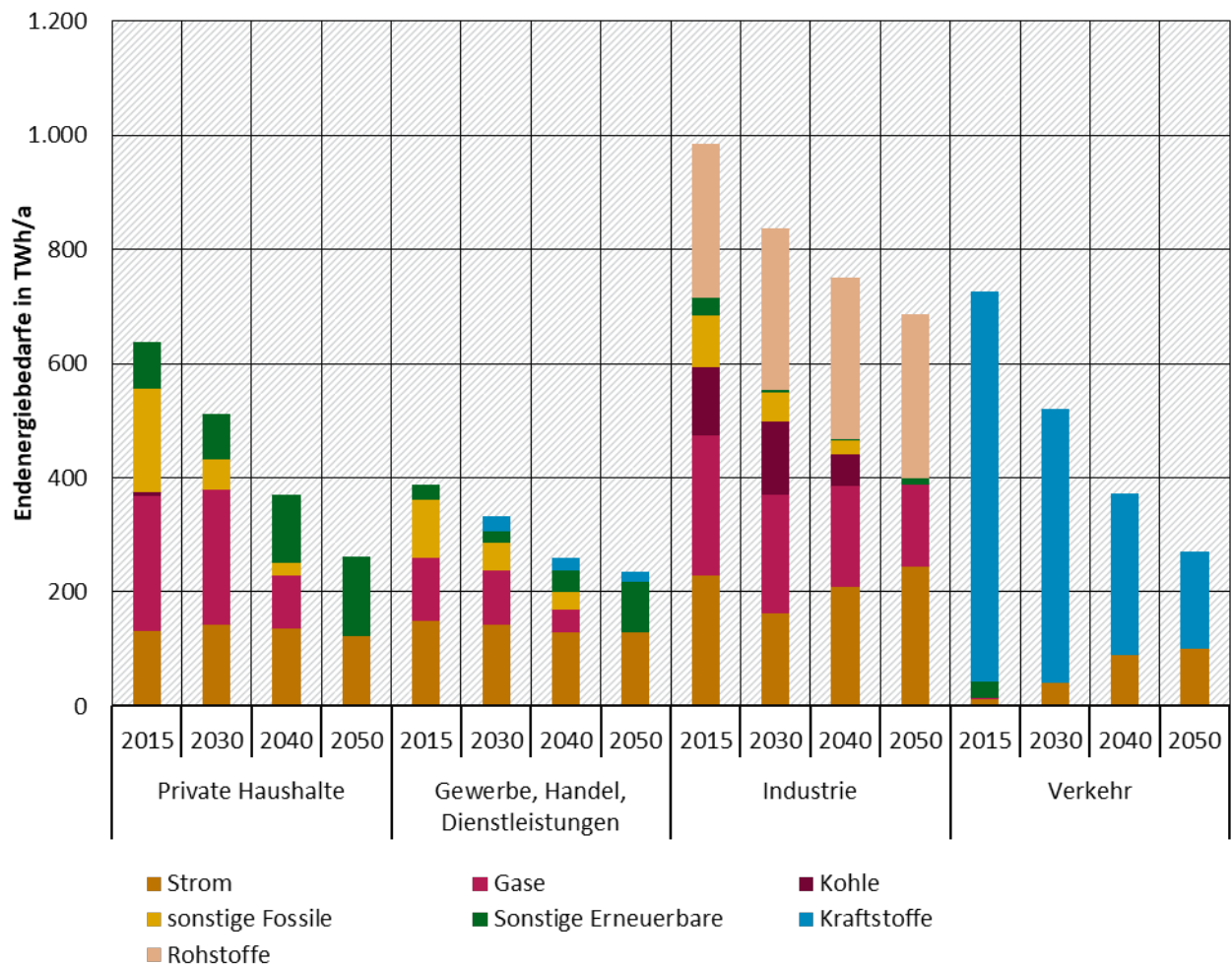
GreenLife beschreibt somit im Vergleich zu anderen Green-Szenarien den Pfad mit den höchsten Änderungen der Konsumweise der Menschen in Deutschland, Ausnahme ist das Szenario GreenSupreme. Die Ergebnisse quantifizieren die geringeren Energie- und Rohstoffbedarfe und die geringeren Treibhausgasemissionen, die sich aus einer Umstellung auf eine nachhaltigere Lebensweise ergeben. (Für eine ausführliche Beschreibung des Narrativ siehe UBA (2019a)).

Wesentliche Ergebnisse

Energie

Im GreenLife-Szenario sinkt der Endenergiebedarf in 2050 auf 1.454 TWh. Den größten Anteil von 47,2 % mit 686 TWh verbraucht die Industrie, 286 TWh davon für rohstoffliche Verwendung in der Chemieindustrie, gefolgt von den privaten Haushalten (17,9 %), dem Verkehr (18,6 %) und GHD (16,2 %).

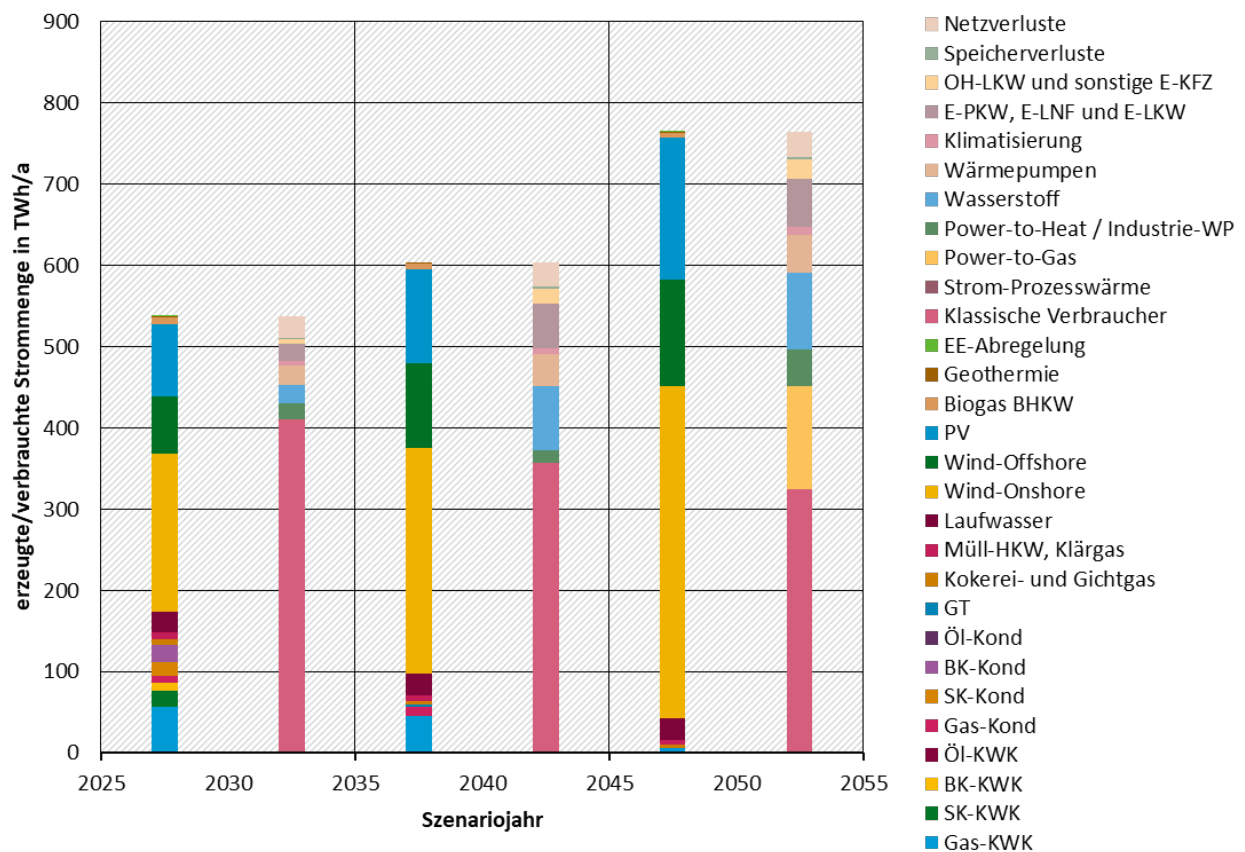
Abbildung Z- 1: Entwicklung der Endenergiebedarfe in GreenLife



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG - SCOPE

Die nationale Nettostromerzeugung steigt kontinuierlich auf insgesamt 765 TWh in 2050, und wird in dem Jahr ausschließlich mit erneuerbaren Energien produziert. Windkraftanlagen on- und offshore sowie Photovoltaik sind die dominanten Techniken, die im Transformationspfad kontinuierlich ausgebaut werden. In 2050 liegt die installierte Leistung bei rund 127 GW Windkraftanlagen onshore, gut 30 GW Windkraftanlagen offshore sowie 167,6 GW Photovoltaikanlagen.

Abbildung Z- 2: Nettostromerzeugung und Verbrauch Deutschland in GreenLife



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG - SCOPE

Aus dem Vergleich mit GreenEe2 (Dittrich et al. 2020a) wird deutlich, dass eine etwas geringere nationale Stromerzeugung notwendig wird (langfristig – 22 TWh gegenüber GreenEe2). Der geringere Stromverbrauch ist bedingt durch die unterstellten Verhaltensänderung vor allen auf weniger Elektromobilität und an zweiter Stelle durch weniger Wärmepumpenstromverbrauch und herkömmlichen Stromverbrauch zurück zu führen ist, während der PtH-Stromverbrauch sogar steigt (der geringere Stromverbrauch in Summe ermöglicht durch einen kostengünstigen EE-Ausbau eine höhere Direktstromnutzung in mehr Stunden des Jahres und der Einsatz von Gaskessel insbesondere im Hochtemperaturbereich kann weiter zurück gedrängt werden).

Im Vergleich zu GreenEe2 ist der langfristige Brennstoffbedarf deutlich geringer (-63 TWh in 2050), wodurch sich die langfristigen deutlichen Einsparungen durch die Lebensstiländerung zeigen. In GreenLife wurde weniger Strom in Anwendungen der Direktstromnutzung (mit Ausnahme von PtH) verbraucht. Deswegen können die kostengünstigen Erzeugungspotenziale genutzt werden, um so auch national auf Basis von Power to Gas Methan zu erzeugen. Das Verhältnis zwischen PtG/L-Importen zu nationaler PtG/L-Erzeugung ist deswegen langfristig mit 78,3 % weniger importabhängig als in GreenEe2 mit 81 %.

Im Gebäudewärmebereich steigt die bewohnte Pro-Kopf Wohnfläche wie im GreenEe1 ebenfalls bis zum Jahr 2030 weiter an, liegt 2030 jedoch mit 46 m²/Kopf auf einem niedrigeren Niveau und sinkt anschließend bis 2050 auf 41 m²/Kopf. Die resultierende Gesamtwohnfläche ist deutlich rückläufig ist und liegt in 2050 bei knapp 3 Mrd. m² bzw. rund 15 % niedriger als in den Green-Szenarien. Der Endenergieverbrauch für Raumwärme von Wohngebäuden liegt um 20 % niedriger als in den GreenEe-Szenarien. Hauptsächlich zurückzuführen ist dieses auf die niedrige

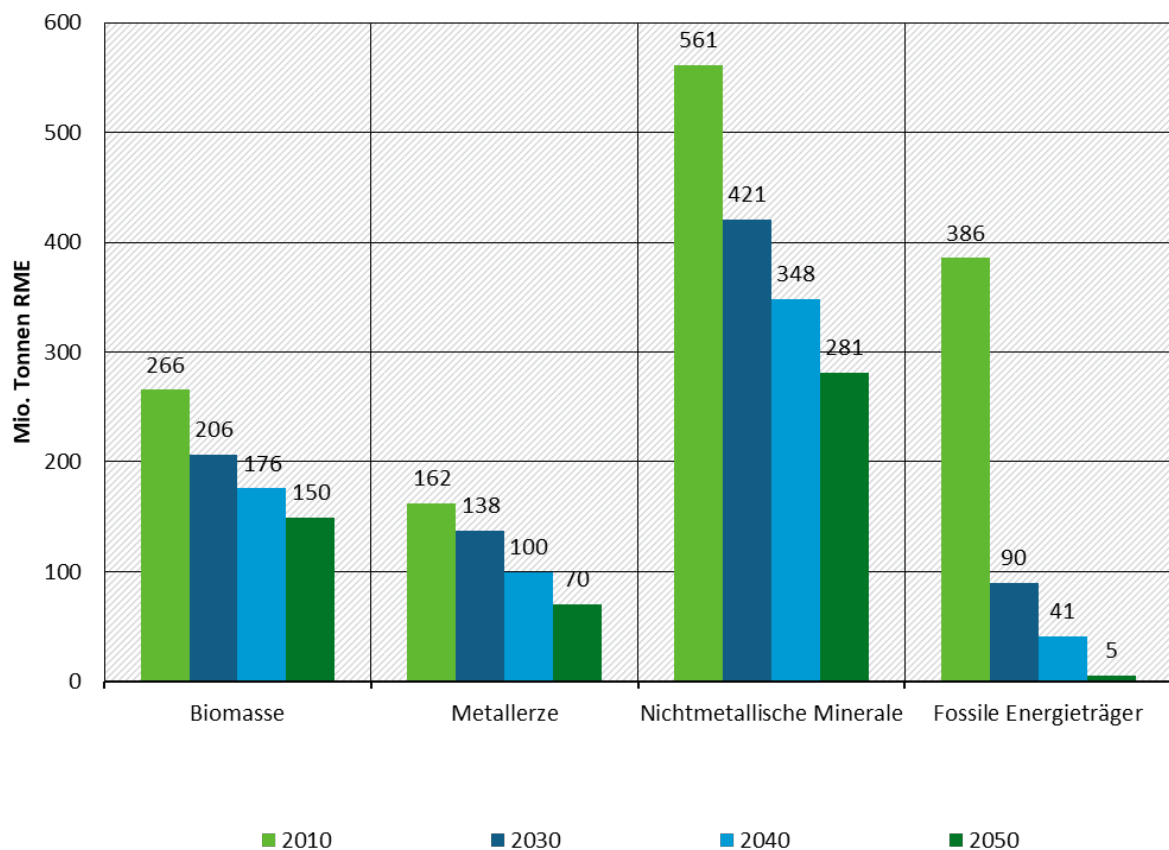
Wohnfläche und den niedrigeren Anteil der Flächen in Ein- und Zweifamilienhäusern (EFH) gegenüber dem Anteil der Flächen in Mehrfamilienhäusern (MFH). Da die Unterschiede im Nichtwohngebäudebereich gering sind, ist der Endenergiebedarf in Summe für alle Gebäude um 15 % geringer als in den GreenEe-Szenarien. Durch den höheren Mehrfamilienhausanteil und die Verstädterung stieg auch der Anteil von Fernwärme von 20 % auf 24 %. Der Rest der Gebäude wird mit Wärmepumpen versorgt.

Im Verkehrssektor liegt der Endenergieverbrauch in 2050 bei insgesamt 232 TWh, 176 TWh entfallen auf den nationalen Verkehr und 57 TWh auf den internationalen Verkehr. Aufgrund der starken Rückgänge liegen die Verbräuche im motorisierten Individualverkehr (75 TWh in 2050 ggü. 384 TWh in 2010), schon nahe am Straßengüterverkehr (67 TWh) gefolgt vom internationalen Flugverkehr, der dagegen einen starken Rückgang aufweist. Es zeigt sich, dass in GreenLife der nationale Verkehr im Jahr 2030 zwar nur 3 % weniger Endenergie benötigt als in GreenEe2 aber bis 2050 diese Endenergieeinsparung auf 9 % steigt. Durch die hohe Durchdringung mit effizienter Elektromobilität fallen die Effekte noch relativ gering aus. Im internationalen Verkehr führen die verhaltensändernden Maßnahmen durch die Bindung an PtL zu noch viel deutlicheren Endenergieeinsparungen um 7 % (2030) bis 38 % (2050). Insgesamt werden im Jahr 2030 in GreenLife etwa 5 % weniger Kraftstoffe benötigt als in GreenEe2. Im Jahr 2050 werden in GreenLife 14 % weniger Strom benötigt, aber der Kraftstoffbedarf ist um 16 % (national) bzw. 27 % (Summe national und international) geringer als in den GreenEe2.

Rohstoffe

Die Transformation in GreenLife führt zu einer Reduktion des Primärrohstoffkonsums (Raw Material Consumption (RMC)) um 63,2 % gegenüber 2010 auf insgesamt 506,0 Mio. Tonnen Rohstoffäquivalente (RME). Der stärkste Rückgang ist bei den fossilen Energieträgern zu finden, die um 98,6 % zurückgehen. Dabei ist der Rückgang zwischen 2010 und 2030 besonders hoch (76,7 %). Im Ausland werden annahmegemäß im Jahr 2050 weiterhin fossilen Energieträger verwendet, dies spiegelt sich in den fossilen Rohstoffen der letzten inländischen Verwendung (RMC) wider. Der RMC für nicht-metallische Minerale vermindert sich zwischen 2010 und 2050 um 56,8 %. Der drittstärkste Rückgang bis 2050 (49,9 %) ist bei den Metallerzen zu verzeichnen, der Konsum von Biomasse sinkt im selben Zeitraum um 43,7 %. Der Rückgang des RMC verläuft bei den fossilen Rohstoffen zwischen 2010 und 2030 sprunghaft, bei allen anderen Rohstoffgruppen jedoch stetig.

Abbildung Z- 3: Primärrohstoffkonsum (RMC) nach Rohstoffarten, 2010 bis 2050



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG - URMOD

Die Gesamtrohstoffproduktivität (letzte Verwendung / Rohmaterialinput) steigt zwischen 2010 und 2030 [2030 bis 2040 / 2040 bis 2050] um 3,1 % [2,7 %/2,6 %] im Jahresdurchschnitt. In 2050 liegt sie um 334 Indexpunkte im Vergleich zum Jahr 1994 höher.

Der Pro-Kopf-Konsum von Primärrohstoffen sinkt auf 7,04 Tonnen pro Person in 2050, dies entspricht mehr als einer Halbierung im Vergleich zu 2010 (-58,1 %).

Der Primärrohstoffkonsum der privaten Haushalte sinkt auf 207 Mio. Tonnen RME in 2050. Das Bedürfnisfeld Ernährung ist in 2050 das rohstoffintensivste mit 95,9 Mio. Tonnen RME, gefolgt vom Bedürfnisfeld Freizeit und Tourismus (40,3 Mio. t RME) und Wohnen und Haushalt (38,9 Mio. t RME).

Im Zeitraum zwischen 2010 und 2050 kumuliert sich der Konsum von Primärrohstoffen auf insgesamt fast 37,8 Mrd. Tonnen RME. Den größten Anteil daran haben die nicht-metallischen Mineralien (47,4 %), gefolgt von biotischen Materialien (24,1 %) und fossilen Rohstoffen (16,8 %).

Durch die stoffliche Wiederverwertung können insgesamt (mindestens) 227 Mio. Tonnen Primärrohstoffe in 2050 eingespart werden, dies entspricht einem Anteil von 31 % am gesamten Rohstoffkonsum (primär und sekundär).

Im Vergleich zur Transformation in GreenEe2 führt die Transformation in GreenLife zu einem niedrigeren Rohstoffkonsum. In 2050 liegt der RMC um insgesamt 3,8 % niedriger. Der Unterschied ist bei den fossilen Rohstoffen in 2030 und bei den Metallerzen in 2050 besonders

ausgeprägt. In Folge des geringeren RMC liegt der Rohstoffkonsum pro Person in 2050 um 3,8 % niedriger als bei GreenEe2. Die zwischen 2010 und 2050 kumulierte Nachfrage nach Primärrohstoffen ist in GreenLife 3,0 % niedriger als in GreenEe1.

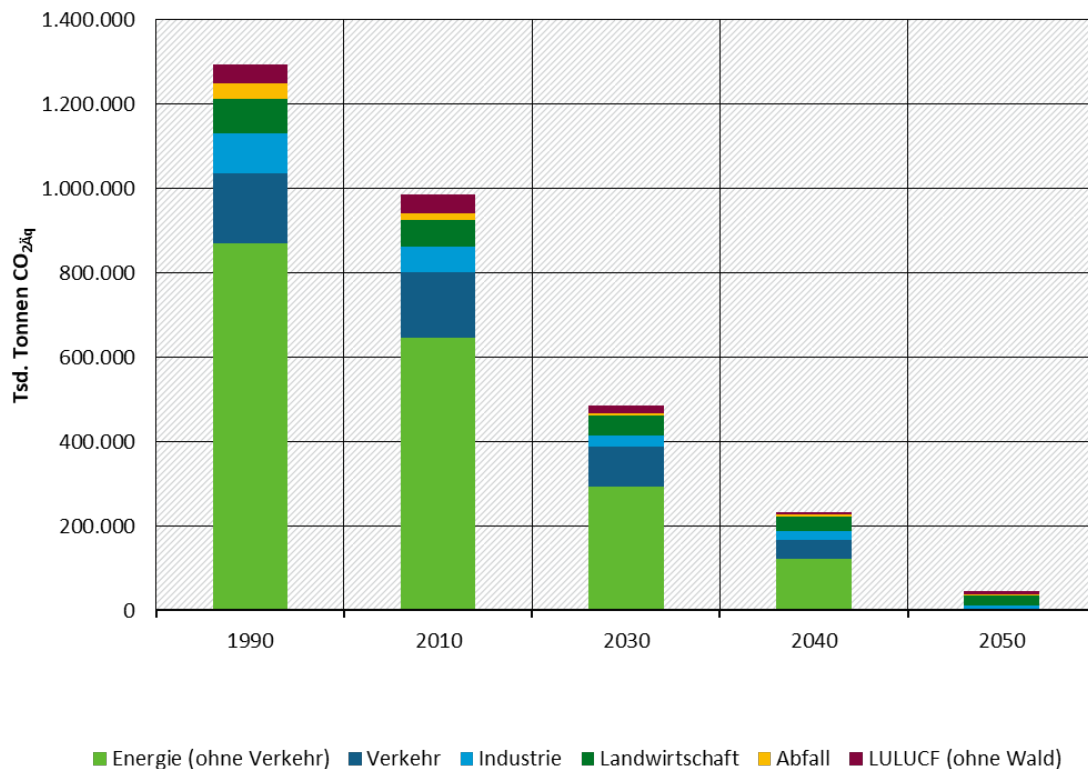
In GreenLife werden eine Vielzahl von Metallen sowohl im Pfad als auch kumuliert bis 2050 in einer geringeren Menge als in den GreenEe-Szenarien nachgefragt. Durch die raschere Verbreitung von Elektroautos ist allerdings in 2030 die Nachfrage nach Rohstoffen, die für Batterien benötigt werden, höher. In 2050 liegt bei Zinn, PGM und Lithium die letzte inländische Nachfrage aus Deutschland bei konstanten Produktionsmengen höher als der Anteil der deutschen Bevölkerung an der Weltbevölkerung. Die von Deutschland übermäßig nachgefragten Rohstoffe sind folglich dieselben wie die in den GreenEe-Szenarien, nur das Ausmaß der überdurchschnittlichen Nachfrage ist geringer.

Treibhausgasemissionen

Im GreenLife-Szenario sinken die THG-Emissionen – gerechnet nach NIR – auf 44,495 Mio. t CO_{2Äq} in 2050 und gehen damit um 96,6 % gegenüber 1990 (UBA 2019a) zurück (Abbildung Z- 4). In 2050 ist unter Einbeziehung der natürlichen Senken (LULUCF) Treibhausgasneutralität sicher erreichbar. Bis 2030 [2040] liegt der Rückgang der THG-Emissionen bei 62,4 % [82 %]. Die höchsten Rückgänge bis 2030 verzeichnet die Abfallwirtschaft (84,5 %). Demgegenüber steht die Landwirtschaft, deren THG-Emissionen bis 2030 nur um 41,5 % gegenüber 1990 zurückgehen. In 2050 ist der Energiesektor, einschließlich Verkehr, treibhausgasneutral und die Rückgänge gegenüber 1990 liegen dementsprechend bei 100 %. Auch die THG-Emissionen der Abfallwirtschaft, LULUCF (ohne Wald) und der Industrie sinken bis 2050 stark mit Rückgängen von 93,4 %, 85,6 % und 88 %. Die geringsten Rückgänge finden sich im Sektor Landwirtschaft mit nur 70 %.

Nachrichtlich sind ferner THG-Emissionen des internationalen Verkehrs zu nennen. Im Verkehr setzen sich die THG-Emissionen aus den THG-Emissionen der internationalen Seeschifffahrt und des Flugverkehrs zusammen. Bis 2030 sinken diese auf insgesamt 28,3 Mio. t CO_{2Äq}. In 2040 und 2050 wird der internationale Verkehr vollständig mit synthetischen erneuerbaren Kraftstoffen versorgt und verursacht bilanziell keine Treibhausgasemissionen.

Abbildung Z- 4: Treibhausgasemissionen nach Quellgruppen, 1990 bis 2050



Quellen: UBA (2019b) 1990-2016, ifeu/IEE/SSG 2017-2050, eigene Darstellung

Die prozessbedingten THG-Emissionen aus der Industrie betragen im Jahr 2050 insgesamt 11,6 Mio. t CO₂Äq. Dabei sind in allen Industriezweigen Rückgänge bereits über den Pfad zu verzeichnen. In 2050 dominieren die THG-Emissionen der Zementindustrie diese mit 58,5 %, gefolgt von der Kalk-, Chemie- und Glasindustrie (30 %, 5,2 % und 4 %). Die Metallindustrie (ohne Eisen) sowie der Gießerei-, Textil-, Nahrungsmittel und Papierindustrie emittieren in 2050 keine THG-Emissionen mehr. Zusätzlich entstehen fluorierter Treibhausgase. Sie gehen bis 2050 auf insgesamt 1,2 Mio. t CO₂Äq zurück. Die THG-Emissionen von Lösemitteln und anderen Produktanwendungen gehen auf insgesamt 0,76 Mio. t CO₂Äq in 2050 zurück. Ferner verursacht Lachgas THG-Emissionen von 0,013 Mio. t CO₂Äq.

Insgesamt kommt es zu einem Rückgang der THG-Emissionen aus der Landwirtschaft um 70 % in 2050 gegenüber 1990. Der größte absolute Rückgang geht dabei auf die Tierhaltung zurück (26,3 Mio. t CO₂Äq), der größte prozentuale Rückgang verzeichnet das veränderte Wirtschaftsdüngermanagement (92,4 %). Die THG-Emissionen im Abfallsektor gehen auf 2,5 Mio. t CO₂Äq in 2050 zurück. Etwa die Hälfte der THG-Emissionen in 2050 entstammt den Kläranlagen. Die THG-Emissionen der Quellgruppe LULUCF (ohne Wald) gehen auf insgesamt 6,5 Mio. t CO₂Äq in 2050 zurück. Die verbleibenden THG-Emissionen werden auf Acker- und Grünland sowie auf Siedlungsflächen verursacht.

Die THG-Emissionen, die Deutschland zwischen 1990 und 2016 (nach NIR) emittiert hat, summieren sich auf insgesamt 28,96 Mrd. t CO₂Äq. Bis 2050 kommen im Szenario GreenLife weitere 14,6 Mrd. t CO₂Äq hinzu. Der Großteil von 9,84 Mrd. t entsteht im Zeitraum bis 2030. 63 % der kumulierten THG-Emissionen zwischen 1990 und 2050 sind energiebedingt (ohne Verkehr), 16,6 % entstammen dem Verkehr. Auf die Industrie entfallen 7,2 % und auf die

Landwirtschaft 7,5 % der kumulierten THG-Emissionen bis 2050. Zwischen 2010 und 2050 werden nach Abschätzung auf Basis des WEHAM-Szenario Naturschutz insgesamt mindestens 0,99 Mrd. t CO₂ im Wald gebunden. Dies entspricht einem Anteil von 6,8 % der kumulierten THG-Emissionen zwischen 2010 und 2050.

Auch die THG-Emissionen, die der deutsche Konsum verursacht, sind rückläufig. Der private und öffentliche Konsum sowie die Investitionen (letzte inländische Verwendung Deutschlands) verursachen weltweit in 2050 [2030/2040] nur noch 66 [464/219] Mio. t CO₂Äq, was einem Rückgang von 94,8 % gegenüber 2010 entspricht (gerechnet nach dem UGR-Konzept). In den Stützjahren dominieren die energiebedingten THG-Emissionen die Güter der letzten Verwendung. Erst in 2050 liegen die nicht-energetischen THG-Emissionen höher als die energiebedingten THG-Emissionen.

Im GreenLife-Szenario entstehen somit weniger THG-Emissionen als im GreenEe1-Szenario. So werden in 2050 [2030/2040] insgesamt 17,6 % [5,7 %/9,3 %] weniger Treibhausgase nach NIR emittiert als in GreenEe1. Ein wichtiger Unterschied liegt in der Reduktion der inländischen Produktion, die insbesondere die THG-Emissionen aus den Quellgruppen Energie, Verkehr und Industrie reduziert. Nur auf die Änderungen der Lebensstile entfallen insgesamt 3,0/3,6 bzw. 6,5 % Reduktion der Treibhausgasemissionen in 2030/2040 bzw. 2050, wie der Vergleich mit GreenEe2 zeigt. Die Nachfrageänderungen reduzieren insbesondere die Treibhausgase in den Quellgruppen Landwirtschaft und Abfall. Die kumulierten Treibhausgase zwischen 1990 und 2050 liegen in Folge in GreenLife um 0,65 Mrd. Tonnen CO₂Äq (1,6 %) niedriger als in GreenEe1.

Das GreenLife-Szenario zeigt, dass ambitionierte Konsumänderungen, neben notwendigen technischen Änderungen, einen wichtigen Beitrag zur zusätzlichen Minderung von Treibhausgasemissionen und Primärrohstoffnachfrage leisten können.

Summary

Background and objectives

Climate change is a key challenge of today. The international community, including Germany, is committed to limiting the temperature rise to below 2 degrees. This means that Germany must significantly reduce greenhouse gas emissions and achieve practically greenhouse gas neutrality. Greenhouse gas neutrality is defined in the RESCUE project as a reduction of greenhouse gas emissions by (at least) 95 % in 2050 compared to 1990. A reduction to such an extent is only possible if GHG emissions are reduced in all sectors. Energy supply affecting all areas of the economy needs to be fundamentally transformed. In addition, natural resources must be used much more sparingly than today in all areas of the economy. This is where the RESCUE (Resource-Efficient Pathways towards Greenhouse-Gas-Neutrality) project comes in. RESCUE examines the following questions:

1. What options exist to achieve at least a 95 % reduction in greenhouse gas emissions in 2050?
2. How can the transformation towards GHG-neutrality be designed?
3. Which raw material consumption is associated with the transformation pathways?

In order to answer the questions, a total of six scenarios were developed in close cooperation between the Federal Environment Agency and the authors of this study. The scenarios imply different levels of ambition and rates of change. The following Table Z- 1 shows the 'Green' scenarios and their respective ambition levels in comparison. The Federal Environment Agency has also created corresponding publications based on the work of this project, see www.uba.de/rescue-projekt. This report documents the scenario "Germany – Resource-Efficient and Greenhouse Gas-Neutral - Lifestyle changes", in short: GreenLife.

Table Z- 1: The level of ambition of the 'Green' scenarios in comparison

	GreenEe1	GreenEe2	Green-Late	GreenMe	GreenLife	Green-Supreme
Energy efficiency	Very high	Very high	Medium	Very high	Very high	Very high
Material efficiency	High	High	Medium	Very high	High	Very high
Technological innovation	High	High	Gering	Very high	High	Very high
Sustainable action	Medium	Medium	Gering	Medium	Very high	Very high
Economic growth restraint	Medium	Medium	Medium	Medium	Medium	Very high
Alignment of global technical development	Low	Low	Low	High	Low	High
Reduction of new soil sealing	High	High	High	High	Very high	Very high
Climate protection efforts before 2050	High	High	Low	High	High	Very high

Source: own illustration based on UBA (2019a)

Narrative of the GreenLife scenario

As all Green scenarios, the GreenLife scenario describes a transformation to a greenhouse gas neutral Germany in 2050. GreenLife is characterized by ambitious changes in the lifestyle of people in Germany. This affects all areas of consumer behavior and includes a diet that contains more regional products and fewer animal products than in the GreenEe scenarios. People also change their mobility behavior. They reduce the use of greenhouse gas-intensive modes of transport and increase the use of public transport and sharing services. Demand for long-distance travel is also lower. People live in smaller apartments and increasingly buy sustainable and durable products. Compared to the GreenEe scenarios, people save additional energy and cause less waste.

The savings in greenhouse gas emissions (especially compared to GreenEe 2 with comparable foreign trade) are thus caused by consumer behavior directly or indirectly as a result of changes in consumption. The technical transformation is identical to that of the GreenEe scenarios.

In GreenLife, technological development in the rest of the world is the same as for GreenEe. While European countries such as Germany develop into a greenhouse gas-neutral economy, the transformation outside Europe is ambitious, but somewhat slower. The rest of the world will reach the technological level of Germany and Europe with a ten-year delay in 2060.

As in GreenMe, the production quantities from important basic industries (such as iron & steel or cement) are not specified, but are determined on the basis of the assumed changes in demand. As a result, Germany, unlike GreenEe1 and GreenLate, does not have an increasing trade surplus.

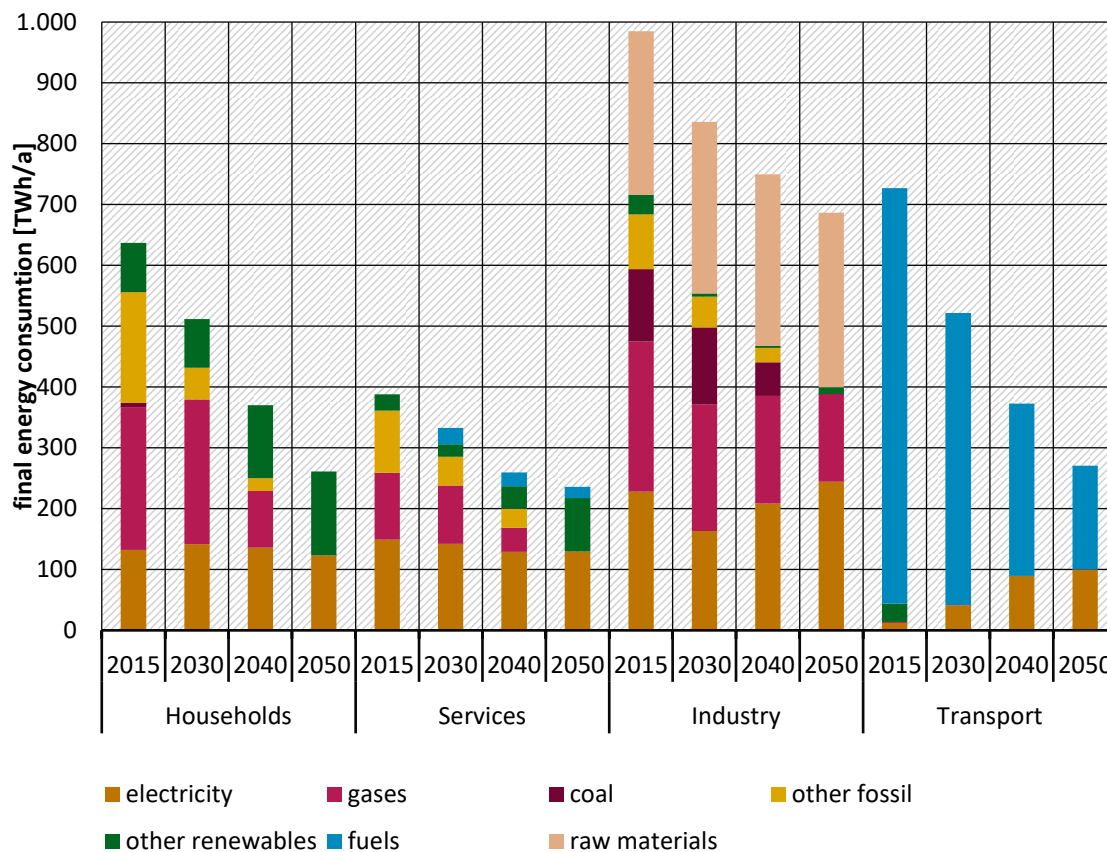
In comparison to other 'Green' scenarios, GreenLife describes the path with the greatest changes in the way people consume in Germany, with the exception of the GreenSupreme scenario. The results quantify the lower energy and raw material requirements and the lower greenhouse gas emissions resulting from a transition to a more sustainable lifestyle. (For a detailed description of the narrative see UBA (2019a)).

Main results

Power

In the scenario GreenLife, final energy demand will decrease to 1,454 TWh in 2050. The largest share of 47.2 % and 686 TWh is consumed by industry, of which 286 TWh are used as raw material in the chemical industry. This is followed by private households (17.9 %), transport (18.6 %) and GHD (16, 2 %).

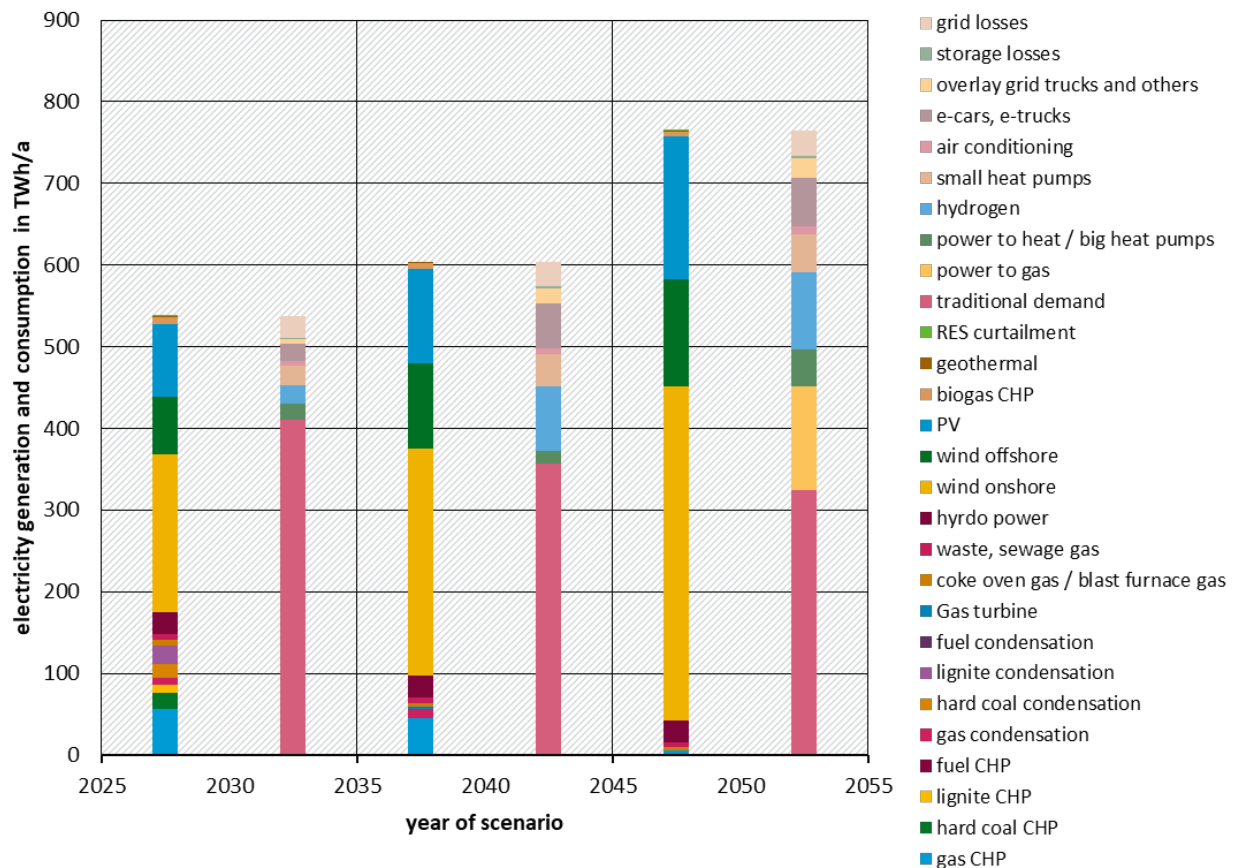
Figure Z- 1: Development of final energy consumption in GreenLife



Source: own illustration, modeling results from ifeu/IEE/SSG – SCOPE

National net electricity generation increases continuously to a total of 765 TWh in 2050. Electricity is produced exclusively from renewable sources in 2050. Onshore and offshore wind turbines and photovoltaics are the dominant technologies that are continuously being expanded in the transformation period. In 2050, the installed capacity will be around 127 GW from onshore wind turbines, 30 GW from offshore wind turbines and 167.6 GW from photovoltaic systems.

Figure Z- 2: Electricity generation and consumption in Germany, GreenLife



Source: own illustration, modeling results from ifeu/IEE/SSG - SCOPE

In comparison with GreenEe2 (see Dittrich et al. (2020a)), national electricity generation is slightly lower (longterm - 22 TWh compared to GreenEe2). The decrease is due to the assumed behavior change and is caused by less electric mobility, less heat pump power consumption and less conventional power consumption, while PtH power consumption even increases. (Lower power consumption in total results in less costs for the expansion of renewable energies and enables more hours of direct electricity use. The use of gas boilers, in particular for the high temperature range, can be reduced further.)

Compared to GreenEe2, long-term fuel consumption is significantly lower (-63 TWh in 2050), which shows the significant longterm savings from the lifestyle change. In GreenLife, less electricity is used directly (with the exception of PtH). That is why inexpensive electricity can be used to generate methane (Power to Gas) also domestically. The import dependency for PtG/L is therefore lower than in GreenEe2 the ratio of PtG/L imports to domestic production being 78.3 % while it is 81 % in GreenEe2.

In the building sector, the living space per capita will continue to increase until 2030, as in GreenEe1. However, it will be at a lower level in 2030 with 46 m² per capita and it will decrease to 41 m² per capita by 2050. Total living space declines to just under 3 billion m² by 2050, being around 15 % lower than in the GreenEe scenarios. Final energy consumption for heating in residential buildings is 20 % lower than in the GreenEe scenarios. This is mainly due to less total living space and a greater role of apartment buildings (MFH) opposed to one- and two-family houses (EFH). Since the differences for non-residential buildings are small, total energy consumption for all buildings is 15 % lower than in the GreenEe scenarios. Due to the higher

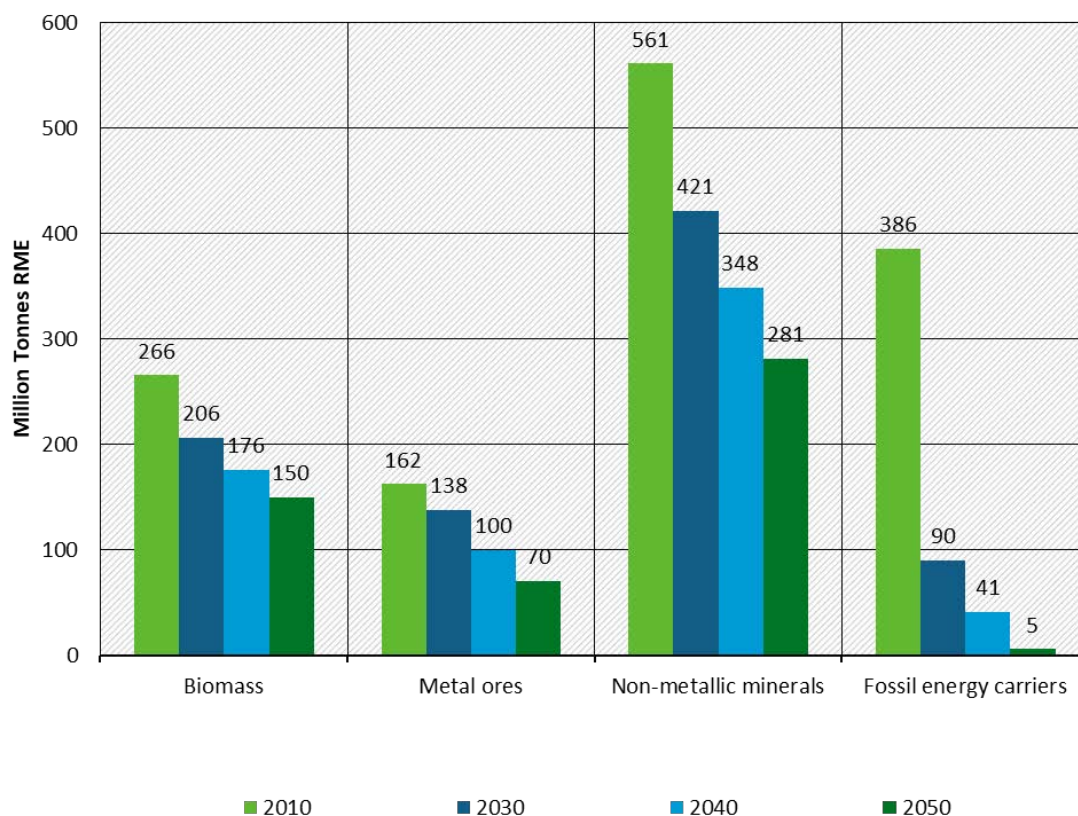
proportion of apartment building and urbanization, the share of district heating increases from 20 % to 24 %. The remaining buildings are supplied with heat pumps.

In 2050, final energy consumption of the transport sector will be 232 TWh, 176 TWh for national and 57 TWh for international traffic. Due to the sharp decline, energy demand of motorized private transport (75 TWh in 2050 vs. 384 TWh in 2010) is almost the same as energy demand of road freight transport (67 TWh), followed by international air traffic also showing a sharp decline. In sum, by 2030 final energy demand of national transport is only 3 % lower than in GreenEe2, but the difference increases to 9 % by 2050. Due to the high share of efficient electric vehicles, the effects remain comparatively small. For international traffic, the behavior changes have a larger effect due to the use of less-efficient PtL. Final energy demand is reduced by 7 % in 2030 and 38 % by 2050 compared to GreenEe2. Total fuel consumption is reduced by 5 % in 2030. In 2050, electricity demand is reduced by 14 % and fuel consumption by 16 % (national) and 27 % (total national and international) compared to GreenEe2.

Raw material use

The transformation in GreenLife leads to a 63.2 % reduction in raw material consumption (RMC) compared to 2010 to a total of 506.0 million tonnes of raw material equivalents (RME). The greatest decline is found in fossil fuels, which decrease by 98.6 %. The decline between 2010 and 2030 is particularly high (76.7 %). It is assumed that fossil fuels continue to be used abroad in 2050, which is reflected in the small amount of fossil fuels still present in the RMC. The RMC for non-metallic minerals will decrease by 56.8 % between 2010 and 2050. The third largest decrease by 2050 is in metal ores (-49.9 %), the consumption of biomass drops by 43.7 % in the same period. The decline of the RMC between 2010 and 2030 is unsteady for fossil fuels, but steady for all other raw material groups.

Figure Z- 3: Raw material consumption (RMC) by raw material groups, 2010 to 2050



Source: own illustration, modeling results from ifeu/IEE/SSG – URMOD

In the period from 2010 to 2030, total raw material productivity (final use / raw material input) increases [2030 to 2040/2040 to 2050] by 3.1 % [2.7 % / 2.6 %] annually on average. In 2050, it is 334 index points higher than in 1994. Per capita consumption of primary raw materials decreases to 7.04 tonnes in 2050, less than half compared to 2010 (-58.1 %). Primary raw material consumption of private households drops to 207 million tons RME in 2050. In 2050, food is the most resource-intensive area of need with 95.9 million tons RME, followed by leisure and tourism (40.3 million tons RME) and housing and housekeeping (38.9 million t RME).

Between 2010 and 2050, cumulative consumption of primary raw materials sums up to 37.8 billion tons RME. Non-metallic minerals (47.4 %) have the largest share, followed by biomass (24.1 %) and fossil raw materials (16.8 %).

Material recycling can save a total of (at least) 227 million tons of primary raw materials in 2050, which corresponds to a share of 31 % of total raw material consumption (primary and secondary).

Compared to GreenEe2, the transformation in GreenLife leads to a lower consumption of raw materials. In 2050, the RMC is 3.8 % lower overall. The difference is particularly pronounced for fossil raw materials in 2030 and for metal ores in 2050. As a result of the lower RMC, raw material consumption per capita will be 3.8 % lower in 2050 compared to GreenEe2. Cumulative demand for primary raw materials between 2010 and 2050 is 3.0 % lower in GreenLife than in GreenEe1.

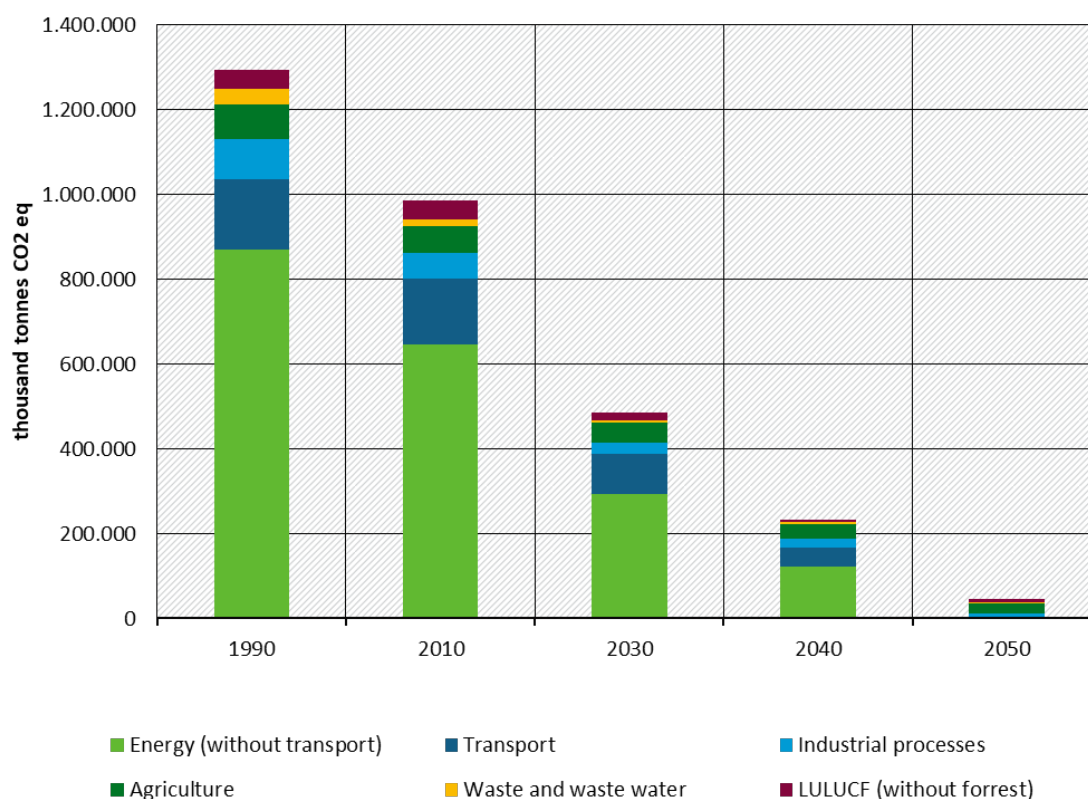
In GreenLife, demand for a large number of metals is lower both in the path and in a smaller amount in 2050 than in the GreenEe scenarios. However, due to the faster spread of electric cars, demand for raw materials for batteries will be higher in 2030. In 2050 the share of globally produced tin, PGM and lithium used by Germany (assuming constant production volumes) is higher than the share of the German population among the world population. Raw materials in excessive demand from Germany are consequently the same as those in the GreenEe scenarios, only the extent of the above-average demand is lower.

Greenhouse gas emissions

In GreenLife, GHG emissions - calculated according to NIR - drop to 44.495 million t CO_{2eq} in 2050 and thus decrease by -96.6 % compared to 1990 (UBA 2019a). In 2050, greenhouse gas neutrality can be achieved with certainty by including natural sinks (LULUCF). Until 2030, [2040] GHG emissions decrease by 62.4 % [82 %]. Waste management records the highest decline (84.5 %) by 2030. Emissions from agriculture, in contrast, only decrease by 41.5 % until 2030 compared to 1990. By 2050, the energy sector, including transport, is fully greenhouse gas neutral with a decline of GHG emissions by 100 %. GHG emissions from waste management, LULUCF (without forrest) and industry also decrease sharply by 2050 with declines of 93.4 %, 85.6 % and 88 %. The smallest decline is found in agriculture with only 70 %.

GHG emissions from international traffic, i.e. international shipping and aviation, should also be mentioned for information. By 2030, they decrease to a total of 28.3 million t CO_{2eq}. In 2040 and 2050, international traffic will be fully supplied with synthetic renewable fuels and will not cause any greenhouse gas emissions on the balance sheet.

Figure Z- 4: GHG emissions by source groups, 1990 – 2050



Sources: UBA (2019b) 1990-2016, ifeu/IEE/SSG 2017-2050, own illustration

Process-related GHG emissions from industry total 11.6 million t CO_{2eq} in 2050. Along the path, emissions are reduced in all branches of industry. In 2050, GHG emissions of the cement industry dominate with 58.5 %, followed by the lime, chemical and glass industries (30 %, 5.2 % and 4 %). The metal industry (without iron) as well as the foundry, textile, food and paper industries will no longer emit GHG in 2050. Fluorinated greenhouse gases decrease to a total of 1.2 million t CO_{2eq} by 2050. The GHG emissions of solvents and other product applications will decrease to a total of 0.76 million t CO_{2eq} in 2050. Nitrous oxide causes GHG emissions of 0.013 million t CO_{2eq}.

Overall, there is a 70 % reduction in GHG emissions from agriculture in 2050 compared to 1990. The largest absolute decrease is due to animal husbandry (26.3 million t CO_{2eq}), the largest percentage decrease is due to the change in manure management (92.4 %). GHG emissions from the waste sector decrease to 2.5 million t CO_{2eq} in 2050. Around half of the GHG emissions in 2050 come from sewage treatment plants. GHG emissions from LULUCF (without forests) total 6.5 million t CO_{2eq} in 2050. The remaining GHG emissions are caused on arable and grassland as well as on settlement areas.

Germany's cumulative GHG emissions between 1990 and 2016 (according to NIR) add up to a total of 28.96 billion t CO_{2eq}. Until 2050, additional 14.6 billion t CO_{2eq} are emitted in the GreenLife scenario. The majority of 9.84 billion t will be generated in the period up to 2030. 63 % of the cumulative GHG emissions between 1990 and 2050 are energy-related (without traffic), 16.6 % stem from traffic. Industry accounts for 7.2 % and agriculture for 7.5 % of the cumulative GHG emissions up to 2050. Between 2010 and 2050, based on the WEHAM nature

conservation scenario, at least 0.99 billion t CO₂ are absorbed by forests. This corresponds to a share of 6.8 % of cumulative GHG emissions between 2010 and 2050.

Germany's consumption-based GHG emissions also decline. Private and public consumption and investments (final domestic use) lead to emissions of 66 [464/219] million t CO_{2eq} worldwide in 2050 [2030/2040], which corresponds to a decrease by 94.8 % compared to 2010 (calculated according to the concept of environmentally-extended national accounts). In the years in between, the energy-related GHG emissions dominate. Only in 2050, non-energy emissions are higher than energy-related emissions.

In the GreenLife scenario, GHG emissions are lower than in the GreenEe1 scenario. In 2050 [2030/2040], 17.6 % [5.7 % / 9.3 %] less greenhouse gases are emitted according to NIR than in GreenEe1. An important difference is the reduction of domestic production, which reduces GHG emissions from energy production, transport and industry. The changes in lifestyle account for a 3.0/3.6/6.5 % reduction in greenhouse gas emissions in 2030/2040/2050. The changes in demand mainly lead to a reduction of emissions from agriculture and waste. As a result, cumulative greenhouse gas emissions between 1990 and 2050 are 0.65 billion tonnes CO_{2eq} (1.6 %) lower in GreenLife than in GreenEe1.

The GreenLife scenario shows that ambitious changes in consumption, in addition to necessary technological changes, can make an important contribution to additional reductions in greenhouse gas emissions and primary raw material demand.

1 Einleitung

1.1 Herausforderung Klimawandel und die Green-Szenarien

Der Klimawandel ist eine zentrale Herausforderung der Gegenwart. Die durchschnittliche globale Konzentration des Treibhausgases Kohlendioxid in der Atmosphäre lag 2018 bereits bei 407 ppm (UBA 2019c). Zum Vergleich: die vorindustrielle Kohlendioxidkonzentration lag bei 280 ppm. Die Auswirkungen des Klimawandels sind bereits in der Gegenwart spürbar. Je höher die Konzentration von Kohlendioxid und weiterer Treibhausgase ansteigt, desto stärker wird sich das weltweite Klima und in Folge die Lebensbedingungen in nahezu allen Ökosystemen auf der Erde ändern.

Die Staatengemeinschaft, darunter Deutschland, bekennt sich mit dem Übereinkommen von Paris dazu, den Temperaturanstieg auf unter 2 Grad zu begrenzen. Dieser Anstieg bedeutet bereits, dass manche Ökosysteme wie Korallenriffe kaum noch eine Überlebenschance haben, Wetterextreme zunehmen und sich das Leben der Menschen weltweit anpassen muss. Gleichzeitig besteht die Hoffnung, dass andere Ökosysteme wie tropische Regenwälder oder boreale Wälder überleben können und Kipppunkte, die zu sich selbst verstärkenden Prozessen der Klimaerwärmung führen, nicht überschritten werden. Mit einer Begrenzung des Temperaturanstiegs auf unter 2 Grad hofft man ebenso, dass die Anpassungsfähigkeit der Menschheit an die Veränderungen nicht überstrapaziert wird (UNFCCC 2015). Die Begrenzung des Temperaturanstiegs auf 2 Grad beinhaltet, dass Deutschland den Ausstoß von Treibhausgasen signifikant reduzieren und eine sogenannte Treibhausgasneutralität erreichen muss. Weitestgehende Treibhausgasneutralität bedeutet im Projekt RESCUE, dass im Jahr 2050 die Treibhausgasemissionen um (mindestens) 95 % gegenüber 1990 reduziert werden, vollständige Treibhausgasneutralität ist ein Rückgang der Treibhausgasemissionen um 100 %.

In den ersten 30 Jahren bis Ende 2019 konnten die Treibhausgasemissionen um 35,7 % gegenüber 1990 gesenkt werden, dies entspricht einer Emissionsreduktion von 447 Millionen Tonnen CO₂Äq in 2019 im Vergleich zu 1990 (UBA 2020). Wichtige Beiträge waren die Schließung von Kohlekraftwerken in der ehemaligen DDR und der Rückgang der Kohlenutzung im Zuge der Energiewende. In den anstehenden 30 Jahren müssen weitere 742 Millionen Tonnen Treibhausgase reduziert werden, um eine Treibhausgasneutralität zu erreichen.

Eine Reduktion in diesem Ausmaß ist nur möglich, wenn die THG-Emissionen in allen Sektoren verringert werden und die Energieversorgung, die Einfluss auf alle Bereiche der Wirtschaft hat, grundlegend verändert wird. Dies allein reicht jedoch nicht. Darüber hinaus müssen auch alle natürlichen Ressourcen viel sparsamer als heute in allen Bereichen der Wirtschaft eingesetzt werden. Warum ist das so wichtig? Das gegenwärtige Energiesystem basiert auf der Verbrennung von fossilen Rohstoffen und ist für den Großteil der Treibhausgasemissionen verantwortlich. Die erforderliche vollständige Umstellung auf erneuerbare Energiequellen erfordert nicht nur neue Technologien, sondern auch ihre vollständige Implementierung – in Deutschland und in anderen Ländern der Erde. Auch wenn keine fossilen Rohstoffe mehr gebraucht werden, so steigt dennoch die Nachfrage nach anderen, ebenso begrenzt vorkommenden Rohstoffe, um die neuen Techniken zu errichten. Je geringer die (zusätzliche) Gesamtnachfrage ausfällt, desto weniger Gründe für sektorale oder regionale Verteilungskonflikte und desto weniger (zusätzliche) Umweltbelastungen entstehen in Folge. Wie genau die Spielräume in Deutschland für eine Transformation zur Treibhausgasneutralität oder weitest gehenden Treibhausgasneutralität sind und welche Rohstoffe in welchem Ausmaß nachgefragt werden, das wurde im Projekt RESCUE untersucht.

Das Projekt RESCUE baut auf der Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland“ (UBA 2014) auf. Treibhausgasneutrales Deutschland beschreibt erstmalig, wie Deutschland in 2050 eine Treibhausgasreduzierung um mindestens 95 % gegenüber 1990 erreichen kann. RESCUE geht nun verschiedene Schritte weiter und untersucht:

1. Welche weiteren Optionen bestehen, um in 2050 eine 95 %-ige Reduzierung von Treibhausgasemissionen zu erreichen?
2. Wie kann bzw. muss der Weg dorthin gestaltet werden?
3. Welcher Rohstoffkonsum ist mit den Transformationswegen verbunden?

Zur Beantwortung der Fragen wurden insgesamt sechs Szenarien entworfen, die unterschiedliche Ambitionsniveaus und Veränderungsgeschwindigkeiten beinhalten. Die folgende Tabelle 1 zeigt die Green-Szenarien und ihre jeweiligen Ambitionsniveaus im Vergleich. Dieser Bericht dokumentiert das Szenario Germany – Resource efficient and Greenhouse gas neutral – lifestyle changes, kurz: GreenLife.

Tabelle 1: Das Ambitionsniveau der Green-Szenarien im Vergleich

	GreenEe1	GreenEe2	Green-Late	GreenMe	GreenLife	Green-Supreme
Energieeffizienz	Sehr hoch	Sehr hoch	Mittel	Sehr hoch	Sehr hoch	Sehr hoch
Materialeffizienz	Hoch	Hoch	Mittel	Sehr hoch	Hoch	Sehr hoch
Technikinnovation	Hoch	Hoch	Gering	Sehr hoch	Hoch	Sehr hoch
Nachhaltiges Handeln	Mittel	Mittel	Gering	Mittel	Sehr hoch	Sehr hoch
Wachstumsbefreiung	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Mittel	Sehr hoch
Ausgleich des globalen Technologieniveaus	Niedrig	Niedrig	Niedrig	Hoch	Niedrig	Hoch
Verringerung der Flächenneuersiegelung	Hoch	Hoch	Hoch	Hoch	Sehr hoch	Sehr hoch
Klimaschutzbestrebungen im Pfad	Hoch	Hoch	Niedrig	Hoch	Hoch	Sehr hoch

Quelle: eigene Darstellung auf der Basis von UBA (2019a)

1.2 GreenLife: Leitlinien und Ausrichtung

Wie alle Green-Szenarien beschreibt auch das GreenLife-Szenario einen Transformationspfad im Lösungsraum hin zu einem treibhausgasneutralen Deutschland in 2050. GreenLife zeichnet sich durch ambitionierte Änderungen im Lebensstil der Menschen in Deutschland aus. Dies betrifft alle Bereiche des Konsumverhaltens. Dazu gehört eine Ernährungsweise, die weniger tierische Produkte als in den GreenEe-Szenarien, einschließlich Fleisch und Milch, und mehr regionale Produkte beinhaltet. Menschen ändern ferner ihr Mobilitätsverhalten, sie nutzen

treibhausgasintensive Verkehrsträger seltener und anstelle dessen stärker Angebote des ÖPNV und von Sharing-Diensten. Auch Fahrräder werden häufiger genutzt und Fernreisen weniger nachgefragt. Menschen leben in kleineren Wohnungen und verstärkt Mehrfamilienhäusern und kaufen vermehrt nachhaltige und langlebige Produkte. Menschen sparen im Vergleich zu den GreenEe-Szenarien zusätzlich Energie und verursachen weniger Abfälle (siehe auch UBA 2019a).

Die Einsparungen an Treibhausgasemissionen (im Vergleich zu GreenEe 2 – bei gleichen Annahmen zur Handelsbilanz) werden somit durch das Konsumverhalten direkt bzw. indirekt in Folge von Konsumänderungen verursacht. Die technische Transformation ist identisch zu denen der GreenEe-Szenarien. In GreenLife verläuft die technologische Entwicklung im Rest der Welt wie bei GreenEe1. Während sich die europäischen Länder wie Deutschland zu einer treibhausgasneutralen Wirtschaftsweise weiterentwickeln, verläuft die Transformation außerhalb Europas ambitioniert, jedoch etwas langsamer. Der Rest der Welt erreicht den technologischen Stand von Deutschland und Europa mit zehn Jahre Verzug erst in 2060. Wie in GreenMe sind die Produktionsmengen wichtiger Basisindustrien (wie Eisen & Stahl bzw. Zement) nicht vorgegeben, sondern sie werden auf der Basis der angenommenen Nachfrageänderungen ermittelt. Dadurch verzeichnet Deutschland, im Gegensatz zu GreenEe1 und GreenLate, keinen ansteigenden Handelsüberschuss.

GreenLife beschreibt somit im Vergleich zu anderen Green-Szenarien den Pfad mit den höchsten Änderungen der Konsumweise der Menschen in Deutschland, Ausnahme ist das Szenario GreenSupreme. Die Ergebnisse quantifizieren die geringeren Energie- und Rohstoffbedarfe und die geringeren Treibhausgasemissionen, die sich aus einer Umstellung auf eine nachhaltigere Lebensweise ergeben.

1.3 Aufbau des Berichts

Der Bericht umfasst eine Kurzbeschreibung des methodischen Vorgehens, die Beschreibung der Annahmen und die Darstellung der Ergebnisse.

Kapitel 2 enthält die Beschreibung der methodischen Änderungen im Vergleich zum Vorgehen in den Szenarien GreenEe1 und GreenLate (Dittrich et al. 2020a; b) sowie eine methodische Kurzbeschreibung, die für das Verständnis des Berichts unerlässlich ist.

Kapitel 3 dokumentiert die allgemeinen Annahmen. Dazu gehören Rahmenannahmen, die bereits im GreenEe-Szenario gesetzt wurden und auch für dieses Szenario gelten, und die für das Verständnis dieses Berichts hilfreich sind (Dittrich et al. 2020a). Die allgemeinen Annahmen, die sich im Vergleich zu GreenEe verändert haben, werden in dem Kapitel ausführlicher beschrieben.

Kapitel 4 beschreibt sektorspezifische Annahmen. Die Reihenfolge orientiert sich an der Systematik der Wirtschaftszweige und ist damit anders als in klassischen Darstellungen von Energieszenarien. Zunächst werden extraktive Sektoren, darunter die Landwirtschaft, dargestellt. Es folgt die verarbeitende Industrie und Dienstleistungen, zu denen der Abfallsektor gehört. Anschließend wird der Gebäude- einschließlich des Bausektor beschrieben. Dem schließt sich der Verkehrssektor an. In GreenLife werden ferner Veränderungen der Konsumnachfrage angenommen, diese werden in einem eigenständigen Kapitel dargestellt. Der zentrale Energiesektor, in den alle Annahmen der zuvor beschriebenen Sektoren fließen, bildet den Abschluss des Kapitels.

Im Kapitel 5 sind die Ergebnisse beschrieben. Zunächst wird die Energieversorgung dargestellt. Es folgen die aus den Annahmen resultierenden Treibhausgasemissionen, einschließlich der

vorgelagerten und der kumulierten THG-Emissionen. Anschließend werden der gesamtwirtschaftliche Rohstoffverbrauch sowie die Nachfrage nach ausgewählten Rohstoffen beschrieben. Den Abschluss des Kapitels bildet die resultierende Flächennutzung.

Kapitel 6 fasst die wesentlichen Ergebnisse zusammen und zieht ein kurzes Resümee.

2 Methodik

Die Methodik im GreenLife-Szenario entspricht der des GreenMe und GreenEe2 -Szenarios. Die Berechnungen erfolgten im Rahmen eines Modellverbundes:

- ▶ der Verkehrsbereich in TREMOD (siehe <https://www.ifeu.de/methoden/modelle/tremod/>),
- ▶ der Wärmeverbrauch in Gebäuden in GEMOD (siehe <https://www.ifeu.de/methoden/modelle/gebaeudemodell/>),
- ▶ die Landwirtschaft in ALMOD (Website steht noch aus),
- ▶ das Energiesystem im kostenoptimierenden Energiesystemmodell SCOPE (siehe https://www.iee.fraunhofer.de/content/dam/iee/energiesystemtechnik/de/Dokumente/Branschueren/2018_F_SCOPE_Einzelseiten.pdf),
- ▶ die gesamtwirtschaftliche Rohstoffnutzung sowie die vorgelagerten THG-Emissionen in URMOD (siehe <https://www.ifeu.de/methoden/modelle/urmod/>).

Weiterhin wurden teilweise umfangreiche Detailrechnungen zu Energie- und Rohstoffinputs sowie THG-Emissionen für folgende Sektoren und Bereiche durchgeführt:

- ▶ Für die emissionsintensiven Industriesektoren Eisen/Stahl, NE-Metalle, Kalk, Zement, Nahrungsmittel, Holz/Papier, Chemie und Glas
- ▶ Für den Abfallbereich
- ▶ Für LULUCF (ohne Wald) – für Wald wurde auf Literatur zurückgegriffen
- ▶ Für rund 20 ausgewählte Schlüsseltechnologien, wobei hier der Fokus auf dem kumulierten Rohstoffbedarf lag;
- ▶ Für materialintensive Sektoren, darunter vor allem der Hoch- und Tiefbau; auch hier lag der Schwerpunkt auf rohstoffbezogenen Inputparametern.

Im Gegensatz zum Vorgehen in GreenEe1 und GreenLate wurden beim GreenMe- und GreenLife-Szenario die Output-Werte für wichtige rohstoff- und emissionsintensive Industriebereiche ermittelt. Daher wurde das Zusammenspiel der Modelle und Detailrechnungen im Vergleich zum Vorgehen in GreenEe1 und GreenLate um einen zusätzlichen Schritt ergänzt.

Das bedeutet, dass weiterhin in einem ersten Schritt die mit dem Umweltbundesamt abgestimmten Annahmen jeweils in TREMOD, GEMOD, ALMOD und in den Bereichen Abfall, LULUCF (ohne Wald) und in den übrigen Sektoren modelliert bzw. berechnet wurden. Diese Informationen flossen als Vorgaben in die Berechnung der Industrieoutputs in URMOD ein. Die Informationen zur Energie wurden in diesem ersten Schritt aus GreenEe1 übernommen. Ausgehend von dem Basismodell für das Jahr 2010 wurde in URMOD der Vektor für die Nachfrage durch Variation der Standardparameter „Komponenten der Endnachfrage“ und die „Inputkoeffizienten“ (Produktionstechnologie) determiniert. Die so ermittelten Industrieoutputs waren die Basis für die Berechnung der Energie- und Emissionswerte im Sektor Industrie.

Zur Einordnung der methodischen Änderung soll der relevante Unterschied hervorgehoben werden: Bei GreenEe1 und GreenLate erfolgte in URMOD eine zusätzliche Abstimmung der

eigentlich endogen ermittelten Modellergebnisse auf extern determinierte Output-Werte. Dazu mussten Parameter freihändig variiert werden. In der Regel erfolgt eine Anpassung über eine entsprechende Änderung der Endnachfragekomponente Exporte. Zur Vermeidung unplausibler Exportwerte war es aber in einigen Fällen erforderlich, auch in die Parameter „Importquote“ oder die Endnachfragekomponente „Bestandsveränderungen an Gütern“ einzugreifen. Beim GreenMe-, GreenLife- und GreenSupreme-Szenario konnte dagegen auf diese Anpassung an vorgegebene Output-Werte für die Industrie verzichtet werden.

Der nächste Schritt im Modellverbund folgt dem Vorgehen in GreenEe1: so wurden die THG-Emissionen der Quellgruppen Landwirtschaft, Industrie, Abfall und LULUCF (ohne Wald) ermittelt und auf der Basis des vorgegebenen Zielkorridors für das gesamte Treibhausgasemissionsbudget die noch möglichen zu emittierenden Treibhausgasemissionen im Energiesektor festgelegt. Gleichzeitig wurde der Energiebedarf der Bereiche Verkehr, Gebäude und aller übrigen Sektoren berechnet. Diese sowie Parameter der Schlüsseltechnologien und weitere, in den folgenden Kapiteln detailliert dargestellte Inputparameter, stellten die Eingangsdaten für die kostenoptimierte Energierechnung in SCOPE dar. In diesem Schritt wurden relevante Auswirkungen eines Sektors auf einen oder mehrere andere Sektoren bereits berücksichtigt. Zur finalen Rohstoffrechnung wurden die überarbeiteten Werte aus TREMOD und SCOPE, einschließlich notwendiger Aktualisierungen von Schlüsseltechnologien, an URMOD übergeben. Eine ausführliche Beschreibung der Modelle und des Zusammenwirkens im Modellverbund findet sich unter Dittrich et al. (2020a).

3 Allgemeine Annahmen

3.1 Rahmendaten

Verschiedene Rahmenannahmen wurden für alle Green-Szenarien getroffen. Für das Verständnis des vorliegenden Berichts werden die wesentlichen Rahmenannahmen zusammengefasst. Eine ausführliche Darstellung findet sich in Dittrich et al. (2020a).

3.1.1 Bevölkerungsentwicklung

Bei der Fortschreibung der Bevölkerungszahlen wurde auf die 13. Koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung und dabei auf die Variante 1 „Kontinuität bei schwächerer Zuwanderung“ zurückgegriffen (Destatis 2015). Diese Projektion schreibt die Geburtenrate fort (1,4 Kinder je Frau), geht von einem moderaten Anstieg der Lebenserwartung auf 88,8 bzw. 84,8 Jahre für Mädchen bzw. Jungen aus, die in 2060 geboren werden. Die Nettozuwanderung in 2015 wird mit 500.000 angenommen, sie ist bis 2021 rückläufig, und verbleibt bei 100.000 pro Jahr bis 2060. Die resultierende Bevölkerung wird in Tabelle 2 wiedergegeben. Bis 2050 geht die Bevölkerung demnach um 12 % zurück.

Tabelle 2: Annahmen zur Bevölkerungsentwicklung

	2010	2020	2030	2040	2050
Bevölkerung, gesamt in Tsd.	81.752	81.434	79.230	75.963	71.902

Quelle: Destatis (2020) für 2010; Destatis (2015) für 2020 – 2050

3.1.2 Wirtschaftliche Entwicklung

Bezüglich der zu erwartenden zukünftigen Entwicklung stützt sich der vorliegende Bericht auf die Annahmen im THGND (UBA 2014). Eine wichtige Vorgabe bestand darin, den Industriestandort Deutschland in den Entwicklungsszenarien zu erhalten. Dazu wird zwischen den Jahren 2010 und 2050 ein jahresdurchschnittliches Wirtschaftswachstum (Bruttoinlandsprodukt (BIP), preisbereinigt) von 0,7 % p.a. unterstellt. Die unterstellten Wachstumsraten für die unterschiedlichen Sektoren sind im Bericht der GreenEe-Szenarien ausführlich dokumentiert (Dittrich et al. 2020a), in GreenLife tragen die Verbesserungen der Produktqualität und die Dienstleistungssektoren im Besonderen Ausmaß zur Wertschöpfung bei. Bei dem gleichzeitig unterstellten Rückgang der Bevölkerung führt das gesamtwirtschaftliche Wachstum zu einer etwa 50 %igen Steigerung des durchschnittlichen Einkommens pro Person im Jahr 2050.

3.1.3 Technologische Entwicklung und Materialeffizienz

Im GreenLife-Szenario ist die Volkswirtschaft so dynamisch wie in den GreenEe-Szenarien und damit etwas innovativer als gegenwärtig. Für alle Sektoren und Dienstleistungen, für die nicht spezifische Annahmen getroffen wurden (siehe Kapitel 4), wurde unterstellt, dass die Materialeffizienz durchschnittlich um 1,1 % pro Jahr wächst.

3.1.4 Entwicklung in Europa und im Rest der Welt

In allen Green-Szenarien wird angenommen, dass die europäischen Länder zur technologischen Entwicklung in Deutschland aufschließen. Dies gilt für alle Produktionstechnologien ebenso wie für die klimapolitischen Ambitionen. Die Annahme beinhaltet, dass die europäischen Länder in 2050 ebenso wie Deutschland eine (weitestgehende) Treibhausgasneutralität erreichen. Für alle

Länder außerhalb Europas wird in den meisten Green-Szenarien, außer GreenMe und GreenSupreme, angenommen, dass sie bis 2050 den technologischen Rückstand nicht vollständig aufgeholt haben, sondern im globalen Mittel etwa zehn Jahre zurückliegen.

Im Projekt RESCUE liegt der Fokus auf Deutschland. Die Annahmen zur Entwicklung in Europa und im Rest der Welt sind daher für die Berechnung der Rohstoffaufwendungen und der Treibhausgas-Emissionen der Importe relevant.

Die Annahmen gehen davon aus, dass der Klimawandel effektiv begrenzt werden kann, wenn alle Staaten in die Transformation eingebunden sind und ambitionierte Transformationen, wenn auch teilweise in einem unterschiedlichen Tempo, global umsetzen.

3.1.5 Nutzung von Biomasse

In allen Green-Szenarien wird Primärbiomasse ab 2030 ausschließlich stofflich genutzt. Biotische Abfälle können stofflich (z.B. für RC-Papier, als Ausgangsrohstoffe für die Chemie) und energetisch genutzt werden. Die unterstellten energetischen Potenziale der biotischen Reststoffe und Abfälle sind in Tabelle 3 wiedergegeben. Die Herleitung wird in der Dokumentation der GreenEe-Szenarien ausführlich erläutert (vgl. Dittrich et al. (2020a)).

Tabelle 3: Energetische Nutzung der Restbiomassepotenziale bis 2050

	2030 TWh/a	2040 TWh/a	2050 TWh/a	Verwendung
Waldrestholz	25,8	12,9	0	Strom- und Wärmeversorgung
Altholz	33,8	33,8	33,8	Strom- und Wärmeversorgung
Stroh	15,9	8,4	0,0	als fortschrittliche Biokraftstoffe in Kraftstoffversorgung
Biogut	1,9	1,55	1,8	Als Biogas in Strom- und Wärmeversorgung
Grüngut	3	2,1	2,4	Als Biogas in Strom- und Wärmeversorgung

Quelle: Dittrich et al. (2020a)

3.1.6 CCS und CCU

In allen Green-Szenarien werden keine technischen Maßnahmen zur Speicherung von Kohlendioxid (CCS) unterstellt.

Carbon Capture and Use (CCU) bedarf es für die Bereitstellung von strombasierten Kohlenwasserstoffen (in PtG/PtL- Techniken). Die Abscheidung und Nutzung von nicht vermeidbarem Kohlendioxid (CCU) als Ausgangsstoff für die nationale Produktion von PtG/PtL (synthetische kohlenstoffbasierte Energieträger) wird unterstellt, sofern dies entsprechend der kostenoptimierten Energiemodellierung in Deutschland stattfindet. Da aber national prioritär Wasserstoff für die Industrie erzeugt wird, sind die national erzeugten PtG-Mengen begrenzt und damit auch der Bedarf an CO₂-Quellen.

Die Abscheidung und Nutzung von atmosphärischem Kohlenstoff mit Direct-Air-Capture-Anlagen (CCU) wird international zur Bereitstellung von strombasierten Kohlenwasserstoffen unterstellt.

CCU in Verbindung mit atmosphärisch genutztem Kohlenstoff verursacht keine zusätzliche Treibhausgaswirkung und wird in der Studie bei den Treibhausgasbilanzen nicht mitbilanziert.

CCU mit Kohlenstoff aus unvermeidbaren industriellen Produktionen wird in der Studie beim Quellverursacher bilanziert. Für nähere Informationen siehe UBA (2019a).

3.2 Emissionsziel 2030 und 2040

Die Treibhausgasminderungsziele in GreenLife sind in 2030 um 62 % und in 2040 um 82 % gegenüber 1990 reduziert. In den Szenarien GreenLate und GreenEe1 wurden feste THG-Minderungsziele vorgegebenen. Konkret 2030 55 % bzw. 60 % und 2040 70 % und 80 %. In den Szenarien GreenMe, GreenEe2 und GreenLife ergibt sich durch die Änderungen des internationalen Handels ein leicht erhöhtes Ambitionsniveau.

Sektorziele entsprechend des Klimaschutzplans 2050 der Bundesregierung werden nicht als Randbedingung für die Optimierung festgelegt, sondern als Ergebnis ausgewertet. Neben den direkten nationalen THG-Emissionen müssen auch Anstrengungen im Bereich des nichtenergetischen Verbrauchs (welcher über Müllheizkraftwerke als THG-Emissionen verspätet auftritt) und des internationalen Verkehrs unternommen werden. Deswegen werden PtG/PtL-Importe in 2030 und 2040 nicht auf nationale Emissionsziele angerechnet. Für nähere Informationen siehe UBA (2019a).

4 Sektorale Annahmen

4.1 Landwirtschaft

Im GreenLife-Szenario wird ausgehend vom Mengen- und Treibhausgasemissionsgerüst für Ackerbau und Viehhaltung im Basisjahr 2010 (siehe die Dokumentation in Dittrich et al. (2020a)) die Transformation entlang der Leitlinien für dieses Szenario hin zu einer noch gesünderen Ernährung und regionalen, nachhaltigen Erzeugung unterstellt. In allen Green-Szenarien wurden die folgenden Annahmen hinterlegt, die auf UBA (2014) zurückgehen:

- **Flächenentwicklung:** Die Entwicklung der landwirtschaftlichen Nutzfläche wird durch zwei Faktoren beeinflusst: der Flächenneuanspruchnahme sowie der Wiedervernässung von Moorböden (siehe Kapitel 4.2). Insgesamt kommt es bis 2050 zu einem leichten Rückgang von Acker- und Grünlandflächen.
- **Technische Minderungsmaßnahmen:** Diese umfassen die Reduktion des Stickstoffdüngereinsatzes sowie Maßnahmen zum Wirtschaftsdüngermanagement. Durch die Erhöhung der Stickstoffeffizienz sowie die Erhöhung des Anteils des Ökolandbaus wird der Stickstoff-Gesamtüberschuss bis 2030 auf 50 kg N pro ha gesenkt. Außerdem wird ein steigender Anteil des Wirtschaftsdüngers in Biogasanlagen vergoren, wobei die Gärreste gasdicht gelagert werden. Dies trägt zu einer starken Reduktion der THG-Emissionen aus der Lagerung und Ausbringung der Wirtschaftsdünger bei.
- **Ökolandbau:** Gemäß dem Nachhaltigkeitsziel der Bundesregierung wird der Anteil des Ökolandbaus kontinuierlich (linear) auf 20 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche bis 2050 erhöht. Auf diesen Flächen wird kein mineralischer Stickstoffdünger verwendet.
- **Lebensmittelabfälle:** Eine Reduktion der Lebensmittelabfälle ist für die Landwirtschaftsemissionen nur dann relevant, wenn der Nachfragerückgang auf der Produktionsseite berücksichtigt wird. In allen Szenarien wurde eine kontinuierliche (lineare) Reduktion der Abfälle um 50 % bis 2050 unterstellt und die Produktion entsprechend angepasst.

Im GreenLife-Szenario wurden für das Zieljahr 2050 die folgenden Anpassungen umgesetzt, die alle in den Bereich der Viehhaltung fallen:

- **Selbstversorgungsgrad:** Zunächst wird hier die Annahme aus dem GreenMe-Szenario übernommen, dass in der Viehhaltung bzw. in der Fleischproduktion ein Selbstversorgungsgrad von 150 % erreicht wird (Heute: 115 %). In den GreenEe-Szenarien betrug dieser 345 %, so dass es hier zu einer Verringerung des Viehbestandes kommt.
- **Fleischkonsum:** Eine weitere Verringerung ergibt sich aus einer leichten Anpassung des Fleischkonsums. Auch in allen anderen Green-Szenarien wird eine ambitionierte Veränderung der Ernährungsweise und damit einhergehend ein reduzierter Fleischkonsum mit abnehmenden Viehbeständen unterstellt. Die Grundlage hierfür stellten die Ernährungsempfehlungen der Deutschen Gesellschaft für Ernährung (DGE) dar. Diese

empfiehlt einen Fleischverzehr von 300 – 600 g Fleisch pro Woche¹. Während in den anderen Green-Szenarien (außer GreenSupreme) der Mittelwert der Fleischmenge zugrunde gelegt wurde (ca. 450 g Fleisch pro Woche), diente dem GreenLife-Szenario die Untergrenze (300 g / Woche). So kommt es zu einer weiteren Reduktion der Viehbestände.

- **Milchproduktion:** Weiterhin erfolgt eine leichte Anpassung der Milchproduktion. Der Konsum von Milch- und Milchprodukten entspricht in allen GreenSzenarien der Untergrenze der DGE-Empfehlungen. In GreenLife wird angenommen, dass ein Teil dieses Milchkonsums mit Soja(-produkten) substituiert werden kann. Folglich wird unterstellt, dass die Nachfrage nach tierbasierter Milch kontinuierlich um 15 % zurückgeht. Diese Annahme hat zweierlei Entwicklungen zur Folge: erstens sinkt die Anzahl der Kühe und damit auch die Produktion von Rindfleisch. Dies wird durch einen erhöhten Konsum von Schweine- und Geflügelfleisch ausgeglichen. Zweitens wird unterstellt, dass das benötigte Soja aus heimischem Anbau stammt. Dafür werden 0,8 Mio. ha mehr Fläche als in den anderen Green-Szenarien (außer GreenSupreme) benötigt.

Insgesamt kommt es in diesem Szenario zu einem noch stärkeren Rückgang des Viehbestandes bis 2050. Dies hat mehrere Einflüsse auf den Ackerbau: es wird weniger Wirtschaftsdünger zur Düngung eingesetzt, und es werden weniger Flächen für die Futtermittelproduktion benötigt. Somit werden Flächen von ca. 1,9 Mio. ha Acker sowie 0,5 Mio. ha Grünland aus der bisherigen landwirtschaftlichen Produktion genommen und können anderweitig genutzt werden. Beim Acker wird ein Teil der Fläche (0,8 Mio. ha) für die Produktion von Soja benötigt, womit in Summe immer noch 1,1 Mio. ha Flächen im Vergleich zur heutigen Nutzungssituation anderweitig im Sinne des Umweltschutzes genutzt werden können. Die sich daraus ergebenden Änderungen der THG-Emissionen werden im Modell ALMOD jedoch nicht berücksichtigt.

Eine weitere Rückkopplung betrifft die Nahrungsmittelindustrie (s. Kapitel 4.3.9), wo die verringerten Viehbestände in 2050 zu einem geringeren Energiebedarf in der Fleischverarbeitung führen.

Die Entwicklung der Viehbestände im GreenLife-Szenario ist in Tabelle 4 zusammengefasst. Hinsichtlich des Pfades wird unterstellt, dass es bis 2020 zu keiner Verringerung der Viehbestände gegenüber dem Basisjahr 2010 kommt. Danach wird von einer linearen Entwicklung bis 2050 ausgegangen.

Tabelle 4: Entwicklung der Viehbestände im GreenLife-Szenario

Tierplatzzahlen [Mio.]	2010	2030	2040	2050
Milchkühe	4,18	3,40	2,61	1,83
Sonstige Rinder	8,63	6,29	3,96	1,62
Schweine	22,2	16,1	9,99	3,86
Geflügel	129	106	83,9	61,5
Schafe	2,39	2,20	1,50	0,79
Pferde	0,46	0,50	0,52	0,54

Quelle: eigene Berechnungen auf der Basis von ifeu/IEE/SSG – ALMOD

¹ <https://www.dge.de/ernaehrungspraxis/vollwertige-ernaehrung/10-regeln-der-dge/>

4.2 Flächennutzung und LULUCF (ohne Wald)

Die Flächenneuanspruchnahme für Siedlungen geht im GreenLife-Szenario schneller als den anderen Green-Szenarien, außer GreenSupreme, zurück. Wie in allen Green-Szenarien werden in 2050 (netto) keine zusätzlichen Flächen für Siedlungen umgewandelt. In 2030 bzw. 2040 liegt der Wert mit 10 bzw. 5 ha pro Tag jedoch niedriger als in den meisten anderen Green-Szenarien mit 20 bzw. 10 ha. In die Berechnungen der Rohstoffaufwände ist zusätzlich eingeflossen, dass weiterhin räumliche Veränderungen stattfinden können und 7 ha pro Tag ent- und an anderer Stelle versiegelt werden können.

Die weiteren Annahmen im GreenLife-Szenario bezüglich der Landnutzung und Landnutzungsänderungen entsprechen denen der GreenEe-Szenarien. So verläuft die Wiedervernässung von Mooren linear und ist 2040 abgeschlossen (5 % pro Jahr ab 2020). Im Jahr 2050 werden noch rund 15 % der organischen Böden als extensives Grünland bewirtschaftet, da eine vollständige Wiedervernässung nicht möglich ist. Hier entstehen weiterhin THG-Emissionen von rund 4 Mio. t CO₂Äq.

Die Annahmen zum Torfabbau sind in allen Green-Szenarien identisch, siehe Dittrich et al. (2020a). Weitere Annahmen zur Landnutzung (Grünlandumbruch, Aufforstung, Entwaldung) entsprechen denen der GreenEe-Szenarien.

Die Nutzung von Sekundärhölzern entsprechen den Annahmen in GreenEe, sie beinhalten eine weitmögliche Kaskadennutzung von biotischen Rohstoffen (siehe Dittrich et al. (2020a)).

4.3 Industrie

4.3.1 Stahlindustrie

In der Stahlindustrie erfolgt ein Technologieumbau. Die kokskohlebasierte Oxygenstahlroute wird vollständig zugunsten der Elektrostahlroute sowie einer neuen Primärstahlerzeugung auf Basis der wasserstoffbasierten Direktreduktion aufgegeben. Damit weiterhin eine bedarfsgemäße Menge an Stahl erzeugt werden kann, wird neben Schrott auch direkt reduziertes Eisen (direct reduced iron, DRI, auch Eisenschwamm genannt), eingesetzt. Eine entsprechende Produktion ist in Deutschland aufzubauen. Zur Direct-Reduced-Iron (DRI)-Herstellung wird Wasserstoff verwendet. (Für weitere Erläuterung siehe Dittrich et al. (2020a)). Die Wasserstoffproduktion kann dabei sowohl ortsnah am Standort der Stahlproduktion erfolgen oder über Leitungsinfrastrukturen ermöglicht werden. Dies ist vornehmlich eine Herausforderung der Energieversorgung, um die erneuerbaren Erzeugungsstandorte effektiv mit den Verbrauchsstandorten zu verbinden.

Im GreenLife-Szenario ändern sich die absoluten Angaben und Werte entsprechend der rohstoffmodellendogenen ermittelten Produktionsmengen auf 35,8 [43,9/39,6] Mio. Tonnen Rohstahlerzeugung in 2050 [2030/2040]. Die zentralen Annahmen zu den technischen Parametern sind in Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5: Annahmen Stahlindustrie im GreenLife-Szenario

	Annahmen
Technologieumbau	- Schrottanteil linearer Anstieg bis 2030 auf 56 %, 2040 auf 61 % und 2050 auf 67 % (entsprechend 25-27,5-30 Mio. t) - linearer Rückbau der Oxygenstahlroute nach 2030 - vor 2030 Reduktion der Oxygenstahlproduktion durchsteigenden Schrotteinsatz über Elektrostahlroute (2030-2040-2050:

	Annahmen
	27,5-13,75-0 Mio. t Oxygenstahl) parallel linearer Aufbau DRI-Anlagen (2030-2040-2050: 0-10-20 Mio. t DRI) mit Wasserstoff als Reduktionsmittel
Spezifischer Endenergieverbrauch (EEV)	- Oxygenstahl: keine Änderung - Elektrostahl: lineare Reduktion des spezifischen Strombedarfs um 20 %, umgekehrt Mehrbedarf wegen Verzicht auf Kohlenstaub (nach 2030) und der Umstellung auf reinen Strombetrieb - Warmwalzwerk: lineare Reduktion des spezifischen Strombedarfs um 60 %, umgekehrt Mehrbedarf wegen Umstellung auf reinen Strombetrieb (induktive Erwärmung)
Minderung der prozessbedingten THG-Emissionen	- lineare Reduktion Kohlenstaub - lineare Reduktion Graphitelektrodenverbrauch auf 3,6 kg CO₂/t Stahl - durch Rückbau Oxygenstahlroute bedingter Rückgang des Kalksteineinsatzes für Hochofen und Sinteranlage

Quelle: eigene Zusammenstellung

Energiebedingte THG-Emissionen in der Stahlindustrie werden durch die Umstellung auf erneuerbare Energieträger vollständig reduziert. Die Verhaltensänderung und die daraus resultierenden Entwicklungen der Produktionsmengen bewirken einen im Vergleich zu den GreenEe-Szenarien geringeren Endenergieverbrauch im GreenLife-Szenario, der im Zieljahr 2050 [2030/2040] bei 97,6 [132,9/111,8] TWh liegt. Der Anteil Strom liegt in denselben Jahren bei 97,6 [15,2/58,2] TWh.

4.3.2 Nicht-Eisen –Metallindustrie

Für die Nicht-Eisen-(NE)-Metallindustrie wurden die Metalle Aluminium, Kupfer, Blei und Zink untersucht. Im GreenEe1 und GreenLate-Szenario ist für die jährlichen Produktionsmengen pauschal ein Wachstum von 0,7 % p.a. angenommen. In GreenLife wird die Produktionsmenge wie in den übrigen Green-Szenarien modellendogen ermittelt und liegen bei 7,2 [7,1/7,2] Mio. Tonnen Primär- und Sekundärerzeugung sowie Halbzeug in 2050 [2030/2040]. Hieraus resultieren die wesentlichen Veränderungen in der NE-Metallindustrie anteilig bei der Umstellung auf strombetriebene Induktionsöfen, der Effizienzsteigerungen und der Steigerung der Sekundärerzeugung. Die technischen Parameter sind für alle Green-Szenarien, mit Ausnahme von GreenLate, identisch (Für weitere Erläuterung siehe Dittrich et al. (2020a)). Die wesentlichen Annahmen zeigt Tabelle 6.

Tabelle 6: Annahmen Nicht-Eisen-Metallindustrie im GreenLife-Szenario

	GreenLife
Sekundäranteil Kupfer, Aluminium, Blei und Zink gesamt	Anstieg 2030-2040-2050: 62 %-78 %-90 % (3,35 Mio. t in 2050)
Sekundäranteil sonstige Nicht-Eisen-Metalle	Linearer Anstieg des Sekundäranteils um 10 % bis 2050
Technologieumbau	- Nach 2030 lineare Umstellung gasbefeuerte Schmelzöfen auf strombetriebene Induktionsöfen (Stromanteil Primärerzeugung konstant); - in 2050 Anteil Strom für: Sekundärmetalle 65 %; Halbzeuge 65 %

	GreenLife
Endenergieverbrauch (EEV)	Effizienzsteigerung um 30 % bis 2050: 1/3 bis 2030, 1/3 bis 2040, 1/3 bis 2050
prozessbedingte THG-Emissionen	Minderung durch • Umstellung auf inerte Anoden bei der Primäraluminiumerzeugung nach 2030: 63 % bis 2040, 100 % bis 2050, sowie durch • Kohlenstoff als Reduktionsmittel für Blei (Primär- und Sekundärerzeugung) und für Sekundärzinkerzeugung in 2050 aus importiertem Csyn (3,3 TWh)

Quelle: eigene Zusammenstellung

Energiebedingte THG-Emissionen in der Nicht-Eisen-Metallindustrie werden durch die Umstellung auf erneuerbare Energieträger vollständig reduziert. Die Verhaltensänderung und die daraus resultierenden Entwicklungen der Produktionsmengen bewirken einen geringeren Endenergieverbrauch im GreenLife-Szenario im Vergleich zu den GreenEe-Szenarien, der im Zieljahr 2050 [2030/2040] bei 11,2 [17,7/14,1] TWh liegt. Der Stromanteil beträgt in denselben Jahren 7,7 [11,7/9,2] TWh.

4.3.3 Gießereiindustrie

Für die Gießereiindustrie ist im GreenEe1 und GreenLate-Szenario für die jährlichen Produktionsmengen pauschal ein Wachstum von 0,7 % p.a. für Eisen-, Stahl- und Temperguss (EST) und von 1,6 % p.a. für NE-Guss angenommen. In GreenLife wird die Entwicklung der Produktion wie in den übrigen Green-Szenarien modellendogen ermittelt, die Produktionsmengen liegen insgesamt bei 3,7 [4,6/4,1] Mio. Tonnen in 2050 [2030/2040]. Hieraus resultieren die wesentlichen Veränderungen in der Gießereiindustrie anteilig bei der Umstellung von fossil befeuerten Schmelzöfen auf strombetriebene, die Effizienzsteigerung und Steigerung der Metallausbringung.

Die technischen Parameter sind für alle Green-Szenarien, mit Ausnahme von GreenLate, identisch. (Für weitere Erläuterung siehe Dittrich et al. (2020a)). Die wesentlichen Annahmen zeigt Tabelle 7.

Tabelle 7: Annahmen Gießereiindustrie im GreenLife-Szenario

	Annahmen
Metallausbringung	Steigerung auf 90 % in 2050 (Ausgangswert 65 %)
Technologieumbau	Umstellung fossil befeuerte Schmelzöfen auf strombetriebene: 1/3 bis 2030, 1/3 bis 2040, 1/3 bis 2050
Endenergieverbrauch (EEV)	Lineare Reduktion des spezifischen Energiebedarfs auf 47 % des Ausgangswertes

Quelle: eigene Zusammenstellung

Energiebedingte THG-Emissionen in der Gießereiindustrie werden durch die Umstellung auf erneuerbare Energieträger bis 2050 vollständig reduziert. Die Verhaltensänderung und die Entwicklungen der Produktionsmengen bewirken einen geringeren Endenergieverbrauch im GreenLife-Szenario im Vergleich zu den GreenEe-Szenarien, der im Zieljahr 2050 [2030/2040] bei 3,5 [7,4/5,2] TWh liegt. Der Anteil Strom beträgt in denselben Jahren 3,5 [4,2/3,8] TWh.

4.3.4 Chemische Industrie

Für die chemische Industrie wurde, basierend auf THGND (UBA 2014) im Vergleich zur restlichen industriellen Produktion ein erhöhtes Wachstum von 2,2 % pro Jahr angenommen. Dementsprechend erfolgt nach dem Szenariennarrativ eine Überschätzung des Bedarfs, welche sich auf das Gesamtenergiesystem als konservative Betrachtung auswirkt, siehe dazu TextBox 5-2 Einfluss der nicht-energetischen Bedarfe an Energieträgern in UBA (2019a). Prinzipiell wird von einer gleichbleibenden Technologie-Landschaft ausgegangen, mit den folgenden Ausnahmen:

- ▶ Übergang von fossilen Rohstoffen (Naphtha/Erdölderivate, Erdgas) zu erneuerbar erzeugten Kohlenwasserstoffen (die überwiegend importiert werden), vor allem synthetisches Methan, sowie zu Biomasse-basierten Rohstoffen, konkret:
 - Ammoniak-Produktion aus elektrolytisch erzeugtem H₂ anstelle von H₂ aus Dampfreformierung von Methan
 - Industrieruß-Herstellung aus Kohlenwasserstoffen basierend auf PtG/PtL-Synthesen
 - Kunststoff-Herstellung nutzt PtL-Methanol als Rohstoff (aus dem v.a. die Olefine Ethylen und Propylen, aber auch Aromaten wie Benzol und Toluol hergestellt werden können)
 - Wasserstoff für chemische Reaktionen (z.B. Hydrierungen) wird elektrolytisch gewonnen
 - Einsatz von PtG-Methan als Rohstoff und Brennstoff für Hochtemperatur-Anwendungen
- ▶ Flächendeckende Anwendung Bester Verfügbarer Technik (BVT) für die N₂O-Abscheidung in der Salpetersäure- und Adipinsäure-Herstellung (>98 % Abscheidung von N₂O)
- ▶ Steigende Energieeffizienz von 1,5 % p.a.

Die in 2030 und 2040 benötigten Mengen synthetischer Rohstoffe wurden abgeleitet aus der überschlagsmäßig ermittelten Menge Produkte, die in 2030/2040 produziert werden und die in 2050 noch in Nutzung ist bzw. thermisch verwertet wird, damit in 2050 keine zusätzlichen fossilen THG-Emissionen zu berechnen sind. Beispiel: Lebensdauer Baustoffe > 20 Jahre; Somit ist der gesamte Anteil Kunststoffe im Bau schon ab dem Jahr 2030 auf der Basis synthetischer Ausgangsstoffe herzustellen. Darüber hinaus wurden nur bezüglich des Kunststoffrecyclings veränderten Annahmen getroffen (siehe Tabelle 8).

Tabelle 8: Annahmen chemische Industrie im GreenLife-Szenario

	GreenLife
Ammoniak-Produktion	Elektrolyse-H ₂ statt Methan-Dampfreformierung • 2040: 37,5 % Elektrolyse-H₂ • 2050: 100 % Elektrolyse-H₂
Salpeter-/Adipinsäure	Flächendeckende Anwendung Bester Verfügbarer Technik (BVT) für N ₂ O-Abscheidung > 98 %
Industrieruß	aus PtG/PtL-Synthesen
Sonstige Emissionsquellen	Pauschale Annahme: lineare Abnahme THG-Emissionen

	GreenLife
Kunststoffe	Umstellung auf PtL-Methanol als Rohstoff
Kunststoffrecycling	Stoffliche Verwertungsquote steigt auf 55 %/60 %/ 65 % in 2030/2040/2050
Allgemeine Annahmen Chem. Industrie (indirekte THG-Emissionen)	• Steigende Energieeffizienz (1,5 %/a) • PtG-Methan als Rohstoff • H₂ aus Elektrolyse

Quelle: eigene Zusammenstellung

4.3.5 Zementindustrie

In der Zementindustrie erfolgt in den GreenEe-Szenarien ein Technologieumbau durch die Einführung von neuartigen zementähnlichen Bindemitteln, die nur ein Drittel der prozessbedingten CO₂-Emissionen aus der Entsäuerung von Kalkstein verursachen, da zu deren Herstellung entsprechend geringere Mengen an Kalkstein benötigt werden. Zudem kann für die neuartigen Bindemittel bis 2050 eine höhere Reduktion des spezifischen Energiebedarfs gegenüber dem Ausgangswert für konventionelle Bindemittel erreicht werden als für die konventionellen Bindemittel selbst, und der thermische Energiebedarf für die Herstellung neuartiger Bindemittel wird zu 50 % durch Strom gedeckt (sonst Gas). Des Weiteren erfolgt ein Technologieumbau bei der Herstellung konventioneller Bindemittel durch die Umstellung der Drehrohrofenfeuerung von Koks bzw. Kohle (sowie EBS) auf Gas. Außerdem wird ein Anstieg des Klinkerfaktors auf 0,9 unterstellt, um durch die vermehrte Klinkerproduktion anteilig die entstehenden Fehlmengen an Hüttensand aus der Stahlindustrie zu kompensieren (siehe Dittrich et al. (2020a)).

In GreenLife wird die Entwicklung der Produktion wie in den übrigen Green-Szenarien, außer GreenEe1 und GreenLate, modellendogen ermittelt und variieren entsprechend der charakteristischen Eigenschaften der einzelnen Szenarien. So sinkt in GreenLife die Produktionsmenge gegenüber 2010 um 24 % bis 2030, um 32 % bis 2040 und um 41 % bis 2050. Die wesentlichen Annahmen zeigt Tabelle 9.

Tabelle 9: Annahmen Zementindustrie im GreenLife-Szenario

	Annahmen
Klinkerfaktor	Anstieg auf 0,9 zur Kompensation von Hüttensand (Ausgangswert 0,77)
Technologieumbau	neuartige Bindemittel 50 % in 2050, davon 20 % in 2030 und 50 % bis 2040
Brennstoff	Umstellung Kohle/Koks auf Gasfeuerung, 50 % bis 2030, 100 % bis 2040; lineare Reduktion EBS auf 0 % in 2050 zugunsten Gasfeuerung
Endenergieverbrauch (EEV)	lineare Reduktion des spezifischen Energiebedarfs bis 2050 (Bezug Ausgangswert konventionelle Bindemittel): • thermischer Energiebedarf: konventionelle Bindemittel um 10 % und neuartige Bindemittel um 50 % • elektrischer Energiebedarf: konventionelle Bindemittel um 30 % und neuartige Bindemittel um 50 %
Prozessbedingte THG-Emissionen	CO ₂ -Minderung wird erreicht durch die Einführung neuartiger Bindemittel, die den umgekehrten Anstieg durch den Anstieg des Klinkerfaktors überwiegen

Quelle: eigene Zusammenstellung

Energiebedingte THG-Emissionen in der Zementindustrie werden durch die Umstellung auf erneuerbare Energieträger bis 2050 vollständig reduziert. Die Verhaltensänderung und die daraus resultierenden Entwicklungen der Produktionsmengen führen zu einem Endenergieverbrauch in Höhe von 13,0 [17,6/16,1] TWh im Jahr 2050 [2030/2040], der Anteil Strom liegt bei 3,3 [2,2/2,5] TWh in denselben Jahren.

4.3.6 Kalkindustrie

Für die Kalkindustrie ergibt sich ein kontinuierlicher Rückgang des Bedarfs an Branntkalk bedingt durch den Rückbau von Kohlekraftwerken und Oxygenstahlwerken. Der Bedarf an Dolomitskalk bleibt konstant. Die wesentlichen Veränderungen in der Kalkindustrie bestehen im Technologieumbau durch die Umstellung der Kohlefeuerung auf Gasfeuerung und durch Effizienzsteigerungen. Im GreenLife-Szenario ändern sich die absoluten Angaben und Werte entsprechend der rohstoffmodellendogenen ermittelten Produktionsmengen. Die technischen Parameter sind für alle Green-Szenarien, mit Ausnahme von GreenLate, identisch. (Für weitere Erläuterung siehe Dittrich et al. (2020a)). Die wesentlichen Annahmen zeigt Tabelle 10. Absolute Werte ändern sich entsprechend der modellendogen ermittelten Produktionsmengen und gehen in 2030-2040-2050 gegenüber 2010 um 76 %-68 %-59 % zurück.

Tabelle 10: Annahmen Kalkindustrie im GreenLife- Szenario

	Annahmen
Technologieumbau	Brennstoffumstellung von Kohle auf Gasfeuerung: 50 % bis 2030, 100 % bis 2040
Endenergieverbrauch (EEV)	Reduktion des spezifischen Energiebedarfs bis 2050: • Brennstoff linear um 20 %, • elektrisch linear um 10 %
prozessbedingte THG-Emissionen	Minderung durch Rückgang Branntkalkproduktion (CO ₂ aus Entsäuerung)

Quelle: eigene Zusammenstellung

Energiebedingte THG-Emissionen in der Kalkindustrie werden durch die Umstellung auf erneuerbare Energieträger bis 2050 vollständig reduziert. Die Verhaltensänderung und die daraus resultierenden Entwicklungen der Produktionsmengen führen zu einem Endenergieverbrauch von 3,9 [5,3/4,6] TWh in 2050 [2030/2040], der Stromanteil beträgt 0,3 [0,4/0,4] TWh.

4.3.7 Glasindustrie

In der Glasindustrie bestehen die wesentlichen Veränderungen im Technologieumbau durch die Umstellung von zunächst Öl- auf Gasfeuerung und im Weiteren auf elektrische Schmelzöfen sowie durch die Steigerung der Energieeffizienz und des Scherbenanteils.

Im GreenLife-Szenario ändern sich die absoluten Angaben und Werte entsprechend der rohstoffmodellendogenen ermittelten Produktionsmengen auf 6,7 [7,3/6,9] Mio. Tonnen in 2050 [2030/2040]. Die technischen Parameter sind für alle Green-Szenarien, mit Ausnahme von GreenLate, identisch. (Für weitere Erläuterung siehe Dittrich et al. (2020a)). Die wesentlichen Annahmen zeigt Tabelle 11.

Tabelle 11: Annahmen Glasindustrie im GreenLife-Szenario

	Annahmen
Scherbenanteil	Anstieg 2030-2040-2050: 45 %-54 %-69 %
Technologieumbau	Umstellung Öl- auf Gasfeuerung bis 2030, Umstellung auf elektrische Schmelzöfen 2030-2040-2050: 10 %-30 %-100 %
Endenergieverbrauch (EEV)	Reduktion des EEV bis 2030 zunächst nur durch steigenden Scherbenanteil, danach linear um 80 % bis 2050
prozessbedingte THG-Emissionen	Minderung durch Steigerung Scherbenanteil (weniger CO ₂ aus Zersetzung Carbonate bei Primärerzeugung)

Quelle: eigene Zusammenstellung

Energiebedingte THG-Emissionen in der Glasindustrie werden durch die Umstellung auf erneuerbare Energieträger bis 2050 vollständig reduziert. Die Verhaltensänderung und die daraus resultierenden Entwicklungen der Produktionsmengen bewirken einen Endenergieverbrauch von 4,5 [17,7/9,8] TWh in 2050 [2030/2040], der Anteil Strom liegt bei 4,5 [9,2/4,8] TWh.

4.3.8 Zellstoff- und Papierindustrie

Gemäß der Szenariendefinition werden im GreenLife-Szenario für die Zellstoff- und Papierindustrie Verhaltensänderungen in zwei Segmente unterstellt: im Bereich der Verpackungen sowie im Bereich der graphischen Papiere.

Bei den Verpackungen sind Einsparungen durch einen Umstieg auf Mehrweg-Kunststoff-Verpackungen möglich. Bis zum Zieljahr 2050 wird dadurch eine Reduktion des Verbrauchs von Verpackungspapier um 30 % erreicht (entspricht 4,2 Mio. t Papier). Streng genommen kommt es dadurch zu einem Mehrverbrauch von Kunststoff. Dieser lässt sich jedoch nicht exakt quantifizieren, da derzeit quasi nicht mit Mehrweg-Kunststoff Verpackungen gearbeitet wird und dies auch besondere Logistikmaßnahmen erfordern würde. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Beim Verbrauch graphischer Papiere ist ein abnehmender Trend zu beobachten und es ist davon auszugehen, dass sich dieser Trend bis 2050 fortsetzt. Da die Entwicklungen in den einzelnen Segmenten nicht exakt quantifiziert werden können, wird ein allgemeiner Rückgang von 40 % angenommen (entspricht 2,4 Mio. t Papier). Erreicht wird dies durch eine Umstellung auf papierlose Büros, dem Rückgang der Papierwerbung sowie einem Rückgang im Bereich von Printmedien (Presse, Zeitschriften).

Sowohl bei den Verpackungen als auch bei den graphischen Papieren wird von einer linearen Entwicklung ausgegangen. Auch in der Zellstoff- und Papierindustrie werden die energiebedingten THG-Emissionen bis 2050 vollständig vermieden durch einen Umstieg auf erneuerbare Energieträger. Die quantitative Ausgestaltung der angepassten Produktionsmengen sind in Tabelle 12 zusammengefasst.

Tabelle 12: Annahmen Zellstoff- und Papierindustrie im GreenLife-Szenario für das Zieljahr 2050

	Annahmen
Produktionsmengen	Verpackungen • Produktionsrückgang um 30 % (Produktion in 2050: 9,8 Mio. t)

	Annahmen
	Lineare Entwicklung
	Graphische Papiere
	- Produktionsrückgang um 40 % (Produktion in 2050: 3,6 Mio. t) - Lineare Entwicklung

Quelle: eigene Zusammenstellung

4.3.9 Nahrungsmittelindustrie

Im GreenLife-Szenario wären in der Nahrungsmittelindustrie prinzipiell Verhaltensänderungen sowohl im Heimtierbereich sowie im Bereich der Convenience-Nahrungsmittel denkbar. Aufgrund mangelnder Datengrundlage wird jedoch auf eine entsprechende Umsetzung in der Nahrungsmittelindustrie verzichtet und es werden lediglich die Änderungen im Landwirtschaftssektor gespiegelt, die einen Einfluss auf die verarbeiteten Fleisch- und Milchmengen haben (s. Kapitel 4.1). Änderungen ergeben sich dort aus der Anpassung des Selbstversorgungsgrades, einer weiteren Reduktion des Fleischkonsums sowie einer Reduktion des Milchkonsums. In der Summe kommt es zu einem starken Rückgang der produzierten Fleisch- und Milchmengen auf 1,48 Mio. Tonnen bzw. 15,9 Mio. Tonnen in 2050. Damit sinkt der Energiebedarf in der Nahrungsmittelindustrie. Die Annahmen bezüglich der Pfadentwicklung orientieren sich ebenfalls an den Annahmen in der Landwirtschaft. Die restlichen Annahmen in der Nahrungsmittelindustrie sind identisch zu den anderen Green-Szenarien mit Ausnahme von GreenLate (vgl. Dittrich et al. (2020a; b)). Die Eckpunkte sind in Tabelle 13 zusammengefasst.

Tabelle 13: Annahmen Nahrungsmittelindustrie im GreenLife-Szenario für das Zieljahr 2050

	GreenLife
Umstellung der Energieträger auf Strom	Reduktion des Energieträgereinsatzes - bis 2030 um 30 % und Ersatz durch Strom - bis 2040 Ersatz von 70 %
Effizienzsteigerung	Jährliches Wachstum um 0,7 % bis 2050 Effizienzsteigerung um Faktor zwei

Quelle: eigene Zusammenstellung

4.3.10 Textilindustrie

In der Textilindustrie liegen die wesentlichen Transformationsschritte in der Umstellung von zunächst Kohle- und Ölfeuerung auf Gasfeuerung und im Weiteren auf elektrische Dampferzeugung sowie in der Steigerung der Energieeffizienz. Die technischen Parameter sind für alle Green-Szenarien, mit Ausnahme von GreenLate, identisch. (Für weitere Erläuterung siehe Dittrich et al. (2020a)).

Für die Textilindustrie ist keine Zuordnung einer modellendogen bestimmten Produktionsmengenänderung erfolgt, so dass die Produktion in allen Green-Szenarien als identisch angenommen wurde.

Tabelle 14: Annahmen Textilindustrie im GreenLife-Szenario

	Annahmen
Technologieumbau	Umstellung Kohle-, Ölfeuerung auf Gas bis 2030, Umstellung auf Strom zur Dampferzeugung 2030-2040-2050: 70 %-85 %-100 %

	Annahmen
Spezifischer Endenergieverbrauch (EEV)	Effizienzsteigerung um 50 % bis 2050: 1/3 bis 2030, 1/3 bis 2040, 1/3 bis 2050
Minderung der prozessbedingten THG-Emissionen	Keine prozessbedingten THG-Emissionen

Quelle: eigene Zusammenstellung

Energiebedingte THG-Emissionen in der Textilindustrie werden durch die Umstellung auf erneuerbare Energieträger bis 2050 vollständig reduziert. Der Endenergieverbrauch liegt bei 4,1 [6,2/5,2] TWh in 2050 [2030/2040], der Anteil Strom beträgt 4,1 [4,4/4,4] TWh.

4.4 Abfall und Abwasser

Im Sektor Abfall und Abwasser werden nach der Systematik der Nationalen Inventarberichterstattung (NIR) ausschließlich nicht-energetische THG-Emissionen berichtet. Für Deutschland sind folgende Bereiche relevant²:

- ▶ Deponie,
- ▶ Kompostierung und Vergärung organischer Abfälle,
- ▶ mechanisch-biologische Abfallbehandlung (MBA) und
- ▶ Abwasserbehandlung.

Im Kontext der Szenariengestaltung werden im Bereich Abfall und Abwasser ausschließlich Änderungen vor dem Hintergrund veränderter Verhaltensstrukturen oder Effizienzannahmen angenommen. Das bedeutet, dass sämtliche technische Maßnahmen im Bereich der Abfall- und Abwasserbehandlung in allen Green-Szenarien identisch sind und im Bericht der GreenEe-Szenarien dargelegt sind (siehe Dittrich et al. (2020a)). Veränderungen ergeben sich ausschließlich durch Veränderungen der Abfallmengen, die aus den exogenen Vorgaben zur Materialeffizienz aus der Rohstoffberechnung resultieren. Im GreenLife-Szenario bedingen die Annahmen zu Verhaltensänderungen rückläufige Abfallmengen in manchen der Bereiche (siehe Tabelle 15).

Die energetische Nutzung von Abfallmassen ist im Sektor Energie beinhaltet. Für die Szenarien wird jeweils die gleiche Abfallmengenänderung angenommen wie hier für die nicht-energetischen Bereiche. Grundsätzlich wird über alle Szenarien hinweg unterstellt, dass der Anteil des fossilen Kohlenstoffs in Abfallmengen zur energetischen Verwertung bis 2050 auf Null reduziert wird und die korrelierenden Annahmen im Bereich Industrie, konkret chemische Industrie, getroffen werden.

Tabelle 15: Annahmen Abfall und Abwasser im GreenLife- Szenario

	Annahmen
Deponie	Kontinuierliche Minderung der Methanemissionen um 50 % bis 2050 gegenüber 1990 Rückbau und aerobe Stabilisierung bei 30 % der Ablagerungen
MBA/MBS	kontinuierlich sinkende Abfallmenge zur Behandlung 2030-2040-2050: 90 %-85

² Aus der Abfallverbrennung werden für Deutschland keine nicht-energetischen THG-Emissionen berichtet.

	Annahmen
	%-80 %
Kompostierung/-Vergärung	kontinuierlich sinkende Abfallmenge zur Behandlung 2030-2040-2050: 90 %-85 %-80 %
Abflusslose Gruben	kontinuierliche Reduzierung der Methanemissionen um 50 % bis 2050 durch Erhöhung des Anschlussgrades der Bevölkerung
Kläranlagen	weitergehende Reduzierung Proteinzufuhr in Anlehnung DGE-Empfehlung auf 23 kg/E/a bis 2050

Quelle: eigene Zusammenstellung

4.5 Gebäude

Die grundsätzlichen Maßnahmen und Stellschrauben im Gebäudewärmebereich in GreenLife sind im Folgenden aufgezeigt (Tabelle 16).

Tabelle 16: Überblick Annahmen im Gebäudewärmebereich GreenLife

Maßnahmen / Stellschrauben	GreenEe1 und 2	GreenLife
Sanierungstiefe	Ab 2025 - Gebäude ohne Dämmrestriktionen: • Dach um 0,1 W/m²K • Wand 0,15 W/m²K	
Sanierungsrate	im Mittel von 2011 bis 2050: 2,6 % 2021-2030 2,4 % 2031-2040 2,7 % 2041-2050 3,2 %	im Mittel von 2011 bis 2050: 2,8 % 2021-2030 2,5 % 2031-2040 3,3 % 2041-2050 3,9 %
Bewohnte Wohnfläche 2050	bewohnte Wohnfläche WG: 3,55 Mrd. m ² ~ 49,4 m ² /Kopf	bewohnte Wohnfläche WG: 2,96 Mrd. m ² ~ 41 m ² /Kopf
Nutzfläche NWG 2050	Nutzfläche NWG: 2,54 Mrd. m ²	
Rebound nach Sanierung (mehr Heizungsverbrauch)	Angleichung des realen Verbrauchs an den gerechneten Bedarf	Verbrauch auf niedrigerem Niveau
Wärmepumpen (Resultat aus Narrativ und anderer Annahmen zu Anteil Fernwärme u.a.)	Bis 2050 80 % Wärmepumpen	Bis 2050 Anteil WP ca. 76 %
Gaskessel und Solarthermie	Kein PtH im Pfad, 2050 keine Brennwertkessel, Solarthermie läuft ab 2020 aus	
Wärmenetze (Anteil Endenergie HH+GHD)	2030: 15 % 2050: 20 %	2030: 15 % 2050: 24 %

Quelle: eigene Zusammenstellung

Aufgrund der Charakteristik sind die rohstofflichen Annahmen identisch zu denen der GreenEe-Szenarien und werden unter Berücksichtigung der veränderten Wohnflächen und Gebäudestruktur übernommen.

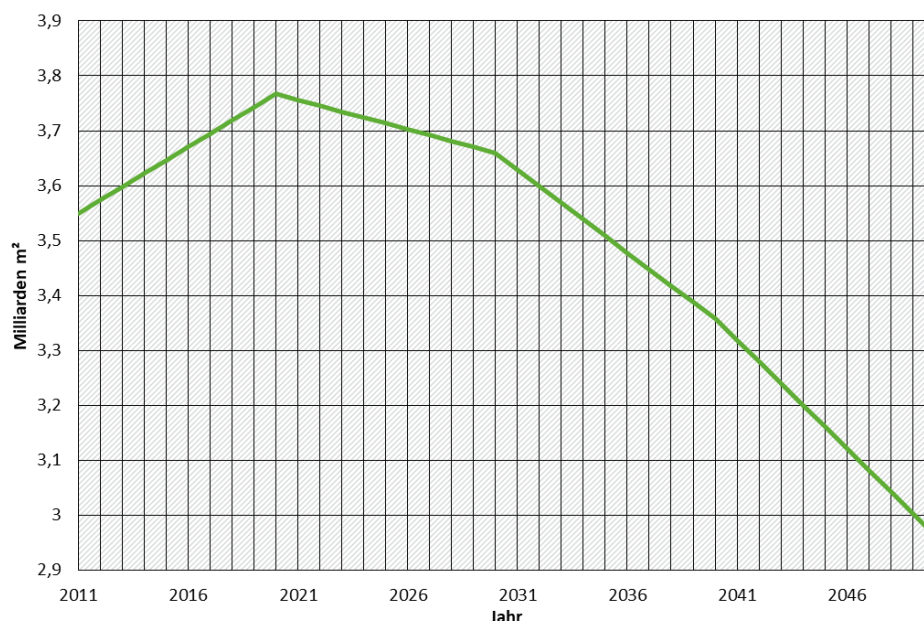
4.5.1 Entwicklung des Gebäudewärmeverbrauchs

4.5.1.1 Entwicklungen von Wohn- und Nutzflächen

Im Szenario GreenLife steigt die bewohnte Pro-Kopf Wohnfläche wie in den GreenEe-Szenarien bis zum Jahr 2030 weiter an, liegt 2030 jedoch mit 46 m²/Kopf auf einem niedrigeren Niveau und sinkt anschließend bis 2050 auf 41 m²/Kopf. Die Bevölkerungsentwicklung ist in allen Jahren identisch in allen Green-Szenarien. Die resultierende Gesamtwohnfläche ist deutlich rückläufig ist (siehe Abbildung 1) und liegt in 2050 bei knapp 3 Mrd. m² bzw. rund 15 % niedriger als in den anderen Green-Szenarien außer GreenSupreme. GreenLife und GreenSupreme zeigen somit eine sehr ambitionierte Entwicklung.

Die niedrigere bewohnte Pro-Kopf Wohnfläche als in den anderen Green-Szenarien resultiert zum Teil aus einem höheren Anteil von Mehrfamilienhäusern und niedrigerem Anteil von Einfamilienhäusern an der Neubauwohnfläche. Weitere Faktoren für die Veränderungen sind alternative Wohnformen einschließlich gemeinschaftlichem und Mehrgenerationen-Wohnen sowie flexible Bauweisen. Das heutige Verhältnis von ca. 60 % Anteil von Wohngebäuden mit bis zu zwei Wohnungen an der Neubauwohnfläche und ca. 40 % Anteil von Wohngebäuden mit mehr als zwei Wohnungen kehrt sich in GreenLife ab 2020 um, so dass der Anteil von Wohngebäuden mit bis zu zwei Wohnungen an der Wohnfläche im Jahr 2050 bei 55 % liegt. In allen anderen Green-Szenarien, mit Ausnahme von GreenSupreme, liegt der Anteil an der Wohnfläche 2050 demgegenüber bei 61 %. Die Neubaurate liegt wie in den anderen Green-Szenarien bei 0,7- 0,5 – 0,4 %), die Abgangsrate ist höher und beträgt 1,0 – 1,35 – 1,6 % jeweils bezogen auf die Wohnfläche pro Jahr und bezogen auf die Dekaden bis 2030 – 2040 – 2050.

Abbildung 1: Verlauf der bewohnten Wohnfläche im GreenLife-Szenario



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG – GEMOD

Die Fläche in Nichtwohngebäuden wird in allen Szenarien identisch angenommen, siehe Dittrich et al. (2020a). Sie steigt dort ebenfalls von ca. 2,28 Mrd. m² im Jahr 2011 auf 2,542 Mrd. m² in 2050.

4.5.1.2 Entwicklung von Sanierungsraten und –tiefen

Die Sanierungstiefen sind identisch mit denen der GreenEe-Szenarien. Durch die eine leicht andere Gebäudestruktur liegt die mittlere flächengewichtete Sanierungsrate mit 2,8 % geringfügig höher als in den GreenEe-Szenarien.

4.5.1.3 Annahmen zu Innentemperaturen und Nutzerverhalten in GreenLife

Durch die Charakteristik des GreenLife-Szenarios, dass die Bevölkerung aktiver die nachhaltige Entwicklung unterstützt, ergeben sich auch veränderte Annahmen zu den anderen Green-Szenarien (außer GreenSupreme) zum Nutzungsverhalten in Gebäuden. Die Innentemperaturen zur Berechnung des Heizwärmebedarfes gemäß der DIN V 4108-6 sind in allen Green-Szenarien identisch. Allerdings werden für GreenLife die empirisch abgeleiteten Faktoren zur Anpassung des nach Normvorschriften berechneten theoretischen Heizwärmebedarfs an den tatsächlichen Verbrauch auf 0,9 limitiert, d.h. dass der Bedarf auch bei sehr gut gedämmten Gebäuden 10 % unter dem theoretischen Bedarf liegt. Die Nutzerverhaltensänderungen betreffen Gebäude mit einem Nutzwärmebedarf für Raumwärme unter 57 kWh/m²a.

4.5.1.4 Ausstattung mit Wärmerückgewinnungsanlagen

Die Durchdringungsrate mit Wärmerückgewinnungsanlagen entwickelt sich in GreenLife sehr ähnlich zu den anderen Green-Szenarien (mit Ausnahme von GreenLate), im Jahr 2020 liegt die Durchdringung in Wohngebäuden in beiden Szenarien bei knapp 20 %. In GreenLife liegt sie im Jahr 2050 aber aufgrund des geringeren Anteils von Altbauten bzw. ineffizienteren Gebäuden bei 68 % statt 61 %. Dabei ist die absolute Anzahl von Wärmerückgewinnungsanlagen aufgrund der geringeren Gebäudeanzahl niedriger als beispielsweise in den GreenEe-Szenarien.

4.5.1.5 Resultierender Nutz- und Endenergiebedarf im Zielpunkt 2050

Der Nutzwärmebedarf für Raumwärme von Wohngebäuden liegt 2050 durch die niedrigere Wohnfläche, den höheren Anteil von Mehrfamilienhäusern, welche bei gleichen Dämmstärken durch das günstigere Oberfläche-zu-Volumenverhältnis einen etwas niedrigeren spezifischen Raumwärmebedarf aufweisen als Einfamilienhäuser sowie durch ein geändertes Nutzerverhalten um 27 % niedriger als in den anderen Green-Szenarien (mit Ausnahme von GreenSupreme).

Der Nutzwärmebedarf für Raumwärme von Nichtwohngebäuden liegt in GreenLife um nur 5 % unter dem der GreenEe-Szenarien, da der Nichtwohngebäudebestand in beiden Szenarien identisch ist.

Insgesamt liegt der Nutzwärmebedarf für Raumwärme und Warmwasser um knapp 16 % unter dem in GreenEe1 und GreenEe2, der Endenergiebedarf mit 258,5 TWh um 17,5 % unter dem in GreenEe1 und GreenEe2.

Tabelle 17: Modellierter Nutzenergie- und Endenergiebedarf in Wohn- und Nichtwohngebäuden 2050

[TWh/a]	Nutzenergie GreenLife			Endenergie GreenLife (zu decken durch Strom, Umgebungswärme, Fernwärme)			Endenergie GreenEe
	RW	WW	SUMME	RW	WW	SUMME	SUMME
Wohngebäude	87,8	40,1	127,9	104,9	62,7	167,6	209,6
Nichtwohngebäude	59,1	8,7	67,8	68,4	22,5	90,9	94,0

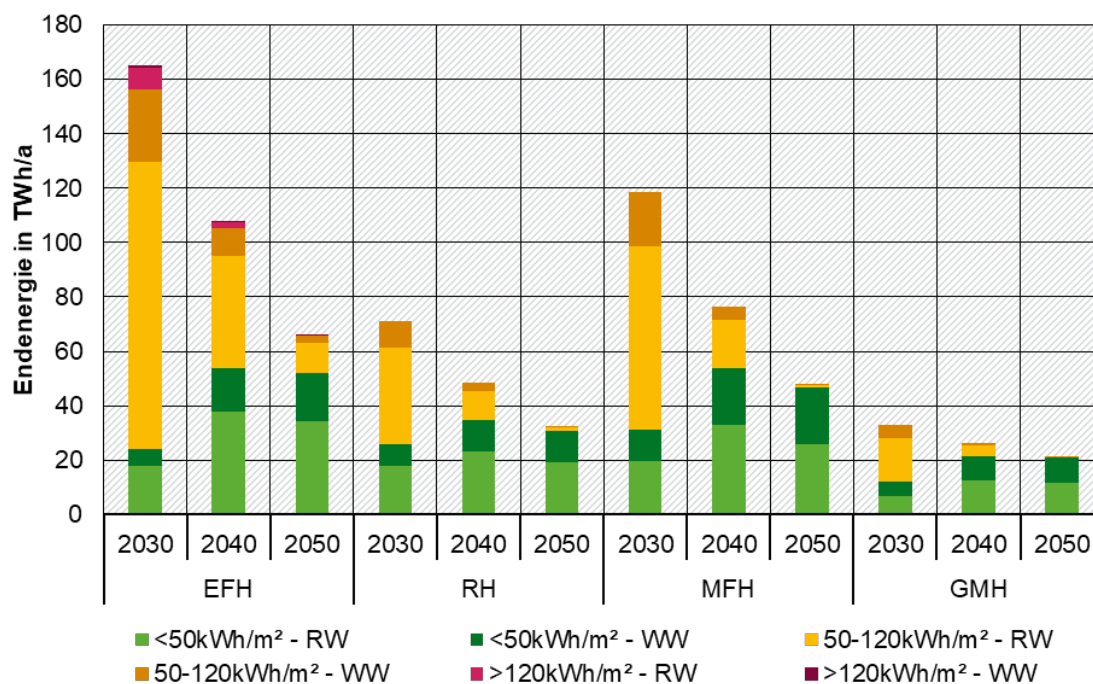
[TWh/a]	Nutzenergie GreenLife			Endenergie GreenLife (zu decken durch Strom, Umgebungswärme, Fernwärme)			Endenergie GreenEe
- GHD	55,7	5,7	61,4	62,8	15,9	78,7	81,3
- Industrie	3,4	3	6,4	5,6	6,6	12,2	12,7

Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG - GEMOD

Für die Übergabe an das Modell SCOPE werden die energetischen Zustände der Gebäude wiederum in die drei Effizienzklassen hoher Dämmstandard (Nutzwärmeverbrauch für Raumwärme von $\leq 50 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$), mittlerer Dämmstandard (Nutzwärmeverbrauch für Raumwärme von $50 - 120 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$) und geringer Dämmstandard (Nutzwärmeverbrauch für Raumwärme von $> 120 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$) aggregiert.

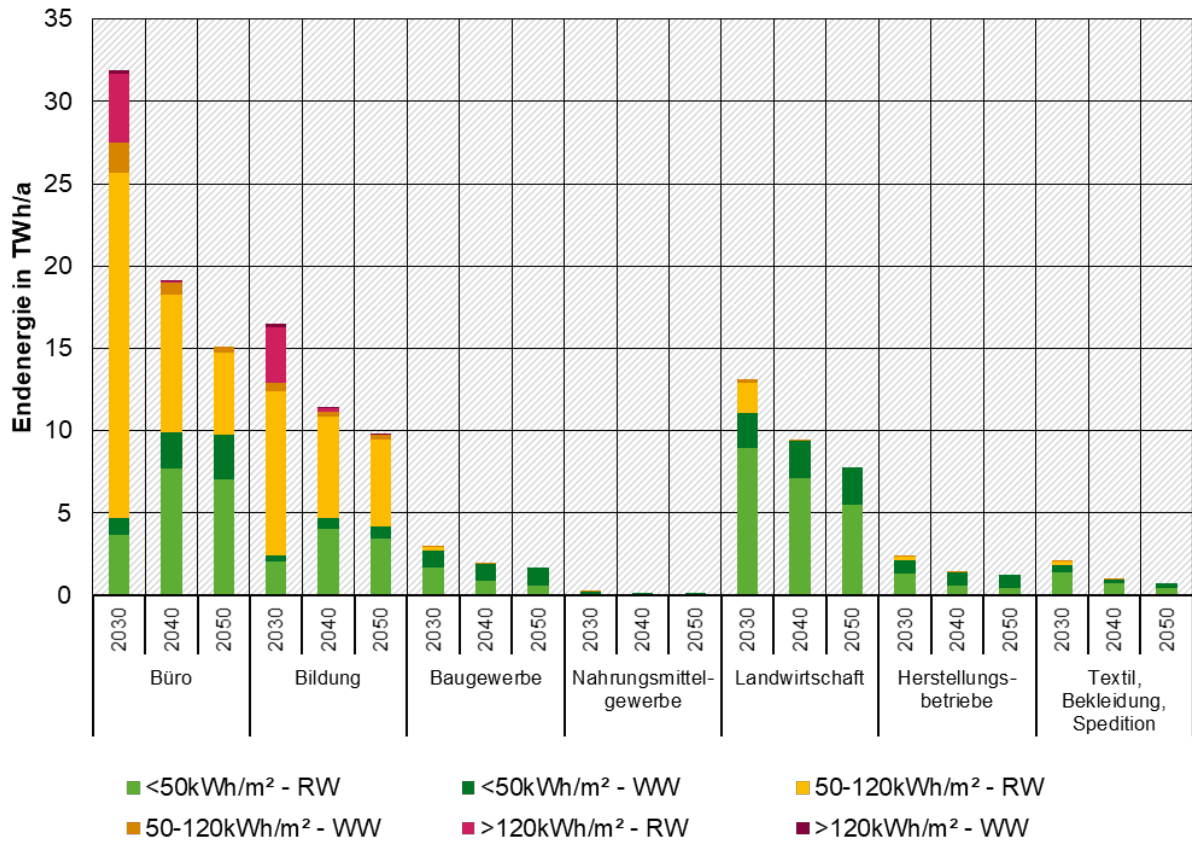
Die Differenzierung nach Gebäudetyp und Sanierungszustand ist in GreenLife in prozentualer Hinsicht fast identisch zu den anderen Green-Szenarien, mit der Ausnahme, dass der Flächenanteil von Wohngebäuden mit einem Nutzenergieverbrauch für Raumwärme unter $50 \text{ kWh}/\text{m}^2\text{a}$ an der gesamten Wohnfläche um einen Prozentpunkt höher liegt. Absolut gesehen, liegen die Verbräuche in allen Gebäudekategorien geringer. Im Folgenden ist die Entwicklung der Endenergie differenziert nach Gebäudetypen dargestellt. Die Daten befinden sich im Anhang.

Abbildung 2: Unterteilung der Wohngebäude in Effizienzklassen in GreenLife – Endenergie



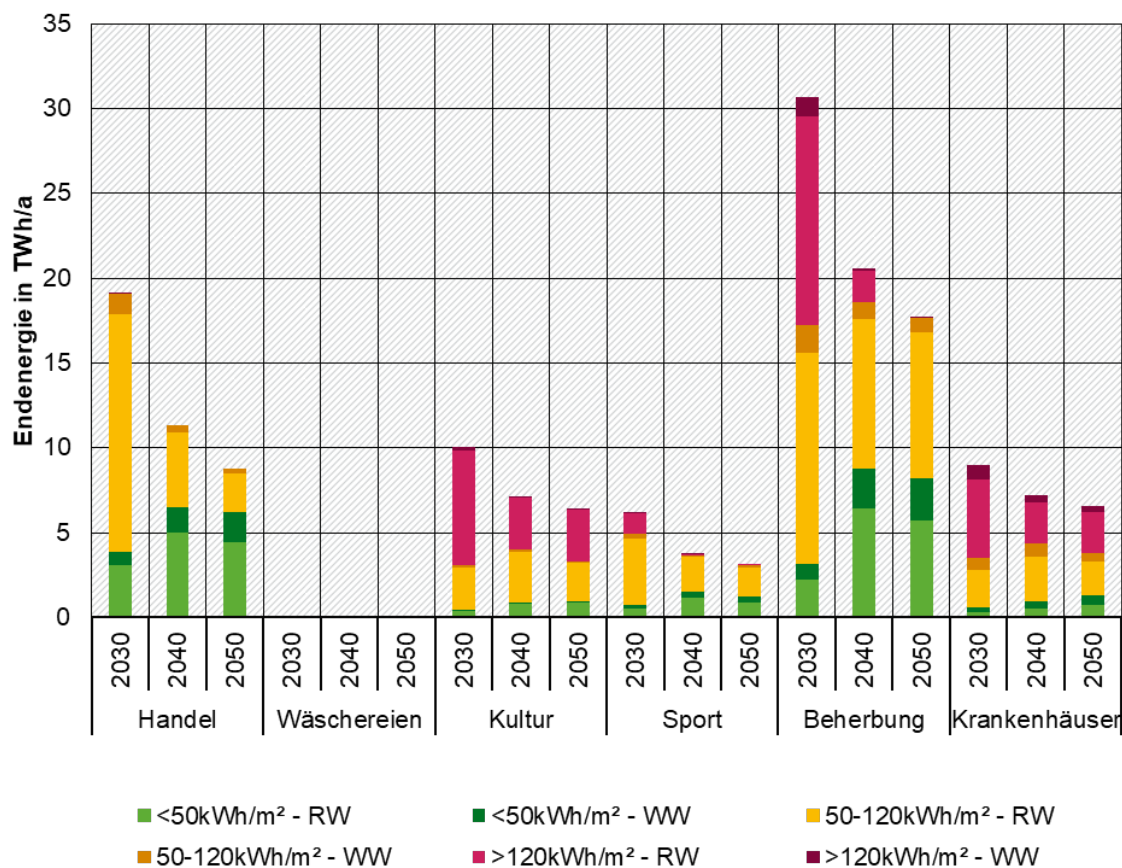
Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG – GEMOD

Abbildung 3: Unterteilung der Nichtwohngebäude Teil 1 in Effizienzklassen in GreenLife – Endenergie



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG - GEMOD

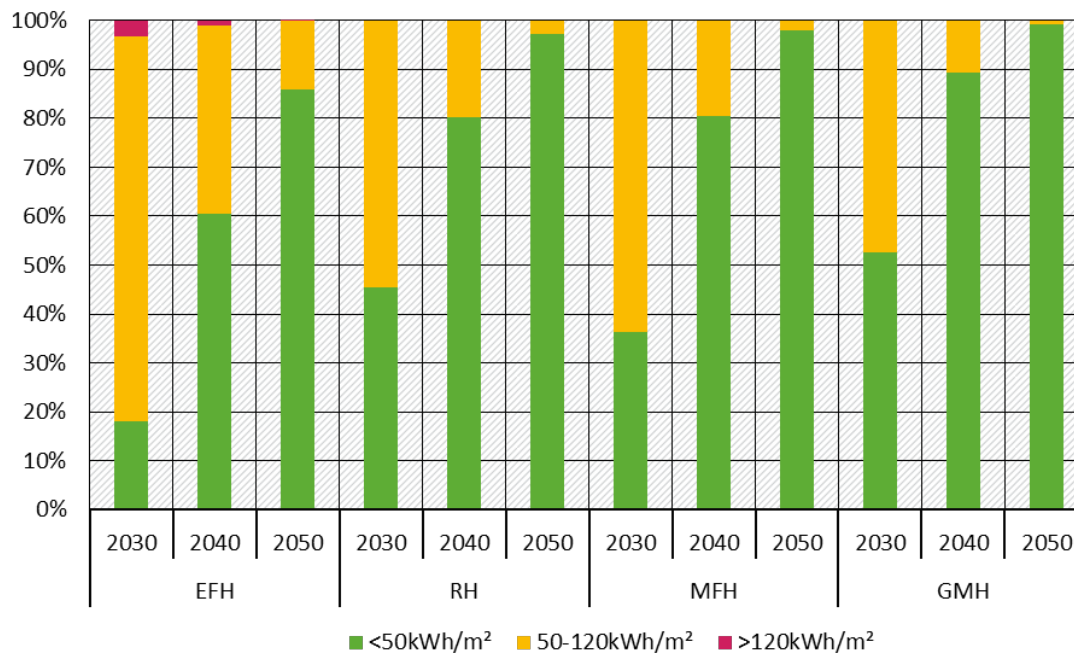
Abbildung 4: Unterteilung der Nichtwohngebäude Teil 2 in Effizienzklassen in GreenLife – Endenergie



Quelle: eigene Darstellung, Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG – GEMOD

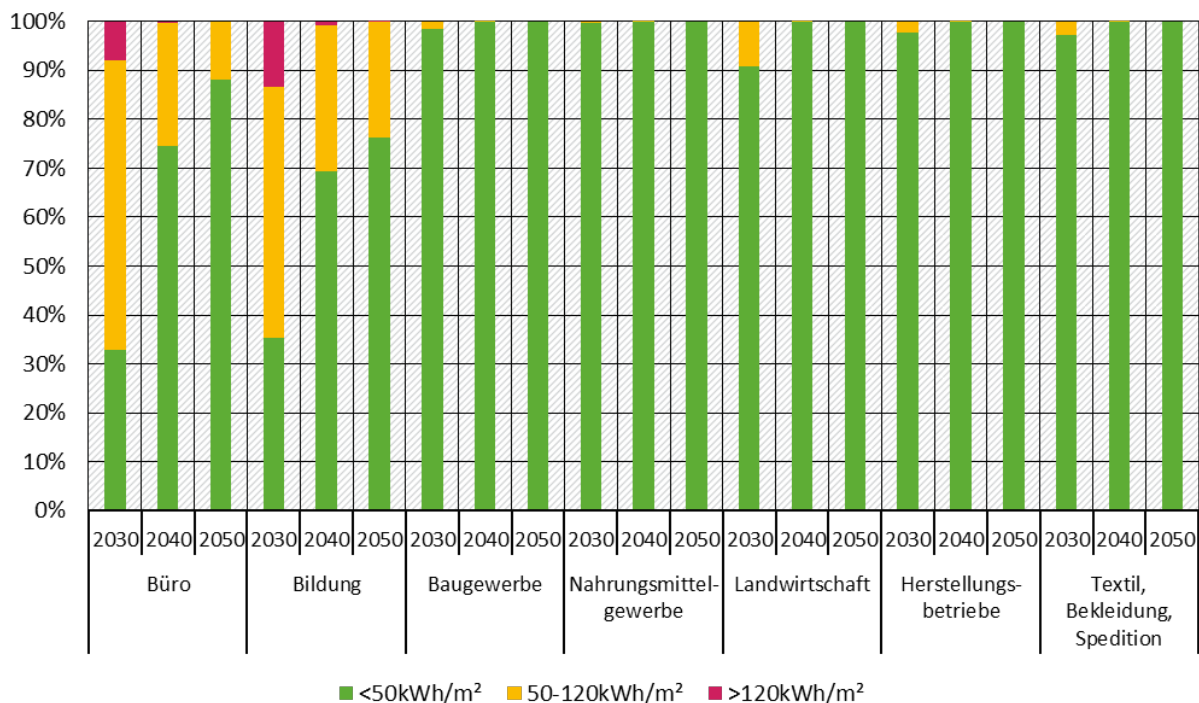
Die Gebäudeanzahl differenziert nach Gebäudetypen ist als relativer Wert und damit als Maß für die Gebäudesanierung im Folgenden in der Entwicklung dargestellt. Die Gebäudeanzahl ist in diesem Fall auch repräsentativ für die Flächen in den jeweiligen Effizienzklassen. Die detaillierten Daten sind im Anhang dargestellt.

Abbildung 5: Unterteilung der Wohngebäude in Effizienzklassen in GreenLife – relative Anzahl bzw. Anteil Flächen



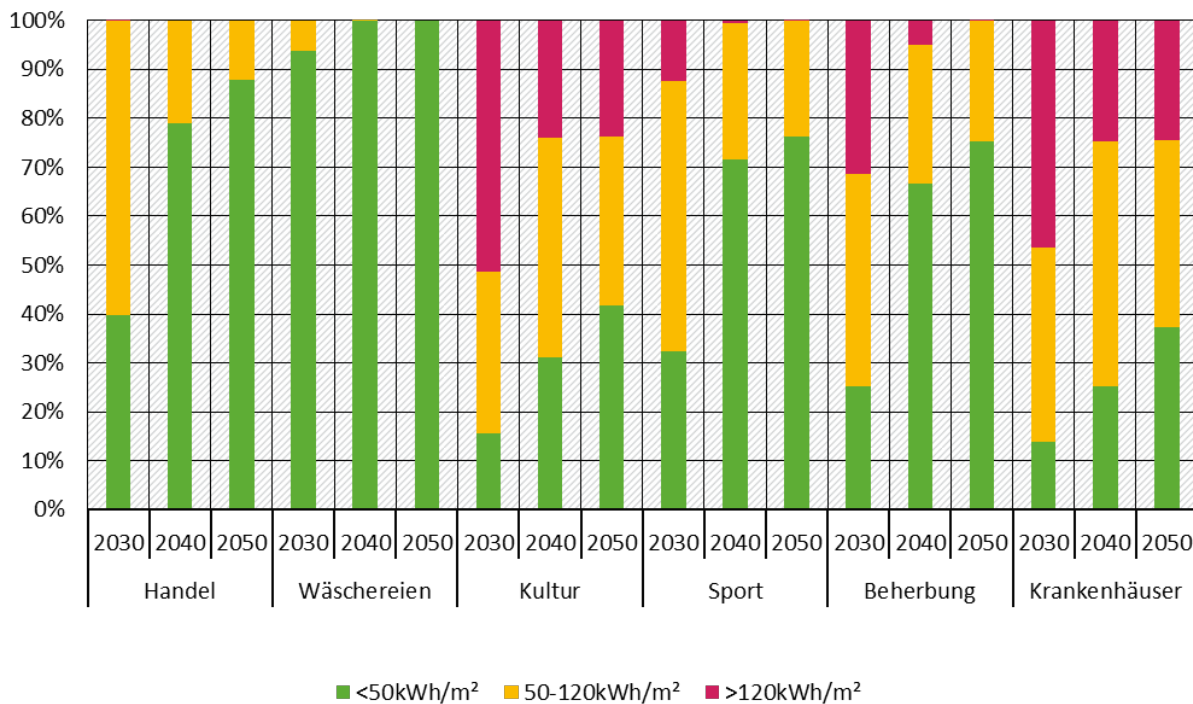
Quelle: eigene Darstellung, Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG – GEMOD

Abbildung 6: Unterteilung der Nichtwohngebäude Teil 1 in Effizienzklassen in GreenLife – relative Anzahl bzw. Anteil Flächen



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG – GEMOD

Abbildung 7: Unterteilung der Nichtwohngebäude Teil 2 in Effizienzklassen in GreenLife – relative Anzahl bzw. Anteil Flächen



Quelle: eigene Darstellung, Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG – GEMOD

4.5.2 Vorgaben für die Entwicklung des Heizungsanlagenbestandes

Die Restnutzungsdauern des heutigen, überalterten Heizungsanlagenbestandes sind in GreenLife identisch mit denen der anderen Green-Szenarien, mit Ausnahme von GreenLate.

Die Marktanteile der Heizungstechniken beim Austausch von alten Heizungsanlagen verlaufen in GreenLife bis 2050 wie in den anderen Green-Szenarien, mit Ausnahme von GreenLate. Eine Ausnahme ist der Anteil von Wärmenetzanschlüssen, welche in GreenLife ab 2030 aufgrund der stärkeren Urbanisierung weniger stark zurückgehen. In GreenLife beträgt der Anteil von Wärmenetzen zur Endenergiebereitstellung in Haushalten und GHD 24 % gegenüber 20 % in den anderen Green-Szenarien, mit Ausnahme von GreenSupreme.

4.5.3 Optimierung der Wärmebereitstellung

Die Optimierung der Wärmebereitstellung in SCOPE beinhaltet im Fall der Wärmenetzversorgung die Investitionsentscheidung aus einer Auswahl von Technikkombinationen:

- ▶ moderne KWK-Systeme mit Großwärmepumpen (KWK+GWP),
- ▶ moderne KWK-Systeme mit saisonaler Solarthermie (KWK/HWK + Solarthermie),
- ▶ Geothermie oder ländliche ganzjährige Solarthermie (Geothermie).

Andere Systeme sind dagegen fest vorgegeben:

- ▶ KWK-Bestandsanlagen (KWK-Bestand),
- ▶ Müll oder Biomasse-Bestandsanlagen (Müll),

► Quartiers-Wärmepumpen für Nahwärme (Quartiers-WP).

Im Falle der Objektversorgung beinhaltet die Optimierung in SCOPE in 2030 und 2040 die Ausprägung des Anteils von Wärmepumpen gegenüber Gaskessel zwischen den exogen vorgegebenen Wärmepumpenkorridor hin zu einem Zielsystem und in allen Stützjahren die Wahl zwischen Sole- und Luft-Wärmepumpe. Andere Systeme oder Sekundärwärmeerzeuger sind dagegen fest vorgegeben (Solarthermie, Öl, Biomasse, Direktstrom). Die konkrete Ausgestaltung der Wärmeversorgung obliegt der Kostenoptimierung in Rückkopplung mit dem Gesamtenergieversorgungssystem.

4.5.3.1 Optimierung der Wärmebereitstellung in Wärmenetzen

Die netzgebundene Versorgung erfolgt mit Müllheizkraftwerken, Großwärmepumpen, Solarthermie und Geothermie. Aufgrund des eingeschränkten Rückverstromungspotenzials wird der Einsatz von KWK weitgehend reduziert. Neben Müll und Geothermie betrifft dies die Kombination von KWK mit Abwasser-Großwärmepumpen. Im Bereich neuer Netze werden dagegen Großwärmepumpen oder saisonale Solarthermiesysteme unterstellt, welche auch weitestgehend ohne den Einsatz von Brennstoffen auskommen. Im Transformationspfad für die Stützjahre 2030 und 2040 müssen einerseits Bestands-KWK-Anlagen berücksichtigt werden, sowie die Wärmeerzeugung aus Biomasse-KWK und ein höheres Müllaufkommen. Für Tiefengeothermie wird aufgrund der Fragen zur Verfügbarkeit von petrothermalen Verfahren von einem kontinuierlichen Wachstum bis 2050 ausgegangen. Für alle anderen Techniken wird im Jahr 2030 ein Markthochlauf unterstellt der bis 2040 abgeschlossen ist. Diese ermöglicht, dass konventionelle KWK-Systeme nur für eine begrenzte Zeit mit einer Lebensdauer von ca. 20 Jahren (Fokus große BHKW) als Brückentechnologie zugebaut werden, aber 2050 nicht mehr vorhanden sind.

Im Szenario GreenLife sind aufgrund des geringeren Gesamtverbrauchs die unterstellten Potenzialgrenzen der effizienteren Technologien für Müll-HKW, Wärmepumpen mit und ohne KWK, monovalente Tiefengeothermie und Solarthermie fast ausreichend, um das angenommene maximale Potenzial von 24 % Wärmenetzen am Wärmemarkt zu decken. In einzelnen Netztypen kommt es zu größeren Abweichungen, was an der groben Zuordnung der EE-Potenziale auf diese Netztypen liegt aber in der Aggregation in der Optimierung ausgeglichen wird. Im Folgenden ist das Potenzial für Systeme inkl. die zusätzliche Kombination von KWK mit Elektrodenkessel dargestellt.

Tabelle 18: Maximales Versorgungspotenzial der Wärmenetzversorgung in 2050 als Input für SCOPE

	Versorgung über bestehende urbanen Wärmenetze (inkl. Verdichtung)	Versorgung durch neue urbane Netze	Versorgung durch neue ländliche Netze	GreenLife SUMME	GreenEe SUMME
Anteil an Gebäudewärme für HH und GHD	16,9 %	4,2 %	2,9 %	24,0 %	20,0 %
Endenergie [TWh _{th}]	41,6	10,3	7,1	59,1	58,2
Netzverluste	10 %	10 %	10 %		

	Versorgung über bestehende urbanen Wärmenetze (inkl. Verdichtung)	Versorgung durch neue urbane Netze	Versorgung durch neue ländliche Netze	GreenLife SUMME	GreenEe SUMME
Wärmeerzeugung [TWh _{th}]	46,2	11,5	7,9	65,7	64,7
Müll-HKW [TWh _{th}]	4,2	0,0	0,0	4,2	4,2
Kombination Groß-WP + KWK [TWh _{th}]	28,3	0,0	0,0	28,3	28,3
Quartiers-WP [TWh _{th}]	0,0	7,0	0,0	7,0	7,0
Tiefengeothermie [TWh _{th}]	9,3	6,6	4,6	20,5	20,5
- Tiefengeothermie KWK [TWh _{th}]	6,2	4,4	3,0	13,6	13,6
- Tiefengeothermie Heizwerk [TWh _{th}]	3,1	2,2	1,5	6,8	6,8
Solarthermie-ganzjährig [TWh _{th}]	0,0	0,0	4,8	4,8	4,8
Differenz (KWK+HKW+Solar+PtH) [TWh _{th}]	4,5	-2,1	-1,4	1,0	0,0

Quelle: eigene Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG - SCOPE

4.5.3.2 Objektversorgung

Der Bereich der dezentralen Wärmebereitstellung macht im Jahr 2050 75 % des Gebäudewärmebedarfs für Haushalte und Gewerbe aus und kann über Wärmepumpen versorgt werden. Dabei wird für die einzelnen Gebäudetypen zwischen Sole- und Luft-Wasser-Wärmepumpen unterschieden. Das theoretische technische Potenzial für Erdwärmesonden beträgt im Wohngebäudebereich im Jahr 2050 im Mittel über alle Gebäudetypen ca. 70 % (zur Methodik siehe Mellwig et al. (2017)). Aufgrund von Umsetzungshemmnissen wird pauschal ein Potenzial von im Mittel 50 % des Gebäudewärmebedarfs für Haushalte und Gewerbe unterstellt und basierend auf eigenen Annahmen zwischen den verschiedenen Gebäudetypen differenziert (Tabelle 19). Die Annahmen zu den Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpen sind innerhalb der Gebäudetypen zwischen dem Effizienzstandard der Gebäude differenziert.

Tabelle 19: Anteil von Wärmenetzen und JAZ (gemittelter Wert für TWW und RW) von Wärmepumpen in 2050 je Gebäudetyp in GreenLife

Gebäudetyp	Wärmenetzanteil	Potenzial Sole-WP	JAZ Sole-WP	JAZ Luft-WP
Wohngebäude				
EFH	11 %	55 %	4,7	3,7
RH	11 %	55 %	4,6	3,7
MFH	29 %	42 %	4,7	4,0

Gebäudetyp	Wärmenetzanteil	Potenzial Sole-WP	JAZ Sole-WP	JAZ Luft-WP
GMH	26 %	44 %	4,8	4,1
Nichtwohngebäude				
Büro	31 %	43 %	4,9	4,1
Bildung	63 %	23 %	5,0	4,1
Baugewerbe	10 %	55 %	4,5	4,1
Nahrungsmittelgewerbe	10 %	55 %	4,5	4,2
Landwirtschaft	6 %	59 %	4,9	4,2
Herstellungsbetriebe	9 %	56 %	4,5	4,1
Industrie	0 %	60 %	4,6	4,2
Textil, Bekleidung, Spedition	13 %	53 %	4,9	4,1
Handel	12 %	55 %	4,9	4,1
Wäschereien	10 %	55 %	4,5	4,2
Kultur	59 %	25 %	5,1	4,2
Sport	65 %	21 %	5,0	4,1
Beherbergung	31 %	42 %	5,0	4,1
Krankenhäuser	70 %	16 %	4,9	4,1

Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG - GEMOD

4.6 Verkehr

4.6.1 Vermeidung und Verlagerung im Personenverkehr

In GreenLife gibt es deutliche Unterschiede bei den zukünftigen Verkehrsentwicklungen gegenüber den anderen Green-Szenarien (mit Ausnahme von GreenSupreme), sowohl im Alltagsverkehr als auch im Fernverkehr. Diese resultieren aus Änderungen im Mobilitätsverhalten der Bevölkerung, insbesondere:

- eine deutliche Stärkung der aktiven Mobilität (Rad- und Fußverkehr)
- eine zunehmende gemeinschaftliche Nutzung von Pkw (Ridesharing) im urbanen Raum und
- eine deutliche Reduktion von Flugreisen, sowohl privat als auch geschäftlich.

Zur Abbildung dieser Verhaltensänderungen im GreenLife-Szenario wurden die Verkehrsentwicklungen im Personenverkehr differenziert für die Bevölkerung im urbanen und im ländlichen Raum sowie für Alltags- und Fernverkehr betrachtet. Ausgangspunkt dafür ist eine Aufteilung der heutigen Verkehrsleistungen auf urbane und ländliche Bevölkerung gemäß aktuell verfügbaren Mobilitätsbefragungen (Nobis / Kuhnimhof 2018). Weiterhin wurde

einbezogen, dass bis zum Jahr 2050 der Anteil der Bevölkerung im ländlichen Raum durch zunehmende Urbanisierung sinkt und sich dadurch (in allen Green-Szenarien) rund 5 %-Punkte der Gesamtfahrleistung der Bevölkerung vom ländlichen in den städtischen Raum verlagern (von 37 % im ländlichen Raum auf 32 %).

Alltagsmobilität: Im Mobilitätsverhalten der Bevölkerung urbaner Räume im Alltag ergeben sich in GreenLife deutliche Veränderungen. Diese sind einerseits durch verstärkte Aktivitäten in der Stadtentwicklung (Umsetzung des Planungskonzepts „Stadt der kurzen Wege“, Stärkung des Rad- und Fußverkehrs) geprägt, andererseits durch eine starke Verschiebung von Mobilität mit eigenem Pkw zu gemeinschaftlich genutzten Pkw (Carsharing & Ridesharing). Für die Bevölkerung ländlicher Räume werden in GreenLife keine Veränderungen im Mobilitätsverhalten angenommen, sie sind identisch zu GreenEe1, GreenEe2, GreenMe und GreenSupreme. Hintergrund sind die großen Wegelängen und begrenzte (zeitliche/räumliche) Überschneidung von Wegstrecken. Prinzipiell wären im ländlichen Raum auch mehr Sammelfahrten in Kombination mit dem ÖPNV möglich, werden in GreenLife aber nicht quantifiziert. Detailliertere Informationen zu den Annahmen für die Nahmobilität im Alltag der urbanen Bevölkerung zeigt (Tabelle 20).

Fernmobilität: Erhebliche Änderungen im Mobilitätsverhalten betreffen auch die Fernmobilität der Bevölkerung inkl. nationalem und internationalem Flugverkehr. Die Anzahl von Flugreisen nimmt stark ab: Innerhalb Deutschlands wird gar nicht mehr geflogen. Auch internationale Flugreisen werden stark reduziert, und auf nationale Urlaubsreisen durch Stärkung des hiesigen Tourismus verlagert. Dadurch sind die Verkehrsleistungen im nationalen Fernverkehr im Jahr 2050 in GreenLife insgesamt beispielsweise um knapp 5 % höher als in den GreenEe-Szenarien. Die Verschiebung von Privat-Pkw hin zu gemeinschaftlich genutzten Pkw in Städten hat auch Einfluss auf die Fernmobilität der urbanen Bevölkerung. Ohne Privat-Pkw-Besitz verschiebt sich der Modal-Split im Fernverkehr stark zum öffentlichen Personenfernverkehr. Während in den meisten anderen Green-Szenarien (Ausnahme GreenSupreme) die urbane Bevölkerung im Fernverkehr einen ähnlichen Modal-Split hat wie die ländliche Bevölkerung (etwa zwei Drittel mit dem Pkw), sinkt der Modal-Split-Anteil von Pkw im Fernverkehr der urbanen Bevölkerung in GreenLife auf ca. 40 %. Tabelle 20 gibt in der rechten Spalte eine Übersicht der GreenLife-Annahmen für die Fernmobilität der Bevölkerung im urbanen Raum.

Tabelle 21 zeigt die Verkehrsleistungen im nationalen Personenverkehr in GreenLife und GreenEe2. Insgesamt sind im Jahr 2050 die Verkehrsleistungen im nationalen Personenverkehr in GreenLife um 2 % höher als in den GreenEe-Szenarien, was auf die zusätzlichen nationalen Urlaubsreisen statt internationaler Urlaubsflüge zurückzuführen ist. Gleichzeitig erbringen Pkw in GreenLife nur etwa 50 % dieser Verkehrsleistungen (in den GreenEe-Szenarien 62 %), die Pkw-Verkehrsleistungen sind damit in GreenLife um 18 % niedriger als in den GreenEe-Szenarien. Die Pkw-Fahrleistungen sind in GreenLife im Jahr 2050 sogar um 26 % niedriger, infolge der überwiegenden Nutzung von Ridesharing-Angeboten in den Städten.

Tabelle 20: GreenLife-Annahmen zur Nah- und Fernmobilität der Bevölkerung im urbanen Raum

Nahmobilität	Fernmobilität
- Anstieg des Rad- & Fußverkehrs 2010-2050 um 77 % - Der ÖPNV steigt wie in GreenEe um 47 %.	Im innerdeutschen Fernverkehr finden im Jahr 2050 keine Flugreisen mehr statt, diese werden anteilig auf bodengebundene Verkehrsmittel aufgeteilt. Diese Annahme gilt auch für die Bevölkerung im ländlichen Raum.

Nahmobilität	Fernmobilität
• Damit sinkt in GreenLife die MIV-Verkehrsleistung im urbanen Alltagsverkehr 2010-2050 um 43 % und liegt im Jahr 2050 20 % niedriger als in GreenEe. • Insgesamt sinkt in Deutschland die MIV-Verkehrsleistung 2010-2050 um 46 % (GreenEe-Szenarien: -35 %). • Im urbanen Pkw-Alltagsverkehr erfolgt ab 2025 eine Verschiebung von Privat-Pkw hin zu Ridesharing. Im Jahr 2050 gibt es keinen signifikanten Besitz mehr von Privat-Pkw in Städten. • Die Rahmenbedingungen sind so gesetzt, dass Ridesharing nicht zulasten öffentlicher Verkehrsmittel geht, sondern ausschließlich Pkw-Fahrten ersetzt. • Bei gleicher Verkehrsleistung sinkt die Fahrleistung der urbanen Pkw-Flotte im Alltagsverkehr bis 2050 um ca. 25 % gegenüber GreenEe-Szenarien, bedingt durch die höhere Auslastung von Ridesharing-Pkw (ca. 2,4 Personen statt 1,3 Personen) trotz zusätzlicher Leerfahrten (ca. 20 %) der Ridesharing-Pkw.	• Die teilweise Substitution internationaler Urlaubsflüge durch Inlandsreisen bewirkt zusätzliche Urlaubsreisen im Inland. Dadurch sind im Jahr 2050 die Verkehrsleistungen im bodengebundenen Fernverkehr in GreenLife etwa 5 % höher als in GreenEe-Szenarien. • Im bodengebundenen Fernverkehr (Wege über 50 km) wird der Modal-Split heutiger Haushalte ohne eigenes Auto auf die gesamte Bevölkerung in urbanen Räumen übertragen. • Die Fernverkehrsleistung wird damit im Jahr 2050 in GreenLife jeweils zur Hälfte durch Pkw bzw. öffentlichen Verkehr (Bahn, Reise- und Fernlinienbusse) erbracht – gegenüber zwei Drittel Pkw-Anteil in GreenEe-Szenarien. Bei Pkw-Fernfahrten der urbanen Bevölkerung werden im Wesentlichen Carsharing-Pkw genutzt.

Quelle: eigene Zusammenstellung

Tabelle 21: Nationale Personenverkehrsleistungen in GreenLife im Vergleich zu GreenEe2

Mrd. Pkm		MIV Alltag	MIV Fern	ÖPNV	ÖPFV	Rad/Fuß	Flug national	National Gesamt
2030	GreenEe2	431	381	121	135	73	12	1.153
	GreenLife	411	353	121	165	93	11	1.153
2050	GreenEe2	312	277	132	139	79	12	950
	GreenLife	272	212	132	224	118	0	959

Quelle: eigene Analysen, ifeu

4.6.2 Entwicklung der Pkw-Flotten

Bei den technischen Entwicklungen der Fahrzeugflotten werden in GreenLife die gleichen Annahmen getroffen wie in den GreenEe-Szenarien. Bis zum Jahr 2030 werden im Bestand etwa 7,5 Mio. Elektro-Pkw erreicht (Neuzulassungsanteil ca. 40 %), ab dem Jahr 2040 kommen ausschließlich Elektro-Pkw neu in die Pkw-Flotte. Die Energieeffizienz neuer Pkw verbessert sich um ca. 1 % pro Jahr.

Allerdings resultieren aus dem Trend zu gemeinschaftlich genutzten Pkw (Ridesharing) erhebliche Veränderungen in den Flottenumschichtungen ab 2030, diese betreffen im Wesentlichen die Flottenentwicklungen in den Städten. Da durch Ridesharing deutlich weniger Fahrzeuge für die gleiche Verkehrsleistung benötigt werden, sinkt mit zunehmender Verbreitung der Ridesharing-Nutzung die Zahl der Pkw-Neuzulassungen und damit der Pkw-Bestand. Gleichzeitig haben die Ridesharing-Pkw durch ihren quasi Dauereinsatz eine wesentlich höhere Jahresfahrleistung als Privat-Pkw, wodurch sie deutlich früher ersetzt werden müssen und sich die Flottenumschichtung beschleunigt.

In den GreenEe-Szenarien entfällt der Pkw-Bestand im Jahr 2050 zu 82 % auf den urbanen Raum und zu 18 % auf den ländlichen Raum. Änderungen in GreenLife ergeben sich sowohl bei den Fahrzeugzahlen als auch bei der Größenklassenverteilung. Folgende Annahmen wurden in GreenLife getroffen:

- ▶ Der Markthochlauf von Ridesharing-Angeboten im urbanen Raum beginnt ab 2025 und verstärkt sich ab 2030. Bei einer täglichen Einsatzdauer von 10-12 Stunden und einem mittleren Besetzungsgrad von 2,4 Personen (ggü. 1,3 im Privat-Pkw) ersetzt 1 Ridesharing-Pkw im Alltagsverkehr (<50km Wegelänge) mind. 10 Privat-Pkw.
- ▶ Die mittlere Jahresfahrleistung eines Ridesharing-Pkw wird mit ca. 50-80.000 km/a angenommen (10-12h täglich, 15-20 km/h mittlere Geschwindigkeit, 350 Einsatztage/Jahr). Es wird weiterhin eine Lebensfahrleistung von 600.000 km angenommen, so dass Ridesharing-Pkw nach ca. 7-10 Jahren erneuert werden.
- ▶ Ridesharing-Pkw werden v.a. in der Alltagsmobilität (d.h. bei Wegelängen von üblicherweise unter 50 km) eingesetzt. Da die urbane Bevölkerung überwiegend keine eigenen Privat-Pkw mehr besitzt, werden Fernfahrten mit Pkw vor allem durch ergänzende Carsharing-Angebote abgedeckt.
- ▶ Ridesharing-Pkw sind mittlere und große BEV-Pkw (ähnliche Größenklassen zur heutigen Taxiflotte). Die Größenklassenverteilung in der übrigen urbanen Pkw-Flotte wird über die Anzahl von Mitfahrern und Haushaltsgrößen gemäß MiD 2017 (Nobis / Kuhnimhof 2018) sowie den Bedarf an speziellen Fahrzeugsegmenten (z.B. Wohnmobile) abgeschätzt. Daraus ergibt sich im Jahr 2050 ein Anteil von 79 % im Segment „klein“ sowie 11 % „mittel“ und 10 % „groß“.
- ▶ Die Pkw-Flotte im ländlichen Raum entwickelt sich in GreenLife genauso wie in den GreenEe-Szenarien identisch.

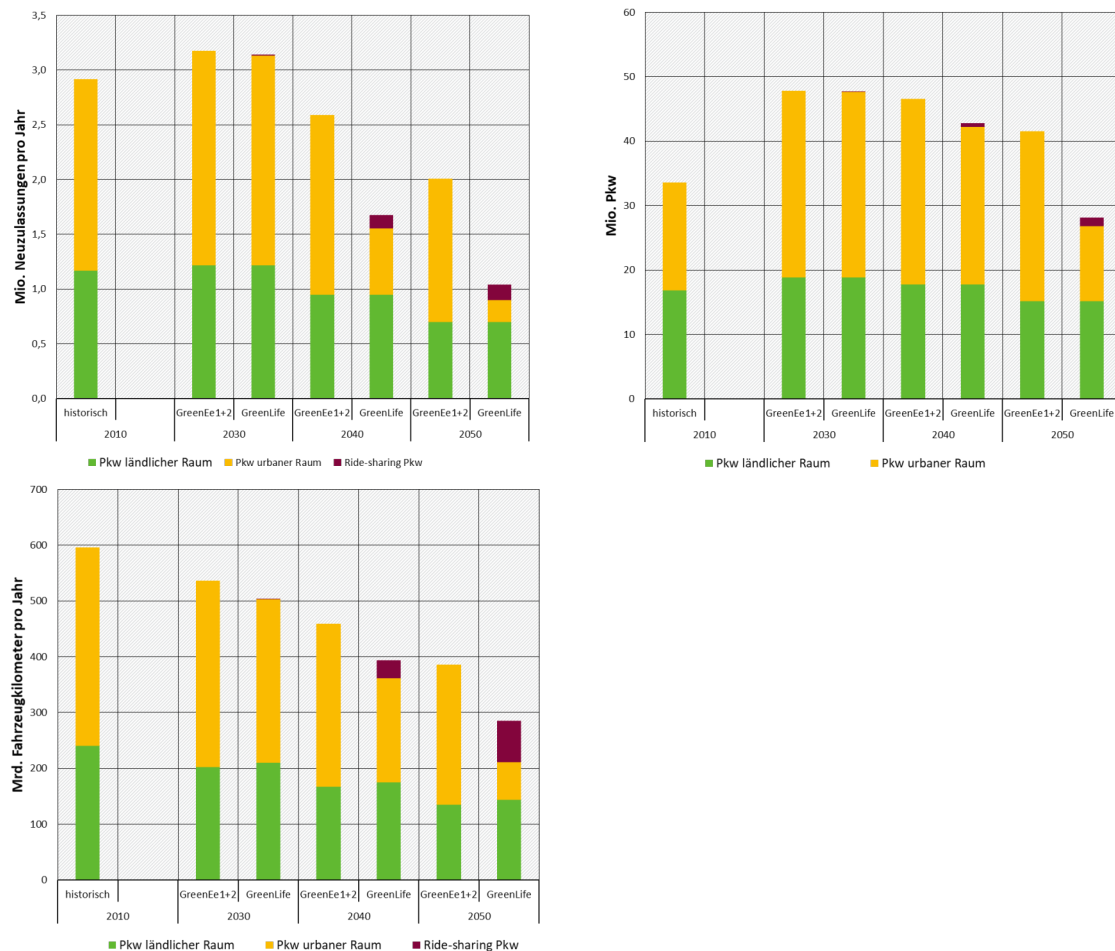
Aus diesen Annahmen heraus wurde die Anzahl der jährlichen notwendigen Pkw-Neuzulassungen abgeschätzt, mittlere Überlebenskurven für Ridesharing-Pkw abgeleitet und so die in GreenLife resultierenden Pkw-Bestände modelliert.

- ▶ Während in den GreenEe-Szenarien die Zahl der jährlichen Pkw-Neuzulassungen von 3,2 Mio./a im Jahr 2030 bis zum Jahr 2050 auf etwa 2 Mio./a abnimmt, sinkt sie in GreenLife bis auf etwa 1 Mio./a.
- ▶ Der Pkw-Bestand sinkt bis 2050 in GreenLife auf ca. 28 Mio. und liegt damit um ein Drittel niedriger als in den GreenEe-Szenarien.

- ▶ Während der Pkw-Bestand im ländlichen Raum gleich ist, kommt es im urbanen Raum zu einer Halbierung des Pkw-Bestands gegenüber den GreenEe-Szenarien.
- ▶ Durch die beschleunigte Flottenumschichtung ist der Anteil von Elektro-Pkw im Bestand im Jahr 2050 in GreenLife mit 88 % leicht höher als in den GreenEe-Szenarien (86 %).

Abbildung 8 veranschaulicht die Unterschiede bei Pkw-Neuzulassungen und –Beständen sowie bei den Pkw-Fahrleistungen zwischen GreenLife und den GreenEe-Szenarien.

Abbildung 8: Pkw-Neuzulassungen, –Bestände und –Fahrleistungen in GreenLife und den GreenEe-Szenarien



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG - TREMOD

4.6.3 Vermeidung und Verlagerung im nationalen Güterverkehr

Die Entwicklung der zukünftigen Güterverkehrsnachfrage in den Green-Szenarien soll die Änderungen der Wirtschaftsentwicklung und Produktionsstrukturen in Deutschland (Güteraufkommen in Produktion, Import und Export) und damit verbundene Änderungen der Transportnachfrage widerspiegeln. Dazu wurde ein methodischer Ansatz entwickelt, der auf den in URMOD abgeleiteten Rohstoffmengen für die Produktion von Gütern basiert. Damit wird gewährleistet, dass die Wechselwirkungen zwischen Produktion und Gütertransport abgebildet und die Szenarien in sich konsistent sind. Bei der exogenen Verwendung bspw. des Bundesverkehrswegeplanes ist dies nicht gegeben. Unterschiede bei der nationalen

Güterverkehrsnachfrage insgesamt ergeben sich daher primär aus Unterschieden in den Produktionsstrukturen und nicht aus gesonderten Maßnahmen zur Verkehrsvermeidung.

Verkehrsspezifische Annahmen betreffen hauptsächlich die Verkehrsmittelwahl und somit den Modal-Split der Verkehrsleistungen im Güterverkehr. Hier wurden in GreenLife die gleichen Annahmen getroffen wie in allen anderen Green-Szenarien, mit Ausnahme von GreenLate: Transportmengen von Bahn und Binnenschiff wurden entsprechend der Beförderungspotenziale pro Hauptverkehrsbeziehung (Binnentransport, Empfang, Versand) und Güterabteilung im Klimaschutzszenario in UBA (2016) angenommen. Die Differenz der Bahn- und Binnenschifftransporte zur Gesamttransportnachfrage pro Hauptverkehrsbeziehung und Güterabteilung wird als Lkw-Transporte gerechnet.

In GreenLife wurde zusätzlich die Annahme getroffen, dass eine stärkere Regionalisierung der Wirtschaftskreisläufe bei Nahrungsmitteln im Binnentransport bis 2050 zu einer Verringerung der mittleren Transportentfernungen um 25 % gegenüber den anderen Green-Szenarien (mit Ausnahme von GreenSupreme) führt. Bei den übrigen Gütergruppen wurden keine Änderungen der Transportentfernungen angenommen, da entweder bereits stark regionale Kreisläufe vorliegen (z.B. Baustoffe, Abfälle) oder aufgrund hoher Spezialisierung (Maschinenbau) bzw. Konzentration auf wenige Großstandorte (z.B. Fahrzeugbau, chemische Industrie) keine signifikante Regionalisierung möglich ist.

Tabelle 22 zeigt die Verkehrsleistungen im nationalen Güterverkehr in GreenLife und GreenEe2. Insgesamt sind in GreenLife die Verkehrsleistungen im Jahr 2050 um ca. 7 % niedriger als in GreenEe2. Während der Straßengüterverkehr etwa 10 % niedriger ist, sind die Verkehrsleistungen im Schienen- und Binnenschifftransport nur 2 % niedriger als in GreenEe2.

Tabelle 22: Nationale Güterverkehrsleistungen in GreenLife im Vergleich zu GreenEe2

Mrd. tkm		Straße	Schiene	Wasser	National Gesamt
2030	GreenEe2	415	171	71	656
	GreenLife	402	169	69	640
2050	GreenEe2	384	211	74	669
	GreenLife	346	207	72	625

Quelle: eigene Analysen, ifeu

4.6.4 Entwicklung der Fahrzeugflotten im Güterverkehr

Für die Entwicklung der Fahrzeugflotten im Güterverkehr wurden in GreenLife die gleichen Annahmen getroffen wie in den GreenEe-Szenarien (vgl. Dittrich et al. (2020a)).

4.6.5 Internationaler Verkehr

Im internationalen Flugverkehr werden in GreenLife starke Verringerungen der Verkehrsnachfrage bis zum Jahr 2050 unterstellt.

- Im privaten Flugverkehr werden internationale Flugreisen bis zum Jahr 2050 um 50 % ggü. den GreenEe-Szenarien und GreenMe verringert. Davon wird die Hälfte auf Inlandsreisen im bodengebundenen Verkehr (Pkw, ÖV) verlagert.

- Bei internationalen Geschäftsreisen werden bis ins Jahr 2050 etwa 25 % der Flugverkehrsleistung ggü. den GreenEe-Szenarien und GreenMe vermieden. Eine Vermeidung kann dabei sowohl durch zunehmende Digitalisierung (z.B. virtuelle Meetings) als auch innereuropäisch durch Verlagerung auf die Schiene erreicht werden. Auf eine Quantifizierung möglicher Verlagerungen wird vor dem Hintergrund der geringen Emissionsrelevanz etwaiger damit verbundener Zunahmen des Schienenangebots verzichtet.

Folglich steigt die Verkehrsleistung im internationalen Flugverkehr im GreenLife zunächst von 2010 bis 2030 um 65 % (in den GreenEe-Szenarien +72 %) und sinkt anschließend deutlich, so dass diese im Jahr 2050 nur etwa 9 % höher ist als 2010. Im Vergleich zu den GreenEe-Szenarien beträgt die internationale Flugverkehrsleistung in GreenLife im Jahr 2050 insgesamt nur 55 %.

Für zukünftige Effizienzsteigerungen im Flugverkehr wurden in GreenLife und in GreenEe-Szenarien und GreenMe die gleichen Annahmen getroffen. Die angenommene Verringerung des spezifischen Energieverbrauchs pro Verkehrsleistung zwischen 2010 und 2050 um etwa 56 % entspricht dabei etwa der ICAO-Selbstverpflichtung (-2 %/a).

Im internationalen Seetransport resultieren die Transportleistungsentwicklungen direkt aus den zeitlichen Entwicklungen der Transportmengen im Empfang und Versand in deutschen Häfen, differenziert nach Güterabteilungen (NST2007) sowie Start-/Zielregionen. Die Methodik ist in allen Green-Szenarien einheitlich, es gibt keine zusätzlichen Maßnahmen zur Verkehrsvermeidung. Die Energieeffizienz von Seeschiffen verbessert sich in GreenLife, wie in den GreenEe-Szenarien und GreenMe, angelehnt an UBA (2016b) zwischen 2010 und 2050 um ca. 53 %.

4.7 Weitere Sektoren und nachhaltiger Konsum

4.7.1 Weitere Sektoren

4.7.1.1 Fahrzeugbau

Die Annahmen zur Batterietechnologie und zum Fahrzeugbau entsprechen den Annahmen in den GreenEe-Szenarien und sind in Dittrich et al. (2020a) ausführlich dokumentiert.

4.7.1.2 Sonstige THG-Emissionen

Ausgehend von GreenEe1 wurden die THG-Emissionen der F-Gase und Lösemittel sowie sonstige THG-Emissionen wie folgt variiert:

- Kopplung der sonstigen THG-Emissionen Aluminium- und Magnesiumindustrie an die Veränderungen der Produktionsmengenentwicklung der Aluminium- und Magnesiumindustrie.
- Kopplung der Produktion fluorierende THG an die Veränderungen in der Produktion von Basischemikalien (ohne Düngemittel und Plastik).
- Kopplung der Aerosole und Lösemittel an die mengengewichtete Entwicklung der Basischemikalien (ohne Düngemittel und Plastik) und Hygieneartikel (Seifen, Parfüme, etc.).

- Kopplung der THG-Emissionen Anwenden von Farben und Lacken/Entfetten u. chemische Reinigung / Herstellung chemischer Produkte / andere Anwendungen von Lösemitteln an die Entwicklung der Basischemikalien (ohne Düngemittel und Plastik).

Die THG-Emissionen der sonstigen SF₆-Anwendungen und sonstigen Branchen bleiben unverändert, da die Quellen zu divers sind. Unverändert blieben die Annahmen zu Feuerlöschmitteln, Lachgas, Kälte-, Klimaanlage und Wärmepumpen sowie die Annahmen zur Herstellung von Dämmstoffen.

4.7.1.3 Sonstige Produktions- und Dienstleistungssektoren

Es wurde angenommen, dass die sonstige Endenergienachfrage der übrigen Sektoren proportional zum Durchschnitt der quantifizierten und oben dargestellten Industriesektoren verläuft.

Rohstoffseitig gelten die Annahmen zur Steigerung der Materialeffizienz, die in Kap. 3.1.3 dargestellt wurden, für die sonstigen Sektoren in der Industrie und in den Dienstleistungen.

4.7.2 Konsumänderungen

4.7.2.1 Kleidung

In GreenLife wird davon ausgegangen, dass sich das nachhaltige Konsumverhalten auch im Kauf von Kleidung äußert. Kleidung wird zunehmend geteilt, das heißt, genutzte Kleidung wird Second-hand weiterverkauft und gleichzeitig wird anstelle neuer Kleidung genutzte Kleidung nachgefragt.

Dazu wurde auf die Erkenntnisse des BmBF/FONA-Projekt „Peer Sharing“ aufgebaut, in dem die ökologischen Auswirkungen von Sharing-Ansätzen anhand von T-Shirts untersucht wurden (Ludmann 2018). Demnach konsumiert eine nachhaltige, durchschnittliche Person 0,7 kg neue T-Shirts und 0,5 kg gebrauchte T-Shirts. Die 0,7 kg neue T-Shirts kommen durch normalen Verschleiß zu Stande. Zum Vergleich: eine durchschnittliche Person in Deutschland kauft (ohne Sharing und nachhaltigen Konsum) etwa 2 kg neue T-Shirts pro Jahr und 0,1 kg gebrauchte T-Shirts. Das heißt, die Nachfrage nach neuen T-Shirts sinkt durch die veränderte Nachfrage um - 65 %.

Die strukturellen Unterschiede im Nachfrageverhalten von T-Shirts können auf die Oberbekleidung (Pullover, Hosen, Mäntel, Mützen, etc.) sowie auf Kleidungszubehör (Accessoires etc.) übertragen werden, da diese zu typischen Secondhand-Waren gehören. Die Erkenntnisse lassen sich jedoch nicht auf Schuhe oder Unterbekleidung übertragen. Daher musste ein pauschaler Abschlag vorgenommen werden.

In GreenLife wurde somit angenommen, dass die Nachfrage nach Kleidung und Kleidungszubehör (Accessoires etc.) gegenüber den anderen Green-Szenarien (mit Ausnahme von GreenSupreme) in 2050 [2030/2040] um 50 % [20 %/35 %] aufgrund von suffizientem und nachhaltigen Konsumverhalten und Sharing sinkt.

4.7.2.2 IKT-Geräte

Im GreenLife-Szenario wurde auch die Nachfrage nach IKT-Geräten variiert. Während in den anderen Green-Szenarien (mit Ausnahme von GreenSupreme) von einem Anstieg von IKT-Geräten in Haushalten entlang des Wirtschaftswachstums ausgegangen wurde, wurde in GreenLife angenommen, dass Menschen elektronische Geräte länger nutzen und sich für Geräte entscheiden, die reparierbar und erweiterbar sind. Das heißt, es wird angenommen, dass die Sättigungsgrenze für privat genutzte IKT erreicht ist, Geräte werden ersetzt, wenn sie das Ende

ihrer Lebenszeit erreicht haben. Sie werden zunehmend durch multifunktionale Geräte ersetzt (ein Gerät ersetzt mehrere vorherige Geräte), gleichwohl werden neue elektronische Geräte entwickelt. Beides hält sich bezogen auf den Materialeinsatz die Waage. Es findet somit kein quantitativer Anstieg von IKT-Geräten pro Person in privaten Haushalten statt, der Materialinput stagniert. Gleichwohl steigt die Qualität, so dass die Konsumausgaben für IKT-Geräte wie in allen Green-Szenarien steigen.

4.7.2.3 Möbel, Spielzeuge und sonstige Waren

In GreenLife wird ein verändertes Nachfrageverhalten nach Konsumgütern angenommen. Die Konsumgüter umfassen Möbel, Sportutensilien, Spiele, Schmuck und sonstige Konsumwaren. Während in den anderen Green-Szenarien (mit Ausnahme von GreenSupreme) die Nachfrage nach Konsumgütern entlang des Einkommens stieg, wird in GreenLife angenommen, dass sich Verbraucher und Verbraucherinnen für hochwertige, langlebige und reparierbare Konsumgüter entscheiden, und diese in der Nutzungsphase auch sorgfältiger pflegen. Da es große Unterschiede in der Nutzungsdauer zwischen normalen und hochwertigen Konsumgütern gibt, wurde anhand Abschreibungswerte und Versicherungsangaben von ausgewählten Möbeln ermittelt, dass die Nutzungsdauer hochwertiger Gegenstände zwei- bis dreimal so lang ist im Vergleich zu normalen Gegenständen. Dies wurde auf alle Konsumgüter übertragen. Es wurde konkret angenommen, dass sich die Konsumenten ab 2030 nur noch hochwertige, langlebige und reparierbar designte Konsumgüter kaufen, die eine doppelt bis dreimal so lange Nutzungsdauer aufweisen wie die durchschnittlichen Güter in 2010. Der Materialinput pro Gut sinkt entsprechend, monetär steigen die Ausgaben für diese Gütergruppen aufgrund der höheren Wertigkeit entlang des Einkommens.

4.7.2.4 Staatliche Dienstleistungen

Der Staat erbringt unterschiedliche Dienstleistungen, beispielsweise im Bereich Gesundheit, Bildung und Verwaltung. In GreenLife wurde angenommen, dass diese nachhaltiger gestaltet werden. Konkret wurden folgende Annahmen getroffen:

- ▶ Abfallvermeidung in allen staatlichen Großküchen und Mensen führt zu einer Reduktion von 20 % des Nahrungsmittelinputs über alle Nahrungsmittel ab 2030.
- ▶ Staatliche Küchen und Mensen in den Sektoren Bildung, Gesundheit, Sicherheit, Verteidigung, Administration und Sozialleistung stellen ihr Angebot entsprechend der in GreenLife unterstellten Konsumstrukturen bezüglich der Nahrungsmittel (siehe Kapitel 4.1) um.
- ▶ Der Papierverbrauch in allen staatlichen Sektoren außer Bildung wird durch eine konsequente Umsetzung von papierlosen Büros und geringerem nachfrageorientiertem Druck in 2050 [2030/2040] um 50 % [30 %/40 %] reduziert.
- ▶ Dienstreisen per Flugzeug entwickeln sich entlang der Annahmen in der Fernmobilität (siehe Kapitel 4.6.5). So finden keine innerdeutschen Flüge statt und auch Fernflüge werden zunehmend durch digitale Kommunikationsformen ersetzt.

4.7.3 Stromnetze

Wie in allen Green-Szenarien wurde die DENA Verteilnetzstudie zugrunde gelegt und der Ausbaurahmen aus dem Bundesländerszenario mit einer Korrektur der Annahmen bei der Niederspannung entlang der spezifischen Annahmen zur Siedlungsentwicklung (Kap. 4.2)

übernommen. Ferner wurde der Netzentwicklungsplan Strom 2030 (Szenario C) und bezüglich der angegebenen Trassenlängen die Annahmen aus (Wiesen et al. 2017) übernommen, dass je Trasse drei Stromkreise geführt werden ($\text{Trassenlänge} \cdot 3 = \text{Stromkreislänge}$). Für das Übertrag- bzw. Hochspannungsnetz wird eine Lebensdauer von 80 Jahren unterstellt, für die Netzebene Mittelspannung und Niederspannung 40 Jahre. Es wird der Annahme aus Wiesen et al. (2017) gefolgt und keine Unterscheidung zwischen Kabel- und Freileitung hinsichtlich der Lebensdauer vorgenommen.

4.7.4 Sonstige Infrastrukturen

Alle Annahmen zu Infrastrukturen sind identisch zu GreenEe1 und GreenEe2 sowie GreenLate (siehe ausführlich Dittrich et al. (2020a)). Aufgrund der geringeren Flächenneuversiegelung im Transformationspfad bis 2050 (Kapitel 4.2) resultieren in GreenLife und GreenSupreme im Vergleich zu den anderen Green-Szenarien jedoch bezüglich der kommunalen Infrastrukturen Straßen und Wege, Wasserver- und entsorgung sowie kommunale Strom- und IKT-Kabelinfrastrukturen leichte Veränderungen.

4.8 Energieversorgung

4.8.1 Festlegung verschiedener Parameter

Die grundsätzlichen Maßnahmen und Stellschrauben im Bereich der Energieversorgung in GreenLife sind gleich wie in den GreenEe-Szenarien, aber zum besseren Verständnis der Ergebnisse hier in Tabelle 23 im Überblick dargestellt. Die technischen Parameter sind im GreenEe-Bericht (siehe Dittrich et al. (2020a)) dargestellt, sie sind für die Szenarien GreenEe1, GreenEe2, GreenLate und GreenLife identisch. Der Stromaustausch in Europa wurde in allen Szenarien einheitlich mit einem bilanziellen Jahressaldo von „Null“ für den deutschen Im- und Export abgebildet.

Tabelle 23: Überblick Annahmen zur Energieversorgung in GreenLife

Maßnahmen / Stellschrauben	GreenLife
Kohlekraftwerke Lebensdauer	• Braunkohle 30 Jahre • Steinkohle 40 Jahre • Ab 2040 keine Kohle
Merit-Order fossile Kraftwerke	• 2030 Kohle vor Gas (niedrigerer CO₂-Preis im ETS) • 2040 keine Beeinflussung der Merit-Order (fuel switch)
EE-Potentiale & Markthochlauf	• Mindestleistung Offshore in 2050 32 GW • 2050 freier Zubau von Wind onshore und PV • daraus abgeleitet für 2030 und 2040 Korridor mit 0 % Überbauung³
Lebensdauer Wind und Überbauung der langfristigen Repoweringrate	• 20 Jahre • Keine Überbauung • mit 30 %/a Marktwachstum
Lebensdauer PV und Überbauung der	• 25 Jahre • Keine Überbauung

³ Überbauung ist die Erhöhung der jährlichen Installationsrate im Zeitraum heute bis 2050 gegenüber der langfristigen notwendigen Repowering-Rate (installierte Leistung in 2050 geteilt durch Lebensdauer). Wenn eine Überbauung akzeptiert wird, bedeutet dies auch in gewissen Umfang volkswirtschaftliche Verwerfungen durch den Rückgang von Industriezweigen nach 2050 (Produktionsanlagen, Installateure, Schiffe, Kräne, ...).

Maßnahmen / Stellschrauben	GreenLife
langfristigen Repoweringrate	mit 50 %/a Marktwachstum
PtG/L-Importe	15 % Überbauung - Preis: 2030: 154,3 €/MWh, 2040: 136,2 €/MWh, 2050: 118,2 €/MWh - Preise identisch für alle Szenarien - PtG/L-Importe 2030 und 2040 ergeben sich aus dem Markthochlauf für 2050 und werden nur im internationalen Verkehr und stofflich genutzt (nicht für Kyoto-Klimaziel 2030/2040 relevant)
Technologie Wind	- Onshore Basisannahmen Auswahl zwischen Schwachwind-Anlagen und Starkwindszenarien - Schwachwindanlagen mit 2,5 geringer Leistung pro Anlage und 150 m Nabenhöhe, 115 m Rotordurchmesser
PV	- Dickschichtzellen mit 19,55 % Wirkungsgrad im Durchschnitt heute - 2050 - Langfristig 50 %/50 % Dach- zu Freifläche

Quelle: eigene Zusammenstellung

4.8.2 Markthochlauf von Wind-Onshore und Photovoltaik

Auf Basis des Ergebnisses für 2050 werden Ausbaukorridore in Form von Ober- und Untergrenze (so früh wie möglich / so spät wie möglich) für den Markthochlauf von Wind-Onshore und Photovoltaik vorgegeben. Der Markthochlauf für PV weist aufgrund der Langlebigkeit der Module ohne eine Überbauung (maximaler jährlicher Absatzmarkt vor 2050 gegenüber der langfristigen Repoweringrate nach 2050) geringere Freiheitsgrade als Onshore auf. Die Ausprägung in 2030 und 2040 im Ausbaukorridore wird dabei durch das THG-Emissionsziel bestimmt.

4.8.3 Markthochlauf von PtG/L und Zuordnung auf Anwendungsbereiche

Auf Basis des Ergebnisses für 2050 wird eine Untergrenze (so spät wie möglich) des Markthochlaufs für PtG/L-Importe festgelegt. Wie in den anderen Green-Szenarien (mit Ausnahme GreenSupreme und GreenLate) liegt die Überbauungsrate bei nur 15 %, da schon durch eine moderate Überbauung die Notwendigkeit des Marktzuwachsen in der ersten Dekade 2020 bis 2030 deutlich reduziert werden kann.

Die Importe in 2030 und 2040 werden wie in den anderen Green-Szenarien (mit Ausnahme GreenSupreme) dabei nicht in den Anwendungen, die dem nationalen THG-Emissionsziel bilanziell unterliegen, sondern im internationalen Verkehr und nichtenergetischen in der industriellen Produktion (Chemie) genutzt.

4.8.4 Herkömmlicher Stromverbrauch

Die Entwicklung des klassischen Stromverbrauchs ohne neue Sektorkopplungs-Anwendungen ist in Tabelle 24 für GreenLife absolut und relativ im Vergleich zu GreenEe1 dargestellt. Für die produktionsrelevanten Bereiche erfolgt eine proportionale Änderung des Strombedarfes in allen Stützjahren entsprechend dem Verhältnis der Gesamtproduktionsmengen im GreenLife- zum GreenEe2-Szenario. Für die Anwendungen, welche in Wechselwirkung mit der Gebäudefläche stehen, erfolgt eine proportionale Änderung des Strombedarfes in allen Stützjahren entsprechend dem Verhältnis der Gebäudefläche im GreenLife zu den GreenEe-Szenarien. Für alle weiteren Verbraucher werden die identischen Werte aus GreenEe1 und 2 unterstellt.

Tabelle 24: Klassischer Stromverbrauch GreenLife im Vergleich zu GreenEe2

TWh/a		2030	2040	2050	2030 relativ zu GreenEe2	2040 relativ zu GreenEe2	2050 relativ zu GreenEe2
Industrie	Prozesswärme- monovalent	63,4	65,8	83,8	99,1 %	98,9 %	100,1 %
	Klimakälte	3,2	2,1	0,0	100,0 %	100,0 %	100,0 %
	sonst. Prozesskälte	3,1	2,0	0,9	97,4 %	97,0 %	95,8 %
	Mechanische Energie	71,2	58,4	46,8	102,3 %	102,3 %	100,1 %
	IKT	9,0	8,6	8,1	97,4 %	97,0 %	95,8 %
	Beleuchtung	8,6	7,0	5,4	100,0 %	100,0 %	100,0 %
GHD	Prozesswärme- monovalent	8,1	7,7	7,3	97,5 %	97,2 %	96,3 %
	Klimakälte	5,3	7,7	10,0	100,0 %	100,0 %	100,0 %
	sonst. Prozesskälte	13,9	15,0	15,9	97,6 %	97,5 %	96,3 %
	Mechanische Energie	29,0	21,6	14,4	98,1 %	99,1 %	99,9 %
	IKT	22,7	21,0	19,3	97,6 %	97,5 %	96,3 %
	Beleuchtung	41,4	29,9	18,3	100,0 %	100,0 %	100,0 %
Haushalte	Mechanische Energie	4,2	3,6	3,0	95,8 %	89,8 %	83,5 %
	Beleuchtung	7,6	4,4	1,5	95,8 %	89,8 %	83,5 %
	PW, Kälte, IKT	81,7	72,6	63,5	100,0 %	100,0 %	100,0 %
Gebäudewärme NSH/TWW		13,7	6,7	3,6	100,0 %	100,0 %	100,0 %
Verkehr – Schiene		14,5	15,7	16,7	104,0 %	107,5 %	110,3 %
Umwandlungsverbrauch		7,0	4,0	3,0	100,0 %	100,0 %	100,0 %
Leitungsverluste		26,9	29,5	32,0	96,4 %	96,2 %	97,0 %

Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG – eigene Berechnungen

4.8.5 Biomassenutzung

Die detaillierte Herleitung der Szenarioannahmen der Biomassenutzung sind im GreenEe-Bericht (siehe Dittrich et al. (2020a)) dargestellt. Durch die unterschiedlichen angenommenen Tierzahlen und Haltungsformen in den Green-Szenarien fallen verschiedene Mengen an Gülle und Mist an und werden entsprechend berücksichtigt. In GreenLife sind in 2050 die errechneten Mengen aus Gülle und Mist, die anfallen und in die Vergärung gehen, um 14 % geringer wie in GreenEe2.

Tabelle 25: Stromerzeugung in GreenLife im Vergleich zu GreenEe2

TWh		Strom aus Biogas	Davon Strom aus Gülle	Davon Strom aus NaWaRo	Davon Strom aus Klärgas	Davon Strom aus Abfall
2030	GreenEe2	10,01	6,11	2,70	0,76	0,44
	GreenLife	9,02	5,12	2,70	0,76	0,44
2040	GreenEe2	8,03	6,90	0,00	0,80	0,33
	GreenLife	6,86	5,73	0,00	0,80	0,33
2050	GreenEe2	6,53	5,25	0,00	0,90	0,38
	GreenLife	5,59	4,31	0,00	0,90	0,38

Quelle: eigene Analysen, IEE und ifeu

Im Bereich der Biomethan-Gasnetzeinspeisung gibt es keine Unterschiede zwischen den GreenEe-Szenarien.

Tabelle 26: Biomethan-Gasnetzeinspeisung in den GreenEe-Szenarien

TWh		Summe Biomethan	Davon Abfall	Davon NaWaRo	Davon Klärgas	Davon Gülle
2030	Green-Szenarien	6,95	3,43	1,00	2,52	0,00
2040	Green-Szenarien	5,36	2,68	0,00	2,68	0,00
2050	Green-Szenarien	5,94	2,94	0,00	3,00	0,00

Quelle: eigene Analysen, IEE und ifeu

Neben dem Gülleaufkommen unterscheiden sich die Szenarien im Bereich der festen Biomasse je nachdem wie schnell im Gebäudebereich der Ausstieg aus den dezentralen Holzheizungen erfolgt (Modellergebnis GEMOD) und inwiefern in der Industrie Biomasse-Heizkesseln in der Prozesswärmeerzeugung neben fossilen Bestands-KWK-Anlagen und Elektrodenkesseln zum Einsatz kommen (Modellergebnis SCOPE). In 2050 werden in allen Szenarien die komplette Waldrest- und Altholzpotezenziale in der Industrie eingesetzt, dadurch können dort 34 TWh Wärme auf einem Temperaturniveau bis 500°C bereitgestellt werden.

Tabelle 27: Endenergie aus biogenen Strömen (inkl. Klärgas, ohne industrieellen Reststoffen) in GreenLife im Vergleich zu GreenEe2

TWh		Strom aus Biogas	Wärme in Industrie	Wärme in HH und GHD	Biomethan	BtL	BTL-Verwendung	
							Verkehr	ch. Industrie
2030	GreenEe2	10,01	49,69	9,89	6,95	15,90	15,90	
	GreenLife	9,02	50,29	9,31				

TWh							BTL-Verwendung	
2040	GreenEe2	8,03	45,86	0,84	5,36	16,80	8,40	8,40
	GreenLife	6,86	46,00	0,70				
2050	GreenEe2	6,53	33,80	0,00	5,944	17,68		17,68
	GreenLife	5,59						

Quelle: eigene Analysen, IEE und ifeu

4.8.6 Sonstige Rest- und Abfallströme

Das Müllaufkommen und damit die Strom- und Wärmeerzeugung wurde mit Hilfe eines Korrekturfaktors zur Reduktion des Müllaufkommens durch Verbraucherverhalten (Steigerung bis 1,2 in 2050) gegenüber GreenEe abgeleitet (Quelle: Eigene Annahmen, adaptiert nach prognos-Studie für Siedlungsabfälle in der Schweiz (Birnstengel et al. 2018)). Die Szenarioannahmen sind im GreenEe-Bericht (siehe Dittrich et al. (2020a)) dargestellt. In Summe ergibt sich eine etwas geringere Strom- und Wärmeerzeugung, aber auch etwas geringere THG-Emissionen. Die THG-Emissionen in 2050 sind per Definition durch die unterstellte vollständige Versorgung des nichtenergetischen Verbrauchs mit treibhausgasneutralem PtG/PtL einheitlich auf „Null“ gesetzt.

Tabelle 28: Nutzung von Müllheizkraftwerken in GreenLife im Vergleich mit GreenEe

	2030		2040		2050	
	GreenEe1/2	GreenLife	GreenEe1/2	GreenLife	GreenEe1/2	GreenLife
Stromerzeugung (netto) [TWh _{el}]	5,30	4,77	4,40	3,74	3,60	2,88
Wärmeerzeugung (Fernwärme) [TWh _{th}]	5,83	5,25	5,00	4,25	4,17	3,33
Emissionen [Mio. t CO ₂ Äq]	17,4	15,66	13,6	11,56	0	0

Quelle: eigene Annahmen UBA, ifeu, IEE

5 Ergebnisse

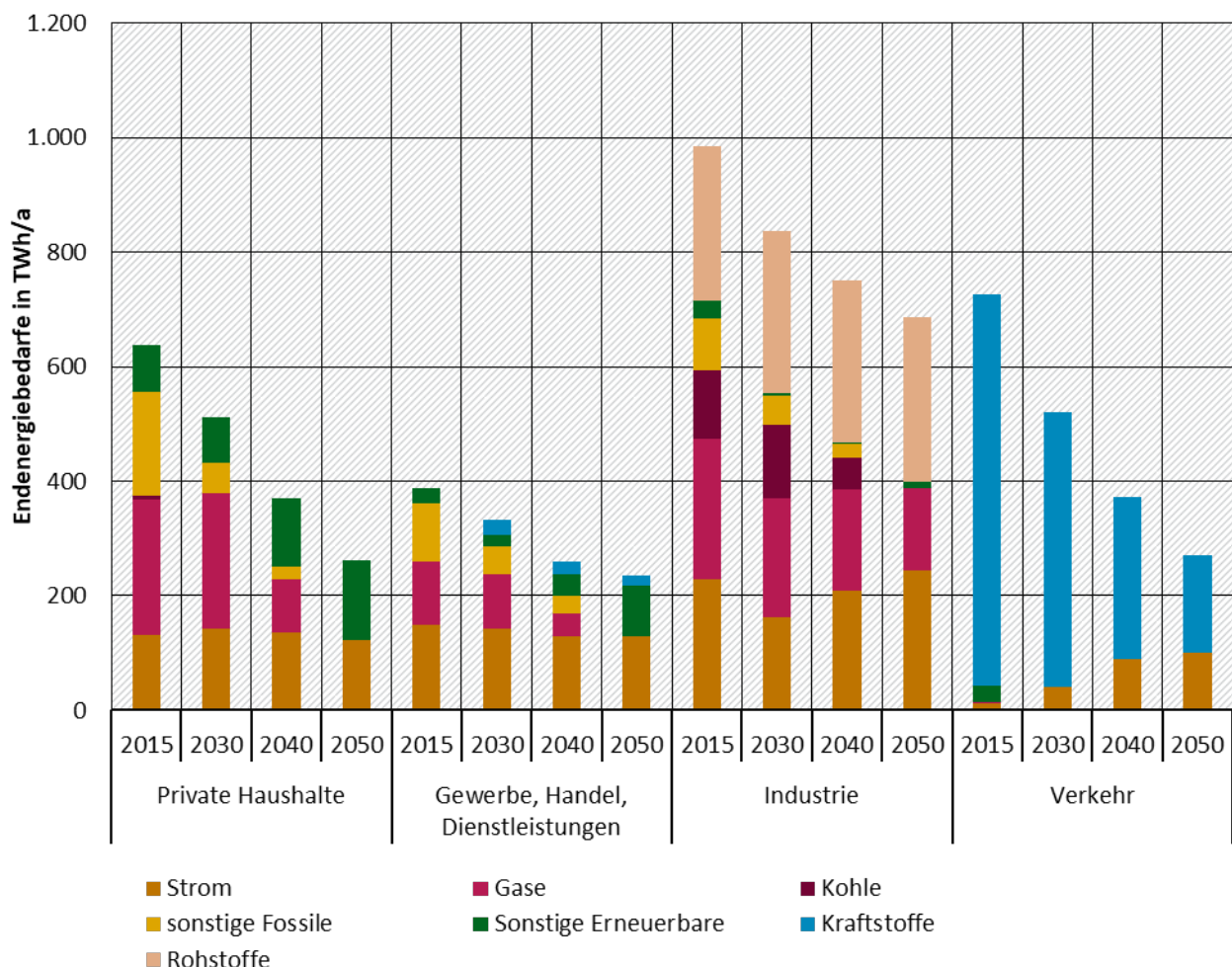
5.1 Energie

Im Folgenden sind die Simulationsergebnisse der Gesamtsystemoptimierung mittels SCOPE und des Verkehrsbereichs mittels TREMOD dargestellt. Dabei wird GreenLife aufgrund der vergleichbaren Annahme zu einer ausgeglichenen Handelsbilanz zusätzlich mit GreenEe2 verglichen.

5.1.1 Endenergiebedarfe

Die Entwicklung der Endenergiebedarfe ist differenziert nach Energieträgern und Sektoren in folgender Abbildung 9 dargestellt. Dabei wird in allen Bereichen auch im Bereich der Industrie eine hohe und kontinuierliche Verbrauchsreduktion und Effizienzsteigerung erreicht.

Abbildung 9: Entwicklung der Endenergiebedarfe in GreenLife



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG – GEMOD, TREMOD, SCOPE, URMOD

Insgesamt sinkt der Endenergiebedarf in GreenLife um 47 % gegenüber 2015 auf 1454 TWh. Die größten Einsparungen werden im Bereich Verkehr (63 %) und Gebäude (52 %) erreicht. Im Vergleich zu GreenEe2 wird dabei die Energieeinsparung durch den Lebenswandel deutlich. Die Endenergie reduziert sich in Summe langfristig um 5,6 %. So wird der gesamte Brennstoff-Bedarf gegenüber GreenEe2 um 6,2 % geringer und der Strombedarf um 4,8 %.

Tabelle 29: Endenergiebedarfe differenziert nach Energieträger und Sektoren in GreenLife

TWh/a		Strom	Gase	Kohle	sonstige Fossile	sonstige Erneuerbare	Kraftstoffe	Rohstoffe	Summe
2015	HH	132	235	7	182	81	0	0	637
	GHD	149	110	0	102	27	0	0	388
	Industrie	228	247	119	90	32	0	269	985
	Verkehr	12	2	0	0	30	683	0	727
	SUMME	521	594	126	374	170	683	269	2.737
2030 Green-Life	HH	142	238	0	52	80	0	0	512
	GHD	142	96	0	47	20	27	0	333
	Industrie	163	208	127	50	6	0	282	836
	Verkehr	41	0	0	0	0	480	0	522
	SUMME	488	543	127	150	106	507	282	2.202
Green-Ee2	SUMME	484	560	128	156	111	523	282	2.244
2040 Green-Life	HH	136	93	0	21	120	0	0	370
	GHD	129	40	0	31	37	23	0	260
	Industrie	208	177	55	24	3	0	282	750
	Verkehr	89	0	0	0	0	283	0	373
	SUMME	563	310	55	76	160	306	282	1.752
Green-Ee2	SUMME	581	327	55	79	183	327	282	1.834
2050 Green-Life	HH	123	0	0	0	138	0	0	261
	GHD	130	0	0	0	88	19	0	236
	Industrie	244	144	0	0	11	0	286	686
	Verkehr	100	0	0	0	0	170	0	271
	SUMME	597	144	0	0	237	189	286	1.454
Green-Ee2	SUMME	627	146	0	0	279	200	288	1.540

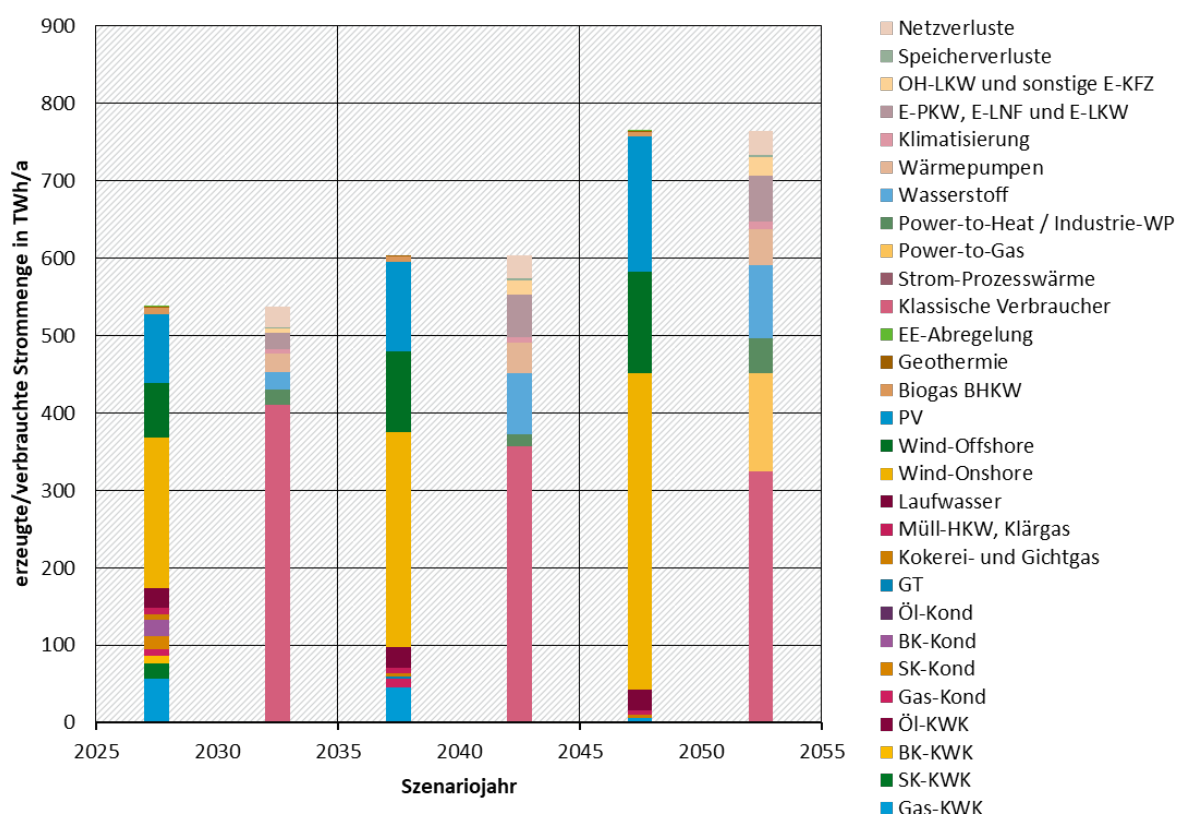
Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG – GEMOD, TREMOD, SCOPE, URMOD

5.1.2 Stromsektor

5.1.2.1 Strombilanz in Deutschland

In Abbildung 10 ist die Nettostromerzeugung und der Nettostromverbrauch zzgl. Verluste in seiner Entwicklung dargestellt. Dabei ist eine zusätzliche Randbedingung der europäischen stündlichen Energiesystemoptimierung, dass die Stromimport- und Exporte für Deutschland in der Jahressumme ausgeglichen sind.

Abbildung 10: Nettostromerzeugung und Verbrauch Deutschland in GreenLife



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG – SCOPE

Der Nettostromverbrauch inkl. Netz- und Speicherverluste steigt bis 2050 vor dem Hintergrund der zunehmenden Sektorkopplung auf 765 TWh an. Aufgrund der Szenarieneigenschaften und insbesondere des veränderten Konsumverhaltens und damit unmittelbar auch des Energiekonsums erfolgt ein geringerer Stromverbrauch im Vergleich zu den GreenEe-Szenarien. Dies betrifft vor allem Elektromobilität, Wärmepumpen und herkömmlichen Stromverbrauch. Einen großen neuen Verbraucher stellen Wasserstoffelektrolyseanlagen für die industrielle Produktion dar. Insgesamt werden hier in 2050 94 TWh Strom benötigt. Auch besteht in Deutschland das Potential eine Menge von 76 TWh PtG Methan zu erzeugen, wofür 126 TWh Strom benötigt wird. Dies deckt jedoch nur einen kleinen Anteil der PtG/PtL-Nachfrage, welche im Wesentlichen durch Importe gedeckt wird.

Tabelle 30: Nettostromverbrauch zuzüglich Verluste in GreenLife und GreenEe2

TWh/a		herk. Verbrauch	PtG	PtH	H2	WP	Klima	E-Mob	OH-Lkw u.a.	Speicherverlust	Netzverlust
2030	GreenLife	411,2	0,0	19,1	22,6	24,1	5,0	22,0	4,8	1,5	26,9
	Green-Ee2	412,6	0,0	11,4	22,6	26,0	4,9	21,7	5,1	0,2	28,0
2040	GreenLife	356,8	0,0	16,3	78,2	39,6	7,3	55,6	18,2	1,9	29,5
	Green-Ee2	361,5	0,0	18,5	78,6	44,4	7,3	56,8	20,3	2,0	30,7
2050	GreenLife	324,7	126,2	45,1	94,4	47,5	9,7	59,6	23,9	1,9	32,0

TWh/a		herk. Ver- brauch	PtG	PtH	H2	WP	Klima	E- Mob	OH- Lkw u.a.	Spei- cher- ver- lust	Netz ver- lust
	Green-Ee2	332,8	123,8	35,1	95,3	55,5	9,7	71,5	28,9	1,7	33,0

Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG – SCOPE

Charakteristisch leisten Photovoltaik und Windenergie onshore mit 583 TWh etwa 76 % den größten Beitrag zur Nettostromversorgung in 2050. Im Vergleich zu den GreenEe-Szenarien wird eine geringere nationale Stromerzeugung notwendig (langfristig -22 TWh gegenüber GreenEe2). Vor dem Hintergrund des veränderten Konsumverhaltens und des ähnlichen Klimaziels wie in GreenEe2, wird ein etwas höherer Spielraum für mehr fossile Stromerzeugung in 2030 möglich.

Tabelle 31: Nettostromerzeugung in GreenLife und GreenEe2

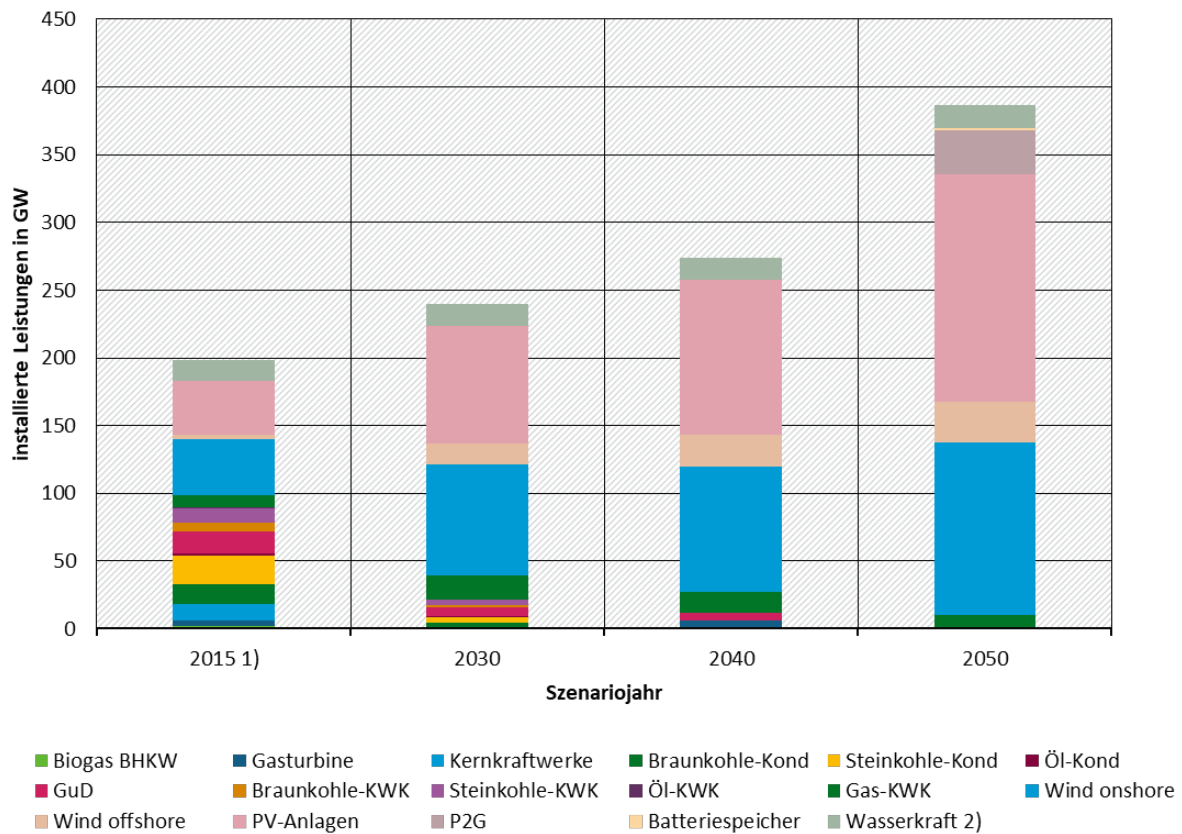
T W h/ a		Wa- s- ser	Bio	Geo- ther- mie	Müll, Klärg .	Gas	Brau- nko- hle	Stein- ko- hle	On- shor- e	Off- shor- e	PV	SUM ME	EE- Ab- regel
2030	GreenLife	26,0	9,0	0,6	7,8	72,1	31,7	36,8	193,7	71,3	88,3	537,2	0,1
	GreenEe2	25,9	10,0	0,6	8,3	59,9	30,0	43,9	192,8	71,3	89,7	532,4	0,2
2040	GreenLife	26,5	6,9	0,9	6,9	63,9	0,0	0,0	278,1	103,8	116,3	603,3	0,0
	GreenEe2	26,5	8,0	0,9	7,5	53,3	0,0	0,0	300,3	103,8	119,8	620,1	0,0
2050	GreenLife	26,9	5,6	1,3	6,2	9,5	0,0	0,0	408,4	132,1	174,9	765,0	0,2
	GreenEe2	26,9	6,5	1,4	6,9	10,8	0,0	0,0	418,9	139,7	176,3	787,5	4,2

Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG – SCOPE

5.1.2.2 Installierte Leistungen in Deutschland

In Abbildung 11 ist die für die Deckung des nationalen Stromverbrauchs notwendige installierte Leistung an Stromerzeugern dargestellt. In Tabelle 33 ist neben dem Vergleich zu GreenEe1 zusätzlich der mit der EE-Erzeugung eng verbundene Ausbau an neuen Batteriespeichern und PtG/PtL-Anlagen dargestellt.

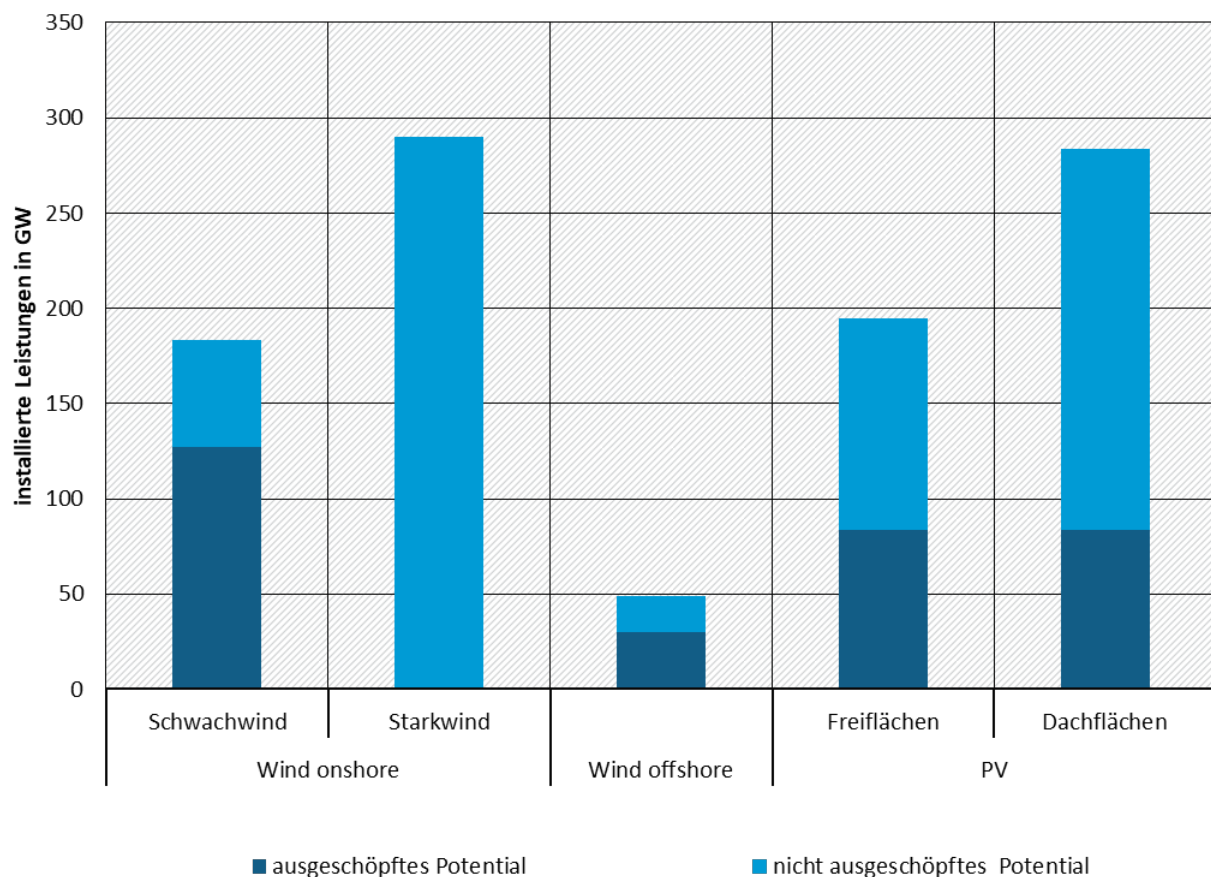
Abbildung 11: Installierte Leistungen Deutschland in GreenLife



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG – SCOPE 1) historische Werte basierend auf eigenen Auswertungen der Kraftwerkslisten der BNetzA und des UBA; 2) Zuordnung von Wasserkraftanlagen nach Teilnahme am deutschen Markt, Standort teilweise im Ausland

Dabei stellt der Zubau von Wind und PV das Ergebnis einer anteiligen Flächenpotenzialaus-schöpfung dar, wie in Abbildung 12 zu sehen ist. Wie auch in den anderen Green-Szenarien werden 2050 ausschließlich Schwachwind Anlagen installiert und dabei etwa 70 % des vorab festgelegten Potentials ausgenutzt. Das Verhältnis der Dach- zu Freiflächen-PV-Anlagen ist dabei exogen vorgeben und stellt kein Ergebnis der Modellierung dar. Für Wind-Offshore wird die vorgegebene Mindestleistung von rund 32 GW ausgebaut.

Abbildung 12: Potenzialausschöpfung Wind und PV im Jahr 2050 in GreenLife



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG - SCOPE

Für die Ausbaupfade werden wir in Kapitel 4.8.2 beschrieben Ausbaukorridore ausgehend vom Zielwert 2050 vorgegeben. Der mit Hilfe des Modells ermittelte Markthochlauf für PV befindet sich in 2030 und 2050 an der Untergrenze aufgrund der durch die Lebensstiländerung erzielten exogenen Einsparungen und damit größeren Spielräume zum Ausstoß von THG-Emissionen in der Energiewirtschaft. Wind-Onshore befindet sich 2030 im mittleren Bereich und 2040 nahe der Untergrenze des für 2050 notwendigen Wertes.

Tabelle 32: Markthochlauf Wind-Onshore und PV

GW	Wind Onshore			PV		
	2030	2040	2050	2030	2040	2050
Korridor-Obergrenze	103,2	127,5		118,4	146,3	
Korridor-Untergrenze	60,1	91,9		86,3	114,2	
Ergebnis	82,0	92,3	127,4	86,3	114,2	167,6

Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG – SCOPE

Die installierten Leistungen sind in Tabelle 33 zu sehen. Im Vergleich zu GreenEe2 wird deutlich, dass es langfristig und sehr geringe Änderungen durch den geänderten Lebensstil gibt. Es

können etwas mehr PtG-Anlagen installiert werden (+3 GW) insbesondere obwohl die EE-Leistung etwas geringer ausfällt (-3 GW), da der sonstige Stromverbrauch geringer ausfällt.

Tabelle 33: Installierte Leistungen in GreenLife

[GW]		Bio	Gas	Kernkraft	Braunkohle	Steinkohle	Öl	On-shore	Off-shore	PV	PtG	Batt-Speicher	Wasser
2015		2,4	29,9	12,1	21,1	30,9	2,6	41,2	3,3	39,8	0,0	0,0	14,9
2030	Green-Life	0,1	25,1	0,0	5,2	8,7	0,2	82,0	15,6	86,3	0,0	0,0	16,7
	Green-Ee2	0,1	24,3	0,0	5,2	11,3	0,2	82,0	15,6	87,7	0,0	0,0	16,7
	Green-Life	0,1	26,9	0,0	0,0	0,0	0,1	92,3	23,8	114,2	0,0	0,0	16,7
2040	Green-Ee2	0,1	25,8	0,0	0,0	0,0	0,1	100,6	23,8	117,5	0,0	0,0	16,7
	Green-Life	0,1	9,9	0,0	0,0	0,0	0,0	127,4	30,3	167,6	33,2	1,2	16,8
2050	Green-Ee2	0,1	12,6	0,0	0,0	0,0	0,0	127,4	32,7	168,9	30,4	0,0	16,8
	Green-Life	0,1	12,6	0,0	0,0	0,0	0,0	127,4	32,7	168,9	30,4	0,0	16,8

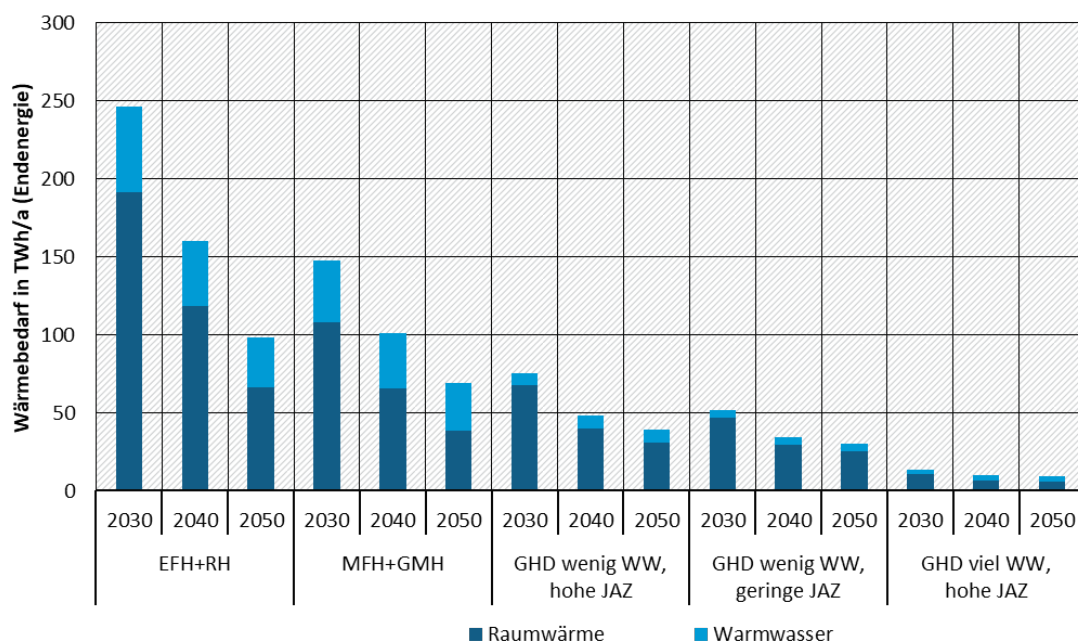
Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von eigene Berechnungen ifeu/IEE/SSG – SCOPE

5.1.3 Wärmesektor

5.1.3.1 Gebäudewärme Haushalte und GHD

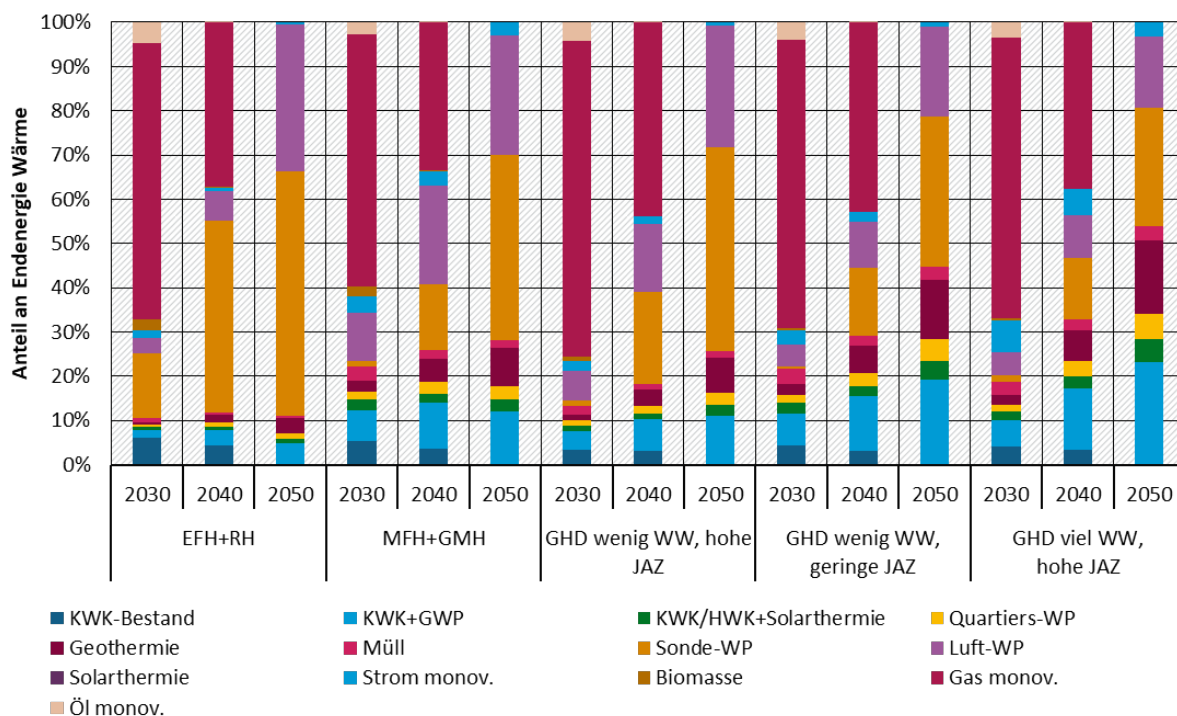
Auf Basis der Zwischenergebnisse zu der Gebäudewärmbedarfsentwicklung und den EE-Wärmepotenzialen in Kapitel 4.5 werden im Folgenden die Ergebnisse der Gesamtsystem-Optimierungsrechnung und damit die Rückkopplung der THG-Emissions-Ziele auf die Investitionsentscheidungen in der Wärmeversorgung dargestellt. Die Entwicklung der Gebäudewärmebedarfe für Haushalte und GHD ist noch einmal in Abbildung 13 zusammengefasst. Die relative Deckung dieser Wärmenachfrage ist in Abbildung 14 dargestellt.

Abbildung 13: Zeitliche Entwicklung des Bedarfs an Raum- und Trinkwarmwasserwärme in Wohn- und gewerblich genutzten Gebäuden (GHD) – GreenLife



Quelle: eigene Darstellung eigener Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG – GEMOD

Abbildung 14: Deckung der Wärmenachfrage in GreenLife



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG - SCOPE

In allen Green-Szenarien außer GreenLate kommt die Technikkombination moderner KWK-Solarthermienetze im Rahmen der kostenoptimierten Wärmeversorgung langfristig nur durch

das Wechselspiel mit dem Stromsystem mit langfristig hohen Deckungsanteilen von PtH (Elektrodenkesseln) zum Einsatz (2,3 %). Ohne diese Rückkopplung, würde die Technikkombination nicht zur Deckung der Wärmeversorgung genutzt. Der größte Anteil zur netzgebundenen Wärmeversorgung wird durch moderne KWK-Systeme mit Großwärmepumpen (10,3 %) bereitgestellt.

Tabelle 34: Ergebnis der SCOPE-Optimierung der Wärmenetzversorgung

	Randbedingungen für die Optimierung	GreenEe2			GreenLife		
		2030	2040	2050	2030	2040	2050
KWK-Bestand	aus Kraftwerksliste	6,2 %	3,4 %	0,0 %	5,3 %	3,9 %	0,0 %
KWK+GWP	Obergrenze (Potenzial)	3,6 %	6,4 %	8,4 %	4,2 %	7,1 %	9,7 %
KWK/HWK + Solarthermie-saisonal + PtH	frei	1,0 %	3,0 %	1,8 %	1,4 %	1,4 %	2,2 %
Quartiers-WP	Festsetzung (ohne Kostenannahmen)	0,9 %	1,6 %	2,1 %	1,0 %	1,8 %	2,4 %
Geothermie + Solarthermie-ganzjährig	Obergrenze (Potenzial)	1,3 %	3,0 %	5,8 %	1,5 %	3,6 %	6,9 %
Müll + Biomasse	Festsetzung (ohne Kostenannahmen)	2,0 %	1,1 %	1,2 %	2,1 %	1,3 %	1,4 %

Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG - SCOPE

In der dezentralen Wärmeversorgung wird das langfristige Potenzial für Erdsonden in 2050 nicht ausgeschöpft. Aus Effizienz- und Wirtschaftlichkeitsgründen werden in Rückkopplung mit dem Stromsystem mehr Erdsonden-WP als Luft-WP ausgebaut. Sie leisten bis 2050 den größten Anteil (46,3 %) zur dezentralen Wärmeversorgung. Konventionelle Heiztechniken werden entsprechend der Annahmen (siehe Kapitel 4.5.2) bis 2050 vollständig verdrängt. Langfristig verbleiben noch 1,4 % Durchlauferhitzer. Das Ergebnis ist mit den anderen Green-Szenarien außer GreenLate vergleichbar.

Tabelle 35: Ergebnis der SCOPE-Optimierung der dezentralen Wärmeversorgung

	Randbedingungen für die Optimierung	GreenEe2			GreenLife		
		2030	2040	2050	2030	2040	2050
Sonde-WP	Obergrenze aus GEMOD	7,3 %	28,6 %	46,3 %	7,3 %	28,6 %	46,3 %
Luft-WP	frei	6,2 %	12,8 %	28,3 %	6,2 %	12,8 %	28,3 %
Solarthermie	aus GEMOD	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
Strom monov.	aus GEMOD	2,6 %	1,9 %	1,4 %	2,6 %	1,9 %	1,4 %
Biomasse	aus GEMOD	2,0 %	0,2 %	0,0 %	2,0 %	0,2 %	0,0 %
Gas monov.	Untergrenze aus GEMOD	62,5 %	37,6 %	0,0 %	62,5 %	37,6 %	0,0 %

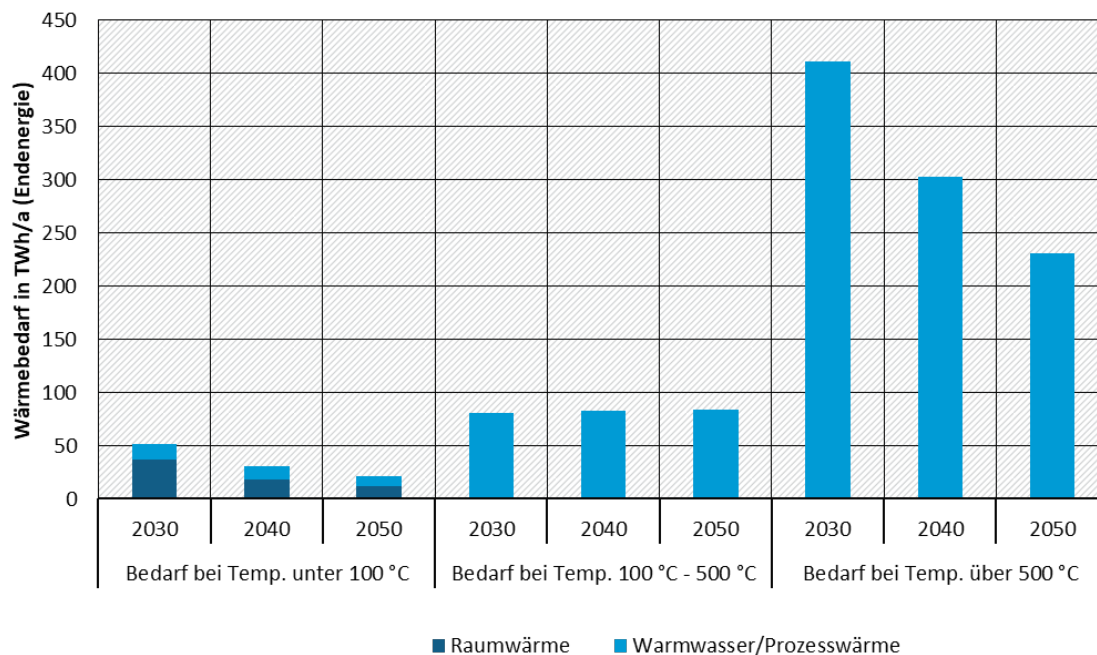
	Randbedingungen für die Optimierung	GreenEe2			GreenLife		
Öl monov.	aus GEMOD	4,0 %	0,0 %	0,0 %	4,0 %	0,0 %	0,0 %

Quelle: eigene Berechnung ifeu/IEE/SSG – SCOPE

5.1.3.2 Prozesswärme Industrie und GHD sowie Industriegebäude

Wie in den Annahmen zur Industrie in Kapitel 4.2 dargestellt geht der Endenergieverbrauch stark zurück (siehe Abbildung 15).

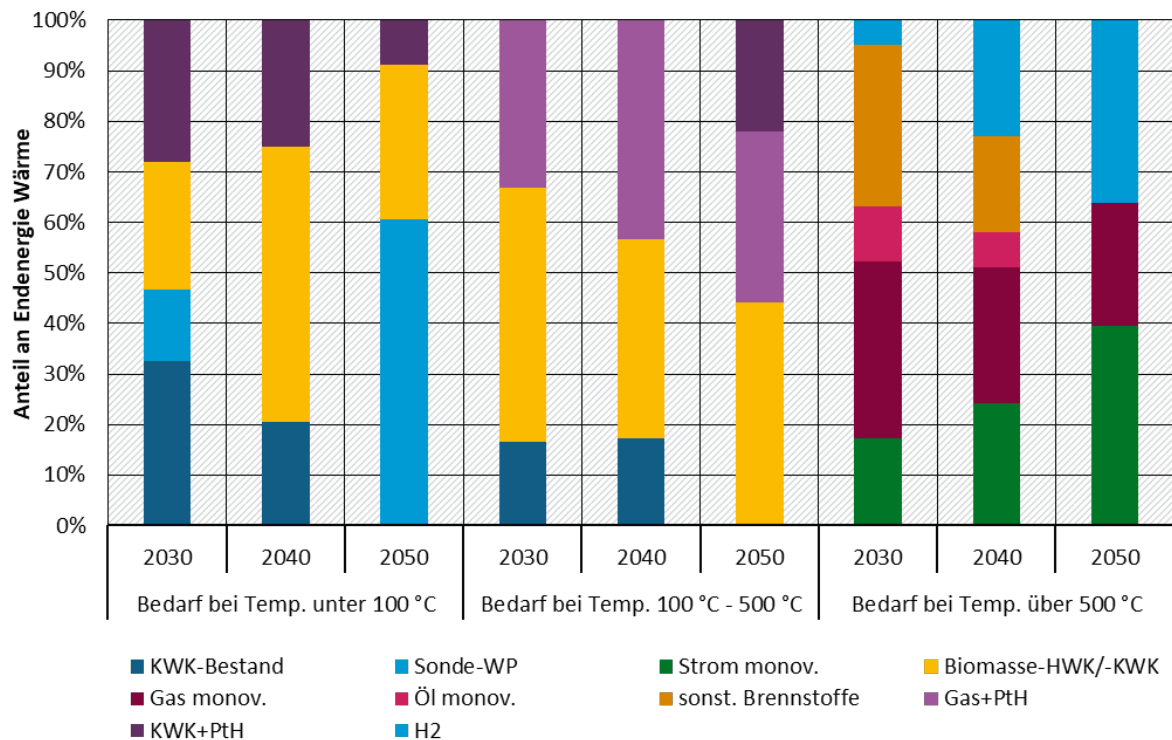
Abbildung 15: Zeitliche Entwicklung des Bedarfs der Industrie an Raum-, Trinkwarmwasser- und Prozesswärme sowie GHD-Prozesswärme – GreenLife



Quelle: eigene Berechnungen ifeu/IEE/SSG – GEMOD, SCOPE

Dabei wird diese Nachfrage wie in Abbildung 16 dargestellt je nach Temperaturniveau unterschiedlich versorgt. So werden für Bedarfe < 100°C ausschließlich Wärmepumpen (mit Abwärmenutzung hier vereinfacht als Sonden-Wärmepumpen bezeichnet) eingesetzt. Für Prozesswärme-Dampfanwendungen (100-500°C) werden Hybridsysteme aus KWK und Elektrodenkesseln oder Heizkesseln und Elektrodenkesseln entsprechend der Potenzialgrenze für KWK (siehe Dittrich et al. (2020a)) eingesetzt. Neben diesen optimierten Ergebnissen sind zusätzlich die exogenen Vorgaben für Verfahren >500°C im zeitlichen Verlauf dargestellt.

Abbildung 16: Zeitliche Entwicklung der Zusammensetzung der Wärmebedarfsdeckung Industrie und GHD-Prozesswärme – GreenLife



Quelle: eigene Berechnungen ifeu/IEE/SSG – SCOPE

5.1.4 Verkehrssektor

Im Folgenden ist der resultierende Endenergieverbrauch im Verkehrssektor differenziert nach Verkehrsmitteln von GreenLife dargestellt. Sowohl der nationale als auch der internationale Verkehr benötigen in GreenLife deutlich weniger Endenergie benötigen als in GreenEe2. Der nationale Verkehr benötigt 4 bzw. 15 % (2030 bzw. 2050) weniger Endenergie, der internationale Verkehr 8 % bzw. 38 % weniger in denselben Jahren.

Tabelle 36: EEV nach Verkehrsmitteln GreenLife im Vergleich zu GreenEe2

TWh/a	2010	2030		2040		2050	
		GreenEe2	GreenLife	GreenEe2	GreenLife	GreenEe2	GreenLife
MIV	384	255	240	164	140	99	75
ÖSPV	16	15	16	13	15	11	13
ÖV Schiene	10	10	10	10	11	10	11
Güter Straße	193	134	130	96	90	74	67
Güter Schiene	5	5	5	6	5	6	6
Güter Binnenschiff	4	3	3	3	3	3	3
Flug national	10	4	6	6	3	4	0
Flug internat.	87	105	95	91	70	77	42

TWh/a	2010	2030		2040		2050	
Seeverkehr intern.	27	20	20	17	17	15	15
Gesamt national	621	430	411	297	268	207	176
International	114	125	115	108	87	92	57
Gesamt	735	554	526	405	355	299	232

Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG - TREMOD

Alternativ ist in Tabelle 37 der Endenergiebedarf nach Energieträger aufgeschlüsselt dargestellt. In den Jahren 2040 und 2050 ist der Stromverbrauch in GreenLife auch in absoluten Zahlen niedriger als in GreenEe2 aufgrund der stärkeren Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel und Sharing-Angeboten. Der Kraftstoffbedarf im Jahr 2050 liegt in GreenLife national um 17 % und international um 38 % niedriger als GreenEe2. Die starke Minderung im internationalen Verkehr ist insbesondere auf die deutlichen Verhaltensänderungen bezüglich Flugreisen zurückzuführen.

Tabelle 37: EEV nach Energieträgern

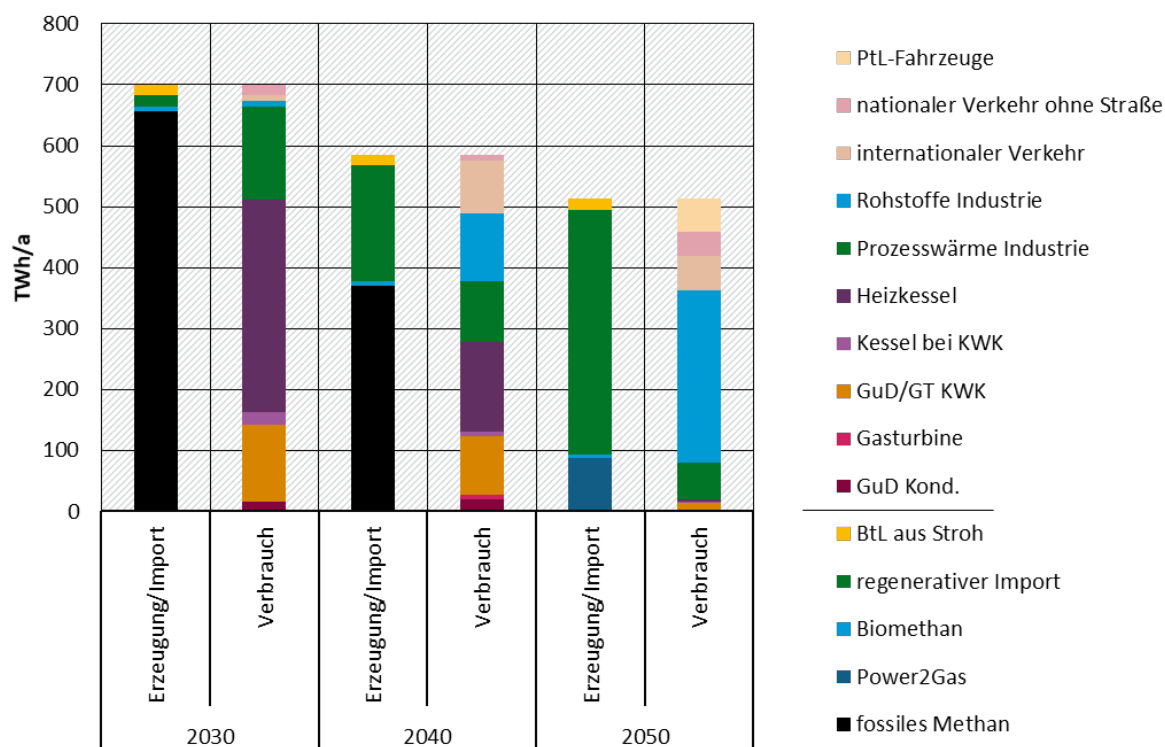
TWh/a	2010	2030		2040		2050	
		GreenEe2	GreenLife	GreenEe2	GreenLife	GreenEe2	GreenLife
Kraftst. Straße PV	398	250	237	126	110	45	37
Kraftst. Straße GV	193	125	121	66	62	37	33
Kraftst. Schiene + Binnschiff	8	6	6	6	6	5	5
Kraftst. Flug nat.	10	7	6	6	3	4	0
Strom Straße PV	0	18	17	49	44	63	50
Strom Straße GV	0	9	9	31	29	38	34
Strom Straße Schiene	12	14	15	15	16	15	17
Kraftst. Internat.	114	125	115	108	87	92	57
Kraftstoff nat.	609	388	370	203	180	91	76
Strom	12	41	41	94	88	116	100
Kraftstoff Summe	723	513	485	311	267	183	133

Quelle: eigene Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG – TREMOD

5.1.5 Gas- und PtL-Versorgung

Durch den Ausstieg aus der Kohlenutzung, verbleiben neben Strom und Holz und anderen Reststoffen insbesondere Gase und Kraftstoffe als Energieträger. Die Auswertung der Gas- und Kraftstoffbilanz inkl. des nichtenergetischen Verbrauchs (Rohstoffe für die Industrie) ist im Folgenden dargestellt. Dabei wird die kontinuierliche Abnahme des Gesamtverbrauchs und die Substitution fossiler Kraftstoffe und Erdgas durch PtG/L deutlich.

Abbildung 17: Entwicklung der Gas- und Kraftstoffnachfrage und Versorgung in GreenLife



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG - SCOPE

In GreenEe2 zeigen sich langfristig die Einsparungen durch die Lebensstiländerung deutlich. So liegt der Brenn- und Kraftstoffbedarf um 63 TWh niedriger als GreenEe2. Darüber hinaus werden durch die Szenariencharakteristik weniger erneuerbare Energien für die Stromversorgung der direkten Stromnutzung benötigt, so dass auch national kostengünstige Erzeugungspotenziale zur PtG/L-Erzeugung genutzt werden können. Das Verhältnis zwischen PtG/L-Importen zu nationaler PtG/L-Erzeugung ist deswegen langfristig deutlich weniger importabhängig als in GreenEe2. Der Anteil der Importe am Gesamtverbrauch liegt mit 78,3 % niedriger als 81 % in GreenEe2.

Tabelle 38: Gas- und Kraftstoffbilanz in GreenLife im Vergleich zu GreenEe2

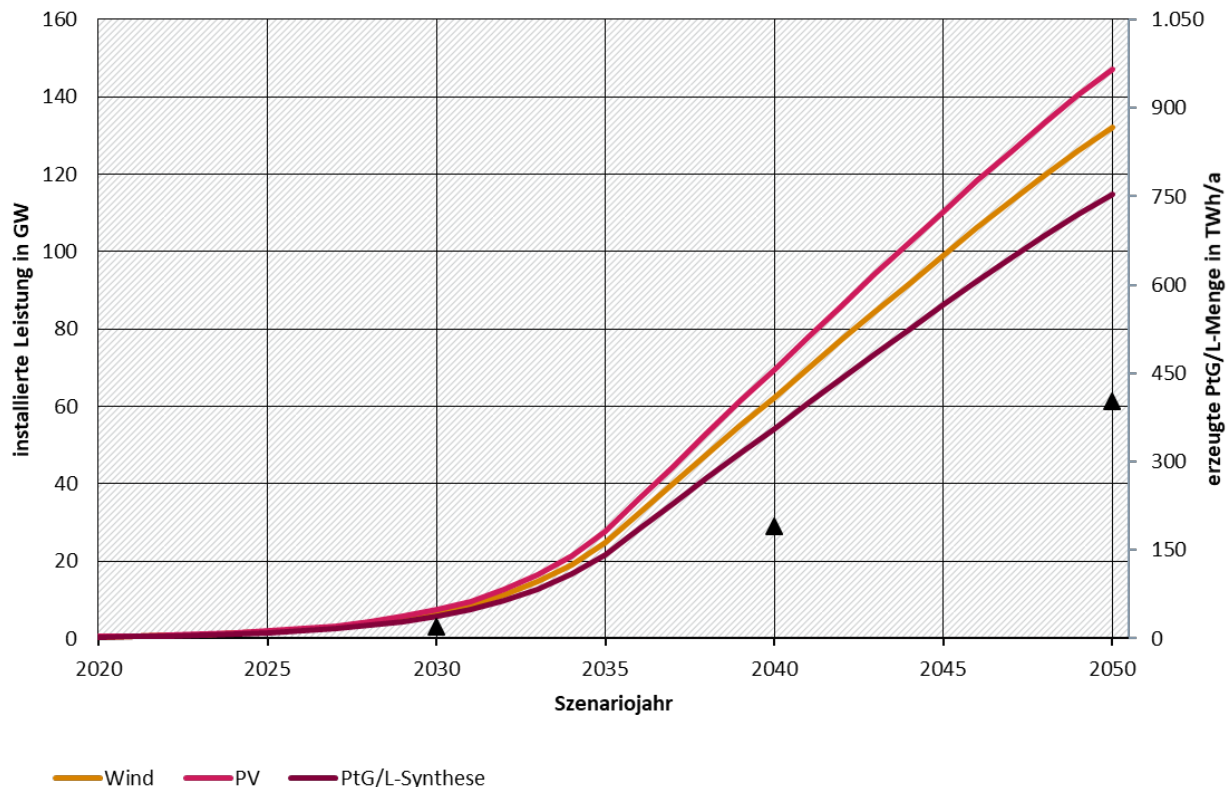
TWh/a		Erdgas	PtG/L-national	PtG/L-Import	Biomethan	BtL aus Stroh	SUMME
2030	GreenLife	657,2	0,0	19,2	7,0	15,9	699,2
	GreenEe2	647,9	0,0	22,4	7,0	15,9	693,1
2040	GreenLife	370,9	0,0	189,8	7,0	16,8	584,4
	GreenEe2	365,9	0,0	221,5	7,0	16,8	611,1

TWh/a		Erdgas	PtG/L-national	PtG/L-Import	Biomethan	BtL aus Stroh	SUMME
2050	GreenLife	0,0	88,3	401,8	5,2	17,7	513,0
	GreenEe2	0,0	86,6	466,6	5,2	17,7	576,1

Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG - SCOPE

Der für diesen PtG/L-Import notwendige Infrastrukturaufbau ist in Abbildung 18 dargestellt.

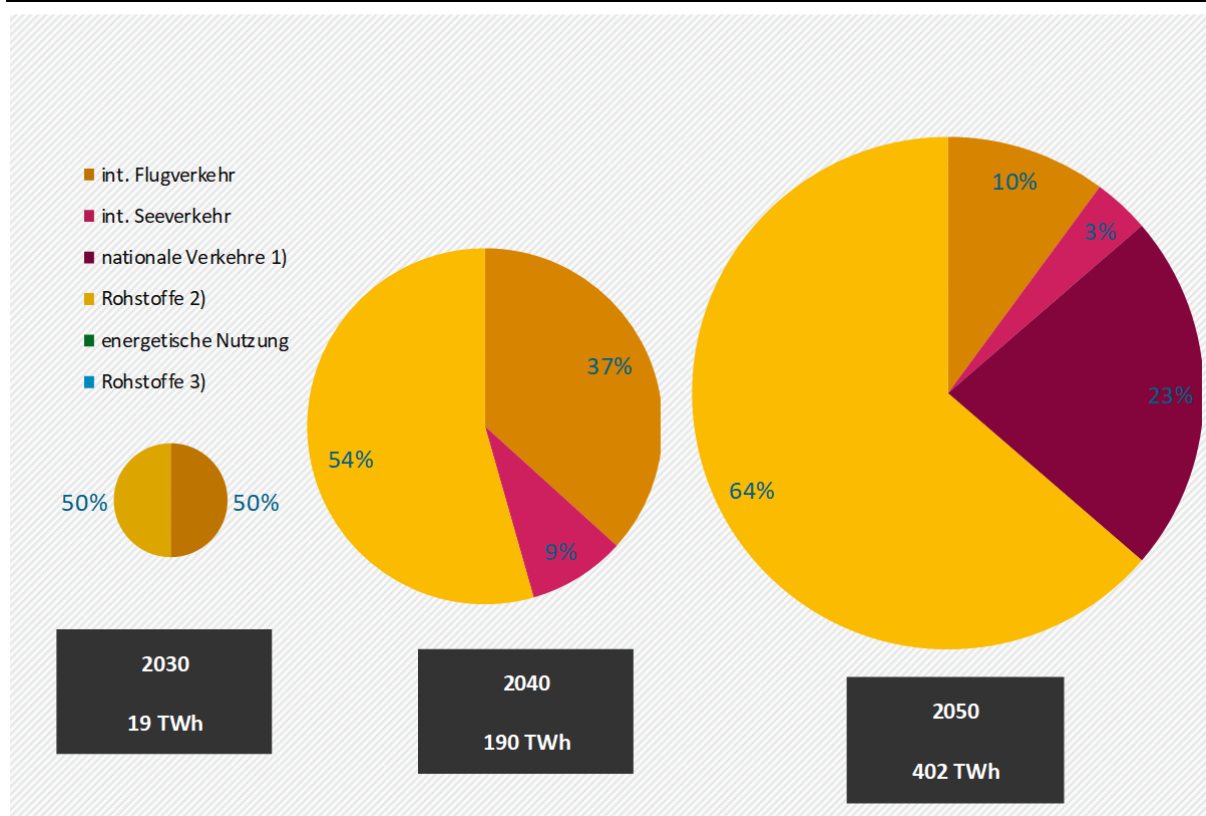
Abbildung 18: Notwendiger Markthochlauf für eine PtG/L-Import-Infrastruktur in GreenLife



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG - SCOPE

Wie in den anderen Green-Szenarien werden vornehmlich die Bedarfe des internationalen Verkehrs und der stofflichen Nutzung gedeckt. Wie in den anderen Green-Szenarien mit Ausnahme GreenSupreme gelangen erst nach 2040 PtG/L-Importe in die nationalen Anwendungsbereiche, wie Verkehr, Gebäude und Industrie zur Prozesswärmeversorgung und wirken erst dann auf das nationale THG-Emissionsziel wie in Abbildung 19 dargestellt ist.

Abbildung 19: Zeitliche Entwicklung des PtG/L-Einsatzes in Deutschland (nur Importe) – GreenLife



Quelle: eigene Berechnungen ifeu/IEE/SSG - SCOPE

Der Vergleich der PtX-Importe zwischen GreenLife und GreenEe2 im Pfad ist in Tabelle 39 noch einmal dargestellt. Wie in in den GreenEe-Szenarien und GreenMe wurde eine 15 %-ige Überbauung unterstellt. Entsprechend ergibt sich eine gleiche relative Entwicklung des Markthochlaufs. Dennoch sind aufgrund der langfristig geringeren PtG/L-Nachfrage die absoluten Importmengen in 2030 und 2040 kleiner als in den GreenEe-Szenarien (und GreenMe).

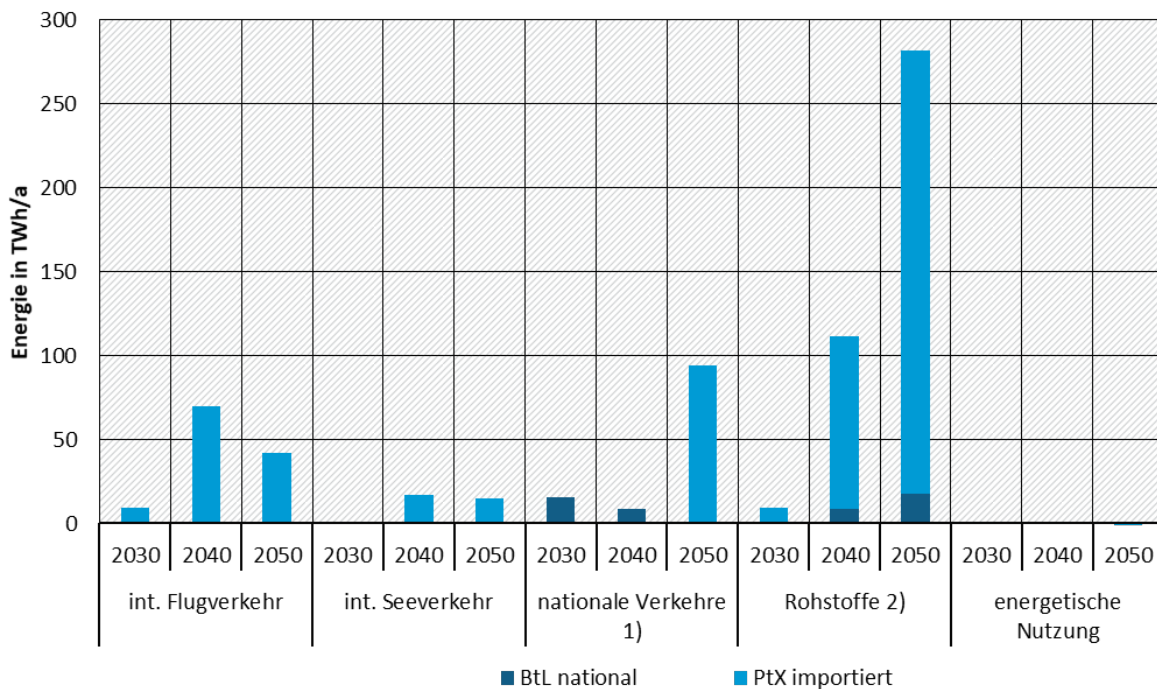
Tabelle 39: Entwicklung der PtG/L-Importmengen im Vergleich zwischen GreenEe2 und GreenLife

	GreenEe2		GreenLife	
	absolut [TWh/a]	relativ zu 2050	absolut [TWh/a]	relativ zu 2050
2030	22,3	5 %	19,2	5 %
2040	220,3	47 %	189,8	47 %
2050	466,6	100 %	401,8	100 %

Quelle: eigene Berechnungen ifeu/IEE/SSG - SCOPE

Dagegen werden Kraftstoffe aus Biomasse im Pfad auch auf das nationale Klimaziel durch eine anteilige Anwendung im nationalen Verkehr angerechnet. Der Vergleich ist in Abbildung 20 dargestellt.

Abbildung 20: Zeitliche Entwicklung des PtG/PtL-Einsatzes (national und importiert)



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG – SCOPE

5.1.6 Europäischer Rahmen

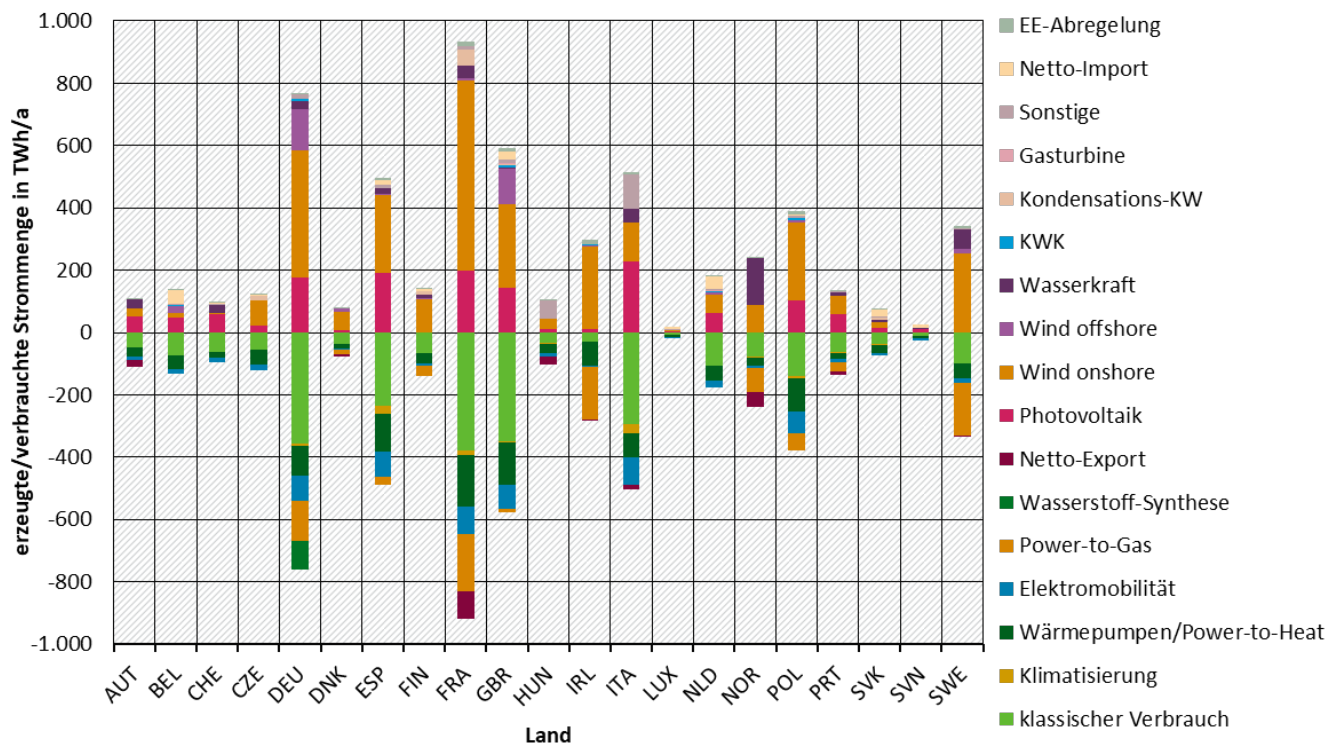
Die kostenoptimierte energiewirtschaftliche Modellierung für Deutschland ist in den europäischen Strommarkt integriert, um die Flexibilität des europäischen Netzes aber auch die unterschiedlichen Potentiale erneuerbarer Energien und deren unterschiedlichen Fluktuationsverhalten zu nutzen. Dabei wird unterstellt, dass die europäischen Staaten ggf. technologisch aufholen und bei der Entwicklung des Kraftwerksparkes sich wie Deutschland entsprechend der jeweiligen Green-Szenarien Charakteristik entwickeln.

Unter diesen Rahmenbedingungen werden auch die Entwicklungen des europäischen Kraftwerksparkes mit abgebildet und sind nachfolgend dargestellt. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass der Fokus der RESCUE-Studie auf der nationalen Entwicklung in Deutschland lag.

5.1.6.1 Strombilanz

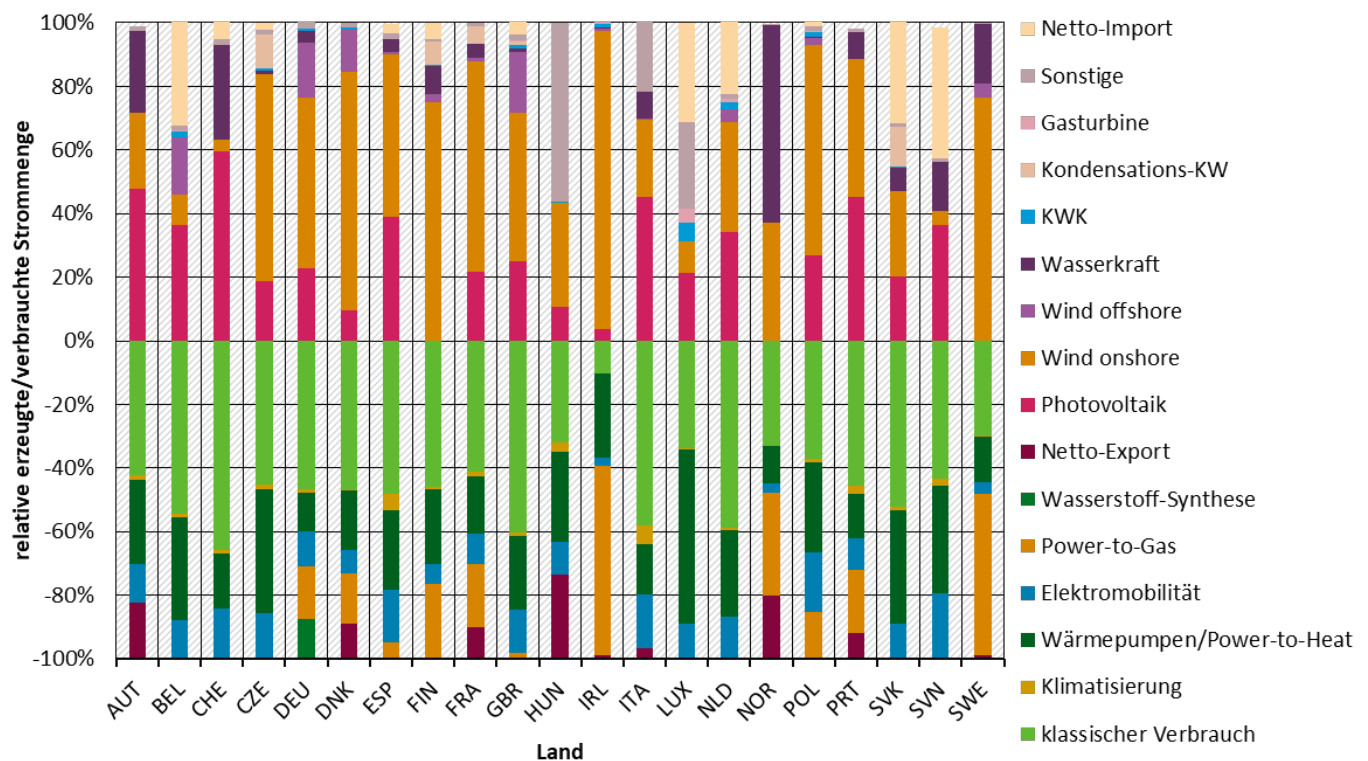
In Abbildung 21 ist das Ergebnis der europäischen Energiesystemoptimierung beispielhaft für 2050 für die Nettostromerzeugung und den Nettostromverbrauch zzgl. Verluste dargestellt. Grundsätzlich zeigen sich vergleichbare Entwicklungen wie in Deutschland. Während jedoch für Deutschland aufgrund der Vergleichbarkeit zwischen den verschiedenen Szenarien eine zusätzliche Randbedingung einer ausgeglichenen Stromhandelsbilanz definiert wurde, zeigen sich zwischen den anderen Ländern Ungleichgewichte. Typische Exportländer sind Frankreich oder Norwegen, während andere Länder, wie Belgien oder Niederlande, auf Stromimporte angewiesen sind. Als ein großes Land weist Großbritannien aufgrund begrenzter Onshore-Potentiale auch einen gewissen Stromimport mit deutlich geringeren Anteil am Gesamtverbrauch auf wie Abbildung 22 zeigt.

Abbildung 21: Stromerzeugung und Verbrauch Europa 2050 in GreenLife



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG – SCOPE

Abbildung 22: Relativer Anteil von Stromerzeugung und Verbrauch Europa 2050 in GreenLife

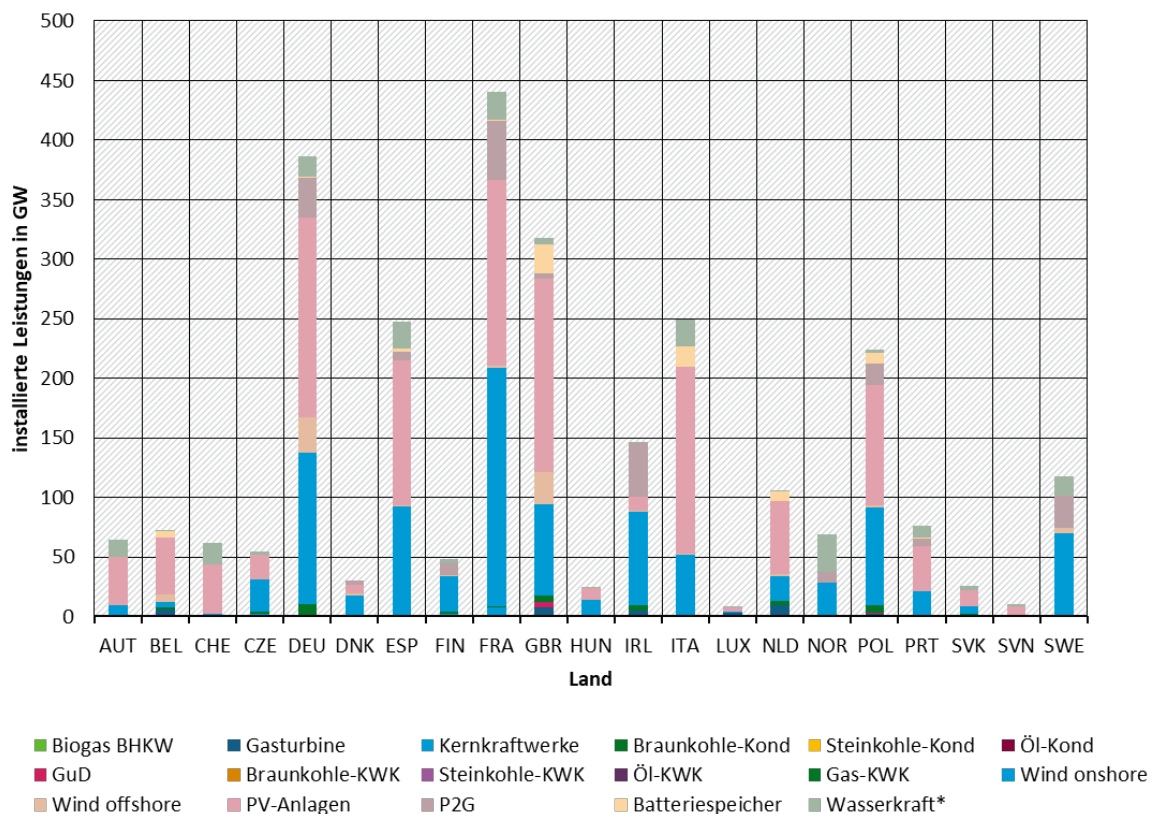


Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG – SCOPE

5.1.6.2 Installierte Leistungen

Die notwendigen installierten Leistungen für diese Stromerzeugung sind in Abbildung 23 dargestellt. Wie in Deutschland, ist auch in ganz Europa die Stromversorgung durch Photovoltaik und Windenergie onshore geprägt. Deutlich wird, dass einige Länder vor dem Hintergrund großer kostengünstiger Standorte für erneuerbare Energiehohe Leistungen von PtG/PtL-Anlagen im jeweiligen nationalen Strommarkt integriert sind. Dies sind insbesondere Irland und Frankreich.

Abbildung 23: Installierte Leistungen Europa 2050 in GreenLife



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG - SCOPE; * Zuordnung Wasserkraftwerke nach Teilnahme an Marktgebieten, Standorte tlw. grenznahe Gebiet

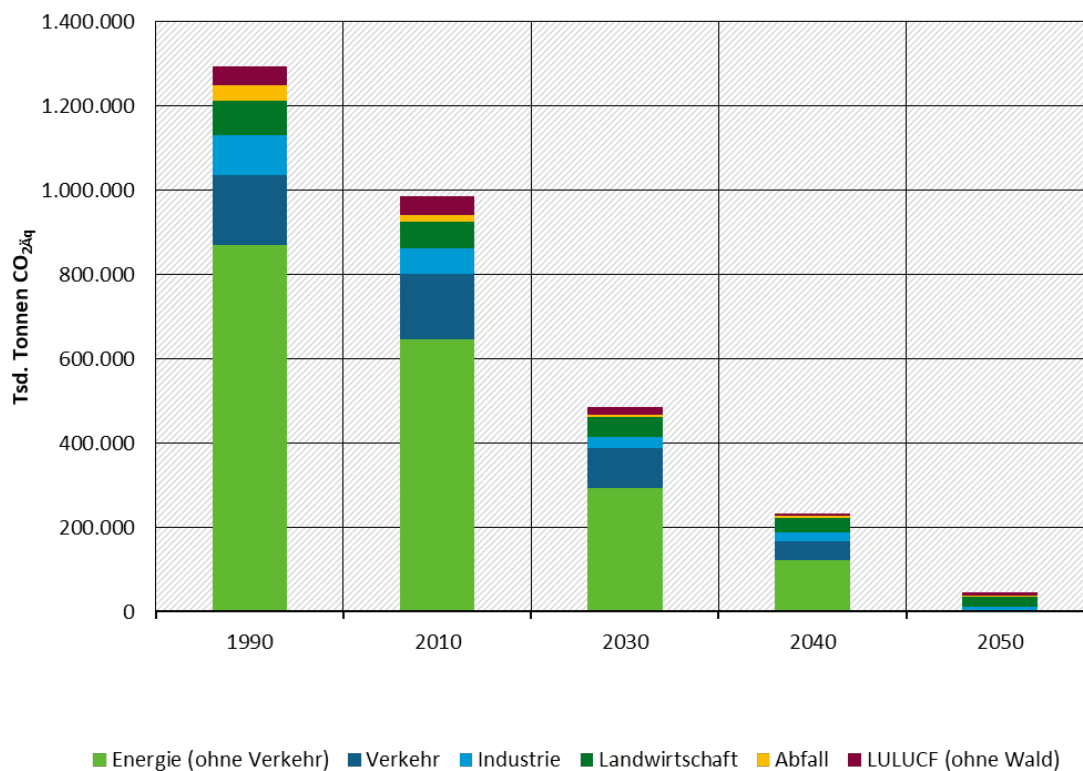
5.2 Entwicklung der Treibhausgasemissionen

5.2.1 Übersicht über die Entwicklung aller Treibhausgasemissionen

Die Treibhausgasemissionen in GreenLife betragen 44,5 Mio. t CO₂Äq in 2050 und gehen damit um 96,6 % gegenüber 1990 (UBA 2019b) zurück (Abbildung 24). Bis 2030 [2040] liegt der Rückgang der THG-Emissionen bei 62,4 % [82 %].

Die Berechnungen der THG-Emissionen erfolgen in diesem Bericht entlang der NIR-Vorgaben. Die THG-Emissionen wurden durch UBA auch nach dem Vorgehen im Klimaschutzplan berechnet (BMUB 2016a; UBA 2019b). Demnach sinken die THG-Emissionen in GreenLife bis 2030 in allen Sektoren stärker als es die Ziele des Klimaschutzplanes vorsehen und sogar im Verkehr werden die Sektorziele erreicht (-55 %) (UBA 2019a).

Abbildung 24: Treibhausgasemissionen nach Quellgruppen, 1990 bis 2050



Quellen: UBA (2019b) 1990-2016, eigene Darstellung eigene Berechnungen von ifeu/IEE/SSG 2017-2050

Die höchsten Rückgänge bis 2030 verzeichnet die Abfallwirtschaft (84,5 %) (Tabelle 40). Demgegenüber steht die Landwirtschaft, deren THG-Emissionen bis 2030 nur um 41,5 % gegenüber 1990 zurückgehen.

In 2050 ist der Energiesektor, einschließlich Verkehr, treibhausgasneutral und die Rückgänge gegenüber 1990 liegen dementsprechend bei 100 %. Auch die THG-Emissionen der Abfallwirtschaft, LULUCF (ohne Wald) und der Industrie sinken bis 2050 stark mit Rückgängen von 93,4 %, 85,6 % und 88 %. Die geringsten Rückgänge finden sich im Sektor Landwirtschaft mit nur 70 %.

Tabelle 40: Emissionsminderungen GreenLife in 2030 und 2050 gegenüber 1990

	historisch	GreenLife in Mio. t CO ₂ Äq		Rückgang gegenüber 1990 in %	
	1990 ¹	2030 ³	2050 ³	Bis 2030 ³	Bis 2050 ³
Energie, ohne Verkehr	871,3	292,9	0,0	-66,4 %	-100,0 %
Verkehr	164,4	95,0	0,0	-42,2 %	-100,0 %
Industrie	96,4	27,0	11,6	-72,0 %	-88,0 %
Landwirtschaft	79,8	46,6	23,9	-41,5 %	-70,0 %
Abfall	38	5,9	2,5	-84,6 %	-93,4 %
LULUCF, ohne	45,2	19,1	6,5	-57,8 %	-85,6 %

	historisch	GreenLife in Mio. t CO ₂ Äq		Rückgang gegenüber 1990 in %	
Wald					
Summe	1.295,0	486,4	44,5	-62,4 %	-96,6 %

Quellen: für 1990 UBA (2019b), für 2030 und 2050 sowie Rückgang eigene Berechnungen ifeu/IEE/SSG; Unstimmigkeiten gehen auf Rundungen zurück

Nachrichtlich sind ferner THG-Emissionen des internationalen Verkehrs (Seeschifffahrt und Flugverkehr) und des Waldes zu nennen:

Bis 2030 steigen die Treibhausgasemissionen des internationalen Flugverkehrs leicht von 22,8 auf 22,9 Mio. t CO₂Äq und im internationalen Schiffsverkehr sinken diese von 8,2 auf 5,4 Mio. t CO₂Äq. In 2040 und 2050 wird der internationale Verkehr ausschließlich mit synthetischen Kraftstoffen versorgt und ist deshalb bilanziell neutral.

Der Wald und die Produkte des Waldes waren zusammengekommen in allen Jahren seit 1990 eine Senke. Für die zukünftige Waldentwicklung ist das WEHAM-Szenario Naturschutz unterstellt, wonach der Wald auch weiterhin eine Senke bleiben und in 2050 etwa 34 Mio. t CO₂ aufnehmen wird (UNEP-IRP 2010). Da jedoch die Nachfrage nach Holz und Holzprodukten in GreenLife rückläufig ist (siehe Kap. 5.3.2.3), verbleibt mehr Holz im Wald als im WEHAM-Szenario angenommen. Die Senkenwirkung ist damit höher. Es ist davon auszugehen, dass unter deren Berücksichtigung 2050 sicher Treibhausgasneutralität, also maximal Netto-Null-Emissionen, erreicht werden.

5.2.2 Emissionen nach Quellgruppen

5.2.2.1 Emissionen im Energiesektor, einschließlich Verkehr

Die THG-Emissionen des Energiesektors sind im Folgenden entsprechend der Emittenten differenziert dargestellt.

Tabelle 41: Energiebedingte THG-Emissionen nach Anlagentyp in Mio. t CO₂Äq

		2030	2040	2050
Stromerzeugung + KWK (SCOPE - endogen)	Öl-KWK-Kraftwerke	0,0	0,0	0,0
	Öl-Kondensations-Kraftwerke	0,0	0,0	0,0
	Steinkohle-KWK-Kraftwerke	14,9	0,0	0,0
	Steinkohle-Kondensationskraftw.	12,7	0,0	0,0
	Braunkohle-KWK-Kraftwerke	9,8	0,0	0,0
	Braunkohle-Kondensationskraftw.	19,9	0,0	0,0
	Gas-KWK-Kraftwerke	28,8	19,8	0,0
	GuD-Kondensationskraftwerke	3,0	3,8	0,0
	Gasturbinen-Kondensationskraftw.	0,0	1,1	0,0

		2030	2040	2050
Wärmeerzeugung außer KWK (SCOPE - endogen)	Dezentrale Gaskessel HH/GHD	66,3	25,4	0,0
	Dezentrale Ölkessel HH/GHD	5,7	0,0	0,0
	Müll-HKW – Fernwärme	1,4	0,6	0,0
	Gas -Industrie-Prozesswärme	33,1	21,6	0,0
	Braunkohle -Industrie-Prozessw.	2,3	0,3	0,0
	Steinkohle -Industrie-Prozessw.	45,3	19,9	0,0
	Öl -Industrie-Prozesswärme	12,7	6,0	0,0
	Ersatzbrennstoff -Industrie-PW	0,3	0,1	0,0
Verkehr	PKW	65,2	29,5	0,0
	LNF	6,0	3,0	0,0
	LZ/SZ ohne OH-Lkw	18,7	8,8	0,0
	OH-Lkw (Diesel-Anteil)	0,0	0,0	0,0
	Weitere Kraftstoffverbräuche im nationalen Verkehr	5,0	4,7	0,0
Sonstige energetische THG-Emissionen (SCOPE - exogen)	Umwandlungssektor u.a.	29,5	17,4	0,0
	Kraftstoffe GHD	7,1	5,8	0,0
Summe		387,9	167,7	0,0

Quelle: eigene Berechnungen von Ifeu/IEE/SSG – SCOPE für Strom und Wärme, TREMOD für Verkehr

5.2.2.2 Treibhausgasemissionen der Industrie

Die prozessbedingten THG-Emissionen (nach NIR-Systematik) aus der Industrie betragen im Jahr 2050 einschließlich der fluorierten THG-Emissionen sowie THG-Emissionen von Lösemitteln und anderen Produktverwendungen insgesamt 11,6 Mio. t CO₂-Äq. Die energetisch bedingten THG-Emissionen werden wie in den anderen Anwendungsbereichen vollständig vermieden.

In allen Industriezweigen sind Rückgänge bereits über den Pfad zu verzeichnen (Tabelle 42). In 2050 dominieren die THG-Emissionen der Zementindustrie die prozessbedingten THG-Emissionen mit 58,5 %, gefolgt von der Kalk-, Chemie und Glasindustrie (30,9 %, 5,2 % und 4 %). Die Metallindustrie (ohne Eisen) sowie der Gießerei-, Textil-, Nahrungsmittel und Papierindustrie emittieren in 2050 keine THG-Emissionen mehr.

Tabelle 42: Prozessbedingte THG-Emissionen nach Industriesektoren in t CO₂-Äq

Sektor	2030	2040	2050
Eisen- und Stahlindustrie	2.645.804	1.570.707	128.982

Sektor	2030	2040	2050
NE-Metallindustrie	1.022.304	639.353	0
Gießereiindustrie	0	0	0
Zementindustrie	8.924.494	7.827.765	5.618.096
Glasindustrie	776.281	612.355	388.038
Kalkindustrie	3.785.565	3.416.690	2.972.328
Textilindustrie	0	0	0
Nahrungsmittelindustrie	0	0	0
Papierindustrie	0	0	0
Chemie	6.882.898	4.159.097	500.000

Quelle: ifeu - eigene Berechnungen; Berechnung enthält keine energiebedingten THG-Emissionen

Die THG-Emissionen fluorierter Treibhausgase gehen bis 2050 auf insgesamt 1,2 Mio. t CO₂Äq zurück. Sie sind in Tabelle 43 detailliert ausgewiesen.

Tabelle 43: THG-Emissionen aus Produktion und Einsatz fluorierter Treibhausgase in t CO₂Äq

	2030	2040	2050
Aluminium- und Magnesiumindustrie	196.361	186.316	172.167
Produktion fluorierter Treibhausgase	298.763	318.666	339.508
Kälte-, Klimaanlage und Wärmepumpen	293.000	114.000	24.296
Herstellung von Dämmstoffen	87.226	87.226	87.226
Feuerlöschmittel	0	0	0
Aerosole und Lösemittel	129.902	129.897	130.214
Halbleiterproduktion	135.934	135.879	135.667
Elektrische Betriebsmittel	166.000	115.000	51.031
Sonstige SF ₆ -Anwendungen	464.000	253.918	253.918
Gesamt	1.771.186	1.340.902	1.194.027

Quelle: eigene Berechnungen auf der Basis von ifeu/IEE/SSG - URMOD

Die THG-Emissionen von Lösemitteln und anderen Produktanwendungen gehen auf insgesamt 0,76 Mio. t CO₂Äq in 2050 zurück, die einzelnen Quellen sind in (Tabelle 44) ausgewiesen. Ferner verursacht Lachgas THG-Emissionen von 0,013 Mio. t CO₂Äq.

Tabelle 44: THG-Emissionen von Lösemitteln und anderen Produktanwendungen sowie Lachgas in t CO₂Äq

	2030	2040	2050
--	------	------	------

	2030	2040	2050
Anwendung von Farben und Lacken	359.670	328.032	255.096
Entfettung sowie Chemische Reinigung	59.103	55.646	47.745
Herstellung und Anwendung chemischer Produkte	87.928	82.739	70.879
Andere Anwendungen von Lösemitteln	526.598	485.361	390.497
sonstige Branchen (nicht im Bericht betrachtet)	99.667	69.767	0
Gesamt	1.132.966	1.021.545	764.217
Lachgas	13.000	13.000	13.000

Quelle: eigene Berechnungen auf der Basis von ifeu/IEE/SSG - URMOD

5.2.2.3 THG-Emissionen der Landwirtschaft

Die im Kapitel 4.1 genannten Annahmen führen zu den in Tabelle 45 dargestellten THG-Emissionen nach IPCC (2006).

Tabelle 45: THG-Emissionen Sektor Landwirtschaft im GreenLife-Szenario in t CO₂Äq

Landwirtschaft	1990	2010	bis 2030	bis 2040	bis 2050
Tierhaltung / Verdauung	34.664.197	24.653.820	19.268.980	13.807.427	8.345.875
Wirtschaftsdüngermanagement	13.158.304	10.274.520	5.437.515	2.670.484	999.019
Böden	28.763.506	24.708.817	19.534.356	15.490.101	12.436.151
Kalkung	2.704.013	1.737.636	1.737.636	1.737.636	1.737.636
Harnstoffausbringung	479.601	587.408	486.928	436.689	386.449
Andere	393	1.052.329	181.711	0	0
Summe	52.389.910	38.195.113	46.647.126	34.142.338	23.905.130
Veränderung ggü. 1990		-21,0 %	-41,5 %	-57,2 %	-70,0 %

Quelle: UBA (2019b) für 1990 und 2010, ifeu/IEE/SSG - ALMOD für 2030, 2040 und 2050

Insgesamt kommt es zu einem Rückgang der THG-Emissionen aus der Landwirtschaft um 70 % in 2050 gegenüber 1990. Die größte absolute Änderung geht dabei auf die Tierhaltung zurück (26,3 Mio. t CO₂Äq), die größte prozentuale Änderung verzeichnet das veränderte Wirtschaftsdüngermanagement (92,4 %).

Der THG-Emissionsrückgang ergibt sich aus dem geringeren Viehbestand in 2050 und damit geringeren THG-Emissionen aus der Verdauung, dem Wirtschaftsdüngermanagement sowie der Bodenbewirtschaftung (durch die geringere Menge an ausgebrachtem Wirtschaftsdünger).

Die Treibhausgasemissionen in der Quellgruppe Landwirtschaft beinhalten Kohlendioxid, Methan und Lachgas. Tabelle 46 zeigt die Entwicklung der Treibhausgase der Quellgruppe Landwirtschaft nach Art der Treibhausgase nach IPCC (2006).

Tabelle 46: Emissionen der Quellgruppe Landwirtschaft nach Treibhausgasen im GreenLife-Szenario Szenario in t CO₂Äq

	1990	2010	2030	2040	2050
Kohlendioxid	3.183.610	2.325.040	2.224.565	2.174.325	2.124.085
Methan	42.737.380	31.807.030	22.028.230	14.670.962	8.392.331
Lachgas	33.849.020	28.882.460	22.394.332	17.297.051	13.388.714

Quelle: UBA (2019b) für 1990 und 2010, ifeu/IEE/SSG - ALMOD für 2030, 2040 und 2050

5.2.2.4 THG-Emissionen im Abfallsektor

Die THG-Emissionen im Abfallsektor gehen auf 2,5 Mio. t CO₂Äq in 2050 zurück. Tabelle 47 zeigt die weitere Aufschlüsselung nach Untergruppen im Zeitverlauf. Aufgrund der rückläufigen Abfallmengen gehen die Treibhausgasemissionen für die Bereiche MBA/MBS und Kompostierung/Vergärung stärker als in vorherigen Green-Szenarien zurück. Fast die Hälfte der THG-Emissionen in 2050 entstammt den Kläranlagen.

Tabelle 47: THG-Emissionen im Abfallsektor nach Untergruppen in t CO₂Äq

Abfallsektor	1990	2010	bis 2030	bis 2040	bis 2050
Deponie	34.250.000	10.675.000	3.083.333	1.483.333	700.000
MBA		156.000	122.668	104.689	77.516
Kompostierung/Vergärung	41.306	886.831	701.977	602.425	453.008
abflusslose Gruben	3.675.169	84.250	70.208	60.847	42.125
Kläranlagen		2.214.140	1.889.031	1.672.291	1.238.812
Summe	37.966.475	14.016.221	5.867.217	3.923.586	2.511.460

Quelle: UBA (2019b) für 1990 und 2010, ifeu für 2030 bis 2050

5.2.2.5 THG-Emissionen im Bereich LULUCF (ohne Wald)

Die THG-Emissionen der Quellgruppe LULUCF (ohne Wald) gehen auf insgesamt 6,5 Mio. t CO₂Äq in 2050 zurück. Die folgende Tabelle 48 zeigt die THG-Emissionen der einzelnen Untergruppen. Die verbleibenden THG-Emissionen werden auf Acker- und Grünland sowie auf Siedlungsflächen verursacht. Die unterstellte Senkenwirkung des Waldes wurde in Kap. 4.2 nachrichtlich genannt.

Tabelle 48: Treibhausgasemissionen in LULUCF (ohne Wald) nach Untergruppen in t CO₂Äq

LULUCF	1990	2010	bis 2030	bis 2040	bis 2050
Acker und Grünland (Reduktion durch Wiedervernässung)	39.054.200	15.235.368	15.235.368	4.000.000	4.000.000
Torfabbau	4.127.590	1.018.500	1.018.500	0	0

LULUCF	1990	2010	bis 2030	bis 2040	bis 2050
Siedlungsfläche	1.885.560	2.821.950	2.821.950	2.740.628	2.500.000
Sonstiges	163	213	0	0	0
Summe (ohne Wald)	43.099.923	45.429.833	19.075.818	6.840.978	6.500.000

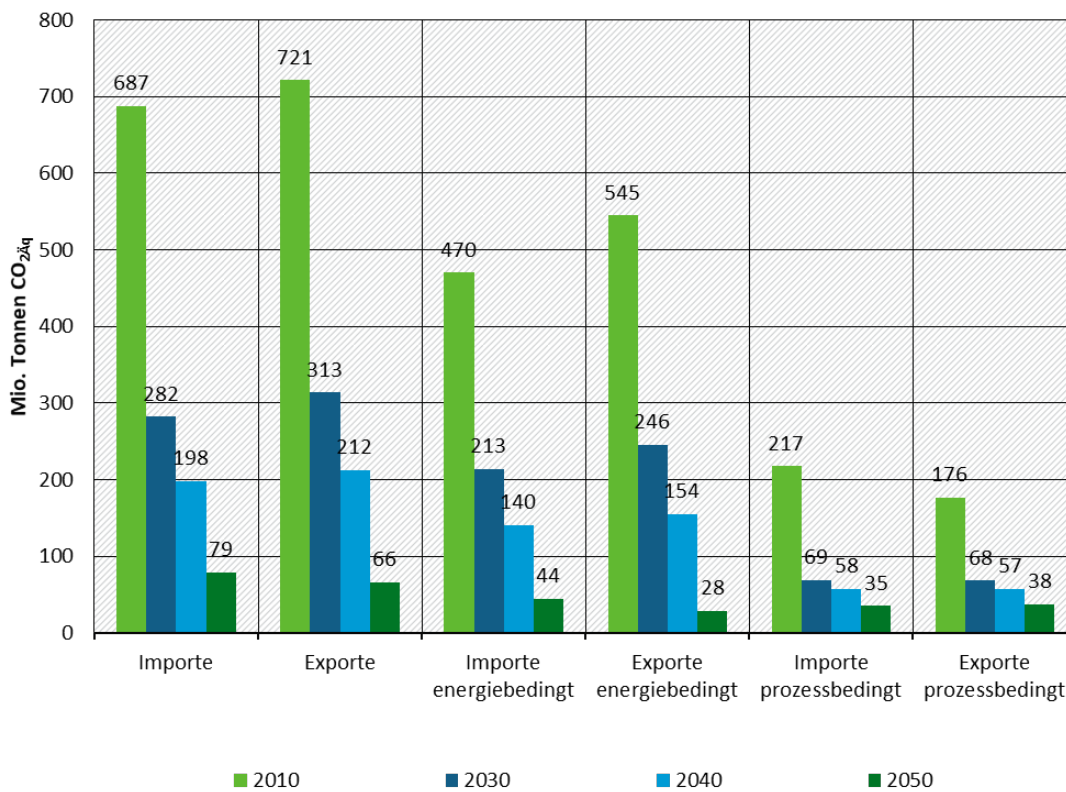
Quelle: UBA (2019b) für 1990 und 2010, UBA (2014) für 2050, ifeu für 2030 und 2040

Im Zuge der Szenarienentwicklung ergab sich bezüglich der Wiedervernässung der Moore ein Attributionsproblem: die THG-Emissionen aus wiedervernässten Mooren können nicht auf Null zurückgehen, wie dies noch im THGND-Bericht, bzw. GreenEe angenommen wurde. Auch naturnahe Moore emittieren Treibhausgase (Niedermoores ca. 10 t CO₂Äq./ha, Hochmoore ca. 3 t CO₂Äq./ha). Diese sind allerdings nicht anthropogen und daher im Treibhausgasinventar mit Null angesetzt. Bei einer Wiedervernässung werden jedoch auch die Restemissionen als anthropogen berücksichtigt (und müssten theoretisch kalkuliert werden). Da nicht alle Moore tiefentwässert sind, bedeutet das im besten Falle, dass rund 2/3 der heutigen Treibhausgasemissionen aus den Mooren eingespart werden können. Da diese Emissionen auch im Treibhausgasinventar nicht berücksichtigt werden, werden sie auch in diesem Projekt nicht auf das THG-Minderungsziel angerechnet, sondern lediglich nachrichtlich erwähnt. Es handelt sich hierbei um THG-Emissionen in Höhe von 8,5 Mio t CO₂Äq.

5.2.3 Emissionen einschließlich Vorketten

Die territoriale Emissionsberechnung wird ergänzt durch die Berechnung der THG-Emissionen, die bei Produktion und Transport der im- und exportierten Güter entstanden sind. Die Berechnung erfolgt nach dem UGR-Konzept. Dabei entsprechen die Güter der letzten inländischen Verwendung der Abgrenzung des Rohmaterialkonsums (RMC) und beinhalten den privaten und öffentlichen Konsum sowie die Investitionen. Die THG-Emissionsgehalte der Im- und Exporte sind bis 2050 rückläufig (Abbildung 25). Bis 2040 überwiegen die THG-Emissionsgehalte der Exporte die der Importe. Dies reflektiert insbesondere die hohe Energieintensität der Exporte. Das Verhältnis kehrt sich in 2050 um, wenn im Inland keine energiebedingten THG-Emissionen entstehen. Die THG-Emissionen der Exporte setzen sich dann aus den energiebedingten THG-Emissionen der importierten Vorleistungen und aus nicht-energiebedingten THG-Emissionen zusammen. Letztere entstammen sowohl den importierten Vorleistungen als auch der inländischen Produktion und sind dominiert von den Quellgruppen Landwirtschaft und Industrie.

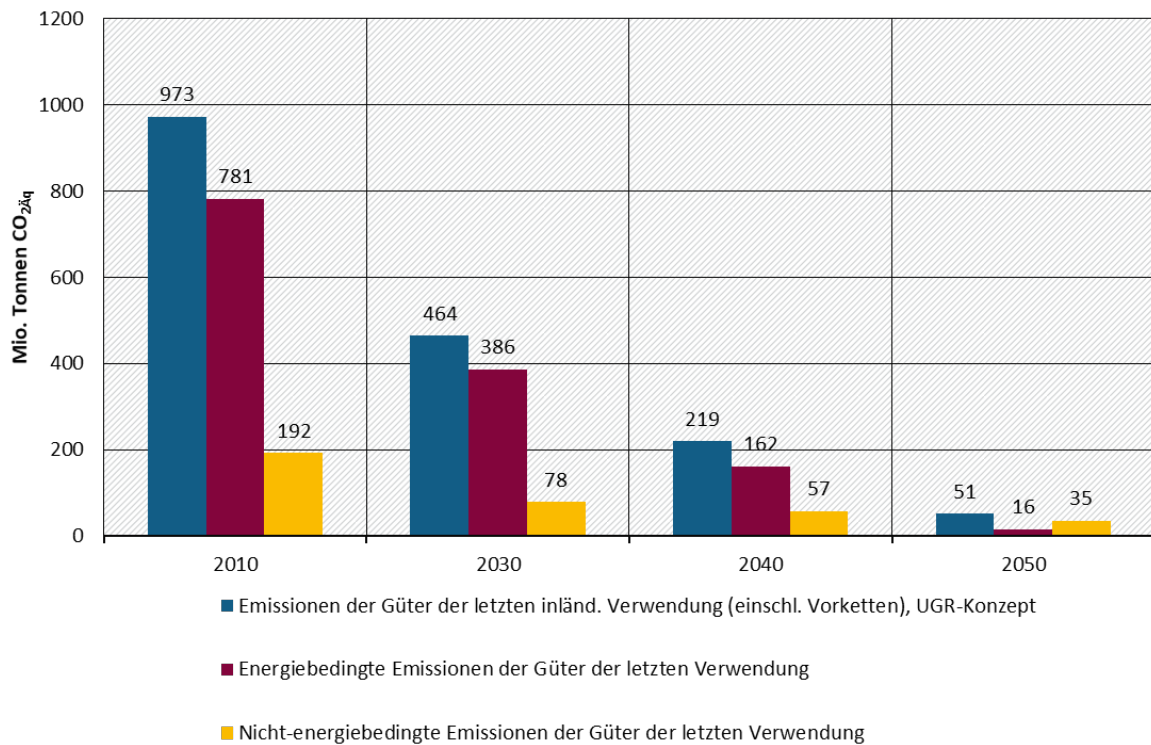
Abbildung 25: THG-Emissionsgehalte der Im- und Exporte, 2010 bis 2050



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG - URMOD

Der private und öffentliche Konsum sowie die Investitionen (letzte inländische Verwendung Deutschlands) verursachen weltweit rückläufige Treibhausgasemissionen. Diese liegen in 2050 [2030/2040] nur noch bei 66 [464/219] Mio. t CO₂Äq, was einem Rückgang von 94,8 % gegenüber 2010 entspricht. In den Stützjahren dominieren die energiebedingten THG-Emissionen die Güter der letzten Verwendung. Erst in 2050 liegen die nicht-energetischen THG-Emissionen höher als die energiebedingten THG-Emissionen.

Abbildung 26: THG-Emissionen der Güter der letzten inländischen Verwendung

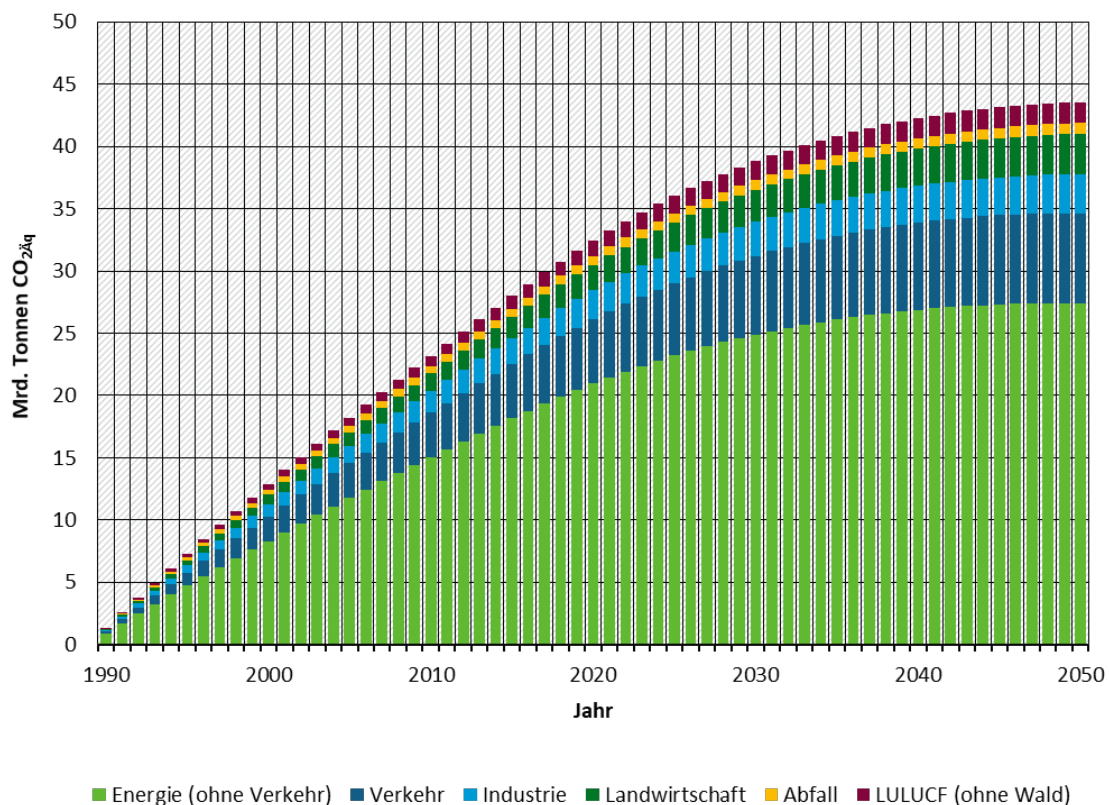


Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG - URMOD

5.2.4 Kumulierte Treibhausgasemissionen

Die THG-Emissionen, die Deutschland zwischen 1990 und 2016 (nach NIR) emittiert hat, summieren sich auf insgesamt 28,96 Mrd. t CO₂Äq. Bis 2050 kommen im Szenario GreenLife weitere 14,6 Mrd. t CO₂Äq hinzu. Der Großteil von 9,84 Mrd. t CO₂Äq entsteht im Zeitraum bis 2030. 63 % der kumulierten THG-Emissionen zwischen 1990 und 2050 sind energiebedingt, 16,6 % entstammen dem Verkehr. Auf die Industrie entfallen 7,2 % und auf die Landwirtschaft 7,5 % der kumulierten THG-Emissionen bis 2050. (siehe Abbildung 27)

Abbildung 27: Kumulierte THG-Emissionen nach Quellgruppen, 1990 – 2050



Quellen: eigene Darstellung und eigene Berechnungen basierend auf (UBA 2019a) für 1990 - 2016 und ifeu/IEE/SSG, 2017-2050

Zwischen 2010 und 2050 werden nach dem WEHAM-Szenario Naturschutz insgesamt rund 0,99 Mrd. t CO₂ im Wald gebunden. Dies entspricht einem Anteil von 6,8 % der kumulierten THG-Emissionen zwischen 2010 und 2050 in GreenLife. Eine genaue Quantifizierung konnte nicht vorgenommen werden, es ist davon auszugehen, dass die Senkenfunktion größer ausfällt.

5.2.5 Vergleich der Treibhausgasemissionen mit den GreenEe-Szenarien

Aufgrund der zusätzlichen Lebensstiländerungen in GreenLife entstehen im Vergleich zu den GreenEe-Szenarien weniger Treibhausgas-Emissionen. So werden in 2050 [2030/2040] insgesamt 17,6 % [6,0 %/9,5 %] weniger Treibhausgase nach NIR emittiert als in GreenEe1 (Tabelle 49). Der relevanteste Unterschied mit 16,9 bzw. 8,3 Mio. Tonnen CO₂Äq in 2030 bzw. 2040 ist in der Quellgruppe Energie ohne Verkehr zu finden. Die Reduktion der Produktionsmengen auf die Treibhausgasreduktion ist ein relevanter Faktor, der insbesondere auf die Reduktion der THG-Emissionen in den Quellgruppen Industrie, Energie und Verkehr Auswirkungen hat. Auf die zusätzlichen Änderungen der Lebensstile gehen in 2030/2040 und 2050 Reduktionen von 3,0/3,6 bzw. 6,5 % der Treibhausgasemissionen insbesondere in den Quellgruppen Landwirtschaft und Abfall zurück. Bereinigt um den Einfluss der Handelsbilanz ist die Änderung der Lebensstiländerung insbesondere im Verkehr 2040 spürbar mit -11,8 % gegenüber GreenEe2 (Tabelle 50).

Die kumulierten Treibhausgase zwischen 1990 und 2050 liegen in Folge in GreenLife um 0,65 Mrd. Tonnen (1,6 %) niedriger als in GreenEe1 und 0,29 Mrd. Tonnen (0,7 %) als in GreenEe2.

Tabelle 49: Vergleich der Treibhausgasemissionen in GreenLife und GreenEe1 in Mio. Tonnen CO₂Äq

	GreenLife			GreenEe1			GreenLife ggü. GreenEe1 in %		
	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050
Energie ohne Verkehr	294,0	125,6	0,0	311,0	134,0	0,0	-5,4	-6,2	
Verkehr	95,0	46,0	0,0	100,3	52,8	0,0	-5,4	-12,9	
Industrie	27,0	20,6	11,6	30,8	25,0	16,2	-12,4	-17,5	-28,5
Landwirtschaft	46,6	34,1	23,9	51,5	39,1	28,4	-9,5	-12,6	-15,8
Abfall	5,9	3,9	2,5	6,0	4,2	2,9	-2,9	-6,4	-13,5
LULUCF (ohne Wald)	19,1	6,7	6,5	19,3	6,8	6,5	-1,0	-1,5	0,0
Summe	487,5	237,0	44,5	518,9	261,9	54,0	-6,0	-9,5	-17,6

Quelle: eigene Berechnungen ifeu/IEE/SSG

Tabelle 50: Vergleich der Treibhausgasemissionen in GreenLife und GreenEe2 in Mio. Tonnen CO₂Äq

	GreenLife			GreenEe2			GreenLife ggü. GreenEe2 in %		
	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050
Energie ohne Verkehr	294,0	125,6	0,0	298,3	124,6	0,0	-1,4	0,8	
Verkehr	95,0	46,0	0,0	99,7	52,1	0,0	-4,8	-11,8	
Industrie	27,0	20,6	11,6	27,0	20,6	11,6	0,0	0,0	0,0
Landwirtschaft	46,6	34,1	23,9	46,6	34,1	23,9	0,0	0,0	0,0
Abfall	5,9	3,9	2,5	5,9	3,9	2,5	0,0	0,0	0,0
LULUCF (ohne Wald)	19,1	6,7	6,5	19,1	6,7	6,5	0,0	0,0	0,0

	GreenLife			GreenEe2			GreenLife ggü. GreenEe2 in %		
Summe	487,5	237,0	44,5	496,5	242,1	44,5	-1,8	-2,1	0,0

Quelle: eigene Berechnungen ifeu/IEE/SSG

5.3 Der Konsum von Rohstoffen

5.3.1 Der gesamtwirtschaftliche Konsum von Primärrohstoffen

5.3.1.1 Der Konsum von Primärrohstoffen nach Rohstoffarten

Der gesamtwirtschaftliche kumulierte Aufwand von Primärrohstoffen zur Herstellung der Güter der letzten inländischen Verwendung (RMC) im Jahre 2050 [2030/ 2040] summiert sich auf insgesamt 506,0 [855,2/ 664,9] Mio. Tonnen Rohstoffäquivalente (RME). Dies ist ein Rückgang um 63,2 [37,8/ 51,6] % gegenüber 2010 (Tabelle 51).

Im Jahr 2050 haben die mineralischen Rohstoffe den größten Anteil von 55,5 % am RMC, gefolgt von biotischen Rohstoffen (29,6 %) und Metallerzen (13,8 %).

Tabelle 51: Übersicht über die Rohstoffflüsse in 2010, 2030, 2040 und 2050

		Inländische Entnahme (DE)	Importe	Güter der letzten Verwendung insgesamt (RMI)	Exporte	Güter der letzten inländischen Verwendung (RMC)
--	--	---------------------------------	---------	--	---------	---

2010

Primärrohstoffe	Mio. t RME	1.021,3	1.669,3	2.690,6	1.316,1	1.374,5
Biomasse	Mio. t RME	249,2	173,5	422,7	157,2	265,5
Metallerze	Mio. t RME	0,4	663,7	664,1	502,0	162,1
Nicht- metallische Mineralien	Mio. t RME	575,6	262,3	837,9	276,8	561,1
Fossile Energieträger	Mio. t RME	196,1	569,8	765,8	380,1	385,7

2030

Primärrohstoffe	Mio. t RME	721,9	981,6	1.703,5	848,2	855,2
Biomasse	Mio. t RME	210,1	139,8	349,9	143,5	206,4
Metallerze	Mio. t RME	0,3	579,9	580,2	442,5	137,7
Nicht- metallische Mineralien	Mio. t RME	482,5	138,4	620,9	199,8	421,1

		Inländische Entnahme (DE)	Importe	Güter der letzten Verwendung insgesamt (RMI)	Exporte	Güter der letzten inländischen Verwendung (RMC)
Fossile Energieträger	Mio. t RME	28,9	123,5	152,4	62,4	90,0

2040

Primärrohstoffe	Mio. t RME	595,5	769,5	1.365,0	700,1	664,9
Biomasse	Mio. t RME	182,9	123,5	306,4	130,6	175,8
Metallerze	Mio. t RME	0,3	438,5	438,8	339,1	99,6
Nicht- metallische Mineralien	Mio. t RME	412,1	126,1	538,2	189,7	348,5
Fossile Energieträger	Mio. t RME	0,2	81,5	81,7	40,7	41,0

2050

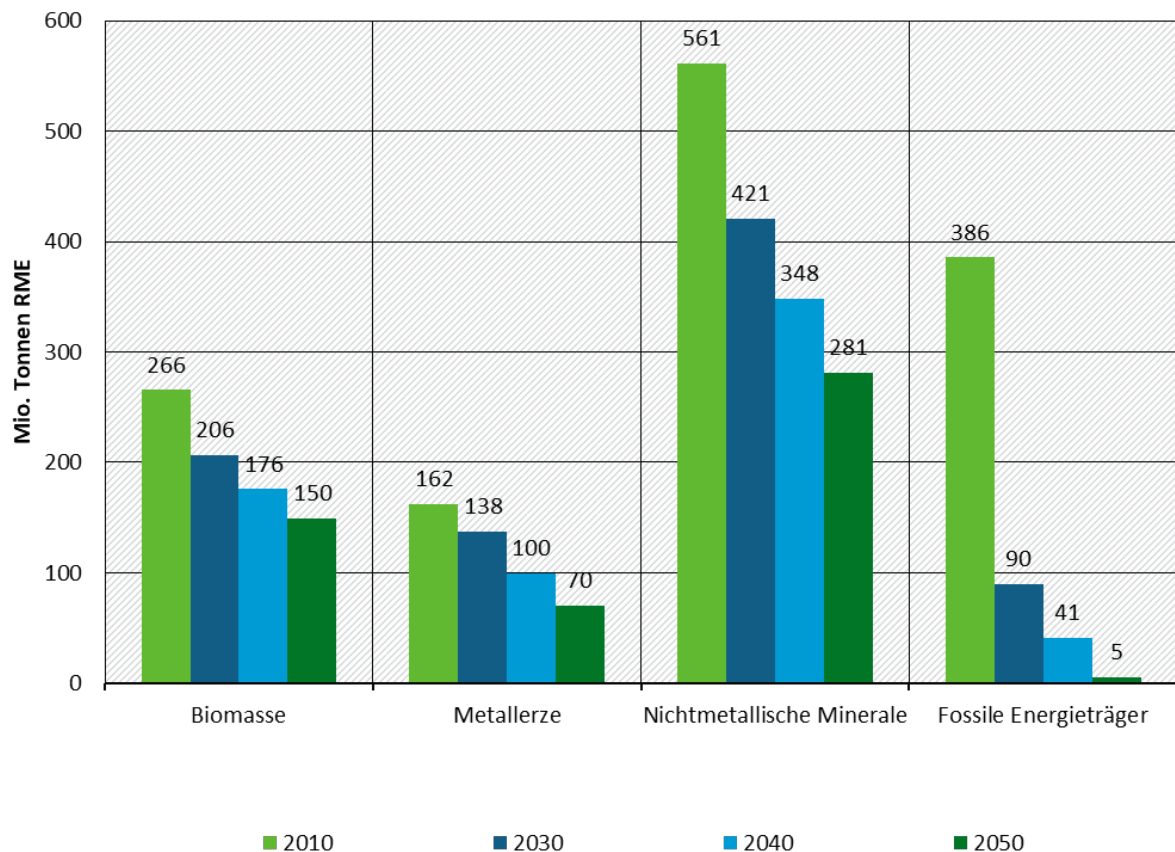
Primärrohstoffe	Mio. t RME	516,8	614,5	1.131,3	625,4	505,9
Biomasse	Mio. t RME	169,2	109,5	278,7	129,2	149,5
Metallerze	Mio. t RME	0,2	370,1	370,3	300,4	70,0
Nicht- metallische Mineralien	Mio. t RME	347,4	116,3	463,7	182,8	280,9
Fossile Energieträger	Mio. t RME	0	18,5	18,5	13,0	5,5

Quelle: eigene Berechnungen ifeu/IEE/SSG - URMOD

Der stärkste Rückgang ist bei den fossilen Energieträgern zu finden, die im Zuge der zuvor beschriebenen Transformation im Energiesystem um 98,6 % zurückgehen (Tabelle 51 und Abbildung 28). Dabei ist der Rückgang zwischen 2010 und 2030 besonders hoch (76,7 %). In Inland werden annahmegemäß im Jahr 2050 keine fossilen Energieträger mehr verwendet. Der für 2050 nachgewiesene Verbrauch an fossilen Energieträgern beim RMC ist darauf zurückzuführen, dass der RMC importierte Güter enthält, für deren Produktion in Herkunftsländern außerhalb der EU noch fossile Energieträger zum Einsatz kommen.

Der zweitstärkste Rückgang (56,8 %) ist bei den nicht-metallischen mineralischen Rohstoffen zu verzeichnen. Der Rückgang des RMC verläuft bei den mineralischen Rohstoffen relativ stetig und ist vor allem geprägt von der insgesamt rückläufigen Bautätigkeit im Hoch- und Tiefbau. Der RMC für Metallerze vermindert sich zwischen 2010 und 2050 um 49,9 %. Der RMC für Biomasse geht zwischen 2010 und 2050 um insgesamt 43,7 % zurück, relevante Faktoren sind die Umstellung der Diäten und der rückläufige Holzverbrauch.

Abbildung 28: Primärrohstoffkonsum nach Rohstoffarten, 2010 bis 2050

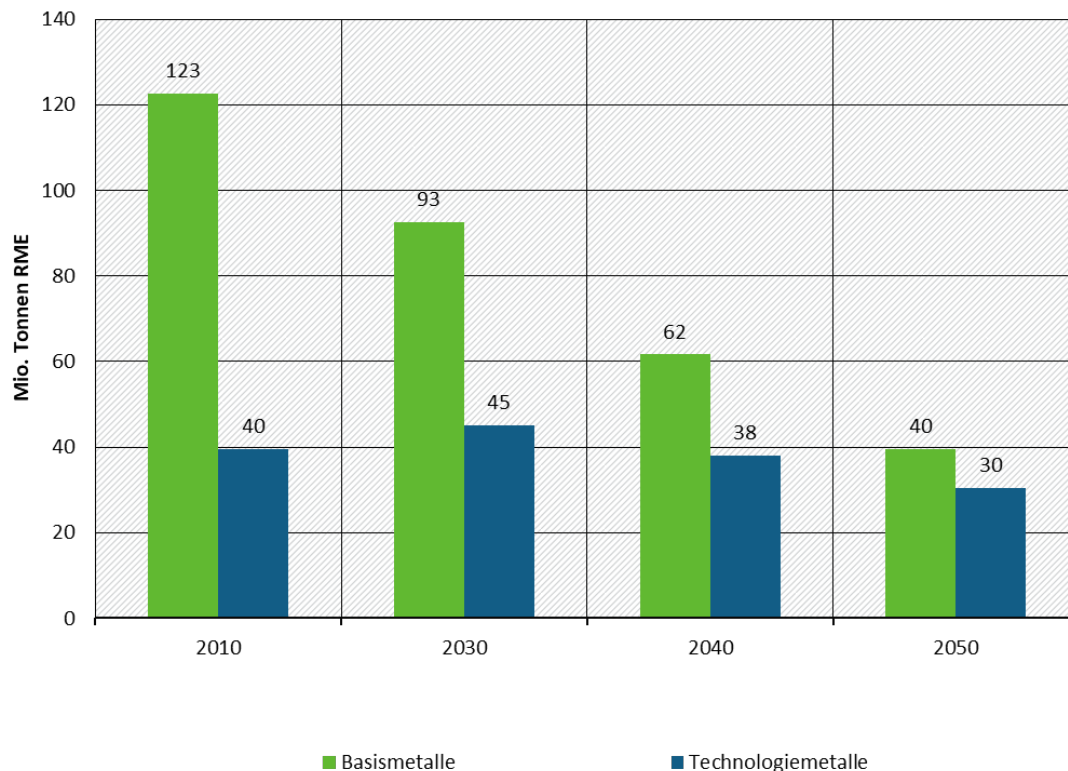


Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG - URMOD

Der im Zeitverlauf kontinuierliche Rückgang des RMC der Metallerze verdeckt, dass innerhalb der Gruppe der Metalle deutliche Verschiebungen stattfinden. Die Basismetalle Eisen, Kupfer und Aluminium stellen in 2010 im RMC in der Kategorie der Metalle den weitaus größten Anteil von 75,6 %, während ihr Anteil in 2050 nur noch bei 56,6 % liegt (Abbildung 29). Dabei ist die nachgefragte Menge nach Basismetallen zurückläufig. Gleichzeitig steigt auch die Nachfrage nach Technologie- und Edelmetallen⁴ insbesondere bis 2030 an und geht bis 2050 zurück.

⁴ In URMOD werden neben Eisen, Kupfer und Aluminium (jeweils primär und sekundär) folgende Metalle unterschieden: Nickel, Zinn, Zink, Blei, Wolfram, Gold, Silber, Platinmetalle, Uran und Thorium, Tantal, Magnesium, Titan, Mangan, Chrom. Alle weiteren Metalle sind in der Kategorie Sonstige zusammengefasst. In obiger Abbildung sind alle Metalle außer Eisen, Kupfer und Aluminium unter Technologie- und Edelmetallen zusammengefasst.

Abbildung 29: Letzte inländische Verwendung der Basismetalle gegenüber Technologie- und Edelmetallen, 2010 bis 2050



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG - URMOD

5.3.1.2 Die Veränderung der Rohstoffproduktivität

In diesem Bericht werden zwei verschiedene Bezugswerte betrachtet, welche die wirtschaftliche Leistung zum kumulierten Rohstoffaufwand in Beziehung setzen:

- ▶ **Rohstoffproduktivität:** im internationalen Kontext Bruttoinlandsprodukt je Einheit DMC bzw. RMC, in Deutschland Bruttoinlandsprodukt je Einheit DMI_{abiotisch}. Dieser Indikator (im Folgenden: BIP je RMC) setzt die monetäre Größe Bruttoinlandsprodukt in Beziehung zum kumulierten Rohstoffaufwand zur Herstellung der Güter der letzten inländischen Verwendung in Tonnen (Letzte Verwendung-Exporte=Konsum + Investitionen).
- ▶ **Gesamtrohstoffproduktivität:** Letzte Verwendung (LV=BIP + Importe) je Einheit RMI. Dieser Indikator setzt den Wert des Bruttoinlandsprodukts zuzüglich Importe in Beziehung zu der korrespondierenden Größe kumulierter Rohstoffaufwand zur Herstellung aller Güter der letzten Verwendung in Tonnen.

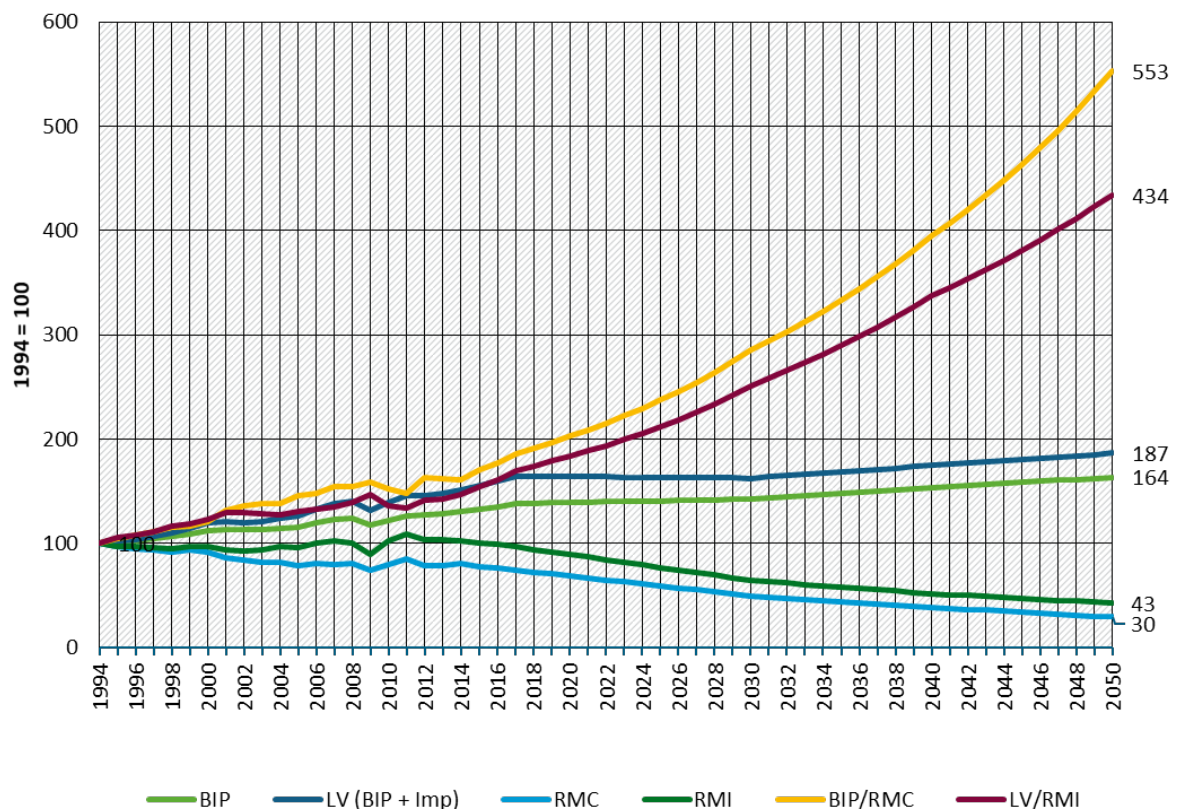
Der international eher übliche Indikator ist die Rohstoffproduktivität (BIP/DMC bzw. BIP/RMC). Die Gesamtrohstoffproduktivität ist in Deutschland ein Zielindikator.

Abbildung 30 vergleicht die Entwicklung ausgewählter Rohstoffindikatoren zwischen 1994 und 2015, sowie die Entwicklung bis 2050, wobei zwischen den Stützjahren linear interpoliert wurde. Der Anstieg des BIP von durchschnittlich 0,7 % p.a. im Zeitraum 2010 bis 2050 entspricht der für das Projekt getroffenen Annahme. Während das BIP im Zeitablauf steigt, vermindert sich der RMC kontinuierlich. Der RMI bewegt sich zwischen 1994 und 2016 in etwa

auf gleichem Niveau. Diese Entwicklung spiegelt wider, dass die Importe und Exporte in diesem Zeitraum deutlich stärker gestiegen sind als das BIP. Der starke Importanstieg schlägt sich im RMI nieder, während die Effekte steigender Importe und Exporte sich beim Indikator RMC weitgehend ausgleichen. Für den Zeitraum nach 2016 wurde dagegen ein geringerer Anstieg der Außenhandelsverflechtung unterstellt. Daher sind für diesen Zeitraum die Entwicklungen von RMI und RMC recht ähnlich. Im Vergleich zu 1994 sinkt der RMI auf 43 und der RMC auf 30 Indexpunkte.

Die Gesamtrohstoffproduktivität (LV/RMI) liegt in 2050 um 334 Indexpunkte höher als im Jahr 1994. Die Rohstoffproduktivität, gemessen als Verhältnis zwischen BIP und RMC, steigt um 453 Indexpunkte im Vergleich zu 1994.

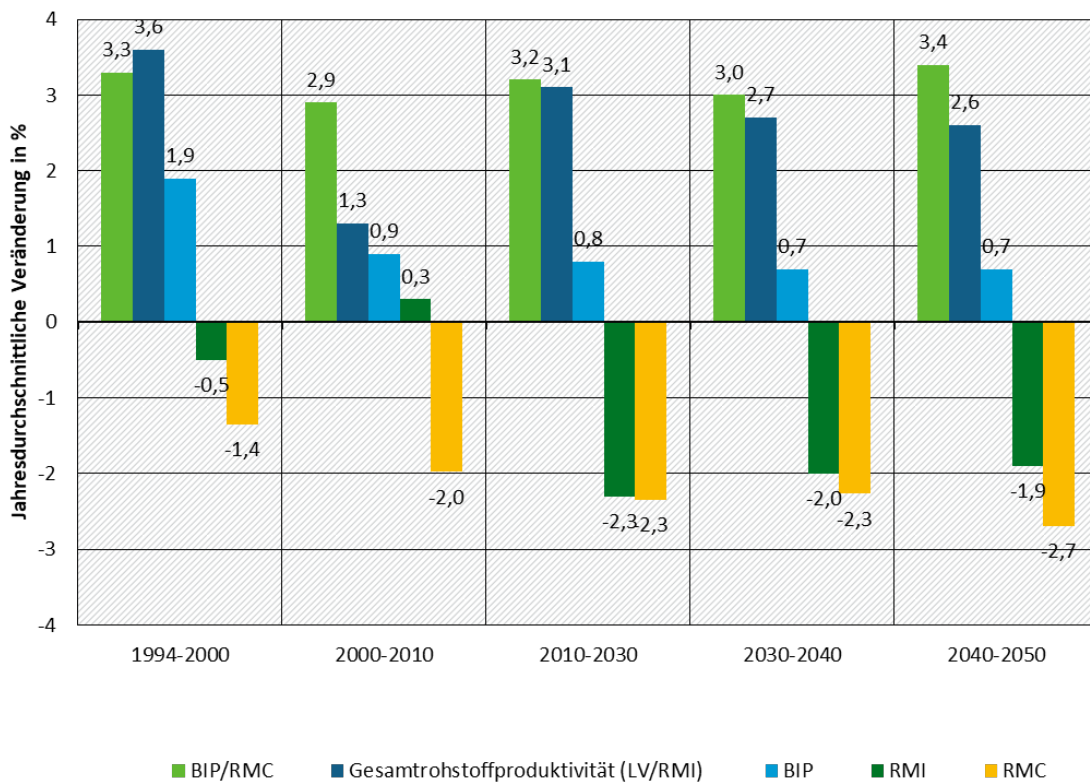
Abbildung 30: Entwicklung von ausgewählten Rohstoffindikatoren und BIP, 1994 bis 2050



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG – URMOD für 2010, 2030, 2040 und 2050, verkettet mit Eckwerten 2000 und 2015 des UGR-RME Modells und der Zeitreihe UGR 1994-2015 der UGR Materialflussrechnung (EW-MFA, Destatis (2018a)). Ab 2016 lineare Interpolation zwischen den Stützjahren und dem Zieljahr.

Die jahresdurchschnittlichen Änderungen sind in Abbildung 31 dargestellt. Auffallend ist, dass der RMI im Zeitraum 1994-2000 um 0,5 % p.a. fällt, im Zeitraum 2000-2010 sogar steigt (+0,3 % p.a.), und sich nach 2010 mit zwischen -2,3 bis -1,9 % p.a. deutlich vermindert. Ursächlich für die Differenzen ist, wie bereits erwähnt, vor allem die unterschiedliche Entwicklung der Außenhandelsverflechtung. Insgesamt steigt die Gesamtrohstoffproduktivität, zunächst um 3,1 bzw. 2,7 % pro Jahr und ab 2040 durchschnittlich um 2,6 % pro Jahr. Die Entwicklung der Gesamtrohstoffproduktivität ist somit über der Zielvorgabe beispielsweise von ProgRess II oder ProgRess III (BMU 2020; BMUB 2016b) und der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie (Bundesregierung 2018).

Abbildung 31: Rohstoffproduktivität und Komponenten der Rohstoffproduktivität

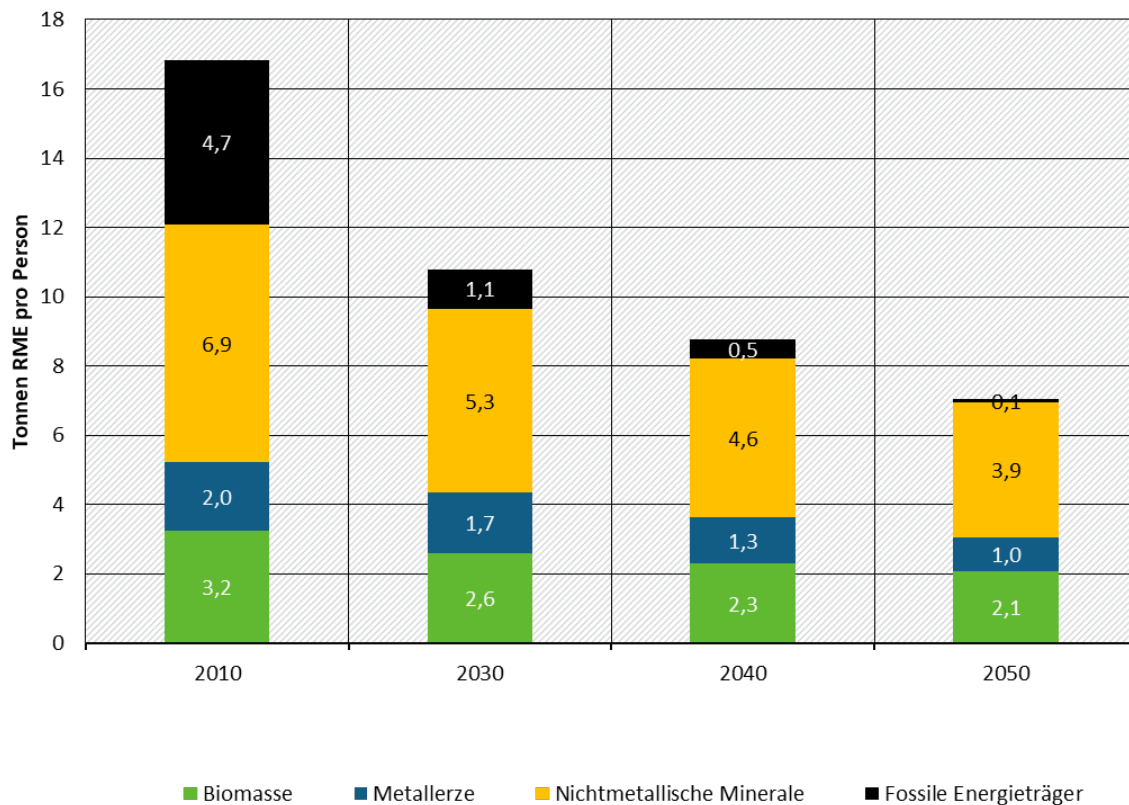


Quellen: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG - URMOD für 2010, 2030, 2040 und 2050 verkettet mit Eckwerten 2000 und 2015 des UGR-RME Modells und der Zeitreihe UGR 1994-2015 der UGR Materialflussrechnung (EW-MFA, Destatis (2018a)). Zwischen den Stützjahren lineare Interpolation.

5.3.1.3 Der Pro-Kopf-Rohstoffkonsum in 2050

Der Pro-Kopf-Konsum von Primärrohstoffen beläuft sich im Jahre 2050 auf 7,04 Tonnen, was mehr als einer Halbierung im Vergleich zu 2010 entspricht (-58,1 %). Zum Vergleich: der global durchschnittliche Rohstoffkonsum lag bei 10 Tonnen in 2010 (UNEP 2016) bzw. 12 Tonnen in 2015.

Abbildung 32: Primärrohstoffkonsum (RMC) pro Person in 2010, 2030, 2040 und 2050



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG - URMOD

Der Pro-Kopf-Konsum von primärer Biomasse verringert sich zwischen 2010 und 2050 von 3,2 auf 2,1 Tonnen. Dies ist eine Größenordnung, die auch in Ländern mit einem geringen Anteil tierischer Produkte in der Nahrung gemessen wird. Der Wert für Metalle (1,0 Tonnen) liegt trotz aller Recyclinganstrengungen bei den Massenmetallen über dem gegenwärtigen globalen Durchschnitt von 1,1 Tonnen pro Person (UNEP 2016). Der Konsum von nicht-metallischen mineralischen Rohstoffen (3,9 Tonnen) ist noch immer hoch und liegt leicht unterhalb in der Höhe des gegenwärtigen globalen Durchschnittswertes von 4,4 Tonnen pro Person. Die Höhe zeigt vor allem, welche Materialinputs für die Aufrechterhaltung der mengenmäßig überwiegend auf nicht-metallischen Mineralien beruhenden Technosphäre benötigt werden.

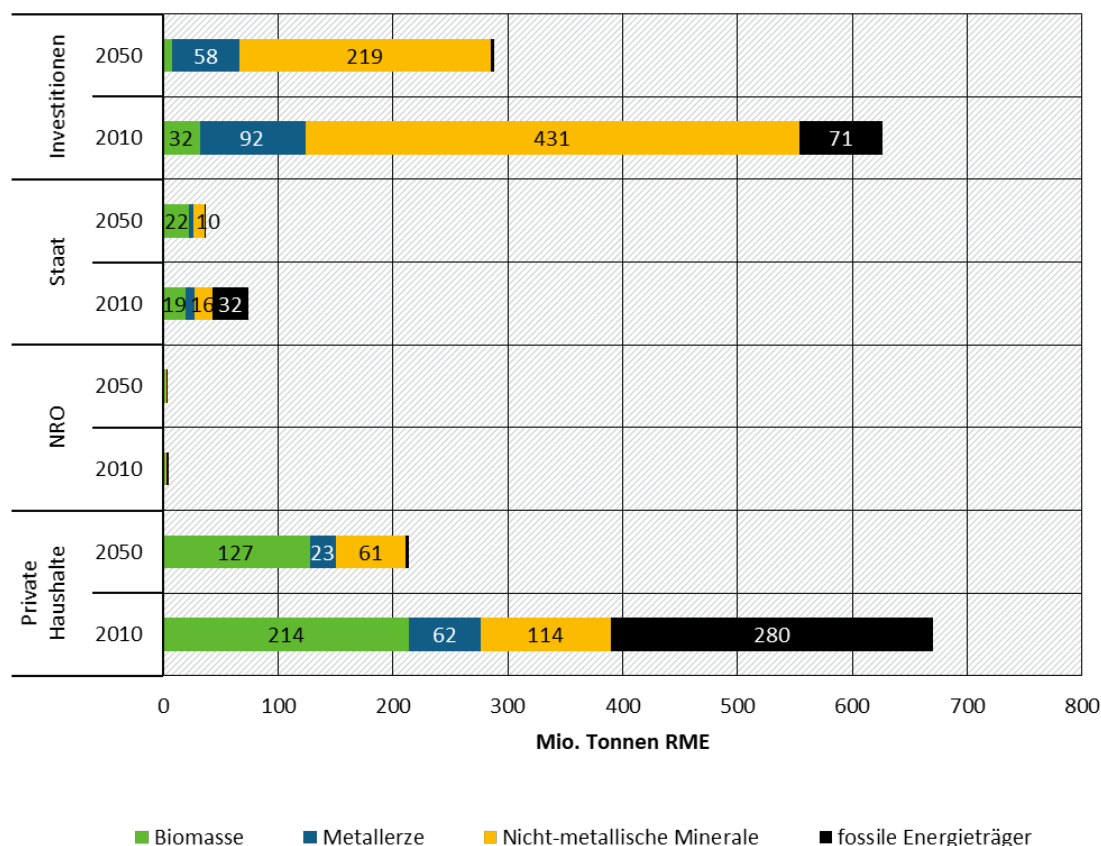
5.3.1.4 Der Rohstoffkonsum nach Kategorien der letzten Verwendung und Bedürfnisfeldern in 2050

In 2050 werden rund 263 Millionen Tonnen Rohstoffe (in Rohmaterialäquivalenten) in Bauwerken, Infrastrukturen und Anlagen investiert, das heißt längerfristig gebunden (Abbildung 33). Die Investitionen werden von nicht-metallischen Mineralen dominiert, die 79,8 % der Rohstoffe der Investitionen ausmachen. Weitere 17 % der Rohstoffaufwendungen sind Metallerze, die Anteile der Biomasse und der fossilen Rohstoffe sind hingegen gering (2,3 % bzw. 1 %). Im Vergleich zu 2010 gehen die Rohstoffaufwendungen in den Investitionen um 57,9 % zurück.

Die privaten Haushalte konsumieren 206 Millionen Tonnen Rohstoffe. Dies entspricht einem Rückgang um 69,2 % gegenüber 2010. Den größten Anteil stellt die Biomasse mit 59,3 %, gefolgt von nicht-metallischen Mineralen (29 %) und Metallerzen (10,5 %).

Der Konsum des Staates und der Nichtstaatlichen Organisationen ist vergleichsweise gering mit 33,7 bzw. 2,5 Millionen Tonnen. Der Rückgang gegenüber 2010 liegt bei 54,6 bzw. 49,3 %.

Abbildung 33: Der Primärrohstoffkonsum (RMC) nach Verwendungskategorien in 2050



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG – URMOD; Werte unter 10 werden nicht angezeigt.

Der Konsum der privaten Haushalte wird in Abbildung 34 entlang der Bedürfnisfelder weiter aufgeschlüsselt. Der größte Anteil der Rohstoffe wird in 2050 für die Ernährung gebraucht (46,5 %). Zum Bedürfnisfeld Freizeit und Tourismus, das 19,5 % des Rohstoffkonsums der privaten Haushalte ausmacht, zählt das Gastgewerbe, so dass auch in diesem Bedürfnisfeld ein Anteil für Ernährung zu finden ist. Die Ernährung wird von Biomasse dominiert (85,6 %), abiotische Rohstoffe werden unter anderem für Düngemittel, Haltbarmachung, Zubereitung oder Verpackung der Lebensmittel benötigt. Der Rückgang des Rohstoffkonsums im Bereich Ernährung gegenüber 2010 liegt bei 52,2 %.

Im Bereich Haushalt und Wohnen werden Rohstoffe nicht nur für Möbel, sondern auch für Reparaturen (z.B. Badsanierung u. ä.) benötigt, wodurch sich der hohe Anteil nicht-metallischer Minerale in 2050 erklärt. Insgesamt fragen die privaten Haushalte in diesem Bedürfnisfeld 18,9 % ihres Rohstoffkonsums nach. Der Wohnungsbau ist jedoch hier nicht berücksichtigt, da er eine Investition darstellt und dort verortet wird. Der Rohstoffkonsums in diesem Bedürfnisfeld geht um 80 % zurück, was vor allem eine Folge der Transformation der Energieinputs im Bereich Wohnen ist.

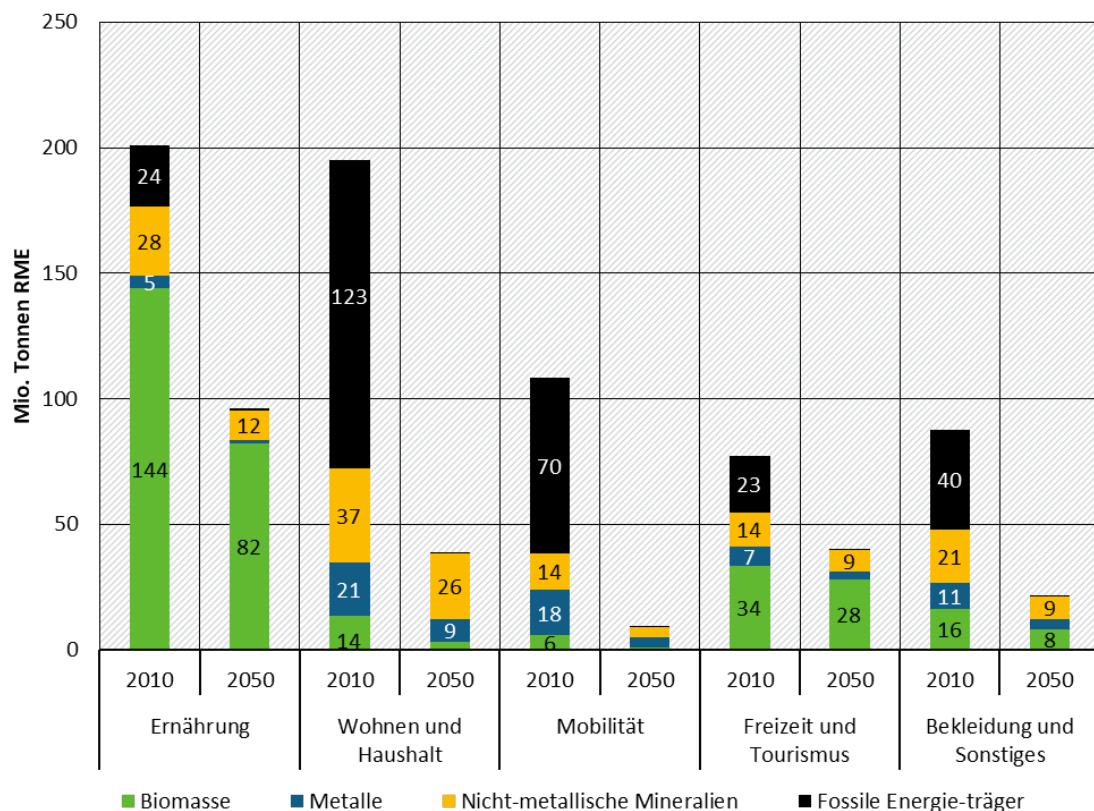
Im Bedürfnisfeld Mobilität konsumieren private Haushalte nur noch 4,6 % ihres gesamten Rohstoffkonsums, beispielsweise für private Pkw oder den öffentlichen Verkehr (die Verkehrsinfrastruktur ist Teil der Investitionen). Auch in diesem Bedürfnisfeld zeigt sich die

Änderung der Energieinputs besonders, wobei auch der Rückgang von Privat-Pkw eine Rolle spielt. Der Rückgang des Rohstoffkonsums gegenüber 2010 liegt bei 91,3 %.

Die Aufwendungen für Kleidung und sonstige Produkte und Dienstleistungen liegen bei 10,6 % des privaten Konsums. Auf die Kleidung entfallen insgesamt nur 0,82 Mio. Tonnen, das sind 0,5 Mio. Tonnen bzw. 38,2 % weniger als in GreenEe2. Auffallend ist der starke Rückgang bei der Bekleidung gegenüber 2010, der unter anderem durch die Annahme des Aufholens im Rest der Welt auf die deutsche Technologie zustande kommt und für alle Green-Szenarien gilt: die Textilien in Deutschland werden zu einem hohen Anteil aus synthetischen Stoffen hergestellt, die in 2050 im Wesentlichen auf der Basis von CO₂ aus der Luft und Wasser hergestellt werden und entsprechend den Konventionen der Materialflussrechnungen nicht berücksichtigt werden. Diese Technologie wird nun auch anteilmäßig auf die Änderungen im Ausland übertragen. Im Ergebnis geht der Anteil z.B. von Baumwollbekleidung stark zurück und der Import von synthetischer Bekleidung (auf der Basis von erneuerbaren Rohstoffen) steigt.

Die Rohstoffaufwendungen gehen unter den beschriebenen Annahmen zur Änderung des Konsumverhaltens um insgesamt 75,1 % gegenüber 2010 zurück.

Abbildung 34: Der Primärrohstoffkonsum (RMC) der privaten Haushalte nach Bedürfnisfelder



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG – URMOD; Werte unter 5 werden nicht angezeigt.

Pro Person und Jahr werden damit in den Bedürfnisfeldern

- Ernährung: 1,33 Tonnen
- Wohnen und Haushalt: 0,54 Tonnen
- Mobilität: 0,13 Tonnen

- Freizeit und Tourismus: 0,56 Tonnen und
- Bekleidung und Sonstiges: 0,30 Tonnen (davon 0,01 Tonnen für Bekleidung)

Rohmaterialien konsumiert.

5.3.1.5 Der kumulierte Rohstoffkonsum

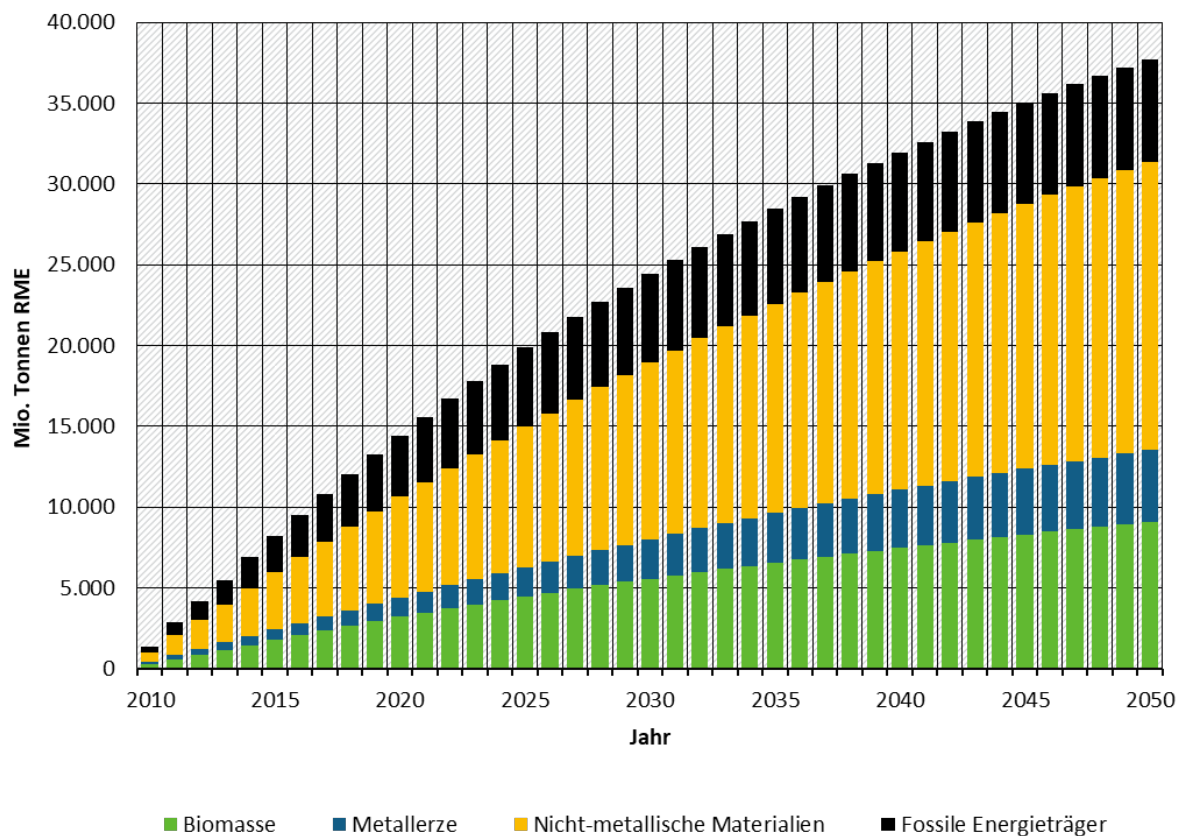
Im Zeitraum zwischen 2010 und 2050 kumuliert sich der Konsum von Primärrohstoffen (LIV) auf insgesamt 37,739 Mrd. Tonnen (Abbildung 35).

Den größten Anteil daran haben die nicht-metallischen Mineralien (47,4 %), gefolgt von biotischen Materialien (24,1 %) und fossilen Rohstoffen (16,8 %).

Knapp 24,5 Mrd. Tonnen werden im Zeitraum zwischen 2010 und 2030 konsumiert bzw. investiert. Zwischen 2030 und 2050 summieren sich die Primärrohstoffe auf 13,3 Mrd. Tonnen.

Zur Einordnung der Menge soll der Vergleich mit dem jährlichen Konsum in China und der Welt dienen: In 2017 (aktuell möglichstes Jahr) lag der globale Rohstoffkonsum bei insgesamt 92,065 Mrd. Tonnen und der von China bei insgesamt 35,305 Mrd. Tonnen (UNEP 2016).

Abbildung 35: Kumulierter Primärrohstoffkonsum, 2010 bis 2050



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von eigenen Berechnungen auf der Basis von ifeu/IEE/SSG - URMOD

5.3.1.6 Substitution von Primärrohstoffen

In GreenLife liegt der Verbrauch von Primärrohstoffen (RMC) im Jahre 2050 um insgesamt 869 Mio. Tonnen niedriger als im Jahr 2010.

Zu diesen Einsparungen leistet die Substitution von Primärrohstoffen einen erheblichen Beitrag. Fossile Energieträger werden durch Nutzung immaterieller erneuerbarer Energieträger, wie Windkraft, Wasserkraft, Solarenergie und Geothermie, sowie durch die energetische Verwertung von Abfällen eingespart. Andere Primärrohstoffe werden in erheblichem Umfang durch die stoffliche Verwertung von Abfällen (Recycling) substituiert.

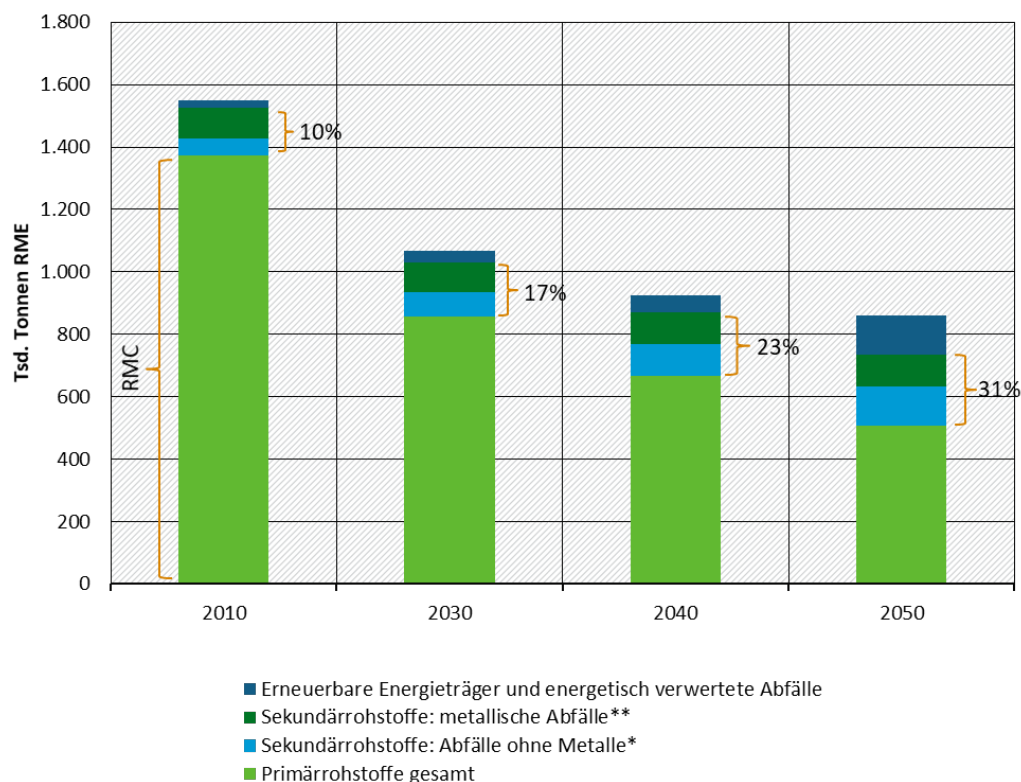
Aufgrund der Substitution werden im Jahr 2050 im Vergleich zu 2010 Primärrohstoffe in Höhe von 353 Mio. Tonnen eingespart. Diese Abschätzung ist eine Mindestabschätzung, da bei der Berechnung nicht alle stofflich verwerteten Abfälle vollständig einbezogen werden konnten. Berücksichtigt wurden die in Kapitel 4 genannten Annahmen zu Eisen, Kupfer, Aluminium, Papier, Altholz und Kunststoffe sowie Sekundärbaustoffe.

Die Substitution der fossilen Energieträger beläuft sich auf insgesamt 127 Mio. Tonnen RME Öläquivalente das sind 103 Mio. Tonnen mehr als in 2010. Aufgrund von Recycling wurden 227 Mio. Tonnen RME substituiert, insgesamt 75 Mio. Tonnen mehr als 2010 (siehe auch Abbildung 36).

Abbildung 36: Gesamtrohstoffaufwand einschließlich Primär- und Sekundärrohstoffen und substituierte fossile Energieträger, 2010 – 2050

zeigt den Gesamtrohstoffaufwand einschließlich der Primär- und Sekundärrohstoffe sowie der substituierten fossilen Energieträger. Der Anteil der Sekundärrohstoffe (genutzte Abfälle) am Gesamtrohstoffaufwand als ein Maß für die Zirkularität der gesamten Volkswirtschaft liegt somit bei 31 % in 2050. Es soll noch einmal betont werden, dass nicht alle Sekundärrohstoffe, insbesondere nicht alle Metalle, in dieser Rechnung einbezogen werden konnten und somit der Anteil der Sekundärrohstoffe insgesamt unterschätzt ist.

Abbildung 36: Gesamtrohstoffaufwand einschließlich Primär- und Sekundärrohstoffen und substituierte fossile Energieträger, 2010 – 2050



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG – URMOD; *Holz, Papier, Kunststoffe, mineralische Abfälle; ** Eisen-, Kupfer- und Aluminiumschrotte

5.3.2 Rohstoffkonsum nach ausgewählten Rohstoffen

5.3.2.1 Primär- und Sekundärbedarf von Eisen, Kupfer und Aluminium

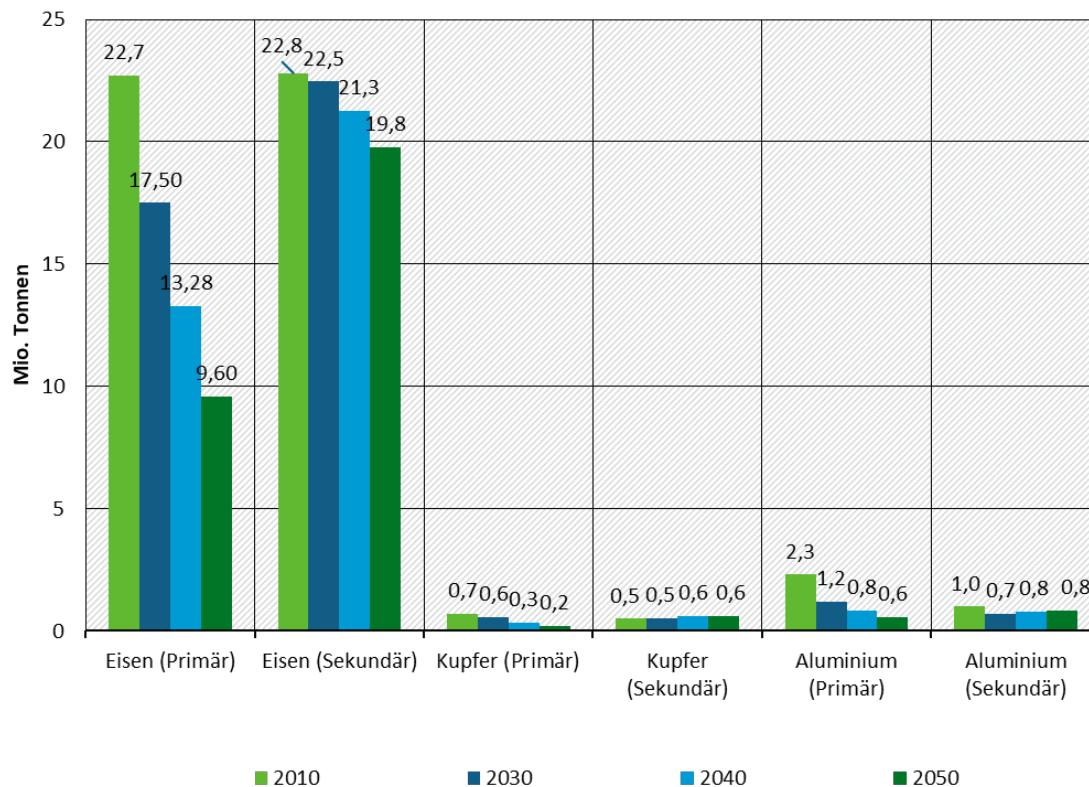
Der Bedarf (in der Abgrenzung des RMC) der primären Basismetalle ist in GreenLife bis 2050 rückläufig (siehe Abbildung 29). Im Gegensatz dazu steigt der anteilige Bedarf an Sekundärmetallen bezogen auf den Konsum des Metalls. In den folgenden Angaben sind die Im- und Exporte vollständig verrechnet, einschließlich der Metallanteile, die sich in Halbwaren und Endprodukten befindet. Die Metalle werden in Metallgehalten ausgedrückt (Abbildung 37).

Sowohl der Primär- als auch der Sekundäreisenkonsum ist rückläufig (-35,4 % in 2050 gegenüber 2010). Aufgrund der erhöhten Recyclingrate in 2050 gegenüber 2010 verändern sich die Anteile von Primäreisen und Schrotten. Konsum und Investitionen erfordern somit in 2050 insgesamt 29,4 Mio. Tonnen Eisen, davon 9,6 Mio. Tonnen Primäreisen und 19,8 Mio. Tonnen Eisenschrott.

Auch die für Konsum und Investitionen benötigten Mengen Kupfer sind rückläufig (-31,5 % in 2050 gegenüber 2010). Aufgrund der Annahmen zu steigenden Recyclingraten steigt im Ergebnis die nachgefragte Menge Kupferschrott leicht auf 0,6 Mio. Tonnen, der Rückgang der gesamten Nachfrage wirkt sich insbesondere auf die nachgefragte Primärkupfermenge aus, die in 2050 nur noch 0,2 Mio. Tonnen Kupfer beträgt.

Die Nachfrage nach Aluminium sinkt ebenso (-58,1 % in 2050 gegenüber 2010). Der Rückgang zwischen 2010 und 2030 hat verschiedene Ursachen: einmal sinkt die Nachfrage ähnlich wie bei den Basismetallen Eisen und Kupfer. Hinzu kommen jedoch auch größere Unterschiede bei der Produktion und dem Einsatz von Aluminium bei den importierten Vorprodukten aus Europa, die sich als Folge der Annahme, dass sich in europäischen Ländern die Produktionsweisen an die deutsche angleichen, im Falle von Aluminium im Ergebnis stark niederschlagen. Durch die angenommenen Änderungen der Produktionsweisen in Europa und auch im Rest der Welt sinkt die Primäraluminiummenge in den Importen. Bis 2050 sinkt die nachgefragte Menge nach Primäraluminium weiter auf 0,6 Mio. Tonnen, während sich aufgrund der erhöhten Recyclinganstrengungen die Menge an Aluminiumschrotten auf 0,8 Mio. Tonnen gegenüber 2030 wieder leicht erhöht.

Abbildung 37: Primär- und Sekundärbasismetallmengen in der letzten inländischen Verwendung, 2010 bis 2050



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG - URMOD

5.3.2.2 Primäreinsatz ausgewählter Technologie- und Edelmetalle

Neben den Basismetallen wurde die Nachfrage (letzte inländische Verwendung, LIV) nach ausgewählten Technologie- und Edelmetallen untersucht.

So wurde die gesamtwirtschaftliche Nachfrage nach Zink, Blei, Platingruppenmetallen, Magnesium, Chrom und Nickel berechnet. Die in Tabelle 52 ausgewiesenen Mengen zeigen die Primärmetallgehalte, die im Konsum und in den Investitionen in Deutschland verbleiben. Der internationale Handel ist vollständig verrechnet.

Im Rahmen des Projekts konnten keine Analysen zum Einfluss einzelner Faktoren durchgeführt werden, daher kann keine exakte Aussage zu Gründen der Nachfrageänderung getroffen werden, sondern nur allgemeine Einflussfaktoren genannt werden.

In der überwiegenden Mehrzahl der ausgewählten Metalle ist die Nachfrage aus Deutschland rückläufig (Tabelle 52). Die Veränderung der Nachfrage der Konsumenten wirkt sich im Allgemeinen nur indirekt, das heißt vermittelt über den Energie-, Bau- oder Kfz-Sektor auf die Nachfrage nach Technologiemetallen aus. Verschiedene Faktoren wirken dabei zusammen, darunter die sinkende Nachfrage nach Gebäuden und nicht-energiebedingten Infrastrukturen aufgrund der rückläufigen Bevölkerung und der rückläufigen Siedlungsneuentwicklung, die ansteigende Effizienz in der Produktion sowie die im Kapitel 4 aufgeführten technologischen und konsumbezogenen Veränderungen. So sinkt die Nachfrage nach Zink, Blei, Platingruppenmetallen, Silber, Magnesium, Chrom und Nickel kontinuierlich bis 2050.

Tabelle 52: Nachgefragte Menge ausgewählter Technologie- und Edelmetalle (LIV), 2030, 2040 und 2050

		2030	2040	2050
Zink	Tsd. t Metallgehalt	352	241	124
Blei	Tsd. t Metallgehalt	143	91	35
Zinn	Tsd. t Metallgehalt	9	8	6
PGM	t Metallgehalt	25	22	19
Silber	t Metallgehalt	307	279	216
Magnesium	Tsd. t Metallgehalt	13	12	11
Chrom	Tsd. t Metallgehalt	72	61	56
Nickel	Tsd. t Metallgehalt	41	31	23

Quelle: eigene Berechnungen auf der Basis von ifeu/IEE/SSG – URMOD

Im Rahmen von Sonderrechnungen wurden ferner die nachgefragten Mengen von Siliziummetallen (in PV-Anlagen) sowie von Lithium, Graphit und Kobalt (in Batterien von Pkw, Lkw und leichten Nutzfahrzeugen) berechnet. Die Rohstoffmengen werden in Tabelle 53 ausgewiesen. Diese Rechnungen beinhalten keine Annahmen zu Recyclinganteilen, die ausgewiesenen Mengen können folglich Primär- oder Sekundärrohstoffe sein.

Die nachgefragten Mengen nach Siliziummetallen und Lithium sind in 2040 im Zuge des Aufbaus der Photovoltaik bzw. der Einführung von Elektromobilität am höchsten. Die Nachfrage nach Graphit und Kobalt sinkt in 2040, durch die Änderungen der Batterietechnologien werden die Rohstoffe in 2050 nicht mehr gebraucht.

Tabelle 53: Nachgefragte Mengen ausgewählter Rohstoffe in PV-Anlagen und Batterien, 2030, 2040 und 2050

		2030	2040	2050
Siliziummetall¹	t Metallgehalt	85.668	109.078	91.975
Lithium²	t Metallgehalt	2.507	14.484	10.510
Graphit²	t Metallgehalt	39.231	27.007	0
Kobalt²	t Metallgehalt	7.180	4.943	0

Quellen: ¹eigene Berechnungen, ²ifeu/IEE/SSG-TREMOD-Materials

5.3.2.3 Der Einsatz von Holz

Holz wird gegenwärtig sowohl stofflich als auch energetisch genutzt. In GreenLife sinkt der Bedarf an (Primär-) Holz zwischen 2010 und 2050 [2030/2040] um 63,2 % [49,7 %/58,8 %] auf rund 12,14 Mio. Tonnen RME. Auch in diesen Angaben sind die Im- und Exporte miteinander verrechnet.

Verschiedene Gründe sind für den Rückgang verantwortlich. So wird Primärbiomasse ab 2030 nicht mehr für energetische Zwecke genutzt, dies reduziert die Primärholzmenge signifikant. Weiterhin steigt die effiziente Verwendung von Papier und Pappe, auch dies senkt die

nachgefragte Menge nach Holz. Zusätzlich tragen auch die Konsumänderungen, insbesondere die geringere Nachfrage nach Möbeln und Papierwaren einschließlich Verpackungen, aber auch die geringere Nachfrage aus dem Bausektor bei. In 2050 liegt der Verbrauch von Holz beispielsweise um 9,0 % niedriger als in GreenEe2

5.3.2.4 Die Nutzung von Sand, Kies und Schotter

Sand und Kies und Schotter wird im Wesentlichen im Hoch- und Tiefbau eingesetzt, bei der Herstellung von Beton, im Unterbau von Fundamenten, Straßen, Wegen oder Gleistrassen oder auch als Füllmaterial. Sand, Kies und Schotter sind Massenrohstoffe, fast ein Drittel des gesamtdeutschen Rohstoffkonsums geht auf den Bedarf dieser Rohstoffgruppe zurück. Gleichzeitig ist die konkrete Mengenangabe mit Unsicherheiten behaftet, da die empirischen Daten nicht ausreichen erfasst werden.

Im GreenLife-Szenario sinkt der Bedarf bis 2050 auf 220 Mio. Tonnen, dies ist ein Rückgang um 50,5 % gegenüber 2010. Die Änderung verläuft relativ stetig mit -24,8 % bis 2030 und -38,3 % bis 2040. Wesentliche Gründe für den Rückgang sind die rückläufige Bautätigkeit im Hochbau und im Tiefbau, insbesondere auf kommunaler Ebene (Straßen und Versorgungsinfrastrukturen) in Folge der rückläufigen Siedlungsentwicklung. Im beispielhaften Vergleich zu GreenEe2 wird 3,6 % weniger Sand, Kies und Schotter in 2050 gebraucht.

5.3.2.5 Knappheit von Rohstoffen

Rohstoffe gelten als knapp, wenn die Nachfrage das Angebot übersteigt. Man kann zwischen einer temporären Knappheit und einer absoluten Knappheit unterscheiden. Temporär knapp kann ein Rohstoff sein, wenn zwar ausreichend Rohstoffe in der Erdkruste vorkommen, jedoch die abgebaute Menge unter der nachgefragten Menge liegt. Absolut knapp kann ein Rohstoff sein, wenn die nachgefragte Menge über der Menge liegt, die in der Erdkruste vorkommt. Hierbei können Reserven und Ressourcen weiter unterschieden werden: Reserven sind die Rohstoffmengen, die unter den bekannten technisch-ökonomischen Bedingungen abbaubar sind, Ressourcen sind die Mengen, die geologisch in der Erdkruste vorkommen (siehe bspw. Frondel et al. 2006; USGS 2020). Das heißt, Hinweise auf eine mögliche zukünftige Knappheit von Rohstoffen geben Vergleiche der nachgefragten Mengen mit (aktuellen) Produktionsmengen, Reserven und Ressourcen.

Es sei angemerkt, dass im Projekt RESCUE Szenarien gerechnet und keine Prognosen erstellt werden. Alle RESCUE-Szenarien gehen von einer sehr optimistischen Transformation im Rest der Welt aus. Dies bedeutet, dass implizit unterstellt wird, dass Menschen außerhalb Deutschlands (nahezu exakt oder um zehn Jahre verzögert) dieselben Technologien einsetzen und etwa dieselbe Nachfrage nach Rohstoffen wie die Menschen in Deutschland haben. Daher ist der Vergleich der Nachfrage pro-Kopf-Mengen mit den Produktionsmengen bzw. der Vergleich der kumulierten Nachfragemengen mit Reserven bzw. Ressourcen in diesem Fall sinnvoll, um Hinweise auf eine potenzielle, zukünftige Knappheit bzw. auf mögliche Versorgungsengpässe unter den Szenario-Annahmen zu erhalten. Eine Prognose – was RESCUE nicht ist – würde wahrscheinliche Entwicklungen z.B. bezüglich Technologieänderungen oder Reaktionen des Marktes einbeziehen.

Abbildung 38 zeigt den Vergleich der von Deutschland im Zuge der Transformation in GreenLife ermittelten nachgefragten Mengen als Anteil an der globalen Produktion in 2018. Der gegenwärtige Anteil der deutschen Bevölkerung an der globalen Bevölkerung kann als Referenz der Einordnung der Nachfragemenge dienen.

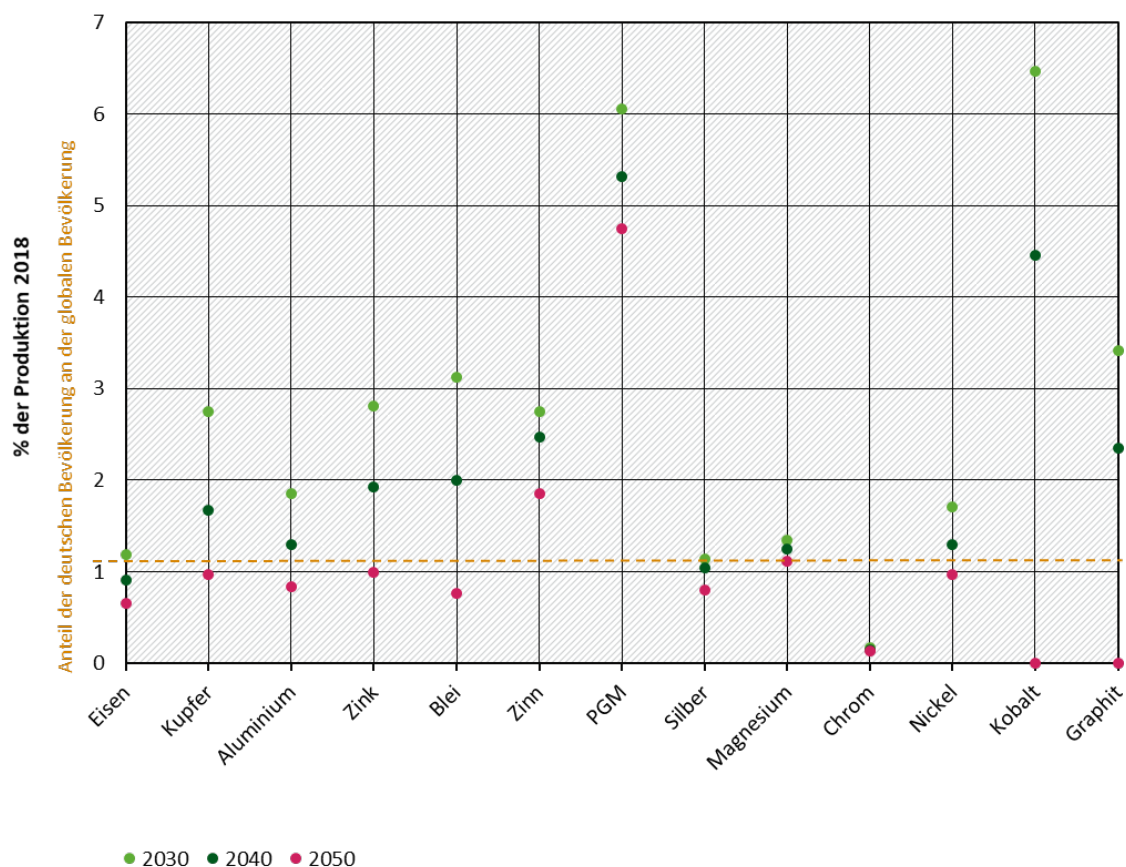
Die von Deutschland nachgefragten Mengen nach Eisen, Chrom und Silber liegen unter oder etwa im Rahmen der Referenz. Das heißt, die von Deutschland nachgefragte Menge ist,

verglichen mit der heutigen Produktion, unterproportional. Unter den Annahmen in GreenLife für Deutschland, Europa und für den Rest der Welt sind folglich keine Versorgungsengpässe zu erwarten.

Im Pfad liegt die Nachfrage nach Kupfer, Aluminium, Zink, Blei, Magnesium, Nickel, Kobalt und Graphit oberhalb der Referenz. Deutschland fragt im Vergleich zum Anteil an der globalen Bevölkerung überproportional viel nach. Dieses Übermaß ist bei Kobalt und Graphit ausgeprägter als bei den anderen Rohstoffen. Unter den Annahmen im GreenLife-Szenario zu den weltweiten Entwicklungen sind somit temporäre Versorgungsengpässe zu erwarten, sofern keine Produktionssteigerungen vorgenommen werden.

In allen Jahren fragt Deutschland einen überproportionalen Anteil nach PGM und Lithium und nach. Besonders stark ausgeprägt ist dieses bei Lithium, die nachgefragte Menge liegt in 2040 bzw. 2050 bei 51,7 % bzw. 37,5 % der Produktionsmenge von 2018. Die nachgefragten Mengen von Lithium sind (ebenso wie Siliziummetall, Kobalt und Graphit) ohne Sekundäranteile berechnet. Das Angebot von Altakkus übersteigt die im Energiesystem für Kurzzeitspeicher benötigten Akkus bei Weitem. Das heißt, ein funktionierendes Recyclingsystem würde die Nachfrage nach den Primärmaterialmengen direkt reduzieren.

Abbildung 38: Nachfrage nach ausgewählten Rohstoffen im Vergleich zur Produktion 2018



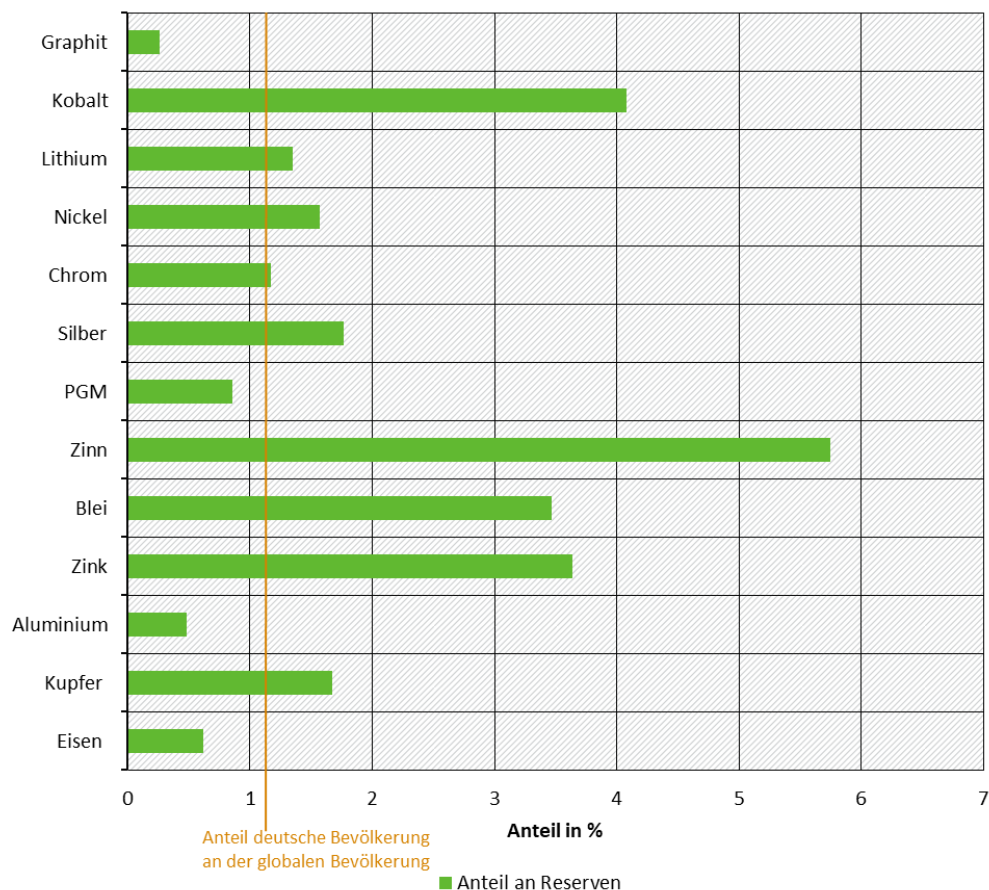
Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG – URMOD und (USGS 2020); zu beachten: Im Unterschied zur RESCUE-Studie (UBA 2019a) wurden die Daten von USGS noch einmal aktualisiert.

Da Bergbauunternehmen auf eine steigende Nachfrage reagieren und Produktionskapazitäten erhöhen, ist der Vergleich der kumulierten Nachfrage im Vergleich zu den Reserven interessant,

um weitere Hinweise auf eine mögliche Knappheit von Rohstoffen zu erhalten. Für manche Rohstoffe, darunter Siliziummetalle und Magnesium, verweist (USGS 2020) auf ausreichende Vorkommen und weist keine Reserven aus. Für diese Rohstoffe ist, bei Ausweitung der Produktionsmengen, folglich kein Versorgungsengpass zu erwarten.

Für Eisen, Aluminium PGM und Graphit liegt die kumulierte Nachfrage unter dem gegenwärtigen Anteil der deutschen an der globalen Bevölkerung (Abbildung 39). Die kumulierte Nachfrage nach Kupfer, Nickel, Silber, Zinn, Blei, Lithium, Kobalt und Zink übersteigt jedoch den Anteil der deutschen an der globalen Bevölkerung. Unter den Szenario-Annahmen in GreenLife und insbesondere unter der Berücksichtigung der angenommenen Entwicklungen im Ausland kann eine überproportionale Nachfrage als ein Hinweis auf mögliche Versorgungsengpässe interpretiert werden. Um mögliche Versorgungsengpässe zu mindern, kann die Nachfrage gesenkt werden, beispielsweise, indem andere Technologien oder Substitute genutzt werden, oder es kann das Angebot durch einen Einsatz von besseren Fördertechnologien erhöht werden.

Abbildung 39: Kumulierte Nachfrage ausgewählter Primärrohstoffe als Anteil der Reserven in 2018



Quelle: eigene Darstellung Modellierungsergebnisse von ifeu/IEE/SSG-URMOD und USGS (2020)

Die kumuliert nachgefragten Mengen können schließlich mit den Ressourcen, also den Mengen, die in der Erdkruste vorkommen, aber gegenwärtig nicht wirtschaftlich/technologisch abbaubar sind, mit den kumuliert nachgefragten Mengen in Deutschland verglichen werden. Es zeigt sich, dass die kumuliert nachgefragte Menge nur noch bei dem Rohstoffen Nickel über 1,1 % der (bekannten) Ressourcen liegt.

Im GreenLife-Szenario wurde angenommen, dass im Rest der Welt in 2050 ebenso hohe Sekundäranteile in der Metallproduktion nachgefragt und verarbeitet werden wie in Deutschland zehn Jahre zuvor. Da in vielen Ländern Infrastrukturen noch nicht bestehen, ist davon auszugehen, dass in diesen Ländern sogar eine höhere Nachfrage als in Deutschland nach den Basismetallen Eisen, Kupfer und Aluminium und vielen weiteren Metallen im Transformationspfad entsteht (z.B. OECD 2019; Pauliuk et al. 2013; Schipper et al. 2018). Die Nachfrage betrifft die Sekundärmetalle ebenso wie die oben bereits diskutierten Primärmetalle. Angesichts der in GreenLife berechneten zukünftigen Schrottmengen sind Versorgungsengpässe bei Metallschrotten absehbar, sofern nicht Sammelmengen und Aufbereitungskapazitäten signifikant erhöht werden.

Eine Umweltwirkungsabschätzung der Transformationspfade über die Treibhausgasemissionen hinaus überstieg die Möglichkeiten im Projekt RESCUE, wird jedoch in Folgeprojekten untersucht. Es sei an dieser Stelle darauf verwiesen, dass Abbau und Verarbeitung von Rohstoffen ebenso wie Nutzung, Recycling und / oder Deponierung mit teilweise erheblichen Umweltbelastungen einhergehen (UNEP-IRP 2010). So hat insbesondere das Projekt „ÖkoRess“ die Umweltgefährdungspotenziale beim Abbau und den ersten Verarbeitungsschritten für insgesamt 50 abiotische (mineralische, einschl. metallische) Rohstoffe systematisiert (Dehoust et al. 2017, 2020). Ein wichtiges Ergebnis ist, dass der Abbau aller untersuchten Rohstoffe mit großen oder sogar sehr großen Umweltgefährdungspotenzialen verbunden ist. Zwar variieren die Umweltgefährdungspotenziale je nach Lagerstätte, geologischer Zusammensetzung der Minen, Aufbereitung der Erze und geographischer Lage der Lagerstätte. Wenn allerdings ein großer Anteil der gegenwärtig bekannten Reserven oder sogar darüber hinaus weitere Ressourcen erschlossen werden müssen, wird dies mit hohen Umweltbelastungen verbunden sein.

5.3.3 Vergleich des Rohstoffkonsums mit GreenEe2

Die Transformation in GreenLife führt im Vergleich zur Transformation in GreenEe2 zu einem niedrigeren Rohstoffkonsum. In 2050 [2030/2040] liegt der RMC aufgrund der zusätzlich zu den GreenEe-Szenarien angenommenen Verhaltensänderungen und ihrer indirekten Auswirkungen um 3,8 % [6,3 % / 4,6 %] niedriger als in GreenEe (Tabelle 54). Der Unterschied ist bei den fossilen Rohstoffen in 2030 und bei den Metallerzen in 2050 besonders ausgeprägt. In Folge des geringeren RMC liegt der Rohstoffkonsum pro Person in 2050 um 3,8 % niedriger als bei GreenEe2.

Tabelle 54: Der Rohstoffkonsum (RMC) in GreenMe und GreenEe im Vergleich in Tsd. Tonnen RME

	GreenLife			GreenEe			GreenLife ggü. GreenEe in %		
	2030	2040	2050	2030	2040	2050	2030	2040	2050
RMC gesamt	855.237	664.888	505.945	912.252	697.144	525.710	-6,2	-4,6	-3,8
Biomasse	206.414	175.803	149.537	210.550	181.618	159.198	-2,0	-3,2	-6,1
Metallerze	137.661	99.641	69.973	137.963	100.696	71.014	-0,2	-1,0	-1,5

	GreenLife			GreenEe			GreenLife ggü. GreenEe in %		
Nicht-metallische Minerale	421.115	348.486	280.941	450.523	372.518	288.894	-6,5	-6,5	-2,8
Fossile Rohstoffe	90.047	40.958	5.494	113.216	42.312	6.604	-20,5	-3,2	-16,8

Quelle: eigene Berechnungen ifeu/IEE/SSG – URMOD

5.4 Flächenentwicklung

Bis 2050 verändert sich die Flächennutzung in Deutschland. Die Entwicklungen der Flächennutzungen folgen unterschiedlichen Trends.

Auch wenn die Siedlungsneuentwicklung stärker als in den anderen Green-Szenarien (Ausnahme GreenSupreme) rückläufig ist und infolge dessen die Flächenneuversiegelung sinkt, so steigt doch die Fläche für Wohn- und Nichtwohngebäude sowie für Verkehrs- und Erholungsflächen weiter an. Im Gegensatz dazu sinkt die Betriebsfläche aufgrund der rückläufigen Rohstoffextraktion in Deutschland. Insgesamt steigt die Siedlungs- und Verkehrsfläche auf 52.600 km² an, dies entspricht 14,7 % der gesamten Bodenfläche Deutschlands (Tabelle 55).

Die Acker- und Grünlandfläche sinkt aufgrund der Umwandlung in Siedlungsflächen und durch die Wiedervernässung organischer Böden auf insgesamt 148.865 km². Die Waldfläche wurde von den WEHAM-Szenarien (Naturschutzpräferenzszenario) übernommen. In Folge der Annahmen zur Rückvernässung steigen wiedervernässte Flächen auf 10.889 km² an. Vegetationsflächen nehmen somit 83,0 % der Gesamtfläche in 2050 ein.

Die Flächenbelegung durch den Ausbau der erneuerbaren Energien (Freiflächen-PV und WEA-on-shore) liegt in 2050 bei insgesamt 1.441 km². Diese Fläche beinhaltet die versiegelten und überschirm-ten Flächen sowie Zwischenflächen und Flächen für den Kranstellplatz und Zuwegung und ist damit nicht identisch mit der Flächenangabe zu den EE-Potenzialen. Die Flächenbelegung entspricht 0,4 % der Gesamtfläche Deutschlands.

Tabelle 55: Flächennutzung in Deutschland in 2030, 2040 und 2050

	2010 ¹	2030 ²	2040 ²	2050 ²	Quelle
Bodenfläche TOTAL [km ²]	357.127	357.582*	357.582	357.582	Destatis (2018b), Fortschreibung 2017
SIEDLUNG und Verkehrsfläche	51.291	52.585	52.649	52.600	Eigene Berechnung
Wohnbau, Industrie/Gewerbe, Erholung, sonst. Siedlungsflächen	30.901	32.029	32.197	32.249	Eigene Berechnung
Betriebsfläche	2.459	2.082	1.882	1.751	Eigene Berechnung auf der Basis von

	2010 ¹	2030 ²	2040 ²	2050 ²	Quelle
					URMOD
Verkehr	17.931	18.473	18.570	18.600	Eigene Berechnung
VEGETATION	297.279	296.782	296.718	296.766	(Abgrenzung Destatis) einschl. UNLAND
Landwirtschaft	162.080	153.913	151.168	150.556	ALMOD
davon Acker	115.140	112.723	111.515	111.515	ALMOD
davon Grünland	44.440	39.708	37.341	37.341	ALMOD
Flächenstilllegung	2.500	1.482	2.311	1.700	ALMOD
Wald	107.664	106.190	106.250	106.360	WEHAM
Sonstige Vegetation	27.535	36.678	39.299	39.851	Eigene Berechnung (Differenz)
davon Moor und Sumpf (Destatis)	929	1.186	1.186	1.186	Destatis (2018b), Wert von 2017 fortgeschrieben
davon wiedervernässte Flächen (ab 2030)		5.766	9.968	10.889	Annahme LULUCF
Bergbaufolgeflechte		526	726	857	Eigene Berechnung auf der Basis von URMOD
GEWÄSSER	8.557	8.215	8.215	8.215	Wert 2017 von Destatis (2018b), fortgeschrieben
Nachrichtlich: Fläche für EE	121	827	1.081	1.441	
Fläche für PV-Freifläche	89	729	964	1.288	Eigene Berechnung auf der Basis von Kauertz et al. (n.d.)
Fläche für WEA - onshore	32	98	117	153	Eigene Berechnung auf der Basis von Kauertz et al. (n.d.)

Quellen: ¹Destatis (2018b), ²Quellen: siehe rechte Spalte

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

GreenLife beschreibt einen Transformationspfad, in dem Menschen ihr Konsumverhalten besonders stark ändern. Technologische Änderungen, darunter die Umstellung des Energiesystems, die Produktionsweise der Basisindustrien, die Erhöhung von Ressourceneffizienzanstrengungen sind weiterhin relevant. Die zusätzlichen Konsumänderungen im Vergleich zu den anderen Green-Szenarien (mit Ausnahme von GreenSupreme) betreffen die Reduktion von Nahrungsmitteln tierischen Ursprungs und die stärkere Nachfrage nach regionalen Nahrungsmitteln sowie die Nachfrage nach verschiedenen nachhaltigeren Konsumgütern. Die Konsumänderungen betreffen aber auch Änderungen im Mobilitätsverhalten und von Wohngewohnheiten. Sharing-Konzepte, langlebige Güter und Reparatur finden stärker Verbreitung.

Im Gegensatz zu GreenEe1 und GreenLate, sind keine Produktionsmengen von Basisindustrien festgelegt und es finden keine zunehmenden Exporte von Überschussproduktionen statt. Die Produktionsmengen werden in Deutschland der inländischen Nachfrage folgend verändert.

Im GreenLife-Szenario sinken die **Treibhausgasemissionen** – gerechnet nach NIR mit LULUCF (ohne Wald) – auf insgesamt 44,495 Mio. t CO_{2Äq} in 2050 und gehen damit um 96,6 % gegenüber 1990 (UBA 2019a) zurück.

Bis 2030 [2040] liegt der Rückgang der THG-Emissionen bei 62,4 % [82 %]. Die höchsten Rückgänge bis 2030 verzeichnet die Abfallwirtschaft (84,5 %). Demgegenüber steht die Landwirtschaft, deren THG-Emissionen bis 2030 nur um 41,5 % gegenüber 1990 zurückgehen. In 2050 ist der Energiesektor, einschließlich Verkehr, emissionsneutral und die Rückgänge gegenüber 1990 liegen dementsprechend bei 100 %. Auch die THG-Emissionen der Abfallwirtschaft, LULUCF (ohne Wald) und der Industrie sinken bis 2050 stark mit Rückgängen von 93,4 %, 85,6 % und 88 %. Die geringsten Rückgänge finden sich im Sektor Landwirtschaft mit nur 70 %.

Die **Landwirtschaft** ist von den Verhaltensänderungen direkt betroffen. Zusätzlich zu vielen technischen Änderungen, die in allen Green-Szenarien angenommen werden, sinkt in GreenLife die Nachfrage nach den tierischen Produkten Fleisch und Milch stärker als in allen anderen Szenarien (außer GreenSupreme). In Folge sinken nicht nur die Viehbestände, sondern auch die Treibhausgasemissionen sehr stark, auf nur noch 23,9 Mio. Tonnen CO_{2Äq} in 2050.

Die Annahmen im GreenLife-Szenario bezüglich der **Landnutzung und Landnutzungsänderungen** entsprechend denen der GreenEe-Szenarien. Die Flächenneuanspruchnahme verläuft schneller als in den anderen Green-Szenarien außer GreenSupreme. So verläuft die Wiedervernässung von Mooren linear und ist 2040 abgeschlossen, der Torfabbau ist ab 2040 gestoppt. Diese und weitere Annahmen wie Grünlandumbruch führen zu sinkenden Treibhausgasemissionen, die in 2050 nur noch bei 6,5 Mio. Tonnen CO_{2Äq} liegen.

Die Lebensstiländerungen haben auch auf die **Industrie**produktion Auswirkungen. So werden viele Güter langlebiger und reparierbarer hergestellt. Dadurch und durch weitere sinkende Nachfragetrends gehen die Produktionsmengen vieler Basisindustrien, darunter die Stahl-, Gießerei- und Zementindustrie, zurück. Die prozessbedingten Treibhausgasemissionen in der Industrie sinken auf insgesamt 11,6 Mio. Tonnen CO_{2Äq}.

Der private und öffentliche Konsum sowie die Investitionen (letzte inländische Verwendung Deutschlands) verursachen weltweit rückläufige Treibhausgasemissionen. Diese liegen – gerechnet gemäß dem UGR-Konzept - in 2050 [2030/2040] nur noch bei

66 [464/219] Mio. t CO₂Äq, was einem Rückgang von 94,8 % gegenüber 2010 entspricht. In den Stützjahren dominieren die energiebedingten THG-Emissionen die Güter der letzten Verwendung. Erst in 2050 liegen die nicht-energetischen THG-Emissionen höher als die energiebedingten THG-Emissionen.

Im GreenLife-Szenario entstehen weniger Treibhausgasemissionen als in den GreenEe-Szenarien. So werden in 2050 [2030/2040] insgesamt 17,6 % [5,73%/9,5 %] weniger Treibhausgase nach NIR emittiert als in GreenEe1. Ein wichtiger Unterschied liegt in der Reduktion der inländischen Produktion, die insbesondere die THG-Emissionen aus den Quellgruppen Energie, Verkehr und Industrie reduziert. Nur auf die Änderungen der Lebensstile entfallen insgesamt 3,0/3,6 bzw. 6,5 % Reduktion der Treibhausgasemissionen in 2030/2040 bzw. 2050, wie der Vergleich zu GreenEe2 zeigt. Die Nachfrageänderungen reduzieren insbesondere die Treibhausgase in den Quellgruppen Landwirtschaft und Abfall. Die kumulierten Treibhausgase zwischen 1990 und 2050 liegen in Folge in GreenLife um 0,29 Mrd. Tonnen (0,7 %) niedriger als in GreenEe2.

Im GreenLife-Szenario sinkt der **Endenergiebedarf** in 2050 auf 1.454 TWh. Den größten Anteil von 686 TWh verbraucht die Industrie (47,2 %), 286 TWh davon für rohstoffliche Verwendung in der Chemieindustrie, gefolgt von den privaten Haushalten (17,9 %), dem Verkehr (18,6 %) und GHD (16,2 %). Die nationale Nettostromerzeugung steigt kontinuierlich auf insgesamt 765,0 TWh in 2050, und wird in dem Jahr ausschließlich mit erneuerbaren Energien produziert. Windkraftanlagen on- und offshore sowie Photovoltaik sind die dominanten Technologien, die im Transformationspfad kontinuierlich ausgebaut werden. In 2050 liegt die installierte Leistung bei 127,4 GW Windkraftanlagen onshore, 30,3 GW Windkraftanlagen offshore sowie 167,6 GW Photovoltaikanlagen.

Aus dem Vergleich mit den GreenEe-Szenarien wird deutlich, dass eine etwas geringere nationale Stromerzeugung notwendig wird (langfristig -27 TWh gegenüber GreenEe1 bzw. -22 TWh gegenüber GreenEe2). Der geringere Stromverbrauch ist bedingt durch die unterstellte Lebensstiländerung vor allen auf weniger Elektromobilität, Wärmepumpen und herkömmlichen Stromverbrauch zurück zu führen ist, während der PtH-Stromverbrauch sogar steigt. Grundsätzlich wird deutlich, dass in diesem Szenario für den Pfad auch höhere Klimazieleinsparungen möglich gewesen wäre, gegenüber den vorgegebenen Zwischenzielen. Den sowohl der Ausbau von EE-Anlagen als auch von Wärmepumpen liegt im Bereich der Untergrenze zwischen den möglichen Bandbreiten des Transformationspfades. So erlaubt das Klimaziel etwas mehr fossile Stromerzeugung und etwas weniger Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in 2030.

Im Vergleich zu GreenEe1 ist der langfristige Brennstoffbedarf deutlich geringer (-80 TWh in 2050), und auch bei gleichen Annahmen zum internationalen Handel (GreenEe2) zeigen sich langfristig noch deutliche Einsparung durch die Lebensstiländerung (-63 TWh). In GreenLife wurde weniger Strom in anderen Anwendungen verbraucht. Deswegen können die kostengünstigen Erzeugungspotenziale genutzt werden, um auch national mehr PtG/PtL zu erzeugen. Das Verhältnis zwischen PtG/L-Importen zur nationalen Erzeugung ist deswegen langfristig deutlich weniger importabhängig als beispielsweise in den GreenEe-Szenarien. Der Anteil der Importe am Gesamtverbrauch liegt mit 78,3 % niedriger als in GreenEe2 mit 81 %.

Im **Gebäudewärmebereich** steigt die bewohnte Pro-Kopf Wohnfläche wie in den anderen Green-Szenarien (mit Ausnahme von GreenSupreme) ebenfalls bis zum Jahr 2030 weiter an, liegt 2030 jedoch mit 46 m²/Kopf auf einem niedrigeren Niveau und sinkt anschließend bis 2050 auf 41 m²/Kopf. Die resultierende Gesamtwohnfläche ist deutlich rückläufig ist und liegt in 2050 bei knapp 3 Mrd. m² bzw. rund 15 % niedriger als in den GreenEe-Szenarien. Der

Endenergieverbrauch für Raumwärme von Wohngebäuden liegt um 20 % niedriger als in den GreenEe-Szenarien. Hauptsächlich zurückzuführen ist dieses auf die niedrige Wohnfläche und den niedrigeren Anteil der Flächen in Ein- und Zweifamilienhäusern (EFH) gegenüber dem Anteil der Flächen in Mehrfamilienhäusern (MFH). Da die Unterschiede im Nichtwohngebäudebereich gering sind, ist der Endenergiebedarf in Summe für alle Gebäude um 15 % geringer als in den GreenEe-Szenarien. Durch den höheren Mehrfamilienhausanteil und die Verstädterung steigt auch der Anteil von Fernwärme von 20 % auf 24 %. Der Rest der Gebäude wird mit Wärmepumpen versorgt.

Im **Verkehrssektor** liegt der Endenergieverbrauch in 2050 bei insgesamt 232 TWh, 176 TWh entfallen auf den nationalen Verkehr und 57 TWh auf den internationalen Verkehr. Aufgrund der starken Rückgänge liegen die Verbräuche im motorisierten Individualverkehr (75 TWh in 2050 ggü. 384 TWh in 2010), schon nahe am Straßengüterverkehr (67 TWh) gefolgt vom internationalen Flugverkehr, der dagegen einen starken Rückgang aufweist. Es zeigt sich, dass in GreenLife der nationale Verkehr im Jahr 2030 zwar nur 4,8 % weniger Endenergie benötigt als GreenEe2, aber bis 2050 diese Endenergieeinsparung auf 16,8 % steigt. Auch im internationalen Verkehr führen die Maßnahmen zu Endenergieeinsparungen um 5,1 % (2030) bis 15,1 % (2050). Insgesamt werden im Jahr 2030 in GreenLife etwa 4,6 % weniger Kraftstoffe benötigt als in GreenEe2. Im Jahr 2050 werden in GreenLife 13,3 % weniger Strom benötigt, aber der Kraftstoffbedarf ist um 17,2 % (national) bzw. 28 % (Summe national und international) geringer als in den GreenEe2.

Die wesentlichen Unterschiede im **Energiebereich** liegen somit in den berücksichtigten möglichen Änderungen der Lebensweise und beziehen sich direkt oder indirekt auf das Verhalten von Konsumentinnen und Konsumenten:

- ▶ Geringerer Gebäudewärmebedarf aufgrund geringerer Wohnfläche und höherem Anteil von Mehrfamilienhäusern. Höherer Anteil von Fernwärme und damit geringerer Anteil von Wärmepumpen.
- ▶ Deutlich geringeres Verkehrsaufkommen durch eine deutliche Stärkung der aktiven Mobilität (Rad- und Fußverkehr), eine zunehmende gemeinschaftliche Nutzung von Pkw (Ridesharing) im urbanen Raum und eine deutliche Reduktion von Flugreisen.
- ▶ Durch die Verhaltensänderungen ergeben sich Änderungen der Produktionsmengen und damit auch der Endenergiebedarfe. Indirekt ist die Stromerzeugung durch die geringe Nachfrage aus allen Sektoren betroffen.
- ▶ Die größten Änderungen zeigen sich im Importbedarf von PtG/L-Brenn- und Kraftstoffen, der aufgrund der hohen Verbrauchsreduktion insbesondere in Industrie und Verkehr, und hier insbesondere im Bereich der nicht-elektrifizierbaren Anwendungen, deutlich verringert werden kann.

Die Transformation in GreenLife führt zu einer Reduktion des **Rohstoffkonsums** (RMC) um 63,2 % gegenüber 2010 auf insgesamt 506,0 Mio. Tonnen Rohstoffäquivalente. Der stärkste Rückgang ist bei den fossilen Energieträgern zu finden, die um 98,6 % zurückgehen. Dabei ist der Rückgang zwischen 2010 und 2030 besonders hoch (76,7 %). Im Ausland werden annahmegemäß im Jahr 2050 weiterhin fossilen Energieträger verwendet, dies spiegelt sich in den fossilen Rohstoffen der letzten inländischen Verwendung (RMC) wider. Der RMC für nicht-metallische Minerale vermindert sich zwischen 2010 und 2050 um 56,8 %. Der drittstärkste

Rückgang bis 2050 (-49,9 %) ist bei den Metallerzen zu verzeichnen, der Konsum von Biomasse sinkt im selben Zeitraum um 43,7 %. Der Rückgang des RMC verläuft bei den fossilen Rohstoffen zwischen 2010 und 2030 sprunghaft, bei allen anderen Rohstoffgruppen jedoch stetig.

Die Gesamtrohstoffproduktivität (Letzte Verwendung / RMI) steigt zwischen 2010 und 2030 [2030 bis 2040 / 2040 bis 2050] um 3,1 % [2,7 %/2,6 %] im Jahresdurchschnitt. Sie liegt um 334 Indexpunkte im Vergleich zum Jahr 1994 höher. Der Pro-Kopf-Konsum von Primärrohstoffen sinkt auf 7,04 Tonnen pro Person in 2050, was mehr als einer Halbierung im Vergleich zu 2010 entspricht (-58,1 %). Der Primärrohstoffkonsum der privaten Haushalte sinkt auf 207 Mio. Tonnen RME in 2050. Das Bedürfnisfeld Ernährung ist in 2050 das rohstoffintensivste mit 95,9 Mio. Tonnen RME, gefolgt vom Bedürfnisfeld Freizeit und Tourismus (40,3 Mio. t RME) und Wohnen und Haushalt (38,9 Mio. t RME).

Im Zeitraum zwischen 2010 und 2050 kumuliert sich der Konsum von Primärrohstoffen auf insgesamt 37,739 Mrd. Tonnen RME. Den größten Anteil daran haben die nicht-metallischen Mineralien (47,4 %), gefolgt von biotischen Materialien (24,1 %) und fossilen Rohstoffen (16,8 %). Durch die stoffliche Wiederverwertung können insgesamt (mindestens) 227 Mio. Tonnen Primärrohstoffe in 2050 eingespart werden, dies entspricht einem Anteil von 31 % am gesamten Rohstoffkonsum (primär und sekundär).

Im Vergleich zur Transformation in GreenEe1, GreenEe-2 und GreenLate, führt die Transformation in GreenLife zu einem niedrigeren Rohstoffkonsum. In 2050 liegt beispielsweise der RMC um insgesamt 3,8 % niedriger als in GreenEe2, d.h. die zusätzlichen Nachfrageänderungen (im Vergleich zu den GreenEe-Szenarien) führen zu Rohstoffeinsparungen von insgesamt 19,8 Mio. Tonnen RME in 2050. Der Unterschied ist ferner bei den fossilen Rohstoffen in 2030 und bei den Metallerzen in 2050 besonders ausgeprägt. In Folge des geringeren RMC liegt der Rohstoffkonsum pro Person in 2050 um 3,8 % niedriger als bei GreenEe2.

In GreenLife werden eine Vielzahl von Metallen sowohl im Pfad als auch kumuliert bis 2050 in einer geringeren Menge als in den anderen Green-Szenarien (mit Ausnahme von GreenSupreme und GreenMe) nachgefragt. Durch die raschere Einführung von Elektroautos ist allerdings in 2030 die Nachfrage nach Rohstoffen, die für Batterien benötigt werden, höher. In 2050 übersteigt die Nachfrage nach Zinn, PGM und Lithium den Anteil der deutschen Bevölkerung an der globalen Bevölkerung. Die Rohstoffe mit potenziellen Versorgungsengpässen sind folglich dieselben wie die in den anderen GreenEe-Szenarien, nur das Ausmaß ist etwas geringer als es in GreenEe1, GreenEe2 und GreenLate.

Die wesentlichen Faktoren für den Rückgang der Rohstoffnachfrage in GreenLife seien abschließend zusammengefasst:

- ▶ Die Substitution der fossilen Rohstoffe durch erneuerbare Energien bzw. synthetische Rohstoffe
- ▶ Die Substitution von Primärrohstoffen durch biotische Rohstoffe, durch leichtere Rohstoffe und/ oder durch Sekundärrohstoffe (wenn auch in einem geringeren Ausmaß als in GreenMe und GreenSupreme)
- ▶ Die Steigerung der Materialeffizienz in Industrien und Dienstleistungen (wenn auch in einem geringeren Ausmaß als in GreenMe und GreenSupreme)

- Die Reduktion der Nachfrage nach einer Vielzahl von Gütern und Dienstleistungen, ausgehend von einer geänderten Konsumentennachfrage; rohstofflich relevant ist der Rückgang der Wohnraumnachfrage und in Verbindung damit die rückläufige neue (zu erschließende) Siedlungsfläche und auch die Nachfrage nach privaten PKWs.

Ambitionierte Konsumänderungen können somit, neben notwendigen technischen Änderungen, einen wichtigen Beitrag zur zusätzlichen Minderung von Treibhausgasemissionen und Primärrohstoffnachfrage leisten.

7 Quellenverzeichnis

Birnstengel, B.; Hoffmeister, J.; Alwast, H.; Häusler, A. (2018): Siedlungsabfallaufkommen Schweiz 2050 Auswirkungen auf das Kehrtaufkommen für die thermische Verwertung in den KVA und die Gesamtauslastung der KVA. VBSA, prognos, Berlin/Düsseldorf.

BMU (2020): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm III. Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit.

https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Ressourceneffizienz/progress_iii_programm_bf.pdf (28.07.2020).

BMUB (2016a): Klimaschutzplan 2050 – Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. S. 1–96. https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf.

BMUB (2016b): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II - Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen.

https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/progress_ii_broschuere_bf.pdf (28.07.2020).

Bundesregierung (2018): Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie Aktualisierung 2018.

<https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975274/1546450/65089964ed4a2ab07ca8a4919e09e0af/2018-11-07-aktualisierung-dns-2018-data.pdf> (28.07.2020).

Dehoust, G.; Manhart, A.; Dolega, P.; Vogt, R.; Kämper, C.; Auberger, A.; Priestr, M.; Rechlin, A.; Schöning, N.; Rüttinger, L.; Becker, F.; Scholl, C. (2020): Weiterentwicklung von Handlungsempfehlungen einer ökologischen Rohstoffpolitik - ÖkoRess II. UBA Texte 79/2020 Vorhaben des Umweltbundesamtes, FKZ 3715 32 310 0, Dessau-Roßlau.

Dehoust, G.; Manhart, A.; Möck, A.; Kießling, L.; Vogt, R.; Kämper, C.; Giegrich, J.; Auberger, A.; Priester, Dr. M.; Rechlin, Dr. A.; Dolega, P. (2017): Erörterung ökologischer Grenzen der Primärrohstoffgewinnung und Entwicklung einer Methode zur Bewertung der ökologischen Rohstoffverfügbarkeit zur Weiterentwicklung des Kritikalitätskonzeptes (ÖkoRess I) Konzeptband. Umweltbundesamt.

Destatis (2015): Bevölkerung Deutschlands bis 2060 - 13. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung. Wiesbaden. S. 51.

Destatis (2018a): Umweltökonomische Gesamtrechnungen Aufkommen und Verwendung in Rohstoffäquivalenten. Vol. 49, No.0.

Destatis (2018b): Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung - Fachserie 3 Reihe 5.1 - 2017. Vol. 49, No.0.

Destatis (2020): Bevölkerung Deutschland; 2010, GENESIS.

Dittrich, M.; Gerhardt, N.; Schoer, K.; Dünnebeil, F.; Becker, S.; von Oehsen, A.; Vogt, R.; Köppen, S.; Biemann, K.; Böttger, D.; Ewers, B.; Limberger, S.; Frischmuth, F.; Fehrenbach, H. (2020a): Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland - GreenEe. UBA Climate Change 01/2020.

Dittrich, M.; Gerhardt, N.; Schoer, K.; Dünnebeil, F.; Becker, S.; von Oehsen, A.; Vogt, R.; Köppen, S.; Biemann, K.; Böttger, D.; Ewers, B.; Limberger, S.; Frischmuth, F.; Fehrenbach, H. (2020b): Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland - GreenLate. UBA Climate Change 02/2020.

Fronzel, M.; Grösche, P.; Huchtemann, D.; Oberheitmann, A.; Peters, J.; Vance, C.; Angerer, G.; Sartorius, C.; Buchholz, P.; Röhling, S.; Wagner, M. (2006): Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen. Endbericht Forschungsprojekt Nr. 09/05 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie. BGR, Fraunhofer ISI, RWI Essen.

IPCC (2006): Greenhouse Gas Inventories. Revised 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use.

Kauertz, B.; Franke, B.; Dittrich, M.; Fehrenbach, H. (n.d.): Ableitung eines Indikatorensets zur Umweltverträglichkeit der Energiewende (unveröffentlicht). UBA-Projekt: FKZ 3715 43 101 0. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

Ludmann, S. (2018): Ökologie des Teilens. Bilanzierung der Umweltwirkungen des Peer-to-Peer Sharing. PeerSharing Arbeitsbericht 8 Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW); IZT - Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung; ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg. https://www.peer-sharing.de/data/peerssharing/user_upload/Dateien/Oekologie_des_Teilens_Arbeitspapier_8_.pdf.

Mellwig, P.; Jochum, P.; Pehnt, M.; Lempik, J.; von Oehsen, A.; Böttcher, S.; Blömer, S.; Stelter, D.; Hertle, H.; Krenz, T. (2017): Ableitung eines Korridors für den Ausbau der erneuerbaren Wärme im Gebäudebereich - Kurztitel : Anlagenpotenzial. ifeu Heidelberg, Beuth Hochschule. ifeu Heidelberg, Beuth Hochschule, Berlin, Heidelberg. https://prof.beuth-hochschule.de/fileadmin/prof/jochum/Downloads/Anlagenpotenzial_Endbericht.pdf.

Nobis, C.; Kuhnimhof, T. (2018): Mobilität in Deutschland MiD 2017 Ergebnisbericht.

OECD (2019): Global Material Resources Outlook to 2060 Economic Drivers and Environmental Consequences. Paris.

Pauliuk, S.; Milford, R. L.; Müller, D. B.; Allwood, J. M. (2013): The steel scrap age. In: *Environmental Science and Technology*. Vol. 47, No.7, S. 3448–3454.

Schipper, B. W.; Lin, H. C.; Meloni, M. A.; Wansleeben, K.; Heijungs, R.; van der Voet, E. (2018): Estimating global copper demand until 2100 with regression and stock dynamics. In: *Resources, Conservation and Recycling*. Elsevier. Vol. 132, No.October 2017, S. 28–36.

UBA (2014): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Climate Change 07/2014 Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/07_2014_climate_change_d t.pdf (28.07.2020).

UBA (2016a): Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050. ifeu, INFRAS, LBST; Im Auftrag des Umweltbundesamtes, Forschungskennzahl 3712 45 100, Mai 2016.

UBA (2016b): Erarbeitung einer fachlichen Strategie zur Energieversorgung des Verkehrs bis zum Jahr 2050: Endbericht. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/publikationen/2016-11-10_endbericht_energieversorgung_des_verkehrs_2050_final.pdf (28.07.2020).

UBA (2019a): Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität. RESCUE-Studie. UBA, Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/rescue_studie_cc_36-2019_wege_in_eine_ressourcenschonende_treibhausgasneutralitaet.pdf (28.07.2020).

UBA (2019b): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2019. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2017.

UBA (2019c): Atmosphärische Treibhausgas-Konzentrationen. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/atmosphaerische-treibhausgas-konzentrationen#kohlendioxid-> (28.07.2020).

UBA (2020): Treibhausgasemissionen gingen 2019 um 6,3 Prozent zurück. <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/treibhausgasemissionen-gingen-2019-um-63-prozent>. (28.07.2020).

UNEP (2016): Global Material Flows and Resource Productivity. Assessment Report for the UNEP International Resource Panel. Schandl, Heinz Fischer-Kowalski, Marina West, James Giljum, Stefan Dittrich, Monika Eisenmenger, Nina Geschke, Arne Lieber, Mirko Wieland, Hanspeter Schaffartzik, Anke Krausmann, Fridolin Gierlinger, Sylvia Hosking, Karin Lenzen, Manfred Tanikawa, Hiroki , Paris.

UNEP-IRP (2010): Assessing the Environmental Impacts of Consumption and Production: Priority Products and Materials, A Report of the Working Group on the Environmental Impacts of Products and Materials to the International Panel for Sustainable Resource Management. Hertwich, E., van der Voet, E., Suh, S., Tukker, A., Huijbregts M., Kazmierczyk, P., Lenzen, M., McNeely, J., Moriguchi, Y.

UNFCCC (2015): Paris Agreement. https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf (28.07.2020).

USGS (2020): Mineral Commodity Summaries 2020.

Wiesen, K.; Teubler, J.; Saurat, M.; Suski, P.; Samadi, S.; Kiefer, S. (2017): Analyse des Rohstoffaufwandes der Energieinfrastruktur in Deutschland. Sachverständigengutachten. <https://wupperinst.org/p/wi/p/s/pd/622/>.

A Anhang

Die Endenergie der Gebäudewärme differenziert nach Gebäudetypen ist im Folgenden für die Jahre 2030, 2040 und 2050 dargestellt.

Tabelle A- 1: Unterteilung der Gebäude in Effizienzklassen – Endenergie 2030

Endenergie (in TWh/a)			Differenzierung Dämmstandart Nutzenergie Raumwärme			Differenzierung Dämmstandart Endenergie Warmwasser		
	SUMME		<50 kWh/m ² a	50-120 kWh/ m ² a	>120 kWh/m ² a	<50 kWh/ m ² a	50-120 kWh/ m ² a	>120 kWh/m ² a
	RW	WW	Raumwärme (RW)			Warmwasser (WW)		
Wohngebäude	295,3	92,8	62,6	225,1	7,7	30,7	61,0	1,1
Einfamilienhäuser (EFH)	131,2	34,1	18,1	105,5	7,7	6,2	26,8	1,1
Reihenhäuser (RH)	53,5	17,7	18,0	35,5	0,0	8,0	9,6	0,0
Kleine Mehrfamilienhäuser (MFH)	87,5	31,3	19,7	67,8	0,0	11,3	20,0	0,0
Große Mehrfamilienhäuser (GMH)	23,1	9,8	6,9	16,2	0,0	5,1	4,6	0,0
Nichtwohngebäude	155,2	25,3	40,7	82,1	32,3	14,3	8,3	2,7
Büro	28,8	3,1	3,7	21,0	4,1	1,0	1,8	0,2
Bildung	15,3	1,1	2,0	9,9	3,4	0,4	0,6	0,2
Baugewerbe	1,8	1,1	1,7	0,1	0,0	1,0	0,0	0,0
Nahrungsmittelgewerbe	0,1	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
Landwirtschaft	10,8	2,4	9,0	1,8	0,0	2,1	0,2	0,0
Herstellungsbetriebe	1,5	0,8	1,3	0,2	0,0	0,8	0,0	0,0
Industrie	28,7	7,8	14,9	13,7	0,0	6,2	1,6	0,0
Textil, Bekleidung, Spedition	1,6	0,5	1,4	0,2	0,0	0,4	0,0	0,0
Handel	17,1	1,9	3,1	14,1	0,0	0,8	1,2	0,0
Wäschereien	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Kultur	9,7	0,4	0,4	2,5	6,7	0,1	0,1	0,2
Sport	5,7	0,5	0,5	4,0	1,2	0,2	0,3	0,1

Endenergie (in TWh/a)			Differenzierung Dämmstandart Nutzenergie Raumwärme			Differenzierung Dämmstandart Endenergie Warmwasser		
Beherbergung	26,9	3,8	2,2	12,4	12,3	0,9	1,6	1,2
Krankenhäuser	7,1	1,8	0,3	2,2	4,6	0,3	0,7	0,9

Quelle: eigene Ergebnisse, ifeu/IEE/SSG - GEMOD

Tabelle A- 2: Unterteilung der Gebäude in Effizienzklassen – Endenergie 2040

Endenergie (in TWh/a)			Differenzierung Dämmstandart Nutzenergie Raumwärme			Differenzierung Dämmstandart Endenergie Warmwasser		
	SUMME		<50 kWh/m ² a	50-120 kWh/ m ² a	>120 kWh/m ² a	<50 kWh/ m ² a	50-120 kWh/ m ² a	>120 kWh/m ² a
	RW	WW	Raumwärme (RW)			Warmwasser (WW)		
Wohngebäude	182,6	76,5	106,6	73,8	2,1	57,2	19,1	0,3
Einfamilienhäuser (EFH)	81,5	26,3	38,0	41,3	2,1	15,9	10,1	0,3
Reihenhäuser (RH)	34,2	14,2	23,3	10,9	0,0	11,4	2,8	0,0
Kleine Mehrfamilienhäuser (MFH)	50,4	26,2	32,9	17,5	0,0	21,1	5,1	0,0
Große Mehrfamilienhäuser (GMH)	16,5	9,8	12,4	4,1	0,0	8,8	1,0	0,0
Nichtwohngebäude	88,5	23,7	44,6	36,1	7,8	19,4	3,6	0,7
Büro	16,1	3,0	7,7	8,3	0,1	2,3	0,8	0,0
Bildung	10,3	1,0	4,0	6,1	0,2	0,7	0,3	0,0
Baugewerbe	0,9	1,1	0,9	0,0	0,0	1,1	0,0	0,0
Nahrungsmittelgewerbe	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
Landwirtschaft	7,1	2,3	7,1	0,0	0,0	2,3	0,0	0,0
Herstellungsbetriebe	0,6	0,8	0,6	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0
Industrie	10,6	7,3	9,7	0,8	0,0	7,2	0,1	0,0
Textil, Bekleidung, Spedition	0,7	0,3	0,7	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0
Handel	9,4	2,0	5,0	4,4	0,0	1,5	0,4	0,0
Wäschereien	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Endenergie (in TWh/a)			Differenzierung Dämmstandart Nutzenergie Raumwärme			Differenzierung Dämmstandart Endenergie Warmwasser		
Kultur	6,9	0,2	0,8	3,0	3,1	0,1	0,1	0,1
Sport	3,2	0,5	1,2	2,0	0,0	0,3	0,1	0,0
Beherbergung	17,1	3,5	6,4	8,8	1,9	2,3	1,0	0,2
Krankenhäuser	5,6	1,6	0,5	2,6	2,4	0,4	0,8	0,4

Quelle: eigene Ergebnisse, ifeu/IEE/SSG – GEMOD

Tabelle A- 3: Unterteilung der Gebäude in Effizienzklassen – Endenergie 2050

Endenergie (in TWh/a)	SUMME		Differenzierung Dämmstandart Nutzenergie Raumwärme			Differenzierung Dämmstandart Endenergie Warmwasser		
			<50 kWh/m ² a	50-120 kWh/ m ² a	>120 kWh/m ² a	<50 kWh/ m ² a	50-120 kWh/ m ² a	>120 kWh/m ² a
	RW	WW	Raumwärme (RW)			Warmwasser (WW)		
Wohngebäude	104,9	62,7	91,1	13,7	0,2	59,0	3,7	0,0
Einfamilienhäuser (EFH)	45,6	20,4	34,3	11,1	0,2	17,5	2,9	0,0
Reihenhäuser (RH)	20,5	11,9	19,1	1,3	0,0	11,6	0,3	0,0
Kleine Mehrfamilienhäuser (MFH)	26,9	21,1	25,9	1,0	0,0	20,7	0,4	0,0
Große Mehrfamilienhäuser (GMH)	12,0	9,2	11,6	0,3	0,0	9,1	0,1	0,0
Nichtwohngebäude	68,4	22,5	35,7	27,2	5,5	19,7	2,4	0,4
Büro	12,1	3,0	7,1	5,0	0,0	2,6	0,4	0,0
Bildung	8,7	1,0	3,4	5,3	0,0	0,8	0,2	0,0
Baugewerbe	0,6	1,1	0,6	0,0	0,0	1,1	0,0	0,0
Nahrungsmittelgewerbe	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
Landwirtschaft	5,5	2,3	5,5	0,0	0,0	2,3	0,0	0,0
Herstellungsbetriebe	0,4	0,8	0,4	0,0	0,0	0,8	0,0	0,0
Industrie	5,6	6,6	5,6	0,0	0,0	6,6	0,0	0,0
Textil, Bekleidung, Spedition	0,5	0,2	0,5	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0

Endenergie (in TWh/a)			Differenzierung Dämmstandart Nutzenergie Raumwärme			Differenzierung Dämmstandart Endenergie Warmwasser		
Handel	6,7	2,0	4,4	2,3	0,0	1,8	0,2	0,0
Wäschereien	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Kultur	6,2	0,2	0,9	2,3	3,1	0,1	0,1	0,1
Sport	2,6	0,5	0,9	1,7	0,0	0,4	0,1	0,0
Beherbergung	14,4	3,3	5,7	8,6	0,0	2,5	0,8	0,0
Krankenhäuser	5,1	1,4	0,7	2,0	2,4	0,5	0,6	0,4

Quelle: eigene Ergebnisse, ifeu/IEE/SSG - GEMOD

Die Gesamtanzahl der Wohngebäude beträgt 2030 18,30 Mio. mit 4,41 Mrd. m² Nutzfläche (beheizte Wohnfläche und unbeheizte Nutzfläche), 2040 16,29 Mio. mit 4,04 Mrd. m², 2050 13,92 Mio. mit 3,57 Mrd. m².

Die Gesamtanzahl der Nichtwohngebäude beträgt wie in GreenEe 2030 3,91 Mio. mit 2,87 Mrd. m² Nutzfläche (beheizte Wohnfläche und unbeheizte Nutzfläche), 2040 3,94 Mio. mit 2,89 Mrd. m², 3,97 Mio. mit 2,92 Mrd. m²

Die Nutzfläche ist im Folgenden für die Gebäudetypen dargestellt und ist ebenso repräsentativ für die Gebäudeanzahl in den Klassen.

Tabelle A- 4: Unterteilung der Gebäude in Effizienzklassen – Gesamtfläche

Nutzfläche (beheizte Wohnfläche + unbeheizte Nutzfläche) (in Mio. m ²)	2030			2040			2050		
	<50 kWh/m ² a	50-120 kWh/ m ² a	>120 kWh/ m ² a	<50 kWh/m ² a	50-120 kWh/ m ² a	>120 kWh/m ² a	<50 kWh/ m ² a	50-120 kWh/ m ² a	>120 kWh/m ² a
Wohngebäude	1444	2906	57	2999	1027	16	3346	220	1
Einfamilienhäuser (EFH)	306	1333	57	897	569	16	1065	174	1
Reihenhäuser (RH)	388	464	0	631	157	0	684	20	0
Kleine Mehrfamilienhäuser (MFH)	505	889	0	1022	249	0	1088	22	0
Große Mehrfamilienhäuser (GMH)	245	220	0	449	53	0	508	5	0
Nichtwohngebäude	1704	935	228	2435	402	54	2606	273	37
Büro	127	229	30	290	98	1	345	47	0
Bildung	67	97	25	133	57	1	147	46	0
Baugewerbe	116	2	0	119	0	0	120	0	0

Nutzfläche (beheizte Wohnfläche + Unbeheizte Nutzfläche) (in Mio. m ²)	2030			2040			2050		
	9	0	0	9	0	0	9	0	0
Landwirtschaft	282	28	0	313	0	0	316	0	0
Herstellungsbetriebe	103	2	0	106	0	0	107	0	0
Industrie	676	178	0	851	11	0	871	0	0
Textil, Bekleidung, Spedition	88	3	0	91	0	0	92	0	0
Handel	119	180	0	238	63	0	267	37	0
Wäschereien	1	0	0	1	0	0	1	0	0
Kultur	13	28	44	27	39	21	36	30	21
Sport	22	37	8	48	19	0	52	16	0
Beherbergung	72	125	90	192	82	14	218	72	0
Krankenhäuser	9	26	30	16	33	16	25	25	16

Quelle: eigene Ergebnisse, ifeu/IEE/SSG - GEMOD