

TEXTE

110/2026

Endbericht

Wissenschaftliche Begleitung des Umsetzungsplans zur Nationalen Bioökonomiestrategie

von:

Horst Fehrenbach, Silvana Bürck, Susanne Köppen
ifeu, Heidelberg, Berlin

Dr. Hannes Böttcher, Dr. Klaus Hennenberg,
Dr. Franziska Wolff, Margarethe Scheffler

Öko-Institut, Berlin und Darmstadt

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 110/2026

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3721 31 102 0

Endbericht

Wissenschaftliche Begleitung des Umsetzungsplans zur Nationalen Bioökonomiestrategie

von

Horst Fehrenbach, Silvana Bürck, Susanne Köppen
ifeu, Heidelberg, Berlin

Dr. Hannes Böttcher, Dr. Klaus Hennenberg,
Dr. Franziska Wolff, Margarethe Scheffler
Öko-Institut, Berlin und Darmstadt

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

Durchführung der Studie:

ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung gGmbH, Heidelberg
Wilckensstraße 3
69120 Heidelberg

Abschlussdatum:

Juli 2025

Redaktion:

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

DOI:

<https://doi.org/10.60810/openumwelt-8226>

Dessau-Roßlau, Juli 2026

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

Kurzbeschreibung: Wissenschaftliche Begleitung des Umsetzungsplans zur Nationalen Bioökonomiestrategie

Im Rahmen des Forschungsprojekts werden die Wechselwirkungen und Konflikte der Biomassenutzung mit Umwelt- und Naturschutzbelangen analysiert. Dies erfolgt in drei Schritten, wobei der erste Schritt eine Auswertung der vorhandenen Literatur darstellt. Darin werden für eine umweltgerechte Biomassenutzung und Biomasseproduktion unter mehreren zentralen Themen die Frage der Landnutzung sowie der effektive Beitrag zum Klimaschutz am häufigsten adressiert. Im nächsten Schritt wird das nachhaltig verfügbare Biomassepotenzial abgeschätzt. Dabei wird auf drei Grundsatzarbeiten zurückgegriffen, die auch als Hintergrundinformationen für eine mögliche Nationale Biomassestrategie (NABIS) dienen. Im Anschluss erfolgt eine Bewertung der Umweltwirkungen von Biomasseerzeugung und -nutzung. Dabei wird der Status quo mit verschiedenen Szenarien für das Jahr 2045 verglichen. Eine deutliche Verringerung negativer Umweltwirkungen zeigt sich v.a. durch die Reduktion von Tierhaltung und Fleischkonsum im Gegenzug zu vermehrten pflanzlichen Nahrungsmitteln. Auch schlägt sich der Einsatz für stoffliche Biomassenutzung positiv nieder, wo immer er möglich ist und sich Potenziale bieten anstelle einer energetischen Nutzung. Umweltentlastungen der Biomasseproduktion ergeben sich außerdem durch Extensivierung im Agrarbereich und reduzierte Holzentnahme im Forstbereich.

Im zweiten Teil werden Maßnahmvorschläge für die Umsetzung einer nachhaltigen Bioökonomie diskutiert. Die Analyse baut auf Maßnahmen aus den Empfehlungen des Bioökonomierats (BÖR) auf, die bis Ende 2023 vorgelegt wurden. Generell fehlen den meisten der Empfehlungen konkrete Zielwerte, um sie einer Bewertung des potenziellen Beitrags zur Umsetzung einer nachhaltigen Bioökonomie unterziehen zu können. Eine Fehlstellenanalyse zeigt, dass die Nutzung von Landfläche eine zentrale Grundlage für die Biomasseproduktion ist und somit die Konkurrenz um Flächen damit ein zentraler Faktor, der im Rahmen einer Bioökonomiestrategie berücksichtigt werden sollte.

Im dritten Teil wird ausgearbeitet, wie eine Priorisierung von Biomasseströmen in Richtung nachhaltiger Biomassenutzungen gestaltet werden kann. Dazu werden Kriterien und Indikatoren entwickelt, die das breite Feld der Nutzungsmöglichkeiten in der Bioökonomie abdecken und nicht allein Umweltaspekte adressieren. Die Ergebnisse stützen dennoch die Erkenntnisse der vorausgehenden Analysen und bestätigen die grundsätzliche Vorteilhaftigkeit der stofflichen Nutzung, wobei in diesem Schritt verschiedene Rohstoffe und Produkte differenziert werden. Die Ergebnisse der Priorisierung werden in ein Gesamtnutzungskonzept überführt, in welchem priorisierte Rohstoff/Produkt-Bezüge nach sektoralen Bedarfsmengen aufgeteilt werden. Im Ergebnis zeigt sich, dass trotz zurückhaltender Bedarfsprognose die Verfügbarkeit der nachhaltigen Biomasse nicht alle Bedarfe abdecken kann.

Zuletzt werden Vorschläge zu Maßnahmen und Instrumenten zur Gestaltung der notwendigen Rahmenbedingungen erstellt. Diese nehmen nochmals Bezug auf die Ergebnisse des zweiten Teils, beziehen aber auch die Rückschlüsse der weiteren Projektergebnisse mit ein.

Abstract: Scientific monitoring of the implementation plan for the National Bioeconomy Strategy

Firstly, this research project analyses the interactions and conflicts of biomass use with environmental and nature conservation concerns. This is done in three steps. In the first step, the existing literature is analysed. Among several key issues for environmentally friendly biomass use and production, the question of land use and the effective contribution to climate protection are addressed most frequently. The next step is to estimate the sustainably available biomass potential. This is based on three fundamental studies, which also serve as background information for a potential National Biomass Strategy (NABIS). This is followed by an assessment of the environmental impact of biomass production and utilisation. The status quo is compared with various scenarios for 2045. A significant reduction in negative environmental impacts can be seen primarily through a reduction in animal husbandry and meat consumption and an increase in plant-based foods, as well as through material biomass utilisation where possible and where there is potential instead of energy use. The environmental impact of biomass production can also be reduced by extensification in the agricultural sector and reduced wood extraction in the forestry sector.

The second part discusses proposed measures for the implementation of a sustainable bioeconomy. The analysis builds on measures from the recommendations of the Bioeconomy Council (BÖR), which are to be implemented by the end of 2023. In general, most of the recommendations lack concrete target values in order to be able to assess their potential contribution to the realisation of a sustainable bioeconomy. A gap analysis shows that the use of land is a central basis for biomass production and that competition for land is therefore a key factor that should be taken into account as part of a bioeconomy strategy.

The third part elaborates on how biomass flows can be prioritised towards sustainable biomass use. To this end, criteria and indicators are developed that cover the broad field of possible uses in the bioeconomy and do not solely address environmental aspects. The results nevertheless support the findings of the preceding analyses and confirm the principal advantageousness of material use, whereby different raw materials and products are differentiated in this step. The results of the prioritisation are transferred to an overall use concept in which prioritised raw material/product relationships are divided according to sectoral demand quantities. The result shows that, despite cautious demand forecasts, the availability of sustainable biomass cannot cover all demand.

Finally, proposals are made for measures and instruments to create the necessary framework conditions. These refer again to the results of the second part, but also include the conclusions of the other project results.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	12
Tabellenverzeichnis	16
Abkürzungsverzeichnis	19
Zusammenfassung.....	21
Summary	27
1 Einleitung.....	32
1.1 Hintergrund des Projektes	32
1.2 Ziele des Projektes	33
1.3 Aufbau des Projektes	34
2 Wechselwirkungen und Konflikten der Bioökonomie mit Umwelt- und Naturschutzbelangen...	35
2.1 Auswertung von Vorarbeiten (AP1.1)	35
2.1.1 Rahmen und Herangehensweise	35
2.1.2 Systematisierung der Studien	35
2.1.3 Aussagen bzgl. relevanter Themen.....	39
2.1.3.1 Umweltgerechte Biomassenutzung und – Produktion – Lessons learned	39
2.1.3.2 Wechselwirkung zu planetaren Grenzen – Lessons learned	42
2.1.3.3 Wechselwirkung zu den SDG's – Lessons learned	43
2.1.3.4 Wechselwirkung zum Klimaschutz (Kohlenstoffspeicherung, natürliche Senken) – Lessons learned	44
2.1.3.5 Wechselwirkung zum Biodiversitätsschutz/ Naturschutz – Lessons learned	46
2.1.3.6 Aspekte der Landnutzung / Landnutzungsänderung – Lessons learned	48
2.1.3.7 Weitere relevante Aspekte.....	50
2.1.3.8 Druck auf die biotische Ressource.....	52
2.1.4 Zusammenfassung der Literatúrauswertung.....	54
2.2 Die nachhaltig verfügbare Biomasse.....	57
2.2.1 Waldholz	59
2.2.2 Agrarische Biomasse	60
2.2.3 Biogene Abfälle und Reststoffe	60
2.3 Bewertung der Umweltwirkungen von Biomasseerzeugung und Biomassenutzung.....	61
2.3.1 Beschreibung der Bewertungssystematik	61
2.3.1.1 Umweltwirkungen	62
2.3.1.2 Rahmen der betrachteten Biomasseströme.....	62

2.3.1.3	Vorgehensweise bei der ökologischen Bilanzierung der Erzeugung der Biomasse (Anbau und Verarbeitung)	66
2.3.1.4	Nutzung (sowie Verbleib)	66
2.3.1.5	Die kontrafaktische Seite	66
2.3.2	Ergebnisse der Bewertung	68
2.3.2.1	Landwirtschaftliche Biomasse	68
2.3.2.2	Holz-Biomasse.....	88
2.3.2.3	Sonstige Abfall- und Reststoffe.....	99
2.3.2.4	Gesamtschau	103
2.3.3	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	109
3	Maßnahmenvorschläge für die Umsetzung einer nachhaltigen Bioökonomie.....	112
3.1	Hintergrund.....	112
3.2	Quellen und methodisches Vorgehen.....	112
3.2.1	Quellen für die Identifizierung von Maßnahmen	112
3.2.2	Methodisches Vorgehen	113
3.3	Bewertung von vorgeschlagenen Maßnahmen	115
3.3.1	Einordnung der Bewertbarkeit	115
3.3.2	Annahmen der Bewertung.....	116
3.3.3	Ergebnis der Bewertung	117
3.4	Fehlstellenanalyse.....	121
3.4.1	Minimierung der Konkurrenz um Fläche und Biomasse.....	121
3.4.1.1	Flächenkonkurrenzen innerhalb der Bioökonomie	121
3.4.1.2	Flächenkonkurrenzen zwischen der Bioökonomie und anderen Sektoren	122
3.4.2	Nachhaltige Erzeugung und Bereitstellung von Agrar- und Waldbiomasse	124
3.4.3	Wechselwirkung mit Zielen zur Stärkung der natürlichen Senken.....	125
3.4.4	Minimierung der negativen Wechselwirkungen zum Biodiversitätsschutz.....	126
3.5	Exkurs zu weiteren spezifischen Maßnahmen.....	127
3.5.1	Maßnahmen zu einer gesunden und nachhaltigen Ernährung	127
3.5.2	Maßnahmen zur Ausweitung des Holzbaus	128
3.5.3	Maßnahmen zur Suffizienz	130
3.6	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	134
4	Ansatzpunkte zur Priorisierung von Biomasseströmen und Biomassenutzungen.....	136
4.1	Vorgehensweise	136
4.1.1	Ausgangsbasis für Ansatzpunkte für einen Steuerungsmechanismus	136

4.1.1.1	Strategien zur Bioökonomie und damit verbundene Bereiche	136
4.1.1.2	Anknüpfungspunkte aus dem Konzept der planetaren Grenzen	139
4.1.1.3	Nachhaltigkeitsindikatoren für die Bioökonomie	139
4.1.1.4	Anwendungsbeispiel für Priorisierungs-Kriterien im Biomassekontext	141
4.1.1.5	Zusammenfassung der Ausgangsbasis.....	142
4.1.2	Notwendige Grundlage: Welches Biomassepotenzial steht nachhaltig zur Verfügung?.....	144
4.1.3	Besondere Betrachtung der Nahrungs- und Futtermittel	145
4.1.4	Geographischer Rahmen	148
4.2	Definition von Biomasseströmen und Biomassenutzungen	149
4.3	Vorschlag für einen Satz an Kriterien zur Priorisierung	153
4.3.1	Grundprinzipien und Detailtiefe der Bewertung anhand von Kriterien	153
4.3.2	Kriterien für die relevanten Themenkomplexe	157
4.3.2.1	Material- oder Rohstoffeffizienz.....	158
4.3.2.2	Klimaschutz	162
4.3.2.3	Substitutionsrelevanz des biogenen Produkts gegenüber erneuerbaren Alternativen	165
4.3.2.4	Themenkomplex Biodiversität & Ökosystemleistungen, Naturschutz sowie Landnutzung- und Landnutzungsänderung	165
4.3.2.5	Themenkomplex Gesundheit und Umwelt.....	168
4.3.2.6	Ökonomische Nachhaltigkeit.....	169
4.3.2.7	Kohärenz mit Nachhaltigkeitszielen anderer Strategien	170
4.3.3	Betrachtung der Ernährungssicherheit.....	172
4.3.4	Mögliche Kriteriensätze für die Bewertung der Art Biomasse	172
4.3.5	Vorschlag zur Operationalisierung der Kriterien	173
4.3.5.1	Operationalisierung der Kriterien für die Bewertung der Art Biomasse	174
4.3.5.2	Operationalisierung der Kriterien für die Priorisierung der Art Biomassenutzung	175
4.3.5.3	Mögliche Optionen	175
4.3.5.4	Vorschlag einer Vorgehensweise.....	176
4.4	Anwendung des Kriteriensatzes auf die Art der Biomasseströme	176
4.4.1	Waldholz	176
4.4.2	Agrarische Biomasse	177
4.4.3	Biogene Abfälle und Reststoffe	179
4.5	Anwendung von Priorisierungskriterien auf die Nutzung der Biomasse	179
4.5.1	Kriterien und Daten	179

4.5.1.1	Rohstoffeffizienz	179
4.5.1.2	Klimaschutz	183
4.5.1.3	Substitutionsrelevanz	190
4.5.1.4	Gesundheitsbezogene Umweltwirkungen.....	192
4.5.1.5	Ökonomische Nachhaltigkeit.....	194
4.5.1.6	Kohärenz mit Nachhaltigkeitszielen anderer Strategien	196
4.5.2	Auswertung für Waldholz	198
4.5.3	Auswertung für agrarische Biomasse	200
4.5.4	Auswertung für biogene Abfälle und Reststoffe	202
5	Erstellung eines Gesamtnutzungskonzepts.....	205
5.1	Bedarf an Biomasse.....	205
5.1.1	Status Quo der Biomassenutzung.....	205
5.1.2	Bedarf an stofflicher Nutzung.....	208
5.1.3	Bedarf an energetischer Nutzung	209
5.2	Nutzungskonzept für biogene Abfall- und Reststoffe.....	209
5.3	Nutzungskonzept für Waldholz.....	211
5.4	Nutzungskonzept für agrarische Biomasse.....	212
5.5	Zusammenfassung des Nutzungskonzepts	213
6	Vorschläge zu Maßnahmen und Instrumenten zur Gestaltung der notwendigen Rahmenbedingungen	218
6.1	Grundsätzliche Erkenntnis aus den vorliegenden Analysen	218
6.2	Rückschlüsse aus den Maßnahmenempfehlungen des BÖR	218
6.3	Rückschlüsse aus den Bewertungen der Umweltwirkungen der Biomassenutzung	220
6.4	Rückschlüsse aus der Anwendung von Priorisierungskriterien für die Biomassenutzung .	221
6.5	Empfehlungen zu Instrumenten	222
7	Quellenverzeichnis	225
Anhang		238
A	Detailinformationen zur Einordnung der vom BÖR vorgeschlagenen Maßnahmen.....	239
B	Daten zum Biomasseaufkommen	249
B.1	Agrarische Biomasse	249
B.2	Forstliche Biomasse	255
C	Daten und Ergebnisse zur Rohstoffeffizienz KRA	257
D	Daten und Ergebnisse zum Klimaschutz.....	259
E	Der Hemerobieansatz zur Bewertung von Flächen bezüglich ihrer ökologischen Wertigkeit....	262

E.1	Grundprinzipien des Hemerobieansatzes	262
E.2	Anwendung des Hemerobieansatzes auf Wald und Forstflächen	263
E.3	Anwendung des Hemerobieansatzes auf Landwirtschaftsflächen	265
E.3.1	Ackerland	266
E.3.2	Grünland	267

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Projektablaufplan der Arbeitspakete, Interaktion mit dem Bioökonomierat und Beitrag des Projekts zum Umsetzungsplan der Bundesregierung. Es sind auf verschiedenen Ebenen Iterationen vorgesehen, die nicht explizit dargestellt sind.	34
Abbildung 2:	Wortwolke der Schlagwörter	38
Abbildung 3:	Adressierung relevanter Themen in den Studien.....	39
Abbildung 4:	Technisches Potenzial der biogenen Abfälle und Reststoffe in Deutschland im Jahr 2015 differenziert nach stofflicher und energetischer Nutzung sowie mobilisierbarer Potenziale	61
Abbildung 5:	Systemrahmen für die Betrachtung der der Biomasseproduktion und Biomassenutzung in Deutschland...63	
Abbildung 6:	Geografische Rahmensetzung für die Betrachtung der territorialen Wirkungen der Biomasseproduktion (roter Rahmen).	64
Abbildung 7:	Systemgrenze für die Rahmensetzung zur Biomassenutzung in Deutschland inklusive der substituierten Systeme (kontrafaktisches System).	65
Abbildung 8	Flächenbelegung der Produktion von in Deutschland genutzter landwirtschaftlicher Biomasse, Zusammenfassung der Ergebnisse für den Status quo und die Szenarien für 2045	69
Abbildung 9:	Flächenbilanz der agrarischen Biomasse nach der zu Grund gelegten Systematik der Biomasseerzeugung und -nutzung in Deutschland.....	70
Abbildung 10	Flächenbelegung der Produktion von in Deutschland genutzter landwirtschaftlicher Biomasse, Status quo (Mittelwert über 2020-2022)	71
Abbildung 11	Flächenbelegung der Produktion von in Deutschland genutzter landwirtschaftlicher Biomasse, Szenario 2045 für BEPASO Bioökonomiewende.....	72
Abbildung 12	Flächenbelegung der Produktion von in Deutschland genutzter landwirtschaftlicher Biomasse, Szenario 2045 für KIS-2030 und LFS-3 (die Subszzenarien variieren nur in der Menge bei energetischer Nutzung)	73
Abbildung 13	Naturfernepotenzial durch Produktion von landwirtschaftlicher Biomasse, Status quo (2020-2022).....	74
Abbildung 14	Naturfernepotenzial durch Produktion von landwirtschaftlicher Biomasse, Szenario 2045 für KIS-2030 und LFS-3 (die Subszzenarien variieren nur in der Menge bei energetischer Nutzung)	75
Abbildung 15	Treibhauspotenzial durch Produktion und Nutzung von landwirtschaftlicher Biomasse, Zusammenfassung der Ergebnisse für den Status quo und die Szenarien 2045	76

Abbildung 16	Gutschriften für die Substitution und stofflichen und energetischen Produkten, sowie entgangener Nutzen durch alternative Senkenleistung der Fläche für den Status quo.77
Abbildung 17	Treibhauspotenzial durch Produktion und Nutzung von landwirtschaftlicher Biomasse, Status quo (2020-2022).....78
Abbildung 18	Treibhauspotenzial durch Produktion und Nutzung von landwirtschaftlicher Biomasse, Szenario 2045 für BEPASO79
Abbildung 19	Treibhauspotenzial durch Produktion und Nutzung von landwirtschaftlicher Biomasse, Szenario 2045 für KIS-2030 und LFS-3 (die Subszenarien variieren nur in der Menge bei energetischer Nutzung)79
Abbildung 20	PM2.5-Emission durch Produktion und Nutzung von landwirtschaftlicher Biomasse, Vergleich Status quo und die Szenarien für 2045.....80
Abbildung 21	PM2.5-Emission durch Produktion und Nutzung von landwirtschaftlicher Biomasse, Status quo82
Abbildung 22	PM2.5-Emission durch Produktion und Nutzung von landwirtschaftlicher Biomasse, Szenario 2045 – Szenario BEPASO Bioökonomiewende.....82
Abbildung 23	PM2.5-Emission durch Produktion und Nutzung von landwirtschaftlicher Biomasse, Szenario 2045 – Szenario KIS 2030/LFS-3.....83
Abbildung 24	Stickstoff- und -austrag durch die Landwirtschaft im Status quo84
Abbildung 25:	Saldo der landwirtschaftlichen Stickstoff-Gesamtbilanz in Bezug auf die landwirtschaftlich genutzte Fläche85
Abbildung 26	Stickstoff- und -austrag durch die Landwirtschaft im Szenario 204586
Abbildung 27:	Aufwand an Bewässerungswasser für den deutschen Konsum nach Herkunftsregion und Feldfruchtklasse (Herkunftsregion: Feldfruchtklasse), differenziert nach Wasserstress am Ort der Wasserentnahme87
Abbildung 28:	Vergleich des Wasserfußabdrucks für den Konsum und den Export Deutschlands in 2015 und 2030, unterteilt nach Wasserstressniveau am Ort der Wasserentnahme.....88
Abbildung 29	Waldfläche in Deutschland differenziert nach Naturferne (Hemerobie) nach BWI-3 und Flächenrucksack, Vergleich Status quo und Szenarien für 2045 (diese beziehen sich auf Status quo nach Flächenrucksack).....89
Abbildung 30	Waldfläche in Deutschland charakterisiert nach Naturfernepotenzial, auf Basis von BWI-3 sowie Flächenrucksack, Vergleich Status quo und Szenarien für 2045 (diese beziehen sich auf Status quo nach Flächenrucksack)90

Abbildung 31	Treibhausgaspotenzial durch die Holzwirtschaft im Status quo sowie die Szenarien für 2045	91
Abbildung 32	Energieerzeugung durch Holz im Status quo sowie die Szenarien für 2045.....	93
Abbildung 33	Treibhauspotenzial bzw. Emissionseinsparung durch die Nutzung von Holz zu stofflichen Zwecken (oberes Diagramm) und zu Energiezwecken (unteres Diagramm) für den Status quo sowie die Szenarien für 2045	96
Abbildung 34	Feinstaubemissionen durch die Holzwirtschaft im Status quo sowie in den Szenarien für 2045	97
Abbildung 35	Feinstaubemission bzw. Emissionseinsparung durch die Nutzung von Holz zu Energiezwecken im Status quo sowie die Szenarien für 2045.....	98
Abbildung 36	Treibhauspotenzial (Einsparung) durch die Nutzung von sonstigen Abfällen und Reststoffen zu Energiezwecken im Status quo sowie Szenario 2045.....	101
Abbildung 37	Feinstaubbelastung (netto) durch die Nutzung von sonstigen Abfällen und Reststoffen zu Energiezwecken im Status quo sowie Szenario 2045.....	102
Abbildung 38	Flächenbelegung (links) und Naturfernepotenzial (rechts) durch die Erzeugung und Nutzung von Biomasse (Gesamtschau) im Status quo sowie Szenario 2045.....	104
Abbildung 39	Treibhauspotenzial (Netto) durch die Erzeugung und Nutzung von Biomasse (Gesamtschau) im Status quo sowie die Szenarien für 2045.....	106
Abbildung 40	Treibhauspotenzial (Netto) durch die Erzeugung und Nutzung von Biomasse (Gesamtschau aufgeschlüsselt nach den einzelnen Sektoren und Nutzungsweisen) im Status quo sowie die Szenarien für 2045.....	107
Abbildung 41	Feinstaubbelastung in PM2.5-Äq. (Netto) durch die Erzeugung und Nutzung von Biomasse (Gesamtschau) im Status quo sowie Szenario 2045	108
Abbildung 42:	Vergleich der Flächenbelegung durch Bereitstellung der Energie für die Fahrleistung eines Pkw anhand Solarenergie (PV-Freiflächenanlage) und Biomasse (Biodiesel).....	124
Abbildung 43:	Auswertung von 19 Referenzarbeiten mit umweltbezogenen Nachhaltigkeitsindikatoren für die Bioökonomie in Bezug auf Übereinstimmung mit den Nachhaltigkeitsindikatoren der GBEP (GSI).....	141
Abbildung 44:	Nutzung von Biomasse in Deutschland – inklusive der importierten Warenströme und exklusive der Exporte	146
Abbildung 45:	Nutzung von primärer Biomasse und biogenen Restabfallstoffen in Deutschland – mit Export/Import-Saldo	146

Abbildung 46:	Kombinationsmatrix von Biomasseströmen und Biomassenutzungen	152
Abbildung 47:	Prinzip des „Rohstofferrhaltungs-Faktors“	162
Abbildung 48:	Zeitabhängiger Gewichtungsfaktor auf der Grundlage des kumulativen Strahlungsantriebs und ausgedrückt als globales Erwärmungspotenzial (GWP_{bio}) für verschiedene (5, 10, 20, 40, 60 und 80 a) temporäre Lagerungszeiten von Kohlenstoff in geernteten Holzprodukten	164
Abbildung 49:	Darstellung der punktweisen Beurteilung verschiedener Biomasseströme anhand von vier Kriterien – je höher der Wert, desto vorteilhafter.....	179
Abbildung 50:	Effizienz der Nutzung von Produkten aus (Wald)Holz anhand des effektiven $KRA_{biotisch}$ – für primäre Rohstoffe sowie Reststoffe, bzw. Sekundärrohstoffe unter Berücksichtigung von Rohstofferrhaltungs-Faktoren (Wo nicht anders vermerkt ist Waldholz der eingesetzte Rohstoff)	181
Abbildung 51:	Effizienz der Nutzung von agrarischen Produkten anhand des effektiven $KRA_{biotisch}$ – für primäre Rohstoffe sowie Reststoffe, bzw. Sekundärrohstoffe unter Berücksichtigung von Rohstofferrhaltungs-Faktoren	182
Abbildung 52:	Klimarelevanz der Nutzung von Produkten aus (Wald)Holz, für den Status quo unter Berücksichtigung von temporärer C-Speicherwirkung und Substitutionsleistung (Wo nicht anders vermerkt ist Waldholz der eingesetzte Rohstoff).....	185
Abbildung 53:	Klimarelevanz der Nutzung von Produkten aus (Wald)Holz, für das Jahr 2045 unter Berücksichtigung von temporärer C-Speicherwirkung und Substitutionsleistung (Wo nicht anders vermerkt ist Waldholz der eingesetzte Rohstoff).....	186
Abbildung 54:	Klimarelevanz der Nutzung von agrarischen Produkten, für den Status quo unter Berücksichtigung von temporärer C-Speicherwirkung und Substitutionsleistung (Wo nicht anders vermerkt ist Waldholz der eingesetzte Rohstoff).....	188
Abbildung 55:	Klimarelevanz der Nutzung von agrarischen Produkten, für das Jahr 2045 unter Berücksichtigung von temporärer C-Speicherwirkung und Substitutionsleistung (Wo nicht anders vermerkt ist Waldholz der eingesetzte Rohstoff).....	189
Abbildung 56:	Gesamtbewertung der Nutzungsoptionen von Waldholz (linkes Diagramm aggregiert, rechtes Diagramm differenziert)	200
Abbildung 57:	Gesamtbewertung der Nutzungsoptionen von primärer agrarischer Biomasse (linkes Diagramm aggregiert, rechtes Diagramm differenziert)	202

Abbildung 58:	Gesamtbewertung der Nutzungsoptionen von biogenen Abfall- und Reststoffen (linkes Diagramm aggregiert, rechtes Diagramm differenziert)	204
Abbildung 59:	Flächenbelegung für die in Deutschland produzierte und konsumierte Biomasse für die stoffliche und energetische Nutzung	207
Abbildung 60:	Verfügbarkeit der Rohstoffe und deren Zuordnung zu Produkten nach Priorisierungsschritten (links) und Bedarfe der Produkte und deren Abnahme nach Zuordnung von Rohstoffen (rechts).....	216
Abbildung 61:	Zusammenführung der Zuordnung einer Hemerobiekategorie nach (Fehrenbach et al. 2015) und des Klassifikationsschemas des WZL.....	265

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zusammenstellung der systematisierten Studien/Projekte.....	36
Tabelle 2:	Vorhandene Aussagen innerhalb der relevanten Themenbereiche (eine grüne Färbung bedeutet, dass hierfür in Kapitel 2.1.3 entsprechende Aussagen vorliegen)	54
Tabelle 3:	Flächennutzung und Biomassepotenziale in 2020 sowie in den Szenarien KIS 2030 (für das Jahr 2040), LFS 3 (für das Jahr 2045) und BEPASO-Wende (für das Jahr 2050).....	58
Tabelle 4:	Differenzierung nach Produktgruppen und Nutzungsweisen	68
Tabelle 5:	GWP-Korrekturfaktoren für verzögerte Freisetzung verschiedener stofflicher Holzprodukte	94
Tabelle 6:	Stoffliche Verwendung von Holz für den Status quo und die Szenarien für 2045, Substitute, Äquivalenz- und Emissionsfaktoren	95
Tabelle 7:	Ergebnisse der Bewertung von bewertbaren Maßnahmen der Stellungnahmen des Bioökonomierats (BÖR)	119
Tabelle 8:	Übersicht über Themen, Kriterien oder Indikatoren aus übergreifenden Strategien zur Bioökonomie bzw. damit verflochtenen Bereichen	138
Tabelle 9:	Zusammenstellung von Ansätzen zu Priorisierungs-Kriterien aus politischen Strategien/Normen ^{a)} sowie aus dem Konzept der Planetaren Grenzen ^{b)} und dem Anwendungsbeispiel BioRest ^{c)}	143
Tabelle 10:	Typisierung von Biomasseströmen.....	149
Tabelle 11:	Typisierung von Biomassenutzungen.....	150
Tabelle 12:	Zusammenstellung von Kriterien zur Prüfung der Kohärenz einer bestimmten Biomassenutzung mit übergreifenden Strategien und Rechtssetzungen.....	171

Tabelle 13:	Beurteilung verschiedener Biomasseströme anhand ausgewählter Kriterien	178
Tabelle 14:	Bewertung der Substitutionsrelevanz für verschiedene Arten der Biomassenutzung	191
Tabelle 15:	Bewertung gesundheitsbezogener Umweltwirkungen	193
Tabelle 16:	Bewertung der ökonomischen Nachhaltigkeit von Biomassenutzungen	195
Tabelle 17:	Bewertung der Kohärenz mit Nachhaltigkeitszielen anderer Strategien durch Biomassenutzungen.....	197
Tabelle 18:	Gesamtbewertung der Nutzungsoptionen von Waldholz.....	199
Tabelle 19:	Gesamtbewertung der Nutzungsoptionen von primärer agrarischer Biomasse.....	201
Tabelle 20:	Gesamtbewertung der Nutzungsoptionen von biogenen Abfall- und Reststoffen	203
Tabelle 21:	Zusammenfassung der in Deutschland erzeugten und genutzten agrarischen Biomasse (Status quo)	206
Tabelle 22:	Zusammenfassung der in Deutschland stofflich oder energetisch genutzten forstlichen Biomasse (Status quo).....	207
Tabelle 23:	Aufteilung des verfügbaren Potenzials an biogenen Abfall- und Reststoffe auf die priorisierten Nutzungen unter Angabe derer Bedarfe und der verbleibenden Verfügbarkeiten (Alle Angaben in Mio. t _{TM}).....	210
Tabelle 24:	Verbleibender Bedarf an Biomasse nach dem Aufbrauchen der biogenen Abfall- und Reststoffe.....	210
Tabelle 25:	Aufteilung des verfügbaren Potenzials an Waldholzbiomasse auf die priorisierten Nutzungen unter Angabe derer Bedarfe und der verbleibenden Verfügbarkeiten (Alle Angaben in Mio. t _{TM})	212
Tabelle 26:	Verbleibender Bedarf an Biomasse nach dem Aufbrauchen der Waldholzbiomasse.....	212
Tabelle 27:	Allgemeine Einordnung der Bewertbarkeit der vom BÖR vorgeschlagenen Maßnahmen. Kursive Schrift zeigt die bewertbaren Maßnahmen an.	239
Tabelle 28:	Allgemeine Einordnung der Bewertbarkeit der vom BÖR vorgeschlagenen Handlungsempfehlungen nach Themen.	240
Tabelle 29:	Detaillierte Ergebnisse der Bewertung von bewertbaren Maßnahmen der Stellungnahmen des BÖR	246
Tabelle 30:	Aufstellung zur Produktion (Anbau) von agrarischer Biomasse in Deutschland, (Status quo)	249
Tabelle 31:	Verwendung der in Deutschland erzeugten agrarischen Biomasse (Status quo)	251
Tabelle 32:	Importe von und Exporte nach Deutschland von agrarischen Biomassen (Status quo)	253

Tabelle 33:	Datengrundlage für die Aufstellung zur Produktion von forstlicher Biomasse in Deutschland255
Tabelle 34:	Übersicht der Biomassepotenziale aus Forsten - Status quo und Entwicklung zum Jahr 2045 hin256
Tabelle 35:	Daten zu KRA _{biotisch} sowie Rohstofferhaltungs-Faktoren für eine Auswahl an Produkten aus Biomasse.....257
Tabelle 36:	Daten zu THG-Emissionen der Herstellung und Nutzung von Produkten aus Biomasse sowie Referenzwerte zum einen auf fossiler oder mineralischer Basis für den Status quo.259
Tabelle 37:	Das Klassensystem der Hemerobieklassen mit indikativen Zuordnungen der Bandbreiten verschiedener Flächennutzungsarten263
Tabelle 38:	Kriterien und Messgrößen des Bewertungssystems für Ackerland.....267

Abkürzungsverzeichnis

BAU	Business as Usual (Waldmanagement)
BECCS	Bionergie mit Carbon Capture and Storage
BECCU	Bionergie mit Carbon Capture and Utilisation
BEHG	Brennstoffemissionshandelsgesetz
BHD	Brusthöhendurchmesser
BImSchV	Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes
BioSINK	UBA-Projekt „Auswirkung der energetischen Nutzung forstlicher Biomasse in Deutschland auf deutsche und internationale LULUCF-Senken“
BioWISE	UBA-Projekt „Wirkmechanismen von Regelungen und Förderinstrumenten des Bundes und der Länder auf den Einsatz fester Biomasse in der Wärmeerzeugung“
BLE	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung
BMA	Biomasseanlage
BÖ	Bioökonomie
BÖR	Bioökonomierat
BWI	Bundeswaldinventur
CCS	Carbon Capture and storage
CCU	Carbon Capture and utilisation
COC	Carbon Opportunity Cost
CO₂-Äq.	CO ₂ Äquivalente
CRCF	Carbon Removal Certification Framework
Destatis	Statistisches Bundesamt, Wiesbaden
DGE	Deutsche Gesellschaft für Ernährung
EEG	Erneuerbare Energie Gesetz
ERR	Einschlagsrückrechnung
ETS	Emission trading system (Emissionshandelssystem)
EU-ETS	EU-Emissionshandelssystem
FABio	Forestry and Agriculture Biomass Model
FNR	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe
FWL	Feuerungswärmeleistung
GAP	Gemeinsame Agrarpolitik (der EU)
GEG	Gebäudeenergiegesetz
GFA	Großfeuerungsanlagen (>1 MW)
ha	Hektar
HEFA	Hydrogenated esxters and fatty acids
HoLCA	LCA-Modell für Stoffströme der Holzwirtschaft
HVO	Hydrotreated vegetable oil
HWI	Holzwerkstoffindustrie

INFRO	Informationssysteme für Rohstoffe
IPCC	The Intergovernmental Panel on Climate Change
KIS-2030	Klimaschutzinstrumente-Szenario 2030
KUP	Kurzumtriebsplantagen
LFS-3	Landfristszenarien, dritte Fortschreibung
LULUCF	Land Use, Land Use Change and Forestry
m³_{swe}	Kubikmeter Holz in Einheit „solid wood equivalent“
MMS	Mit-Maßnahmen-Szenario
NABIS	Nationale Biomassestrategie
NawaRO	Nachwachsende Rohstoffe
NBÖ	Nationale Bioökonomiestrategie
o.R.	ohne Rinde
PHH	Private Haushalte
RED III	Erneuerbare-Energien-Richtlinie (<i>Renewable Energy Directive</i>)
RM	Raummeter
RME	Rapsölmethylester
SAF	Sustainable Aviation Fuel
SpS	CO ₂ -Speichersaldo
SRM	Schüttraummeter
THG	Treibhausgas
TM	Trockenmasse
TRAW	Total Resource Assessment of Wood
t_{TM}	Tonnen Trockenmasse
UBA	Umweltbundesamt, Dessau
Vfm	Vorratsfestmeter (Derbholz mit Rinde)
WRM	Wasch- und Reinigungsmittel
WZE	Waldzustandserhebungen

Zusammenfassung

Die Nationale Bioökonomiestrategie zielt darauf ab, die Abhängigkeit von fossilen Rohstoffen zu reduzieren und gleichzeitig den Schutz von Klima, Umwelt und Ressourcen sicherzustellen. Sie baut auf den Leitlinien der deutschen und internationalen Klimaziele sowie der UN-Nachhaltigkeitsziele (SDG) auf.

Die Bioökonomie umfasst die Produktion und Nutzung biologischer Ressourcen (wie landwirtschaftliche Erzeugnisse, Holz und biogene Abfälle) und verfolgt den Anspruch auf technische Innovationen, um den Rohstoffkreislauf effizienter und nachhaltiger zu gestalten.

Analyse der Umweltauswirkungen und Konflikte der Bioökonomie

Im ersten Teil des Vorhabens wird untersucht, wie die Nutzung von Biomasse auf verschiedene Umweltaspekte wie Landnutzung, Biodiversität und Klimaschutz wirkt. Ein zentrales Ergebnis ist, dass durch die Bioökonomie Konflikte zwischen Naturschutz und Ressourcennutzung entstehen können.

Der aktuelle Stand der Biomassenutzung zeigt, dass landwirtschaftliche Flächen intensiver genutzt werden und Wälder stärker für die Holzproduktion herangezogen werden. Dies birgt das Risiko, die Belastungsgrenzen der Ökosysteme zu überschreiten und die Biodiversität zu beeinträchtigen.

Der Bericht analysiert 32 Studien und zeigt, dass die größte Herausforderung in der Konkurrenz um begrenzte Ressourcen und Flächen liegt. Eine nachhaltige Bioökonomie müsse daher diesen Wettbewerb minimieren und die Ressourcenverfügbarkeit langfristig sicherstellen.

Szenarien für eine nachhaltige Biomassenutzung bis 2045

Um die langfristigen Auswirkungen der Bioökonomie zu prognostizieren und eine nachhaltige Entwicklung zu fördern, erstellt die Studie verschiedene Szenarien für die Nutzung und Bereitstellung von Biomasse bis 2045. Diese Szenarien helfen dabei, die komplexen Wechselwirkungen zwischen Biomassenutzung und Umweltbelastungen zu verstehen und die wirksamsten Wege zur Ressourcenschonung aufzuzeigen. Die Szenarien berücksichtigen dabei verschiedene politische, gesellschaftliche und wirtschaftliche Faktoren und entwickeln alternative Wege für eine umweltfreundliche Bioökonomie.

Einige der zentralen Szenarien sind:

- **Status-quo-Szenario:** Hier wird die derzeitige Nutzung und Bewirtschaftung von Biomasse beibehalten, ohne zusätzliche Maßnahmen für mehr Nachhaltigkeit. Es dient als Referenzpunkt und zeigt die Folgen auf, falls keine weiteren Schritte zur Verbesserung der Biomassenutzung unternommen werden. In diesem Szenario wird erwartet, dass die Nachfrage nach Biomasse, insbesondere für Energie und Tierhaltung, weiterhin steigt und dabei die Umweltbelastungen zunimmt. Dieses Szenario verdeutlicht, dass der gegenwärtige Ansatz auf lange Sicht nicht ökologisch tragbar ist und die planetaren Grenzen überschreiten könnte.
- **Szenario „BEPASO“ (Bioökonomiewende):** Dieses Szenario betont eine stärkere Umstellung auf pflanzliche Nahrungsmittel und eine Reduktion der Tierproduktion. Durch eine verstärkte Förderung pflanzlicher Ernährung und eine signifikante Senkung des Fleischkonsums würde weniger landwirtschaftliche Fläche für Futtermittel benötigt, was den Flächendruck reduziert und den ökologischen Fußabdruck senkt. Ein solcher Ansatz hätte erhebliche positive Auswirkungen auf das Klima, da die Emissionen aus der

Landwirtschaft gesenkt würden und Kohlenstoffemissionen durch den geringeren Bedarf an Weideland und Futterproduktion vermieden werden könnten.

- **Szenario „KIS-2030/LFS-3“ (Klimaschutzinstrumente 2030 und Langfristszenarien 3):** Diese Szenarien analysieren, welche Effekte verschiedene Klimaschutzmaßnahmen und Landnutzungskonzepte auf die Biomassenutzung haben könnten. Hier wird die Nutzung von Biomasse auf die energieeffizientesten und umweltschonendsten Anwendungen konzentriert. Es wird ein Schwerpunkt auf stoffliche Nutzung und weniger auf energetische Nutzung gelegt. Damit könnte der Gesamtbedarf an Biomasse reduziert und die Umweltwirkung durch geringere Emissionen und geringeren Ressourcenverbrauch gesenkt werden.

In jedem Szenario wird der Flächenbedarf und die potenziellen Treibhausgasemissionen ermittelt, um die jeweiligen Auswirkungen auf das Klima und die Biodiversität zu bewerten. Ein zentrales Ergebnis dieser Szenarienanalyse ist, dass die Biomassenutzung umso umweltfreundlicher wird, je stärker sie auf stoffliche Nutzung und pflanzliche Produkte ausgerichtet ist. Die Verringerung der energetischen Nutzung sowie eine Reduktion der Tierhaltung und des Fleischkonsums führen dabei zu den größten positiven Effekten.

Die Szenarien zeigen deutlich, dass die derzeitige Biomasseproduktion und -nutzung auf lange Sicht nicht ökologisch tragbar ist. Maßnahmen zur Veränderung der Produktion und eine gezielte Priorisierung der verschiedenen Biomassenutzungen sind unerlässlich, um die Umweltbelastung zu senken und die Nachhaltigkeitsziele zu erreichen.

Biomassepotenziale und Landnutzung

Ein entscheidender Aspekt der Bioökonomie ist die Schätzung und optimale Nutzung der verfügbaren Biomassepotenziale. Die Studie analysiert, wie viel Biomasse Deutschland nachhaltig zur Verfügung steht und welche Potenziale durch eine verbesserte Landnutzung und alternative Biomassequellen ausgeschöpft werden können. Dazu wurden drei Hauptquellen der Biomasse identifiziert:

- **Agrarische Biomasse:** Hierzu zählen alle landwirtschaftlichen Produkte, die für die Bioökonomie nutzbar sind, insbesondere Anbaukulturen wie Getreide, Mais und Futterpflanzen. Der Bericht betont, dass die landwirtschaftliche Biomasseproduktion oft mit erheblichen Umweltbelastungen verbunden ist, insbesondere durch den Einsatz von Düngemitteln und Pestiziden, die intensive Flächennutzung und die Auswirkungen auf die Biodiversität. Die Studie zeigt, dass eine Reduktion der Tierproduktion und ein stärkerer Fokus auf pflanzliche Nahrungsmittelproduktion den Bedarf an agrarischer Biomasse für Futtermittel verringern könnte, wodurch ein Teil der landwirtschaftlichen Fläche für umweltfreundlichere Nutzungen frei würde.
- **Forstliche Biomasse:** Die Wald- und Forstwirtschaft liefert Holz und andere forstliche Produkte, die für die stoffliche und energetische Nutzung von großer Bedeutung sind. Die Studie zeigt, dass eine nachhaltige Forstwirtschaft erforderlich ist, um die ökologische Stabilität der Wälder zu gewährleisten. Eine übermäßige Holzentnahme kann zur Schädigung von Waldökosystemen und zum Verlust an Biodiversität führen. Daher plädiert der Bericht für eine vorsichtige Waldbewirtschaftung, die den Schutz der Wälder und den Erhalt der Artenvielfalt priorisiert. Das Konzept der forstlichen Kaskadennutzung wird hier als potenziell effektiv beschrieben, da Holz so mehrfach genutzt und der Rohstoffverbrauch reduziert werden könnte.

- **Biogene Abfälle und Reststoffe:** Biogene Abfälle umfassen landwirtschaftliche Rückstände, Industrieabfälle und organische Haushaltsabfälle. Diese Abfallstoffe sind besonders wertvoll, da sie keine zusätzlichen Flächen oder Ressourcen beanspruchen und oft ungenutzt bleiben. Durch eine verstärkte Nutzung biogener Abfälle könnten große Mengen an Biomasse in die Wertschöpfungskette integriert werden, ohne die Umwelt weiter zu belasten. Die Studie empfiehlt, diese Abfälle stärker zu nutzen und die energetische Nutzung biogener Reststoffe nur als letzte Option in der Kaskadennutzung zu betrachten.

Um die nachhaltig verfügbare Biomasse zu quantifizieren, wurden verschiedene Schätzungen und Berechnungen durchgeführt, die auch Szenarien zur Veränderung des Biomassepotenzials umfassen. Ein bedeutendes Ergebnis ist, dass das **Biomassepotenzial in Deutschland begrenzt** ist und langfristig wahrscheinlich nicht alle Bedarfe in einer wachsenden Bioökonomie decken kann. Die Konkurrenz um Landflächen ist ein zentraler Konflikt, der die Nachhaltigkeit der Bioökonomie beeinträchtigen könnte. Daher muss der Einsatz von Biomasse sorgfältig priorisiert und reguliert werden, um zu verhindern, dass die steigende Nachfrage zu einem Verlust an biologischer Vielfalt und ökologischer Stabilität führt.

Der Bericht zeigt, dass eine Reduktion der Tierproduktion und ein verstärkter Einsatz von biogenen Abfällen erhebliche positive Effekte auf das Biomassepotenzial haben können. Durch die Freisetzung von Flächen, die derzeit für Futtermittel verwendet werden, könnten landwirtschaftliche Flächen für alternative und umweltfreundlichere Nutzungen bereitgestellt werden. Dies würde den Flächendruck verringern und gleichzeitig die Produktionskapazitäten für biogene Ressourcen in der Bioökonomie erweitern.

Bewertung und Priorisierung von Biomassennutzungen

In der Bioökonomie geht es darum, Biomasse so effizient wie möglich zu nutzen. Die Forschung betont, dass eine systematische Bewertung und Priorisierung notwendig ist, um sicherzustellen, dass Biomasse ressourcenschonend und umweltfreundlich eingesetzt wird. Das Berichtsteam entwickelt ein Bewertungsmodell, das auf einer Reihe von Nachhaltigkeitsindikatoren basiert, die die spezifischen Umweltauswirkungen und den Ressourcennutzen von Biomasse berücksichtigen. Wichtige Bewertungsindikatoren sind dabei:

- **Material- oder Rohstoffeffizienz:** Dieser Indikator misst, wie effizient Biomasse zur Herstellung von Produkten genutzt werden kann, und bevorzugt Anwendungen, bei denen möglichst wenig Rohstoffverlust entsteht.
- **Klimaschutzpotenzial:** Der Bericht analysiert das Potenzial unterschiedlicher Biomasseanwendungen zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen. Die stoffliche Nutzung, etwa in Form von Holz für den Bau, trägt zur langfristigen Kohlenstoffspeicherung bei und schneidet daher positiver ab als die direkte Verbrennung zur Energiegewinnung.
- **Substitutionspotenzial:** Biomasse kann fossile Rohstoffe in vielen Anwendungen ersetzen. Das Substitutionspotenzial wird daher als Maß für die Effizienz in der Vermeidung von Treibhausgasen genutzt, insbesondere dort, wo biogene Produkte die Nutzung nicht-nachhaltiger Alternativen (z. B. Kunststoff aus Erdöl) minimieren können.
- **Biodiversitätsschutz und Ökosystemleistungen:** Dieser Indikator bewertet, wie sich verschiedene Biomassennutzungen auf Biodiversität und Ökosysteme auswirken. Biomasse, die beispielsweise in intensiver Landwirtschaft mit hoher Pestizidbelastung produziert wird, kann schädlich für die Artenvielfalt sein, während extensiv bewirtschaftete Biomasse oder Reststoffe geringere Belastungen für Ökosysteme verursachen.

- **Gesundheit und Umwelt:** Hierbei wird berücksichtigt, welche Auswirkungen die Biomassenutzung auf die Luftqualität, Wasserressourcen und den menschlichen Gesundheitszustand hat. Negative Einflüsse, wie Feinstaubemissionen bei der energetischen Nutzung, werden bewertet und in den Vergleich einbezogen.
- **Wirtschaftliche Nachhaltigkeit:** Für eine langfristig stabile Bioökonomie muss auch die wirtschaftliche Rentabilität berücksichtigt werden. Projekte, die langfristig keine wirtschaftliche Stabilität bieten, wären für die nachhaltige Bioökonomie von geringerer Bedeutung.

Das Konzept der **Kaskadennutzung** erhält hierbei eine zentrale Rolle. Die Kaskadennutzung besagt, dass Biomasse in einem abgestuften Prozess genutzt werden sollte, beginnend mit der stofflichen Nutzung und anschließend, nach dem Ende des Produktlebenszyklus, für die energetische Verwertung. Zum Beispiel wird Holz zunächst in der Bauindustrie verwendet, wo es eine lange Lebensdauer und Speicherfunktion für Kohlenstoff hat. Nach dieser Nutzungsphase kann das gleiche Holz energetisch verwendet werden, etwa zur Energieerzeugung. Diese Reihenfolge erhöht die Gesamteffizienz und verringert den Druck auf Primärressourcen.

Maßnahmen zur Förderung einer nachhaltigen Bioökonomie

Der Bericht analysiert und erweitert Maßnahmen, die von der Bundesregierung und dem Bioökonomierat vorgeschlagen wurden, um den Übergang zu einer nachhaltigen Bioökonomie bis Ende 2023 zu fördern. Eine umfassende Überprüfung dieser Maßnahmen zeigte jedoch, dass viele Empfehlungen ohne konkrete Zielwerte formuliert wurden, was eine Bewertung der Effektivität erschwerte. Der Bericht schlägt daher vor, spezifische Kriterien und Zielwerte festzulegen, um die Umweltauswirkungen und die Erreichung der Bioökonomieziele zu überwachen.

Zentrale Maßnahmen umfassen:

- **Förderung der stofflichen Nutzung von Biomasse:** Vorrangig sollten biogene Rohstoffe in Anwendungen genutzt werden, die eine langfristige Speicherung ermöglichen, wie etwa in der Bauwirtschaft oder in langlebigen Konsumgütern. Dies vermeidet eine vorzeitige Emission von Kohlenstoff in die Atmosphäre und reduziert die Nachfrage nach energieintensiven Baustoffen wie Beton und Stahl.
- **Steigerung der Nutzung von biogenen Abfällen und Reststoffen:** Ein Schwerpunkt liegt auf der Maximierung der Nutzung von Abfällen und Reststoffen (z. B. landwirtschaftliche Rückstände, Holzabfälle und biogene Abfallprodukte aus der Lebensmittelindustrie). Diese Stoffe sind bereits vorhanden und verursachen keine zusätzlichen Umweltbelastungen. Ihre verstärkte Nutzung würde den Druck auf landwirtschaftliche Flächen und Primärwälder verringern.
- **Förderung der Anbaubiomasse und Extensivierung der Landwirtschaft:** Ein nachhaltiger Anbau von Biomasse setzt eine extensivere Nutzung landwirtschaftlicher Flächen voraus. Die landwirtschaftliche Produktion soll umweltverträglich gestaltet werden, etwa durch eine Reduktion von Pestiziden, die Förderung von Mischkulturen und einen verringerten Einsatz synthetischer Düngemittel.
- **Reduzierung der energetischen Nutzung von Biomasse:** Die energetische Nutzung von Biomasse steht unter Kritik, weil sie weniger effizient ist und die Ressourcen schnell verbraucht. Der Bericht schlägt vor, dass Biomasse nur für Energiezwecke verwendet werden soll, wenn keine anderen, umweltfreundlicheren Optionen bestehen.

- **Verringerung von Tierhaltung und Fleischkonsum:** Da ein Großteil der Biomasse für Futtermittel und die Tierhaltung verwendet wird, wäre eine Reduktion dieser Nutzung sowohl für den Klimaschutz als auch für die Ressourceneffizienz von Vorteil. Eine pflanzlichere Ernährung und eine Reduktion der Tierproduktion werden als positive Schritte zur Senkung des Biomasseverbrauchs hervorgehoben.

Die vorgeschlagenen Maßnahmen adressieren auch rechtliche und finanzielle Instrumente, die für die Umsetzung notwendig sind. Dazu gehören Regulierungen für die Nutzung von Flächen und Ressourcen sowie Förderprogramme, die Unternehmen und landwirtschaftliche Betriebe unterstützen, nachhaltigere Biomassenutzungen zu etablieren. Zusätzlich wird empfohlen, die Maßnahmen durch ein Monitoring-System zu begleiten, das regelmäßig die Fortschritte und Umweltwirkungen der Bioökonomie überprüft.

Erstellung eines Gesamtnutzungskonzepts und der Rolle eines Steuerungsmechanismus

Um sicherzustellen, dass Biomasse effizient und nachhaltig genutzt wird, entwickelt der Bericht ein **Gesamtnutzungskonzept**, das die verfügbaren Biomasseressourcen in einem kohärenten System strukturiert. Dieses Konzept legt fest, in welcher Reihenfolge und zu welchem Zweck Biomasse eingesetzt werden sollte, um die höchsten Nachhaltigkeitseffekte zu erzielen. Die zentrale Idee dabei ist, Biomasseanwendungen zu priorisieren, die den größten Nutzen für Klima und Umwelt bieten.

Das Gesamtkonzept ordnet die Biomassennutzung auf sektoraler Ebene. Das bedeutet, dass die verfügbaren Biomasseressourcen so aufgeteilt werden, dass Sektoren mit höherem Bedarf oder größerem Nachhaltigkeitspotenzial bevorzugt werden. Dies führt zu einer klaren Differenzierung zwischen den verschiedenen Anwendungen und Produkten. Für das Gesamtkonzept wurden spezifische Sektoren (z. B. Bau, Landwirtschaft, Energie) und ihre spezifischen Bedarfe an Biomasse definiert.

Die Umsetzung von **Steuerungsmechanismen** wird als entscheidend für die erfolgreiche Umsetzung des Gesamtnutzungskonzepts betrachtet. Der Steuerungsmechanismus dient dazu, die Biomassennutzung entlang der definierten Prioritäten zu lenken und sicherzustellen, dass der Ressourceneinsatz den Nachhaltigkeitszielen entspricht. Dabei werden verschiedene regulatorische und finanzielle Maßnahmen diskutiert, die diesen Mechanismus unterstützen könnten:

- **Regulierungen und Vorgaben zur Biomassennutzung:** Rechtliche Instrumente könnten den Vorrang bestimmter Nutzungsarten vor anderen festlegen und auf eine Reduktion der energetischen Nutzung von Biomasse hinwirken.
- **Förderprogramme und Anreizsysteme:** Subventionen und Förderprogramme könnten Unternehmen und Landwirte ermutigen, auf nachhaltigere Biomasseanwendungen umzustellen. Beispielsweise könnten steuerliche Vorteile oder Zuschüsse für Unternehmen gewährt werden, die auf stoffliche statt auf energetische Nutzung setzen.
- **Preismechanismen und Abgaben:** Die Einführung von Abgaben für bestimmte Biomassenutzungen (z. B. eine Steuer auf die energetische Nutzung) könnte ebenfalls als steuerndes Element wirken. Diese Abgaben könnten die Nachfrage in Richtung bevorzugter Anwendungen lenken und die wirtschaftliche Attraktivität umweltschonender Optionen erhöhen.

Zusätzlich wird der **Aufbau eines Monitoring-Systems** empfohlen, um die Fortschritte bei der Umsetzung der Bioökonomieziele regelmäßig zu bewerten. Dieses System soll die Nutzung von Biomasseressourcen, die Umweltwirkungen und den Beitrag zur Einhaltung der planetaren

Grenzen messen und sicherstellen, dass die Umsetzung des Gesamtnutzungskonzepts erfolgreich verläuft.

Insgesamt zielt das Gesamtnutzungskonzept darauf ab, ein langfristiges, kohärentes System zur Biomassenutzung zu etablieren, das den vielfältigen Anforderungen an eine nachhaltige Bioökonomie gerecht wird. Der Steuerungsmechanismus soll helfen, die begrenzten Biomasseressourcen so zu verwenden, dass der maximale ökologische Nutzen erzielt wird und die Belastungsgrenzen der Umwelt eingehalten werden.

Fazit und Empfehlungen

Die nachhaltige Bioökonomie stellt eine vielversprechende Möglichkeit dar, Umweltbelastungen zu verringern und gleichzeitig die Ressourceneffizienz zu steigern. Jedoch sind klare Leitlinien und Maßnahmen notwendig, um eine tatsächliche Nachhaltigkeit zu erreichen und die planetaren Grenzen nicht zu überschreiten.

Das Umweltbundesamt empfiehlt die Einführung eines Monitoring-Systems, das die Umweltauswirkungen der Bioökonomie regelmäßig überprüft und Anpassungen ermöglicht.

Die Förderung der stofflichen Nutzung von Biomasse sowie die Integration von Abfall- und Reststoffen in den Biomassekreislauf sind entscheidende Schritte zur Entlastung der Primärressourcen.

Langfristig wird empfohlen, die Produktion und Nutzung von Biomasse im Kontext der Bioökonomie so zu steuern, dass ökologische Belastungsgrenzen eingehalten werden und gleichzeitig innovative, ressourcenschonende Technologien und Nutzungsformen gefördert werden.

Summary

The National Bioeconomy Strategy aims to reduce dependence on fossil raw materials while ensuring the protection of the climate, environment and resources. It is based on the guidelines of German and international climate targets and the UN Sustainable Development Goals (SDGs).

The bioeconomy encompasses the production and use of biological resources (such as agricultural products, wood and biogenic waste) and pursues technical innovations to make the raw material cycle more efficient and sustainable.

Analysis of the environmental impacts and conflicts of the bioeconomy

The first part of the project examines how the use of biomass affects various environmental aspects such as land use, biodiversity and climate protection. A key finding is that the bioeconomy can give rise to conflicts between nature conservation and resource use.

The current state of biomass use shows that agricultural land is being used more intensively and forests are being exploited more heavily for timber production. This carries the risk of exceeding the carrying capacity of ecosystems and impairing biodiversity.

The report analyses 32 studies and shows that the greatest challenge lies in competition for limited resources and land. A sustainable bioeconomy must therefore minimise this competition and ensure the long-term availability of resources.

Scenarios for sustainable biomass use until 2045

In order to predict the long-term effects of the bioeconomy and promote sustainable development, the study creates various scenarios for the use and provision of biomass until 2045. These scenarios help to understand the complex interactions between biomass use and environmental impacts and to identify the most effective ways to conserve resources. The scenarios take into account various political, social and economic factors and develop alternative paths for an environmentally friendly bioeconomy.

Some of the key scenarios are:

- ▶ **Status quo scenario:** This scenario maintains the current use and management of biomass without additional measures for greater sustainability. It serves as a reference point and shows the consequences if no further steps are taken to improve biomass use. In this scenario, demand for biomass, especially for energy and animal husbandry, is expected to continue to rise, increasing environmental impacts. This scenario illustrates that the current approach is not ecologically sustainable in the long term and could exceed planetary boundaries.
- ▶ **BEPASO (Bioökonomiewende / bioeconomy transition) scenario:** This scenario emphasises a greater shift towards plant-based foods and a reduction in animal production. By promoting plant-based diets and significantly reducing meat consumption, less agricultural land would be needed for feed, which would reduce land pressure and lower the ecological footprint. Such an approach would have a significant positive impact on the climate, as emissions from agriculture would be reduced and carbon emissions could be avoided due to the lower demand for pasture land and feed production.
- ▶ **Scenario 'KIS-2030/LFS-3' (Klimaschutzinstrumente / Climate Protection Instruments 2030 and Langfristszenarien / Long-Term Scenarios 3):**
These scenarios analyse the effects that various climate protection measures and land use concepts could have on biomass use. Here, the use of biomass is concentrated on the most

energy-efficient and environmentally friendly applications. The focus is on material use rather than energy use. This could reduce the overall demand for biomass and lower the environmental impact through lower emissions and reduced resource consumption.

In each scenario, the land requirement and potential greenhouse gas emissions are determined in order to assess the respective impacts on the climate and biodiversity. A key finding of this scenario analysis is that the more biomass use is geared towards material use and plant products, the more environmentally friendly it becomes. Reducing energy use and cutting back on livestock farming and meat consumption have the greatest positive effects.

The scenarios clearly show that current biomass production and use are not ecologically sustainable in the long term. Measures to change production and a targeted prioritisation of the various uses of biomass are essential in order to reduce environmental impact and achieve sustainability goals.

Biomass potential and land use

A crucial aspect of the bioeconomy is the estimation and optimal use of available biomass potential. The study analyses how much biomass is sustainably available in Germany and what potential can be exploited through improved land use and alternative biomass sources. To this end, three main sources of biomass were identified:

- ▶ **Agricultural biomass:** This includes all agricultural products that can be used for the bioeconomy, in particular crops such as cereals, maize and fodder plants. The report emphasises that agricultural biomass production is often associated with significant environmental impacts, in particular through the use of fertilisers and pesticides, intensive land use and impacts on biodiversity. The study shows that reducing animal production and focusing more on plant-based food production could reduce the demand for agricultural biomass for animal feed, freeing up some agricultural land for more environmentally friendly uses.
- ▶ **Forest biomass:** Forestry and forest management provide wood and other forest products that are of great importance for material and energy use. The study shows that sustainable forestry is necessary to ensure the ecological stability of forests. Excessive timber harvesting can damage forest ecosystems and lead to a loss of biodiversity. The report therefore advocates cautious forest management that prioritises the protection of forests and the preservation of biodiversity. The concept of cascading use of forest resources is described here as potentially effective, as it would allow wood to be used multiple times and reduce raw material consumption.
- ▶ **Biogenic waste and residues:** Biogenic waste includes agricultural residues, industrial waste and organic household waste. These waste materials are particularly valuable as they do not require additional land or resources and often remain unused. Increased use of biogenic waste could integrate large quantities of biomass into the value chain without further burdening the environment. The study recommends making greater use of this waste and considering the use of biogenic residues for energy only as a last resort in cascade use.

In order to quantify the sustainably available biomass, various estimates and calculations were carried out, which also include scenarios for changes in biomass potential. A significant finding is that the **biomass potential in Germany is limited** and is unlikely to meet all the needs of a growing bioeconomy in the long term. Competition for land is a key conflict that could undermine the sustainability of the bioeconomy. Therefore, the use of biomass must be carefully

prioritised and regulated to prevent rising demand from leading to a loss of biodiversity and ecological stability.

The report shows that reducing animal production and increasing the use of biogenic waste can have significant positive effects on biomass potential. By freeing up land currently used for animal feed, agricultural land could be made available for alternative and more environmentally friendly uses. This would reduce pressure on land while expanding production capacity for biogenic resources in the bioeconomy.

Assessment and prioritisation of biomass uses

The bioeconomy is about using biomass as efficiently as possible. Research emphasises that systematic assessment and prioritisation is necessary to ensure that biomass is used in a resource-efficient and environmentally friendly manner. The report team is developing an assessment model based on a set of sustainability indicators that take into account the specific environmental impacts and resource benefits of biomass. Important assessment indicators include:

- ▶ **Material or raw material efficiency:** This indicator measures how efficiently biomass can be used to manufacture products and favours applications that result in as little raw material loss as possible.
- ▶ **Climate protection potential:** The report analyses the potential of different biomass applications to reduce greenhouse gas emissions. Material use, for example in the form of wood for construction, contributes to long-term carbon storage and therefore scores more positively than direct combustion for energy production.
- ▶ **Substitution potential:** Biomass can replace fossil raw materials in many applications. The substitution potential is therefore used as a measure of efficiency in avoiding greenhouse gases, especially where biogenic products can minimise the use of non-sustainable alternatives (e.g. plastic made from petroleum).
- ▶ **Biodiversity protection and ecosystem services:** This indicator assesses how different uses of biomass affect biodiversity and ecosystems. Biomass produced in intensive agriculture with high pesticide use, for example, can be harmful to biodiversity, while extensively farmed biomass or residues cause less stress on ecosystems.
- ▶ **Health and environment:** Here, the impact of biomass use on air quality, water resources and human health are taken into account. Negative impacts, such as particulate matter emissions from energy use, are assessed and included in the comparison.
- ▶ **Economic sustainability:** Economic profitability must also be taken into account to ensure a stable bioeconomy in the long term. Projects that do not offer long-term economic stability would be of lesser importance for a sustainable bioeconomy.

The concept of **cascade use** plays a central role here. Cascade use means that biomass should be used in a step-by-step process, starting with material use and then, at the end of the product life cycle, for energy recovery. For example, wood is first used in the construction industry, where it has a long service life and acts as a carbon store. After this phase of use, the same wood can be used for energy, for example to generate electricity. This sequence increases overall efficiency and reduces pressure on primary resources.

Measures to promote a sustainable bioeconomy

The report analyses and expands on measures proposed by the Federal Government and the Bioeconomy Council to promote the transition to a sustainable bioeconomy by the end of 2023. However, a comprehensive review of these measures showed that many recommendations were formulated without specific target values, making it difficult to assess their effectiveness. The report therefore proposes setting specific criteria and target values to monitor environmental impacts and the achievement of bioeconomy goals.

Key measures include:

- ▶ **Promoting the material use of biomass:** Priority should be given to using biogenic raw materials in applications that enable long-term storage, such as in the construction industry or in durable consumer goods. This avoids premature carbon emissions into the atmosphere and reduces demand for energy-intensive building materials such as concrete and steel.
- ▶ **Increasing the use of biogenic waste and residues:** One focus is on maximising the use of waste and residues (e. g. agricultural residues, wood waste and biogenic waste products from the food industry). These materials are already available and do not cause any additional environmental impact. Their increased use would reduce pressure on agricultural land and primary forests.
- ▶ **Promoting cultivated biomass and extensification of agriculture:** Sustainable biomass cultivation requires more extensive use of agricultural land. Agricultural production should be made environmentally friendly, for example by reducing pesticides, promoting mixed cropping and reducing the use of synthetic fertilisers.
- ▶ **Reducing the use of biomass for energy:** The use of biomass for energy is criticised because it is less efficient and quickly depletes resources. The report suggests that biomass should only be used for energy purposes if there are no other, more environmentally friendly options.
- ▶ **Reducing livestock farming and meat consumption:** Since a large proportion of biomass is used for animal feed and livestock farming, reducing this use would be beneficial for both climate protection and resource efficiency. A more plant-based diet and a reduction in animal production are highlighted as positive steps towards reducing biomass consumption.

The proposed measures also address the legal and financial instruments necessary for implementation. These include regulations on land and resource use, as well as support programmes that help companies and farms establish more sustainable uses of biomass. In addition, it is recommended that the measures be accompanied by a monitoring system that regularly reviews the progress and environmental impact of the bioeconomy.

Creation of an overall utilisation concept and the role of a control mechanism

To ensure that biomass is used efficiently and sustainably, the report develops an **overall utilisation concept** that structures the available biomass resources into a coherent system. This concept specifies the order and purpose for which biomass should be used in order to achieve the highest sustainability effects. The central idea here is to prioritise biomass applications that offer the greatest benefits for the climate and the environment.

The overall concept organises biomass use at the sectoral level. This means that the available biomass resources are allocated in such a way that sectors with higher demand or greater sustainability potential are given preference. This leads to a clear differentiation between the

various applications and products. Specific sectors (e. g. construction, agriculture, energy) and their specific biomass needs were defined for the overall concept.

In addition, the establishment of **steering mechanisms** is considered crucial for the successful implementation of the overall utilisation concept. The steering mechanism serves to guide biomass use along the defined priorities and ensure that resource use is in line with sustainability goals. Various regulatory and financial measures that could support this mechanism are discussed:

- ▶ **Regulations and guidelines on biomass use:** Legal instruments could give priority to certain types of use over others and work towards reducing the use of biomass for energy.
- ▶ **Support programmes and incentive systems:** Subsidies and support programmes could encourage companies and farmers to switch to more sustainable biomass applications. For example, tax advantages or grants could be granted to companies that focus on material rather than energy use.
- ▶ **Pricing mechanisms and levies:** The introduction of levies on certain types of biomass use (e. g. a tax on energy use) could also act as a steering mechanism. These levies could steer demand towards preferred applications and increase the economic attractiveness of environmentally friendly options.

In addition, the **establishment of a monitoring system** is recommended in order to regularly assess progress in implementing the bioeconomy objectives. This system should measure the use of biomass resources, the environmental impacts and the contribution to compliance with planetary boundaries, and ensure that the implementation of the overall utilisation concept is successful.

Overall, the overall utilisation concept aims to establish a long-term, coherent system for biomass use that meets the diverse requirements of a sustainable bioeconomy. The control mechanism should help to use limited biomass resources in such a way that maximum ecological benefits are achieved and the limits of environmental capacity are respected.

Conclusion and recommendations

The sustainable bioeconomy represents a promising opportunity to reduce environmental impacts while increasing resource efficiency. However, clear guidelines and measures are needed to achieve true sustainability and not exceed planetary boundaries.

The Federal Environment Agency recommends the introduction of a monitoring system that regularly reviews the environmental impact of the bioeconomy and allows for adjustments.

Promoting the material use of biomass and integrating waste and residual materials into the biomass cycle are crucial steps towards reducing the burden on primary resources.

In the long term, it is recommended that the production and use of biomass in the context of the bioeconomy be managed in such a way that ecological limits are respected while promoting innovative, resource-efficient technologies and forms of use.

1 Einleitung

1.1 Hintergrund des Projektes

Der Nationalen Bioökonomie-Strategie (NBÖ) zufolge umfasst das Konzept der Bioökonomie (BÖ) „die Erzeugung, Erschließung und Nutzung biologischer Ressourcen, Prozesse und Systeme, um Produkte, Verfahren und Dienstleistungen in allen wirtschaftlichen Sektoren im Rahmen eines zukunftsfähigen Wirtschaftssystems bereitzustellen“ (Bundesregierung 2020, S.10). Dieses Konzept wurde in den vergangenen Jahren als Möglichkeit der Defossilisierung dargestellt, um den „Klimaschutz zu stärken und Rohstoffabhängigkeiten von Industrieländern zu mindern, eine wachsende Weltbevölkerung zu ernähren, Innovation und Wachstum anzuregen und dabei Einkommenschancen in ländlichen Regionen der Industriestaaten wie auch in biomasseproduzierenden Ländern des Globalen Südens zu schaffen“ (Möller et al. 2020, S.13). Der Bioökonomie ging im Grunde der „Aufschwung“ der Bioenergie als Lösungsnarrativ für Klimaschutz voraus. Innerhalb des letzten Jahrzehnts wurden jedoch die erheblichen Nachteile, die mit Energie aus Biomasse verbunden sind, erkannt.

Die Bioökonomie und die ihr zu Grunde liegenden Verfahren sowie die Nutzung von Flächen führen nicht per se zu einer Verbesserung der Nachhaltigkeit oder gar zu einer Einhaltung planetarer Belastungsgrenzen. Im Gegenteil, eine Ausweitung der Bioökonomie geht mit bedeutenden Risiken in Bezug auf zentrale ökologische Problemlagen einher. Zu nennen ist hier beispielsweise die angestrebte Steigerung der Produktion in der Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei und Aquakultur, die relevante Zielkonflikte zu fast allen planetaren Belastungsgrenzen aufweist (Möller et al. 2020). Produktionssteigerungen sind mit zusätzlicher Flächennutzung, Ressourcenverbräuchen und Emissionen verbunden, die unmittelbar negativ auf Klimawandel, Intaktheit der Biosphäre, Landnutzungsänderungen sowie Stickstoff- und Phosphorflüsse wirken. Auch in Bezug auf die weiteren planetaren Belastungsgrenzen sind eher Zielkonflikte als Synergien zu erwarten (Möller et al. 2020).

Mit der Bioökonomie, sprich mit der Erweiterung des Spektrums vom Bioenergie-Fokus auf eine gesamtheitliche Biomasseverwendung, geht die Erwartung einher, das Problem der konkurrierenden Nutzung zu lösen indem gewisse Biomasseverwendungen priorisiert werden sollen. Beispielsweise wird eine nicht-energetische Biomassenutzung als höherwertig eingeschätzt. Für die essenziell notwendige Nahrungsmittelproduktion gilt dies im Grunde unwidersprochen. Doch auch für die stoffliche Nutzung wird insbesondere die höhere Wertschöpfung und eine höhere Ressourceneffizienz vorausgesetzt (Carus et al. 2014). Hinzu kommt außerdem die Möglichkeit der Kaskadennutzung, wodurch der Druck auf die primären Rohstoffe zusätzlich entlastet werden kann (Fehrenbach et al. 2017a).

Doch letztlich verknüpfen sich auch mit der Bioökonomie eine Reihe von Kritikpunkten und ethischen Herausforderungen. Sie beziehen sich beispielsweise auf die Nachhaltigkeitswirkungen industrieller, Input-intensiver Landwirtschaft und Gentechnik, deren Nutzung sich im Rahmen der Bioökonomie ausweiten wird. Auch hier besteht weiterhin der Bedarf an Biomasse, was gleichfalls zu steigendem Nutzungsdruck führt. Damit wirft sich die Frage auf, ob es angemessen ist, komplexe Probleme wie Klimawandel und Ernährungssicherung mit überwiegend technischen Ansätzen („technical fix“) lösen zu wollen (Möller et al. 2020).

In jedem Fall ist es angemessen und notwendig, die Vielfalt an Biomassenutzungen, wie sie die Bioökonomie anbietet, nach ihren Nachhaltigkeitswirkungen zu beurteilen. Schließlich gibt die NBÖ vor, zur Sicherung der Ernährung und der Rohstoffversorgung der Wirtschaft, dem Klima- und Ressourcenschutz, der Fortführung der Energiewende sowie der Kreislaufwirtschaft

beizutragen. Erfolge sollte dies anhand von Maßnahmen, die im sogenannten Umsetzungsplan bis Ende 2022 durch den Bioökonomierat (BÖR) und auch unter Einbindung der Zivilgesellschaft (erweitertes Gremium) formuliert werden sollte. Mit diesem Plan „sollen insbesondere auch Konflikte thematisiert werden, die bei der Umsetzung der mit der Bioökonomie verknüpften Nachhaltigkeitsziele auftreten können“ (Bundesregierung 2020, S.50). Leider lag der Umsetzungsplan zum Zeitpunkt der Berichterstellung noch nicht vor.

Die NBÖ 2020 endet im Übrigen mit der Verpflichtung, alle Maßnahmen der Bundesregierung in den kommenden Jahren auf den unterschiedlichen Feldern der Bioökonomie auf ihre Wirksamkeit hin zu kontrollieren. Dies soll insbesondere durch die Fortschreibung des Umsetzungsplans erfolgen.

Das heißt, die Maßnahmen zur Umsetzung einer nachhaltigen Bioökonomie müssen in erster Linie überprüft werden, ob sie angesichts der beschriebenen Konfliktfelder überhaupt der Nachhaltigkeit entsprechen. Dieser Anspruch klingt implizit in den Ausführungen der NBÖ mit, kommt aber an keiner Stelle explizit bspw. anhand von Kriterien zum Ausdruck. Es ist daher nachvollziehbar, dass das Umweltressort sich der Aufgabe annimmt, sicherzustellen, dass in die Entwicklung der Maßnahmen die Anforderungen des Umwelt- und Naturschutzes explizit einfließen.

Explizit geht die NBÖ auf die Frage der Priorisierung ein. Mit dem im Rahmen des SYMOBIO-Projekts entwickelten Ansatz zum Monitoring anhand von verschiedenen ökologischen Fußabdrücken liegt ein erster Weg zur Quantifizierung von Umwelteffekten der konkreten Ist-Situation der Nutzung der Biomasse, mithin der existierenden Bioökonomie vor. Die NBÖ konstatiert die begrenzte Verfügbarkeit von Biomasse und spricht sich mit Bezugnahme auf diese ökologischen Indikatoren für eine Bewertung und Priorisierung der Biomasseströme und ihrer Nutzungsarten bis hin zu einer politischen Steuerung aus. Dies ist ein ebenso zu begrüßender wie auch hoch ambitionierter Anspruch. Er setzt einen komplexen Analyse- und Bewertungsvorgang und am Ende einen Steuerungsmechanismus voraus. Auch an dieser Stelle ist der Kompetenzbereich des Umweltressorts gefragt.

Es stellen sich somit folgende drei Aufgaben:

1. Die Konfliktpotenziale von Entwicklungen der Bioökonomie mit dem Umwelt- und Naturschutz sind offen und transparent analytisch darzulegen.
2. Die möglichen konkreten Maßnahmen für die Umsetzung einer nachhaltigen Bioökonomie müssen explizit beschrieben und hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit bewertet werden.
3. Der Umgang mit der verfügbaren Biomasse muss nach klarer Priorität für die besser nachhaltige Nutzungsweise ausgerichtet werden, bis hin zur Frage, wie eine Lenkung in diese Richtung umgesetzt werden könnte.

1.2 Ziele des Projektes

Zur Durchsetzung von Nachhaltigkeitszielen in Maßnahmen zur Umsetzung einer nachhaltigen Bioökonomie hat das Umweltressort eine Leitfunktion inne. Dieses Forschungsvorhaben soll daher eine wissenschaftliche Unterstützung und Begleitung des Umweltressorts (BMUKN/UBA) bilden.

Ziel des Vorhabens ist es mit Blick auf die oben genannten drei Kernaufgaben den Stand der Wissenschaft zu folgenden konkreten Fragestellungen aufzuarbeiten:

1. Was zeichnet eine umweltgerechte Biomassenutzung und Biomasseproduktion aus? Wie ist sie in Einklang zu bringen mit den planetaren Grenzen und den Sustainable Development Goals (SDG), insbesondere dem Schutz von Klima und Biodiversität?

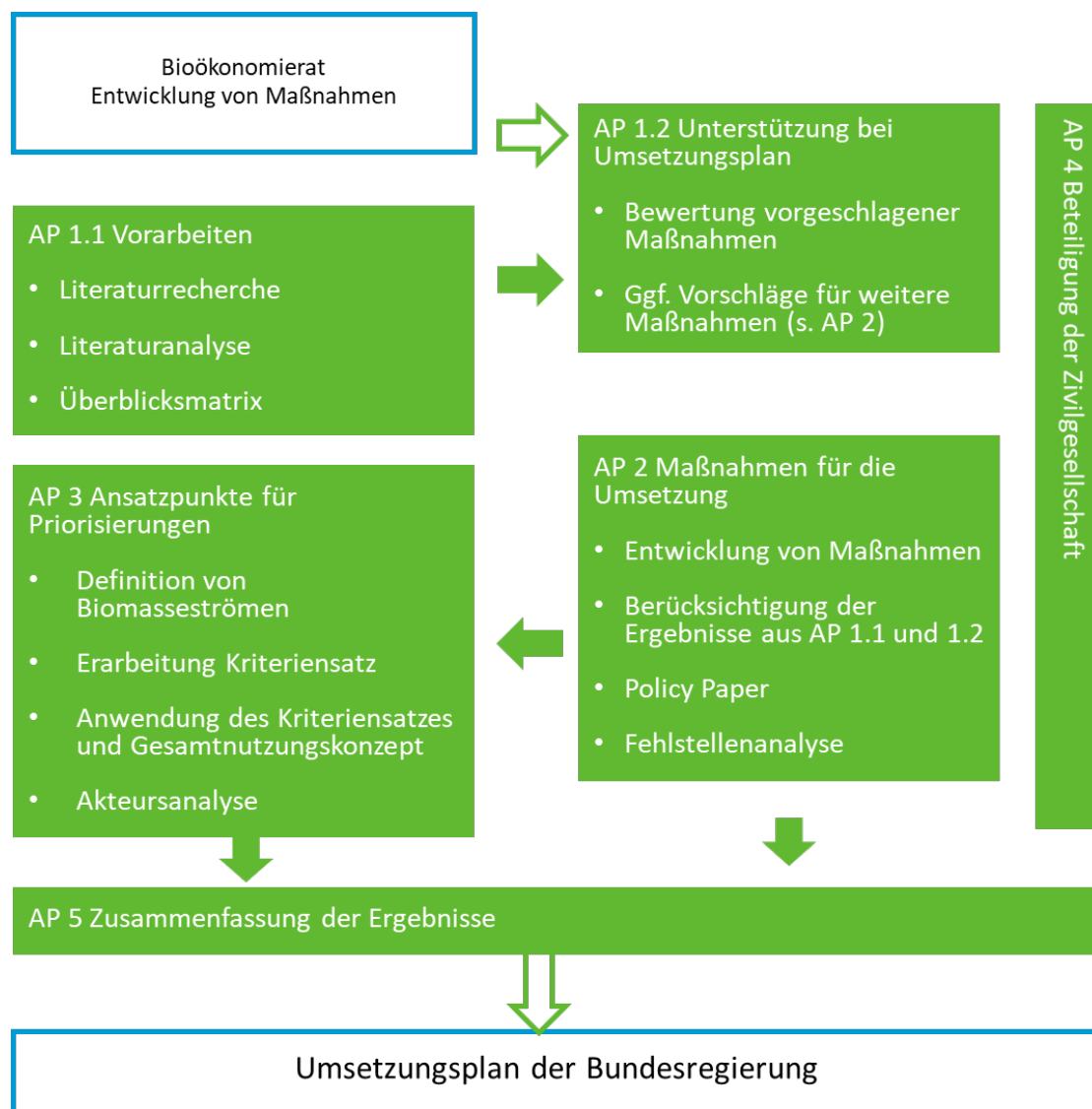
2. Was wären Maßnahmen für die Umsetzung einer nachhaltigen Bioökonomie unter besonderer Berücksichtigung von umwelt- und naturschutzrelevanten Aspekten?
3. Wie kann eine Priorisierung von Biomasseströmen in Richtung nachhaltiger Biomassenutzungen gestaltet werden? Welche Kriterien und Indikatoren sind dafür geeignet, um das breite Feld der Nutzungsmöglichkeiten in der Bioökonomie abzudecken?

Die Bearbeitung erfolgt anhand von Desktop-Analysen, Literaturrecherchen und eigenen Analysen und Konzeptentwicklungen.

1.3 Aufbau des Projektes

Abbildung 1 zeigt die verschiedenen Komponenten des Projekts und ihre Verbindungen untereinander. Insgesamt umfasst das Projekt fünf Arbeitspakete, die jeweils von ifeu und Öko-Institut bearbeitet werden. Die finalen Erkenntnisse sollen letztendlich in den Umsetzungsplan der Bundesregierung integriert werden.

Abbildung 1: Projektablaufplan der Arbeitspakete, Interaktion mit dem Bioökonomierat und Beitrag des Projekts zum Umsetzungsplan der Bundesregierung. Es sind auf verschiedenen Ebenen Iterationen vorgesehen, die nicht explizit dargestellt sind.



2 Wechselwirkungen und Konflikten der Bioökonomie mit Umwelt- und Naturschutzbelangen

In diesem Kapitel sind die Ergebnisse von AP1.1 (Vorarbeiten), von AP A2 (das nachhaltig verfügbar Biomassepotenzial) sowie von AP A3 (Bewertung der Umweltwirkungen von Biomasseerzeugung und Biomassenutzung) zusammengefasst.

2.1 Auswertung von Vorarbeiten (AP1.1)

2.1.1 Rahmen und Herangehensweise

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes werden die aktuellen Diskussionen zu Wechselwirkungen und Konflikten der Bioökonomie mit Umwelt- und Naturschutzbelangen dargestellt. Darüber hinaus werden Verbindungen zu den Zielen der Nachhaltigkeitsstrategie herausgearbeitet. Ein besonderer Schwerpunkt bei der Auswahl der Studien liegt auf der folgenden, nicht abschließenden Liste an Themenbereichen:

- ▶ Umweltgerechte Biomassenutzung und Biomasseproduktion
- ▶ Wechselwirkungen innerhalb des Konzepts der planetaren Grenzen oder vergleichbarer Konzepte
- ▶ Wechselwirkungen zu den Zielen der Agenda 2030 (Sustainable Development Goals)
- ▶ Wechselwirkungen zum Klimaschutz (THG-Minderung, Kohlenstoffspeicherung, natürliche Senken)
- ▶ Wechselwirkungen zum Biodiversitätsschutz / Naturschutz
- ▶ Aspekte der Landnutzung / Landnutzungsänderung

Anhand einer Bewertungsmatrix werden die Studien entlang der relevanten Themenbereiche systematisiert, um eine Auswahl zu treffen für eine vertiefte Auswertung. Dies ergab 32 Schlüsselpublikationen, die das Spektrum der relevanten Themenbereiche umfassen. Es handelt sich überwiegend um primär Überblicksstudien.

Die für die vertiefte Untersuchung ausgewählten Studien wurden auf die drei folgenden Punkte hin ausgewertet:

1. Welche Aussagen treffen die Studien bzgl. der relevanten Themenbereiche?
2. Welche weiteren Aspekte der Studien sind für eine Bioökonomiestrategie relevant?
3. Inwieweit adressieren die Studien den Aspekt einer Steigerung der Nutzung biotischer Ressourcen vor dem Hintergrund eines Ausbaus der Bioökonomie und wie ist dieser kritisch zu bewerten?

2.1.2 Systematisierung der Studien

Insgesamt werden 32 Studien/Projekte mit der Bewertungsmatrix systematisiert. Diese Anzahl setzt sich zusammen aus:

- a. 21 Studien aus dem Angebot
- b. neun Studien aus der Desktoprecherche

c. zwei Studien von UBA empfohlen

In Tabelle 1 wird eine Übersicht über die systematisierten Studien gegeben. Die für die genauere Analyse ausgewählten Studien sind markiert (X).

Tabelle 1: Zusammenstellung der systematisierten Studien/Projekte

Titel der Studie oder des Projekts	Quelle	Auswahl für genauere Analyse
Future transitions for the bioeconomy towards sustainable development and climate-neutral economy- Modelling needs to integrate all three aspects of Sustainability	(Verkerk et al. 2021)	
BIOMASSEKASKADEN Mehr Ressourceneffizienz durch stoffliche Kaskadennutzung von Biomasse – von der Theorie zur Praxis	(Fehrenbach et al. 2017a)	X
Monitoring the bio-economy: Assessing local and global biomass flows, land-use change, carbon impacts and future land resources	(Goh 2017)	X
Study on impacts on resource efficiency of future EU demand for bioenergy (ReceBio).	(Forsell 2016)	X
Meilensteine 2030 - Elemente und Meilensteine für die Entwicklung einer tragfähigen und nachhaltigen Bioenergiestrategie	(Thrän et al. 2015)	
Literaturstudie zur Vorbereitung der Aktualisierung des UBA-Biomassepositionspapiers (Nr. 127447). noch unveröffentlicht	(Fehrenbach et al. 2021a)	X
Biomass flows and technological innovation in the bioeconomy: A global scenario analysis	(Econ-BioSC 2016)	
Environmental and socioeconomic footprints of the German bioeconomy	(Bringezu et al. 2021)	X
Nachhaltige Ressourcennutzung – Anforderungen an eine nachhaltige Bioökonomie aus der Agenda 2030/SDG-Umsetzung	(Möller et al. 2020)	X
Linking the bioeconomy to the 2030 sustainable development agenda: Can SDG indicators be used to monitor progress towards a sustainable bioeconomy?	(Calicioglu, Bogdanski 2021)	X
The Contribution of Sustainable Development Goals and Forest-Related Indicators to National Bioeconomy Progress Monitoring	(Linser, Lier 2020)	X
Bioeconomy and SDGs: Does the Bioeconomy Support the Achievement of the SDGs?	(Heimann 2019)	X
Die Bioökonomie und die Nachhaltigkeitsziele der Vereinten Nationen (BioSDG)	(Weimar 2023)	
Brief on the role of the forest-based bioeconomy in mitigating climate change through carbon storage and material substitution	(Grassi et al. 2021)	X

Titel der Studie oder des Projekts	Quelle	Auswahl für genauere Analyse
Laufendes UBA-Projekt BioSink	(Hennenberg et al. 2022) ¹	
Naturschutz und fortschrittliche Biokraftstoffe	(Böttcher et al. 2020a)	X
Product Biodiversity Footprint – A novel approach to compare the impact of products on biodiversity combining Life Cycle Assessment and Ecology	(Asselin et al. 2020)	
Quantifying Biodiversity Losses Due to Human Consumption: A Global-Scale Footprint Analysis	(Wilting et al. 2017)	X
Bioökonomie - Können neue Technologien die Energieversorgung und die Welternährung sichern?	(Petschow 2011)	
The land footprint of the EU bioeconomy: Monitoring tools, gaps and needs	(O'Brien et al. 2015)	
Nexus Ressourceneffizienz und Landnutzung – Ansätze zur mehrdimensionalen umweltpolitischen Bewertung der Ressourceneffizienz bei der Biomassebereitstellung	(Böttcher et al. 2020b)	X
WIE NACHHALTIG IST DIE BIOÖKONOMIE WIRKLICH?	(Rupp 2020)	X
Future transitions for the Bioeconomy towards Sustainable Development and a Climate-Neutral Economy Knowledge Synthesis Final Report	(Fritsche et al. 2020)	X
Eine biobasierte Zukunft in Deutschland – Szenarien und gesellschaftliche Herausforderungen	(Banse et al. 2020)	X
Wälder unter Druck Warum die Bioökonomie unsere Biosphäre bedroht	(Gerhardt 2020)	
Sustainable bio-resource pathways towards a fossil-free world: the European bioeconomy in a global development context	(Hoff et al. 2018)	X
Bioökonomie: Gemeinsam eine nachhaltige Zukunft gestalten 1. Arbeitspapier des III. Bioökonomierats	(Bioökonomierat 2022a)	
Zukunftsfähige Bioökonomie	(Eppler et al. 2021)	X
EU Biomass Use in a Net-Zero Economy Priorities for EU biomass resources in a low-carbon transition	(Material Economics 2021)	X
Priorities for biomass	(Adams et al. 2022)	X
Zielkonflikte der Bioökonomie: biobasiertes Wirtschaften im Spannungsfeld von Ökonomie und Ökologie	(Perbandt et al. 2021)	X
Bioeconomy and Sustainability: Perspectives from Natural and Social Sciences, Economics and Ethics	(Lanzerath et al. 2022)	

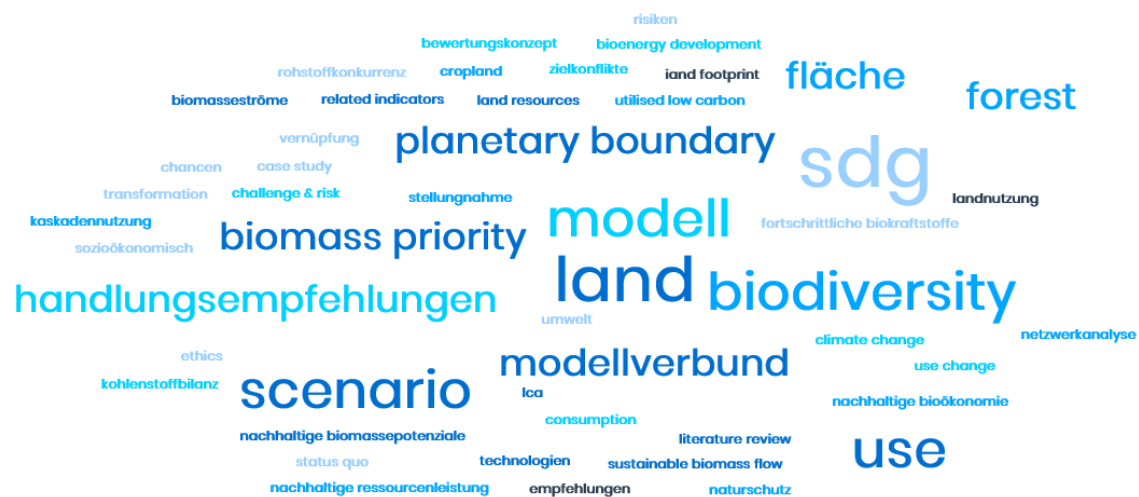
Zusammenstellung: ifeu – Öko-Institut

¹ Noch unpubliziert

Im Hinblick auf die Metadaten umfassen die Studien die Formate Bericht, Dissertation, Zeitschriftenartikel, Website, Broschüre und Buch. Der Großteil der Studien stammt aus dem Jahr 2021, die Bandbreite der Publikationsjahre erstreckt sich jedoch von 2015 bis 2022. Die publizierenden Institutionen befinden sich primär in Deutschland, mit einigen Ausnahmen auf internationaler Ebene (EU-Kommission, FAO, SEI und weitere).

Im Zuge der Systematisierung werden charakteristische Schlagwörter bzw. Hashtags der Studien identifiziert. Diese werden in einer Wortwolke zusammengestellt (Abbildung 2). Aufgrund der Tatsache, dass die Publikationen entweder in Englisch oder Deutsch vorliegen, sind die Schlagwörter in beiden Sprachen verfasst. Es fällt bereits auf, dass die Hauptthemen der Studien sehr divers sind. Häufig liegt der Fokus auf den Themen Landnutzung, Nachhaltigkeitsziele, Modelle, Biodiversität, Szenarien und Nutzung.

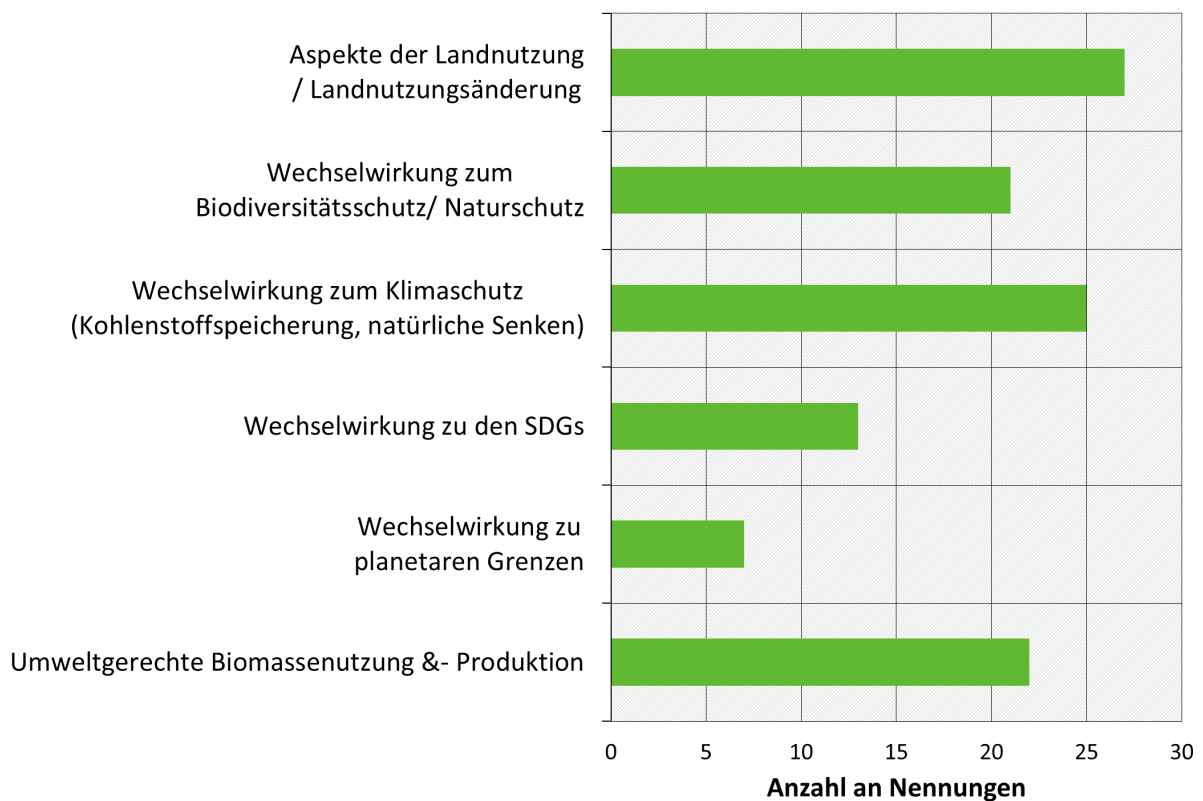
Abbildung 2: Wortwolke der Schlagwörter



Eigene Darstellung ifeu

Die Untersuchung der Studien im Hinblick auf die Adressierung der unter 2.1.1 aufgeführten relevanten Themen ergibt, dass alle relevanten Themen in den Studien adressiert werden. Insbesondere die Themen Landnutzung (27), Umweltgerechte Biomassenutzung und – Produktion (22) und Wechselwirkung zum Klimaschutz (25) und Biodiversität/Naturschutz (21) werden häufig adressiert. Zu geringeren Anteilen werden die Themen SDG's (13) und planetare Grenzen (7) in den Studien thematisiert.

Abbildung 3: Adressierung relevanter Themen in den Studien



Eigene Darstellung ifeu

2.1.3 Aussagen bzgl. relevanter Themen

Wie Kapitel 2.1.1 entnommen werden kann, werden die ausgewählten 21 Studien einer detaillierten Auswertung unterzogen. Dabei wird untersucht, welche Aussagen die Autor*innen der Studien bezüglich den relevanten Themen treffen (2.1.3). Zusätzlich dazu werden weitere relevante Aussagen der Autorenschaft festgehalten (2.1.3.7) und Aussagen bezüglich des Aspekts einer Steigerung der Nutzung biotischer Ressourcen gesammelt (2.1.3.8).

2.1.3.1 Umweltgerechte Biomassenutzung und – Produktion – Lessons learned

- (Fehrenbach et al. 2017a): Im Rahmen des Biomassekaskadenprojektes werden u.a. Biomassepotenziale ermittelt. Durch eine *Kaskadennutzung* kann einerseits das Biomasseaufkommen im System erhöht werden, andererseits wird der Anteil „roher“ Biomasse reduziert. Somit steht ein „umweltgerechteres“ Biomassepotenzial zur Verfügung. Theoretisch wäre durch die Integration einer Kaskadennutzung ein zusätzliches Potenzial von 0,5 Mio. t Alttextilien und 2,9 Mio. t Altholz erschließbar. Ökobilanzen zeigen auf, dass größtenteils eine Kaskadenoption signifikante Umweltvorteile mit sich bringt gegenüber der Referenz oder einer geringen Kaskadennutzung.
- (Goh 2017): Im Kontext Monitoring der Bioökonomie werden hier lokale und globale Biomasseflüsse, Konsequenzen zusätzlicher Biomassebedarfe auf Emissionen (LUC) und Flächenverfügbarkeiten dargestellt. Bezüglich der Biomasseproduktion wird aufgeführt, dass ein *verbessertes Flächenmanagement, eine höhere Produktivität mit effizienter Nutzung bisher nicht ausreichend genutzter kohlenstoffarmer Landressourcen (ULC)* dazu dienen kann, die aktuelle Lücke in der Biomasseproduktion zu schließen. Ein weitergehender Fokus auf umweltgerechte Produktion wird nicht gegeben.

- ▶ (Forsell 2016): Hier wird die Ressourceneffizienz zunehmender Bioenergienachfrage mit Hilfe von fünf Szenarien untersucht. Die fünf Szenarien werden sowohl von Seiten der Bioenergienutzung, als auch von Seiten der Biomassebereitstellung her entwickelt (Baseline, EU Emission reduction, Constant EU Bioenergy Demand, Increased Rest of World (RoW) Bioenergy Demand, Increased EU Biomass Import scenario). Mit Hilfe der Szenarien werden die Konsequenzen beispielsweise einer steigenden Bioenergienachfrage aufgedeckt. Insbesondere auf Wälder lastet durch eine Zunahme der Bioenergienachfrage ein starker Druck, welcher sich in einer intensivierten Waldnutzung und zunehmenden Importzahlen äußert. Im Kontext einer nachhaltigen Biomasseproduktion gilt es diese Konsequenzen zu beachten und entsprechende Optionen zu finden. Beispielsweise wird betont, dass ohne schnellwachsende Plantagen (z.B.: Kurzumtriebsplantagen), die direkte energetische Verwertung von Rundholz, als auch die Holzimporte immer mehr zunehmen werden. Diese *Konsequenzen* gilt es zu berücksichtigen.
- ▶ (Fehrenbach et al. 2021a): Vor dem Hintergrund einer Biomassepositionsstrategie werden hier Optionen der Biomasseproduktion/-nutzung beleuchtet. Insgesamt werden *12 Optionen* der biomassebezogenen Kohlenstoffsequestrierung (differenziert nach Bewirtschaftung der Biomasse und Umgang mit den Produkten aus Biomasse) dargestellt und deren Potenziale abgeleitet. Eine Charakterisierung der Optionen nach Umweltgerechtigkeit erfolgt dabei nicht. Die Optionen umfassen beispielsweise die Änderung der Bewirtschaftung von Bestandswäldern, Änderung der Landwirtschaftsmethoden, Wiedervernässung, Einarbeitung von Biokohle in den Boden oder die Nutzung von Produkten aus Paludikultur. *Es wird betont, dass die Optionen in konkurrierender Wechselbeziehung zueinanderstehen und nicht parallel umgesetzt werden können („Je-mehr-vom-Einen-desto-weniger-vom-Anderen-Prinzip“).*
- ▶ (Bringezu et al. 2021): Im Kontext Nachhaltigkeit können die *Fußabdrücke* wie in Bringezu et al. (2021) beschrieben hilfreich sein, um eine erste Einschätzung darüber zu geben, ob ein Land durch den Konsum bio-basierter Produkte unverhältnismäßig hohen Druck ausübt. Für Deutschland liegt der landwirtschaftliche Biomasseverbrauch über dem globalen Durchschnitt, während der Konsum von Holz auf einem umweltgerechten Niveau liegt. Der Konsum von Nahrungsmitteln tierischen Ursprungs spielt eine zentrale Rolle im Biomassefußabdruck der Landwirtschaft.
- ▶ (Möller et al. 2020): Hier steht die Untersuchung von Chancen und Risiken, die aus der Umsetzung staatlicher Bioökonomie-Strategien für die Erreichung der UN-Ziele für nachhaltige Entwicklung (SDGs) resultieren können, im Zentrum des Projektes. Im Rahmen eines Screenings bedeutender Technikpfade werden Trends und Potenziale ermittelt. Dabei analysieren Möller et al. (2020) *58 Optionen zukünftiger Biomassenutzungen*. Deutlich wird dabei, dass vor allem landwirtschaftliche Anbaubiomasse zum Einsatz kommt. Zukünftig überwiegt die Biomassenachfrage die in Deutschland nachhaltig verfügbaren Biomassepotenziale. Als Konsequenz dessen werden Importe eine wichtige Rolle spielen, die wiederum mit großen negativen Auswirkungen auf Landnutzung und Biodiversität einhergehen.
- ▶ (Böttcher et al. 2020a): Sie beleuchten Naturschutzaspekte fortschrittlicher Biokraftstoffe. Dabei werden u.a. die Biomassepotenziale mehrerer Studien zusammengestellt. Die Potenziale variieren zwischen den Studien, als auch innerhalb der Studien aufgrund der Ausgestaltung unterschiedlicher Szenarien. Für die energetische Verwertung variiert die Bandbreite von 400 – 1.600 PJ. Dabei spielen insbesondere landwirtschaftliche und forstliche Biomasse eine zentrale Rolle. Von Seiten der Nutzung und zukünftig relevanter Technologiepfade ist die *Verfügbarkeit von Biomasse ein entscheidender Faktor, als auch die*

Anforderungen an die Biomasse. Beispielsweise erfordern die Konversionsanlagen die kontinuierliche Verfügbarkeit homogener Biomasse mit engen Spezifikationen. Sofern heimische Biomasse diesen Anforderungen nicht gerecht werden kann, sind Transporte geeigneter Biomasse über große Entfernungen die direkte Konsequenz.

- (Böttcher et al. 2020b): Im Kontext Ressourceneffizienz und Landnutzung wird hier ein mehrdimensionaler Bewertungsansatz der Inanspruchnahme natürlicher Ressourcen bei der Biomassebereitstellung, die sogenannte *nachhaltige Ressourcenleistung* entwickelt. Hintergrund ist, dass die bisherige Trennung von Ressourcennutzung und Wirtschaftswachstum im Kontext nachhaltiger Ressourcenerhalt und –schutz nicht ausreicht. Die nachhaltige Ressourcenleistung entspricht dem Produkt der skalierten Nutzung und der skalierten Ressourcenschonung. Somit werden Ressourceneffizienz und Nutzung vereint. Anhand von Anwendungsbeispielen werden die Konsequenzen extensiver bzw. intensiver Produktionsweisen auf einzelne Umweltindikatoren und die Produktivität aufgezeigt, was sich in der nachhaltigen Ressourcenleistung widerspiegelt. Böttcher et al. (2020) betonen, dass neben der Optimierung der Nutzungsseite die Bereitstellung der Biomasse nachhaltig erfolgen muss, um das Biomasseaufkommen nachhaltig zu steigern. Dabei gilt es eine ganzheitliche Perspektive einzunehmen, in der auch weitere multifunktionelle Aufgaben der Landnutzung berücksichtigt werden sollen. Der entwickelte Ansatz liefert hierzu die Möglichkeiten.
- (Fritsche et al. 2020): Ihnen zufolge ist bis 2030 für alle Sektoren und ggf. Darüber hinaus *ausreichend nachhaltige Biomasse* aus der EU verfügbar.
- (Banse et al. 2020): Aus der Zusammenstellung zentraler Ergebnisse des BEPASO Projektes „Bioökonomie 2050: Potenziale, Zielkonflikte, Lösungsstrategien“ werden u.a. das *Biomasseaufkommen*, differenziert nach Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Rest- und Abfallstoffe (ca. 30 % des technisch möglichen Reststoffpotenzials ist noch ungenutzt), als auch die *Biomasseverwendung* differenziert nach Ernährung und Futtermittelproduktion, stoffliche und energetische Nutzung, dargestellt.
- (Hoff et al. 2018): Sie beleuchten die EU-Bioökonomie im globalen Entwicklungskontext. Wichtig bei der EU-Bioökonomiestrategie ist, dass in Europa biobasierte Produkte *nachhaltig produziert, verarbeitet, konsumiert und wiederverwendet* werden. Darüber hinaus soll die EU-Bioökonomiestrategie sicherstellen, dass Europa auf nachhaltige (ökologisch, sozial, ökonomisch) Weise Biomasse bezieht. Konkrete Biomassepotenziale Europas werden in Hoff et al. (2018) gegeben (zb: 1,2-2,2 Mia. t Biomasseproduktion in der EU).
- (Eppler et al. 2021): In der Kurzstudie „Zukunftsfähige Bioökonomie“ wird sehr detailliert u.a. die nachhaltigen Biomassepotenziale für die Bioökonomie Deutschlands, Europas und der Welt erläutert. Hierbei wird der Indikator „*human appropriation of net primary production (HANPP)*“, der die anthropogene Inanspruchnahme von Biomasse abbildet, eingeführt. Dieser ermöglicht es die durch Biomasseernte reduzierte Nettoprimärproduktion (NPP) darzustellen. Anhand mehrerer Studien wird erklärt, dass der HANPP heute 16-25 % beträgt, d.h. ca. ¼ der globalen NPP wird heute genutzt. Bei der Betrachtung der Biomassenutzung ist zu beachten, dass häufig Biomasse importiert wird (z.B: Futtermittelimporte aus Südamerika). In Deutschland dominiert von Seiten der Nutzung die Futtermittelproduktion über die energetische und dann die stoffliche Biomassenutzung. Die Nutzung von Biomasse für die Nahrungsmittelproduktion nimmt den geringsten Anteil ein. Nachhaltige Potenziale bestehen in der Verwendung biogener Abfall- und Reststoffe innerhalb ökologischer Grenzen, als auch durch die Reduktion und

Umnutzung der heutigen Verwendung durch effizientere Pfade. Weitere detaillierte Ausführungen hierzu werden in Eppler et al. (2021) gegeben.

- ▶ Material Economics (2021): In dieser Studie wird die Biomassenutzung in Europa und Optionen einer Biomassenutzung im Rahmen eines THG-neutralen Europas entwickelt. Die Situation in Europa gestaltet sich den Szenarien zufolge folgendermaßen: Es besteht eine *Lücke von 40-70 % zwischen Nachfrage (18/19 EJ) und Aufkommen (11/13 EJ)*. Weitergehend wird von Seiten der Nutzung eine Priorisierung im Sinne eines THG-neutralen Europas vorgenommen. An erster Stelle steht hierbei die stoffliche Nutzung, energetisch wird Biomasse primär in spezifischen hochwertigen Anwendungen eingesetzt (anstelle des herkömmlichen Bioenergieeinsatzes beispielsweise im Kraftstoffsektor). Darüber hinaus spielt das direkte Kohlenstoffmanagement der Biomasse eine essenzielle Rolle (CCS).
- ▶ (Adams et al. 2022): Momentan liegt für diese Studie lediglich der Abstract vor. Es wird erwartet, dass der Artikel auch auf Biomassepotenziale eingeht. Sobald der Artikel verfügbar ist, werden entsprechende Aussagen zu Biomassepotenzialen an dieser Stelle gegeben.
- ▶ (Perbandt et al. 2021): Hier geht es primär um die Darstellung der Zielkonflikte der Bioökonomie. Im Kontext Klima- und Umweltschutz wird eine *ressourcenschonende Primärproduktion und eine nachhaltige Bewirtschaftung* biologischer Ressourcen als Grundvoraussetzung genannt.

2.1.3.2 Wechselwirkung zu planetaren Grenzen – Lessons learned

- ▶ (Möller et al. 2020): Anhand einer Wirkungskettenanalyse werden Merkmale der BÖ-Konzepte mit dem Konzept der planetaren Grenzen abgeglichen. Es fällt auf, dass die Bioökonomie nicht direkt zu positiven Auswirkungen auf die Prozesse im Konzept der planetaren Grenzen führt. Insbesondere die zukünftige Ausweitung der Bioökonomie bringt weitere Risiken bezüglich der planetaren Belastungsgrenzen mit sich. Eine Produktionssteigerung führt zu *Zielkonflikte zu fast allen planetaren Grenzen*, da die Konsequenzen der Produktionssteigerung zusätzlicher Flächen- und Ressourcenverbrauch und Emissionen sind. Diese wirken wiederum auf die planetaren Grenzen Klimawandel, Intaktheit der Biosphäre, Landnutzungsänderungen, Stickstoff- und Phosphorflüsse und weitere aus. Insgesamt betrachtet überwiegen die Zielkonflikte die Synergien.
- ▶ (Rupp 2020): Er setzt sich kritisch mit dem Konzept der Bioökonomie auseinander. Im Kontext planetare Grenzen wird aufgeführt, dass aufgrund der Tatsache, dass Nutzungskonkurrenzen zukünftig zunehmen werden, ein Gegensteuern unerlässlich ist und hierbei die *Konzepte der planetaren Grenzen und der Nachhaltigkeitsziele eine Orientierung* darstellen können. Ein neues Bioökonomiekonzept soll Nachhaltigkeitskriterien im Rahmen ökologischer und sozialer Leitplanken beinhalten. Weiterhin benennt Rupp die Klimaänderung und den Verlust an Boden und Wasser als zentrale Herausforderung bezüglich Ertragssicherung und den planetaren Grenzen. Eine neue Bioökonomie soll nicht in ein Wachstumswirtschaftssystem integriert sein, sondern *gesellschaftliches Wohlergehen im Rahmen der planetaren Grenzen* im Fokus haben.
- ▶ (Fritsche et al. 2020): Die Biosphäre ist die Grundlage für den Erhalt der Gesellschaft und folglich die Ökonomie und die Basis für *ein Leben innerhalb der planetaren Grenzen*.
- ▶ (Eppler et al. 2021): Aktuell gibt es *keine globale Governance* zur Einhaltung der planetaren Grenzen.

- Perbandt et al. (2022): Die aktuelle Situation (Wirtschaftsmodell, Bevölkerungswachstum und folglich Nachfrage nach Gütern und Dienstleistungen) führt zur *Überschreitung planetarer* Grenzen.

2.1.3.3 Wechselwirkung zu den SDG's – Lessons learned

- (Möller et al. 2020): Sie untersuchen welchen Beitrag die Bioökonomie zur Umsetzung der SDGs leisten kann. Es bestehen teilweise Synergien zwischen den Bioökonomiezielen (Ziel 4 (wissensbasierte Bioökonomie), 7, 8, 9) und den SDG's. *Zielkonflikte bestehen primär zwischen Bioökonomiezielen, die stark auf Wirtschaftswachstum fokussieren* (Ziel 1, 3). Detaillierter werden die landnutzungsrelevanten SDG's 2 „Kein Hunger“ und SDG 15 „Leben an Land“ untersucht. Auch hierbei bestehen sowohl Widersprüche (Biomassebedarf wachsender Bioökonomie, Ernährungssouveränität, Patentierung und Kommerzialisierung von biologischen und genetischen Ressourcen), als positive Aspekte (Förderung von ganzheitlichen Modellen und Methoden nachhaltiger Landnutzung und eine Diversifizierung der landwirtschaftlichen Produktion, Kaskadennutzung, technische Entwicklung). Insgesamt betrachtet bestehen primär Zielkonflikte mit den landnutzungsrelevanten Nachhaltigkeitszielen.
- (Calicioglu, Bogdanski 2021): Eine Option die Nachhaltigkeit der Bioökonomie sicherzustellen ist die Verknüpfung von Bioökonomie und den Nachhaltigkeitszielen (SDG's). Den Erkenntnissen der Autorenschaft zufolge kann ein *Bioökonomiemonitoring* gleichzeitig als Berichterstattung über die SDG's fungieren. Dabei bestehen beispielsweise zu den SDG's im Kontext ökonomische Entwicklung, Zugang zu grundlegenden Dienstleistungen, nachhaltiger Konsum, Biodiversitätsschutz etc. zahlreiche Verbindungen. Dabei ist zu beachten, dass je nach Land die Verknüpfung zwischen Aspekten des Bioökonomiemonitorings oder Zielen der Bioökonomie und den SDG's erheblich variieren kann.
- (Linser, Lier 2020): Nachhaltige Bioökonomie ermöglicht es die SDG's zu erreichen, da zahlreiche Verbindungen zwischen der Bioökonomie und den SDG's bestehen. Insgesamt können *14 der 17 SDG's* in nationalen Bioökonomiestrategien identifiziert werden. Je nach Land stehen dabei unterschiedliche SDG's im Fokus der Bioökonomiestrategien. Keine Verknüpfungen konnten zu SDG5, 10 und 16 identifiziert werden.
- (Heimann 2019): Er untersucht wie Bioökonomiestrategien die SDG's beeinflussen. Hierfür werden drei *Szenarien* unterschiedlicher Bioökonomieaktivität entwickelt und deren Auswirkungen auf das Erreichen der SDG's untersucht. Den Ergebnissen zufolge hat das Bioökonomieszenario sowohl positive, wie auch negative Auswirkungen auf die SDG's. Dem gegenüber überwiegen beim nachhaltigen Bioökonomieszenario die positiven Effekte, insbesondere bei Auswirkungen auf die Bereiche Fläche, Ozeane, Wasser und Ressourcen.
- (Rupp 2020): Wie bereits im vorherigen Kapitel aufgeführt, erläutert Rupp, dass u.a. dem Konzept der SDG's im Kontext Bioökonomie eine zentrale Rolle zukommen kann indem es *Orientierung* gibt. Darüber hinaus soll ein neues Bioökonomiekonzept Nachhaltigkeitskriterien enthalten.
- (Fritsche et al. 2020): Die SDG's können als *normatives Regelwerk* fungieren um die Nachhaltigkeit der Bioökonomie zu lenken.
- (Hoff et al. 2018): Sie erläutern, dass die meisten Bioökonomiestrategien zwar das Ziel des Klimaschutzes oder der Defossilisierung haben, allerdings weitere Aspekte der

Nachhaltigkeit, wie sie in den SDG's formuliert sind, nicht berücksichtigen. Insbesondere in *Anlehnung an SDG 12* sollen auf Seiten der Produktion, als auch auf Seiten des Konsums Anstrengung vollzogen werden.

- ▶ (Eppler et al. 2021): Die Agenda 2030 und die *SDGs geben den normativen Rahmen*, indem sich eine nachhaltig zirkuläre Bioökonomie entwickeln kann. Die SDG's sollten grundsätzlich nicht als nebeneinanderstehende Dimensionen/Säulen aufgefasst werden, sondern viel mehr als mehrschichtiges System mit der Umwelt als Grundlage. Darin ist sowohl die Gesellschaft und folglich auch die wirtschaftliche Komponente eingebunden.
- ▶ (Perbandt et al. 2021): Die aktuelle Situation (Bevölkerungswachstum, veränderte Konsummuster, nicht nachhaltiger Umgang mit Lebensmitteln und Abfällen, Produktionsausfälle durch Klimawandel) *gefährdet das Nachhaltigkeitsziel* „Recht auf Hunger“.

2.1.3.4 Wechselwirkung zum Klimaschutz (Kohlenstoffspeicherung, natürliche Senken) – Lessons learned

- ▶ (Fehrenbach et al. 2017a): Anhand der ökobilanziellen Betrachtung unterschiedlicher Optionen der Kaskadennutzung in Fehrenbach et al. (2017) wird deutlich, dass eine *Kaskadennutzung deutlich bessere Auswirkungen auf das Klima* hat. Beispielsweise kann im Textilbereich mit der Kaskadennutzung von Textilien als Putzlappen die Klimabilanz die spezifische Klimabilanz um 2 % verbessert werden.
- ▶ (Goh 2017): Eine der Forschungsfragen aus Goh (2017) befasst sich mit der Frage wie *Änderungen des Kohlenstoffspeichers, die aus Landnutzungsänderungen (CSC-LUC)* resultieren, mit dem zusätzlichen Biomassebedarf (im Zuge der Erweiterung der Bioökonomie) in Verbindung gebracht werden können. In diesem Kontext betont Goh (2017) die Komplexität der Thematik als auch die Beeinflussung von Modellergebnissen durch die Modifikation einzelner Parameter. Mit hoher Wahrscheinlichkeit ist die hohe Biomassenachfrage, als auch die häufig ineffiziente Landnutzung der entscheidende Faktor bezüglich CSC-LUC. Dem kann durch verbessertes Flächenmanagement, Produktivität und effizienter Nutzung von bisher nicht ausreichend genutzten kohlenstoffarmen Flächen Abhilfe geschaffen werden.
- ▶ (Forsell 2016): Hier werden u.a. die GHG Emissionen, die mit unterschiedlichen Szenarien einhergehen, quantifiziert. Dem Baseline Szenario zufolge bleiben die Emissionen des LULUCF Sektors relativ stabil negativ, wodurch dieser Sektor als Senke fungiert. Durch eine Zunahme der Biomasseproduktion verringert sich der Senkeneffekt. Sowohl LULUCF Emissionen, als auch Landwirtschaftsemissionen werden bei einer zunehmenden globalen Bioenergienachfrage und unter dem Gesichtspunkt der Emissionsreduktion in der EU zunehmen. Folglich führen Klimaschutzmaßnahmen in der EU zu „*exportierten*“ Emissionen in Länder außerhalb der EU.
- ▶ (Fehrenbach et al. 2021a): Die hier beschriebenen Optionen der Bewirtschaftung von Biomasse und des Umgangs mit Produkten aus Biomasse gehen mit unterschiedlichen jährlichen Kohlenstoffspeicherraten einher. Die höchste mittlere jährliche Speicherrate ist bei der Option *Schutz nach SILVA* mit > 80 Mio. t CO₂/a, gefolgt von BECCS (~70 Mio. t CO₂/a) und Schutz nach Waldvision (~50 Mio. t CO₂/a) zu verzeichnen.
- ▶ (Bringezu et al. 2021): Der *Klimafußabdruck* der deutschen Bioökonomie trägt etwa 20 % zum gesamten Klimafußabdruck bei. Insgesamt betrachtet liegen die

Treibhausgasemissionen aus dem Konsum biobasierter Produkte um einiges höher als offiziell berichtet.

- ▶ (Möller et al. 2020): Die Untersuchung der Trends und Entwicklungen der Bioökonomie ergeben, dass zwar bei einigen zukünftigen Trends Potenziale zur *THG Emissionsreduktion* vorhanden sind, allerdings nichts bei allen Trends.
- ▶ (Calicioglu, Bogdanski 2021): Sie untersuchen Verknüpfungen zwischen den Prinzipien und Kriterien des *Bioökonomiemonitorings* und den SDG's. Im Kontext Klima konnte beispielsweise festgestellt werden, dass zwischen der Wirkungskategorie Klimaschutz und den SDG's Verbindungen bestehen (9.4.1, 13.2.1).
- ▶ (Linser, Lier 2020): Aspekte, die mit SDG13 „Klimaschutz“ in Verbindung gebracht werden, werden in allen untersuchten nationalen Bioökonomiestrategien adressiert, jedoch liegt nur für eine nationale Bioökonomiestrategie ein entsprechender *Indikator* vor. Innerhalb der untersuchten Projekte werden die Aspekte des Klimaschutzes häufig, auch unter Nennung von Indikatoren, genannt.
- ▶ (Heimann 2019): Das SDG13 „Climate Action“ wird durch die Bioökonomie direkt beeinflusst, indem *industrielle und landwirtschaftliche Aktivitäten* direkte Auswirkungen auf die Atmosphäre haben.
- ▶ (Grassi et al. 2021): Hier werden Fragen im Kontext Klimaschutz durch wald-basierte Bioökonomie beantwortet. Um die Bedeutung waldbasierter Bioökonomie für den Klimaschutz zu identifizieren, ist eine ganzheitliche Herangehensweise unter Betrachtung aller möglicher Optionen essenziell. Zu den *möglichen Optionen* zählen einerseits a) die Zunahme des Kohlenstoffspeichers durch den 1. Waldspeicher und den 2. Holzproduktspeicher und b) die Substitution 1. emissionsreicher Materialien und 2. fossiler Brennstoffe. Es bestehen sowohl Zielkonflikte als auch Synergien zwischen diesen Optionen. Grundsätzlich kann durch eine verringerte Ernte der Waldspeicher mittelfristig erhöht werden. Eine Zunahme des jährlichen Zuwachses (durch Waldbewirtschaftungsmaßnahmen oder neue Waldflächen) ist jedoch essentiell um den aktuellen Trend der Verringerung der Kohlenstoffspeicherung entgegenzuwirken. Bezüglich dem Holzproduktetapool ist darauf zu achten, dass insbesondere Produkte mit langer Lebenszeit zum Einsatz kommen sollen. Insgesamt betrachtet *überwiegt kurz- und mittelfristig der Klimaschutzbeitrag des Waldspeichers den Klimaschutzbeitrag des Holzproduktespeichers und der Substitution*.
- ▶ (Böttcher et al. 2020a): Vor dem Hintergrund der Frage welche Technologiepfade zukünftig eine entscheidende Rolle spielen werden, wird u.a. aufgeführt, dass im Vergleich zur fossilen Referenz mit dem Einsatz fortschrittlicher Biokraftstoffe hohe *Emissionen eingespart* werden können.
- ▶ (Wilting et al. 2017): Sie quantifizieren den Biodiversitätsverlust, der mit THG Emissionen und Landnutzungen im Zuge des Konsums einhergehen. Es wird betont, dass sowohl die *Reduktion von THG Emissionen als auch des Flächenverbrauchs zum Schutze der Biodiversität* unbedingt berücksichtigt werden müssen. Den Ergebnissen zufolge nimmt der Anteil an Biodiversitätsverlust bedingt durch THG Emissionen stark mit dem Einkommen zu.
- ▶ (Böttcher et al. 2020b): Der Bewertungsansatz der nachhaltigen Ressourcenleistung beinhaltet u.a. *Indikatoren für die Ressource Luft*. Im Kontext Landwirtschaft ist das der

Indikator Treibhausgasemissionen, im Kontext Forstwirtschaft der Indikator Änderungen Biomassekohlenstoff, CO₂-Senke Biomasse.

- ▶ (Fritsche et al. 2020): Eine zirkuläre, nachhaltige und transformative BioWEconomy kann dem *Klimawandel entgegenwirken*.
- ▶ Banse et al. (2020): Im Szenario „Bioökonomie-Wende“ fallen die eingesparten THG Emissionen zwar am geringsten aus, die gesamte *Klimabilanz* fällt jedoch am besten aus aufgrund reduzierten Konsums. Zusätzlich erläutert Banse den Zielkonflikt „Landumbruch vs. Klimaschutz“.
- ▶ (Hoff et al. 2018): Neben dem zunehmenden Druck auf Biomasse aufgrund des Bioökonomie-Übergangs, wird Biomasse für *erforderliche Kohlenstoffsenken* im Kontext Klimaschutz verwendet. Dies führt zu einem zusätzlichen Druck auf die limitierte Ressource Biomasse.
- ▶ (Eppler et al. 2021): Für die Treibhausgasbilanz spielen *indirekte Effekte* innerhalb der Bioökonomie eine zentrale Rolle. Beispielsweise kann es durch den Biomasseanbau für Bioenergie zur Verdrängung des Futtermittelanbaus kommen. Die Futtermittel müssen folglich auf anderen Flächen angebaut werden, die wiederum durch Entwaldung mobilisiert werden.
- ▶ (Material Economics 2021): Die Autor*innen betonen, dass Biomassebereitstellung nicht per se klimaneutral ist, da bereits der Anbau und die Extraktion die Kohlenstoffbilanz des Bodens und der Vegetation beeinflusst. Im Rahmen der Studie wird u.a ein Szenario „High-Value-Szenario“ der Biomasse entwickelt, welches mit einem „BAU-Szenario“ verglichen wird. Dem „*High-value-Szenario*“ zufolge werden 144 Mio. t CO₂ eingespart, die auf der anderen Seite im „BAU-Szenario“ emittiert werden würden.
- ▶ (Perbandt et al. 2021): Klimabilanzen der *Biokraftstoffe* haben je nach Anbaumethode negative Folgen für den Klimaschutz.

2.1.3.5 Wechselwirkung zum Biodiversitätsschutz/ Naturschutz – Lessons learned

- ▶ (Fehrenbach et al. 2017a): Anhand der ökobilanziellen Betrachtung unterschiedlicher Optionen der Kaskadennutzung in Fehrenbach et al. (2017) wurde deutlich, dass insbesondere im Sektor Papier und Textil (Putzlappen) eine Kaskadennutzung deutlich *bessere Auswirkungen auf den Naturraum* hat.
- ▶ (Forsell 2016): diesr Studie zufolge geht mit dem Verhindern weiterer Intensivierung der Waldnutzung in der EU eine Zunahme der Holzproduktion in Kurzumtriebsplantagen einher. Bereits im Baseline Szenario ist von einem *Verlust biodiverser Flächen* auszugehen. Der Schutz dieser biodiverseren Flächen geht wiederum mit einer Zunahme an Druck auf die Biomasseproduktion auf nicht geschützten Flächen und folglich mit einer verstärkten Landnutzungsänderung einher.
- ▶ (Fehrenbach et al. 2021a): hier werden Kohlenstoffspeicherpotenziale unterschiedlicher Optionen der Bewirtschaftung von Biomasse und des Umgangs mit Produkten aus Biomasse beschrieben und quantifiziert. Zusätzlich dazu erfolgt eine Beschreibung weiterer ökologischer Vor- und Nachteile der jeweiligen Optionen. Auffällig ist, dass die Optionen des *Schutzes* nach SILVA und Waldvision nicht nur aus klimatischer Perspektive durch ihre sehr hohen Speicherraten besonders gut abschneiden, sondern dass eine Unterschutzstellung auch mit zahlreichen positiven Auswirkungen auf die Biodiversität einhergeht. Zu nennen ist

in diesem Kontext beispielsweise ein gesteigertes Totholzaufkommen, als auch eine Zunahme der Resilienz als Konsequenz einer geförderten Biodiversität. Auch die Option einer Zunahme ökologischer Landwirtschaft geht mit zahlreichen positiven Auswirkungen auf die Biodiversität (verringertes Einsatz von Dünger, Pestiziden etc.) einher.

- ▶ (Möller et al. 2020): Die Ausweitung der Bioökonomie erfordert die Beschaffung von Biomasse im Ausland, die wiederum zu *globalen Risiken für beispielsweise die Biodiversität* führt. Aufgrund dieser Tatsache wird in einer der Leitlinien aufgeführt, dass Bioökonomie-Pfade keine bis geringe negative Auswirkungen auf die Umwelt (Biodiversität, Boden, Wasser, Luft) und soziale Aspekte haben sollten.
- ▶ (Calicioglu, Bogdanski 2021): Hier werden Verknüpfungen zwischen den Prinzipien und Kriterien des *Bioökonomiemonitorings* und den SDG's untersucht. Im Kontext Biodiversität wird beispielsweise festgestellt, dass zwischen der Wirkungskategorie Biodiversität und den SDG's zahlreiche Verbindungen bestehen (14.4.1, 15.4.1, 15.5.1, 15.8.1, 2.4.1, 15.1.2).
- ▶ (Linser, Lier 2020): Aspekte, die mit SDG15 „Life on land“ in Verbindung gebracht werden und somit das Thema Biodiversitätsverlust adressieren, sind *in einigen der untersuchten nationalen Bioökonomiestrategien aufgeführt* (teils auch unter Nennung entsprechender Indikatoren). Innerhalb der untersuchten Projekte werden die Aspekte der Biodiversität häufig genannt.
- ▶ (Heimann 2019): Negative Auswirkungen der Bioökonomie auf die Biodiversität können nicht mittels *Biotechnologie* vermieden werden. Zukünftiger Biomassebedarf mag durch die Mobilisierung *neuer Flächen* Ökosystemdienstleistungen und Biodiversität schaden. Auch der Anbau *genetisch* modifizierter Feldfrüchte mag negative Auswirkungen auf die Biodiversität haben.
- ▶ (Böttcher et al. 2020a): Hier wird deutlich, dass Naturschutzrestriktionen in aktuellen Biomassepotenzialstudien nicht oder nicht ausreichend berücksichtigt werden. Die Untersuchung zweier Vertiefungsstudien zu Naturschutzbelangen des Einsatzes von Stroh und Waldholz für fortschrittliche Biokraftstoffe ergibt, dass insbesondere die Nutzung von landwirtschaftlichen Reststoffen mit *großem Flächenbezug negative Konsequenzen* für die biologische Vielfalt und die Bodenfruchtbarkeit mit sich bringt.
- ▶ (Wilting et al. 2017): Hier wird der konsumbasierte *Biodiversitätsverlust / Biodiversitätsfußabdruck* für 45 Länder ermittelt. Insgesamt betrachtet variiert der Biodiversitätsfußabdruck zwischen den Ländern, jedoch nimmt der Biodiversitätsfußabdruck mit steigendem Pro-Kopf Einkommen zu. Allerdings kann festgestellt werden, dass bei entwickelten Staaten ca. die Hälfte des konsumbasierten Biodiversitätsverlusts außerhalb des eigenen Staates erfolgt. Um den globalen Biodiversitätsverlust zu reduzieren, ist es unumgänglich THG Emissionen, als auch den Flächenverbrauch, der mit dem Konsum einhergeht, zu reduzieren. Der Konsum von Nahrungsmitteln kann als größter Treiber für Biodiversitätsverlust identifiziert werden. Zusätzlich dazu ermitteln die Autor*innen, dass der Biodiversitätsfußabdruck pro konsumierten Dollar in reichen Staaten geringer ist.
- ▶ (Böttcher et al. 2020b): Der Bewertungsansatz der nachhaltigen Ressourcenleistung beinhaltet u.a. *Indikatoren für die Ressource Biodiversität*. Im Kontext Landwirtschaft ist das der Indikator Biodiversität, im Kontext Forstwirtschaft der Indikator Totholzvorrat. Insgesamt betonen die Autor*innen, dass berücksichtigt werden soll, dass Landnutzung nicht ausschließlich der Biomasseproduktion dient, sondern auch *weitere funktionelle*

Aufgaben, wie beispielsweise die Bereitstellung von Habitaten, Speichern (Ökosystemleistungen) übernimmt.

- ▶ (Fritsche et al. 2020): Sie erklären, dass die neue EU-Waldstrategie die gleichzeitige Förderung von Bioökonomie und den *Erhalt von Ökologie* und Biodiversität beabsichtigt.
- ▶ (Banse et al. 2020): Unter den gesellschaftlichen Zielkonflikten erläutert Banse den Zielkonflikt „*Intensive Anbautechniken vs. Umweltschutz*“. Produktionssteigerungen können Monokulturen und den Einsatz chemischer Pflanzenschutzmittel zur Folge haben, was negative Konsequenzen für die Biodiversität hat.
- ▶ (Hoff et al. 2018): Ohne entsprechende Maßnahmen führt der zunehmende Flächen-/Wasser- und Ressourcenverbrauch zur *Bedrohung von Ökosystemen und Biodiversität*. Die Autor*innen betonen, dass sich der Großteil des Auswirkungen auf die Biodiversität, die von der EU verursacht werden, in den Importländern ereignen. Fast der gesamte externe EU *Biodiversitätsfußabdruck* ereignet sich in Entwicklungsländern.
- ▶ (Eppler et al. 2021): Eine der 5 Kernstrategien Epplers für eine nachhaltige Bioökonomie zielt auf die Transformation des Ernährungssystems ab, um den Biodiversitätsverlust, der mit dem Nahrungs- und Futtermittelbau einhergeht, zu reduzieren. Darüber hinaus betont Eppler, dass bei der *Entnahme von Reststoffen* aus Forst- und Landwirtschaft auch Biodiversitätsaspekte (Durchforstungsholz, Reststroh) und nicht ausschließlich Aspekte des Klimaschutzes berücksichtigt werden sollten.
- ▶ (Material Economics 2021): Das von den Autor*innen entwickelte High-Value-Szenario führt u.a. zu *positiven Auswirkungen auf die Biodiversität* Europas.
- ▶ (Perbandt et al. 2021): Hier werden gleich zwei Zielkonflikte mit Biodiversitäts- bzw. Umweltbezug genannt. Dies ist der Konflikt *Expansion Landwirtschaft vs. Erhalt der Biodiversität* und *Wirtschaftlichkeit vs. Umweltschutz*. Die Konflikte werden ausführlich erläutert und politische Ansätze zur Konfliktbewältigung werden gegeben.

2.1.3.6 Aspekte der Landnutzung / Landnutzungsänderung – Lessons learned

- ▶ (Fehrenbach et al. 2017a): Flächenpotenziale und die Art der Flächennutzung sind entscheidende Faktoren der Biomassebereitstellung. Durch eine *Veränderung der Flächennutzung* durch das Freiwerden von Ackerland (~1,8 Mio. ha) und folglich *zusätzlichem Biomasseanbau* kann Weizen (+3,6 Mio. t Weizen), Mais und KUP (+6 Mio. t Holz) produziert werden.
- ▶ (Goh 2017): In Kapitel 2.1.3.1 wurde bereits aufgeführt, dass Goh (2017) zufolge durch die *Mobilisierung bisher nicht ausreichend genutzter kohlenstoffarmer Landressourcen (ULC)* zusätzliche Biomassepotenziale erschlossen werden können. Für die Identifizierung und Charakterisierung dieser Flächen gilt es mehrere Aspekte (Landbedeckung, legale Klassifizierung) zu berücksichtigen. Auch bei der Mobilisierung dieser Flächen müssen mehrere lokale Faktoren (ökonomische, kulturelle, ökologische etc.) aus unterschiedlichem Blickwinkel beachtet werden.
- ▶ (Forsell 2016): Je nach Szenario ändern sich die Landnutzungen. Dem Baseline Szenario und RoW Szenario zufolge nehmen als Konsequenz der Bioenergienachfrage *Acker- und Waldflächen zu, während andere natürliche Flächen abnehmen*. Sofern natürliche Flächen in andere Landnutzungstypen überführt werden dürfen, verringert sich der Anteil an Kurzumtriebsplantagen und vice versa.

- ▶ (Fehrenbach et al. 2021a): Insbesondere die Optionen der Bewirtschaftung von Biomasse zielen hier explizit auf die Landnutzung ab. Diese Optionen umfassen die Änderung der Bewirtschaftung von Bestandswäldern in Richtung Aufbau des Kohlenstoffbestands, Aufforstung von Flächen, Änderung von Landwirtschaftsmethoden zur Erhöhung des Kohlenstoffgehalts in Böden und Wiedervernässung von bewirtschafteten organischen Böden (Mooren). Auf Produktseite werden weitere Optionen aufgeführt. Diese Optionen haben gemeinsam, dass sie dem Aufbau *biogener Kohlenstoffsenken* dienen, die jährlichen Speicherraten variieren dabei. Aufgrund limitierter Flächenverfügbarkeit können nicht alle Optionen gleichzeitig umgesetzt werden, sondern eine Priorisierung ist erforderlich. Hierfür beschreiben Fehrenbach et al. (2021) die Möglichkeit der Maximierung der Bewirtschaftung der Biomasse und die Möglichkeit der Maximierung des Umgangs mit Produkten. Grundsätzlich führen beide Möglichkeiten zu ähnlichen Speicherpotenzialen.
- ▶ (Bringezu et al. 2021): Die landwirtschaftliche Flächennutzung, die mit dem Konsum bio-basierter Produkte einhergeht, ist ca. dreimal so hoch wie die inländische Ackerflächenbelegung, wodurch bereits in der Vergangenheit signifikante Landnutzungsänderungen stattfanden. Folglich trägt die deutsche Bioökonomie erheblich zum *Landnutzungswandel* in anderen Ländern bei. Ohne weitere Maßnahmen wird auch nach 2030 die landwirtschaftliche Flächennutzung noch über dem durchschnittlichen und nachhaltigen Niveau liegen.
- ▶ (Möller et al. 2020): Hier wird ein zentrales *Handlungsfeld* im Kontext Landnutzung aufgeführt: „Bioökonomie mit nachhaltigem Land- und Flächenmanagement verknüpfen“.
- ▶ (Calicioglu, Bogdanski 2021): Hier werden Verknüpfungen zwischen den Prinzipien und Kriterien des *Bioökonomiemonitorings* und den SDG's untersucht. Im Kontext Landnutzung/-sänderung kann beispielsweise festgestellt werden, dass zwischen der Wirkungskategorie Land use change und SDG 15.1.1 und 15.1.2 Verbindungen bestehen.
- ▶ (Linser, Lier 2020): Aspekte, die mit SDG15 „Life on land“ in Verbindung gebracht werden und somit das Thema Umgang mit Flächen adressieren, sind *in einigen der untersuchten nationalen Bioökonomiestrategien aufgeführt* (teils auch unter Nennung entsprechender Indikatoren). Innerhalb der untersuchten Projekte werden die Aspekte der Landnutzung häufig genannt.
- ▶ (Heimann 2019): Sowohl beim BAU, als auch dem Bioökonomieszenario, ergeben sich keine positiven Auswirkungen auf das SDG15 „Life on land“. Grund hierfür ist u.a. der *Flächenbedarf für die Bioökonomie*. Dadurch können auch bisher unkultivierte Flächen mobilisiert werden oder Flächen übernutzt werden.
- ▶ (Grassi et al. 2021): Hier wird die Rolle des Waldspeichers und des Holzproduktspeichers im *LULUCF Sektor* beleuchtet. Insgesamt betrachtet fungiert der gesamte LULUCF Sektor als Senke, zu der der Wald- und Holzproduktspeicher einen erheblichen Beitrag leistet.
- ▶ (Böttcher et al. 2020a): Sie führen auf, dass in bisherigen Biomassepotenzialstudien einige Aspekte der Naturschutzbelange unberücksichtigt sind. Dazu zählen auch Aspekte mit Flächenbezug, beispielsweise *indirekte Landnutzungseffekte*. Im Rahmen von Handlungsempfehlungen wird betont, dass Politikmaßnahmen zur Umsetzung der RED II so umgesetzt werden sollen, dass die Biomassenachfrage möglichst gering ausfällt um somit den *Druck auf die Fläche* zu reduzieren.

- ▶ (Wilting et al. 2017): Die Autorenschaft betont, dass sowohl die *Reduktion von THG Emissionen als auch des Flächenverbrauchs* zum Schutze der Biodiversität unbedingt berücksichtigt werden müssen.
- ▶ (Böttcher et al. 2020b): Mit dem Bewertungsansatz „nachhaltige Ressourcenleistung“ werden *Landnutzung und Ressourceneffizienz* vereint, um die Biomassebereitstellung ganzheitlich bewerten zu können. In der Herleitung des Ansatzes werden ausführlich Ansätze zur Bewertung von Effizienz von Landnutzung aufgeführt.
- ▶ (Rupp 2020): Die Ausweitung der Flächen für Biomasseproduktion ist *begrenzt*.
- ▶ (Fritsche et al. 2020): Für eine nachhaltige Biomassebereitstellung kommen nicht nur Abfälle und Reststoffe zum Einsatz, sondern auch landwirtschaftliche und forstliche Biomasse aus *restaurierten marginalen und degradierten Flächen*.
- ▶ (Banse et al. 2020): Die hier beschriebene Szenarien „Bioökonomie-Wende“ führt im Vergleich zu den anderen beiden Szenarien zu einer Ausdehnung der Ackerflächen in Deutschland um 18 % zulasten bisheriger Kulturbrachen. Auch auf globaler Ebene spiegelt sich dieser Trend wider. Der *Ackerflächenfußabdruck* pro Kopf liegt jedoch im Szenario Bioökonomie-Wende deutlich niedriger als im Szenario Bioökonomie am Tropf. Anhand dieses Indikators kann die nachhaltige Flächeninanspruchnahme abgebildet werden.
- ▶ (Hoff et al. 2018): Ein Risiko des Bioökonomie-Übergangs ist der *starke Bedarf an Fläche*, Wasser und natürlichen Ressourcen.
- ▶ (Eppler et al. 2021): Sie zielen mit einer 5-Kernstrategie für eine nachhaltige Bioökonomie auf die *Transformation des Ernährungssystems* ab, um somit die Landnutzung nachhaltiger gestalten zu können.
- ▶ (Material Economics 2021): Das hier entwickelte High-Value-Szenario führt u.a. zu einer *Reduktion der Flächeninanspruchnahme um 90 %*.
- ▶ (Perbandt et al. 2021): Im Kontext Landnutzung wird hier der Konflikt *Expansion Landwirtschaft vs. Erhalt der Biodiversität* aufgeführt. Der Konflikt wird ausführlich erläutert und politische Ansätze zur Konfliktbewältigung werden gegeben.

2.1.3.7 Weitere relevante Aspekte

- ▶ (Fehrenbach et al. 2017a): Um zu ermitteln, ob eine Kaskadennutzung aus Nachhaltigkeitssicht sinnvoll ist, wurde im Rahmen des Biomassekaskadenprojekts (Fehrenbach et al. 2017) ein *Bewertungskonzept* entwickelt. In diesem Kontext wird der Indikator *Biomass Utilization Factor (BUF)* integriert, welcher Produktionseffizienz mit Kaskadennutzung verknüpft.
- ▶ (Goh 2017): Im Kontext Monitoring der Bioökonomie betont Goh (2017), dass ein *Monitoring nicht nur von Seiten des Konsums, sondern auch seitens der Produzenten* erfolgen soll. Dadurch können unter Berücksichtigung der Stakeholder lokale Strategien für den Übergang hin zu einer nachhaltigen Bioökonomie entwickelt werden.
- ▶ (Forsell 2016): Hier werden 3 *Fallstudien* (Deutschland, Finnland, Italien) entwickelt. Es wird offensichtlich, dass die drei Länder deutliche Unterschiede im Hinblick auf die Verfügbarkeit von Biomasse, Holzindustrien und das Ziel der Biomassenutzung aufweisen.

- ▶ (Fehrenbach et al. 2021a): hier werden neben der Darstellung der Speicherpotenziale und ökologischen Vor- und Nachteilen der beschriebenen Optionen auch *ökonomische Vor- und Nachteile* aufgeführt. Auch diese Aspekte können von großem Interesse sein, insbesondere wenn die Frage nach finanziellem Ausgleich bei Schutzmaßnahmen aufkommt.
- ▶ (Bringezu et al. 2021): Zwar nimmt der Fußabdruck der *Bewässerungswasserentnahme* weiterhin ab, allerdings kann der Anteil an Regionen mit Wasserstress stark steigen.
- ▶ (Möller et al. 2020): Anhand von *Effizienzmaßnahmen* (vor allem technologische Verbesserungen) kann der aktuelle oder zukünftige Biomassebedarfe verringert werden. Auch Maßnahmen im Bereich *Konsumverhalten* gilt es zu berücksichtigen. Darüber hinaus bedarf es einer *Priorisierung* des Einsatzes von Biomasse. Hierfür werden eigene Leitlinien entwickelt.
- ▶ (Calicioglu, Bogdanski 2021): Die *Netzwerkanalyse* eignet sich als passend um Verknüpfungen zwischen den SGD's und dem Bioökonomiemonitoring darzustellen.
- ▶ (Grassi et al. 2021): Hier wird u.a. die Komplexität der *Auswirkung des Alters von Wäldern auf die Waldsenke* betont.
- ▶ (Böttcher et al. 2020a): Hier wird ausführlich die Rolle der RED im Naturschutz erläutert, darüber hinaus werden Schlussfolgerungen und *Handlungsempfehlungen für unterschiedliche Akteure* abgeleitet.
- ▶ (Böttcher et al. 2020b): Neben THG Emissionen und Biodiversität bestehen weitere *Indikatoren* für die Darstellung der Ressourcenleistung der Tierhaltung und Forstwirtschaft (N-Saldo, Humussaldo, Nährstoffbelastung Gewässer, Holzvorrat, Zuwachs, Holzaufkommen, Änderung Bodenkohlenstoff, Bestandsstrukturen). Auch für den Deckungsbeitrag als Indikator des Nutzens können alternative Indikatoren (Bruttowertschöpfung, der Erlös, die Trockenbiomasse oder auch die Energie- oder Proteinproduktion) verwendet werden.
- ▶ (Rupp 2020): Hier wird die häufig ökologisch bedenkliche Biomasseproduktionsweise, die negative Auswirkungen auf die Umwelt mit sich bringt betont (Degradation, Biodiversitätsverlust, THG Emissionen). Hier können u.a. alternative, agrarökologische Ansätze Abhilfe schaffen. Nachhaltigkeit soll bereits bei der Biomasseerzeugung umgesetzt werden. Neben den ökologischen Konsequenzen werden soziale und ökonomische Aspekte erläutert. Dabei ist wichtig, dass der Wohlstand der Bioökonomie gerecht verteilt wird, beispielsweise durch regionale Wertschöpfungsketten/-netze. Im Zentrum der kritischen Auseinandersetzung steht die Frage nach einem *neuen Wirtschaftsparadigma*. Das bisherige grüne Wachstumskonzept (Wirtschaftswachstum bei reduzierten Ressourcenverbrauch) wird sehr kritisch betrachtet. Es gilt ein neues Konzept zu entwickeln, dass sich a) an umwelt- und sozialverträglich verfügbaren Biomasseressourcen anlehnt und b) den Ressourcenverbrauch reduziert. Zusätzlich enthält Rupp (2020) essenzielle Leitfragen (Wofür nutzen wir zukünftig die verfügbare Biomasse? Wie können wir uns zum Wohle aller vom Wachstumszwang lösen (Ressourcenverbrauch reduzieren, weniger kurzlebigen Produkte?)), als auch weitere zentrale Fragen die es zu beantworten gilt: Welche Biomasseprodukte? Herkunft der Biomasse? Ausreichend Biomasse für Transformation? Gewinner und Verlierer? Politische und gesellschaftliche Rahmenbedingung für nachhaltige Bioökonomie?
- ▶ (Fritsche et al. 2020): Sie erläutern, dass die EU-Bioökonomiestrategie einen Wandel vom Substitutionsgedanken hin zur *Zirkularität* beabsichtigt. Darüber hinaus wird der Begriff

BioWEconomy eingeführt, der beabsichtigt auch soziale Aspekte in das Konzept der Bioökonomie zu integrieren.

- ▶ (Banse et al. 2020): Hier werden drei *Szenarien* einer zukünftigen Bioökonomieentwicklung dargestellt. Dazu zählen „Bioökonomie am Tropf“, „Bioökonomie-Inseln“ und „Bioökonomie-Wende“. Letzteres Szenario beinhaltet u.a. das Einführen einer *Konsumgütersteuer*, die Produkte mit hohem ökologischen Fußabdruck verteuert, nachhaltige Produkte begünstigt.
- ▶ (Hoff et al. 2018): Die Implementierung der EU-Bioökonomiestrategie bringt sowohl *Möglichkeiten, als auch Herausforderungen und Nutzungskonflikte* beispielsweise im Kontext nachhaltige Produktion, Verarbeitung und Nutzung von Biomasse mit sich. Zusätzlich dazu betont Hoff, dass Europa entsprechende Nord-/Süd Partnerschaften durch beispielsweise Wissenstransfer entwickeln und pflegen soll.
- ▶ (Eppler et al. 2021): Die *5 Kernstrategien für eine nachhaltige Entwicklung* lauten: 1.) Übersetzung der planetaren Grenzen in maximale Biomassemengen, die ohne nachteilige Wirkungen für Mensch und Umwelt sowie für künftige Generationen nutzbar sind. 2.) Transformation des Ernährungssystems im Hinblick auf Ernährungssicherung, Biodiversität, Klimaschutz und nachhaltige Landnutzung. 3.) Vorrang stofflicher Nutzung in Kaskaden und in dezentralen Bioraffinerien, die energetische, stoffliche und Futter-Produkte integriert bereitstellen, sowie prioritäre Nutzung biogener Abfall- und Reststoffe bei Einhaltung von Nachhaltigkeitskriterien. 4.) Integration des Biomasseanbaus über Zwischen- und Zweitkulturen sowie Acker-Wald-Mischformen, die biogene Rohstoffe ohne direkte oder indirekte Landnutzungsänderungen bereitstellen, in eine ökologische Landwirtschaft. 5.) Anbau biogener Rohstoffe auf Flächen, die wegen geringer Bodengüte, Rentabilität und Wasserverfügbarkeit nicht für Nahrungs- oder Futtermittel genutzt werden. Hierzu zählen z.B. durch Überweidung degradierte Flächen, auf denen in mehrjährigen Kulturen biogene Rohstoffe (nach)wachsen können.
- ▶ (Material Economics 2021): Im Rahmen der Studie wird u.a. eine *Priorisierung der Biomassenutzung* Europas detailliert erläutert.
- ▶ (Adams et al. 2022): Die zentrale Frage zielt auf die *Priorisierung der Biomasse* und Limitierungen in der Bereitstellung ab (Hinweis: Artikel noch nicht verfügbar, nur Abstract vorhanden).
- ▶ (Perbandt et al. 2021): Folgende *Zielkonflikte* werden in Perbandt et al. (2022) erläutert: Ernährungssicherheit vs. Energiesicherheit, Intensive Landwirtschaft vs. Schonung natürlicher Ressourcen, Expansion der Landwirtschaft vs. Erhalt der Biodiversität, Lokale Landwirtschaft vs. globale Landwirtschaft, Wirtschaftlichkeit vs. Umweltschutz. Diese werden detailliert erklärt und politische Ansätze zur Konfliktbewältigung werden gegeben.

2.1.3.8 Druck auf die biotische Ressource

- ▶ (Fehrenbach et al. 2017a): Aufgrund der Tatsache, dass Biomasse eine limitierte Ressource ist und bereits vielfältig eingesetzt wird, können unter dem steigenden Druck auf diese Ressource nur geringe weitere Potenziale erschlossen werden. Um diese limitierte Ressource effizient zu nutzen, soll eine *Kaskadennutzung* erfolgen – sofern möglich und aus nachhaltiger Sicht sinnvoll.
- ▶ (Goh 2017): Die zentralen Fragestellungen aus Goh (2017) wurden vor dem Hintergrund des steigenden Drucks auf die biotische Ressource im Zuge der Erweiterung der Bioökonomie formuliert. Dabei geht es um Biomasseflüsse, Konsequenzen zusätzliche Biomassebedarfe

auf Emissionen (LUC) und Flächenverfügbarkeiten. Insbesondere durch ein *verbessertes Flächenmanagement*, eine *höhere Produktivität mit effizienter Nutzung bisher nicht ausreichend genutzter kohlenstoffarmer Landressourcen (ULC)* kann die Lücke des Biomassebedarfs geschlossen werden.

- ▶ (Forsell 2016) zufolge geht eine Zunahme der Bioenergienachfrage mit einem *verstärkten Druck* auf Wälder, als auch mit einer Zunahme an Holzimporten in die EU einher.
- ▶ (Fehrenbach et al. 2021a): Sie betonen, dass lediglich eine limitierte Fläche der Biomasseproduktion und folglich nur eine limitierte Menge an Biomasse zur Verfügung steht. Es können nicht alle Optionen der Biomassenutzung simultan umgesetzt werden, sondern die Verwendung der Biomassenutzung folgt dem „Je-mehr-vom-Einen-desto-weniger-vom-Anderen-Prinzip“. Eine *Priorisierung* der Biomasseverwendung ist folglich unerlässlich.
- ▶ (Möller et al. 2020): Die Untersuchung ergibt, dass eine Erweiterung der Bioökonomie zusätzliche Biomasse erfordert, wodurch der *Druck auf die Flächennutzung*, sowohl in Deutschland als auch im Ausland steigt. Eine Intensivierung der Landnutzung, als auch der Landnutzungsänderungen ist die Folge dessen. Auch bei Reststoffen und Abfällen kann es zu Nutzungskonflikten kommen.
- ▶ (Böttcher et al. 2020b): Sie betonen die konkurrierende Nutzung natürlicher Ressourcen aufgrund der *steigenden Weltbevölkerung* und veränderten *Konsummustern*.
- ▶ (Rupp 2020): Den Erläuterungen von Rupp (2020) zufolge wird bisher das Thema *Umdenken im bisherigen Umgang mit verfügbaren Ressourcen* nicht ausreichend adressiert. Die komplette Substitution fossiler durch biotische Ressourcen ist weder möglich noch eine Garantie für nachhaltiges Wirtschaften. Deutlich wird, dass Nutzungskonkurrenzen bereits jetzt bestehen und dass sich diese Situation zukünftig verschärfen wird. Biomasse ist eine endliche Ressource, die Flächenpotenziale sind begrenzt.
- ▶ (Fritsche et al. 2020): Dieser Studie zufolge ist bis 2030 für alle Sektoren und ggf. darüberhinaus *ausreichend nachhaltige Biomasse* in der EU verfügbar.
- ▶ (Banse et al. 2020): Aufgrund der Flächenbegrenzung bestehen Zielkonflikte. Banse führen hierfür die *Konflikte* „Tank vs. Teller“ und „Bio-basierte Produkte vs. Bioenergie“ auf. Gesellschaftliche Konflikte bestehen auf Seiten der „Biomassenutzung vs. fossil-basierter Nutzung“, „Landumbruch vs. Klimaschutz“, „Intensive Anbautechniken vs. Umweltschutz“, „Verdrängung fossil-basierter Wirtschaftszweige versus arbeitsmarktpolitische Ziele“, „Nord-Süd-Zielkonflikte“.
- ▶ (Hoff et al. 2018): Sie betonen, dass durch Bioökonomie der Druck auf die biotische Ressource zusätzlich zu den bereits existierenden Nachfragen steigen kann. Eine volle Umsetzung aller Bioökonomievorhaben wird wahrscheinlich die Nachfrage deutlich verstärken. Dem kann mit Maßnahmen (*Kaskadennutzung, Recycling, Konsumverhalten verändern*) Abhilfe geschaffen werden. Andernfalls sind die Konsequenzen ein zunehmender Flächen-, Wasser-, und Ressourcenverbrauch und folglich die Beeinträchtigung von Ökosystemen, Biodiversität und deren Funktionen.
- ▶ (Material Economics 2021): Die Studie betont, dass Biomasse knapp ist und nicht für alle anvisierten Optionen zur Verfügung steht. Es soll *40-100 % mehr Biomasse verwendet* werden als vorhanden ist. Daher ist eine Priorisierung unumgänglich.

- (Adams et al. 2022): Sie gehen – dem Abstract zufolge (Hinweis: Artikel noch nicht verfügbar, nur Abstract vorhanden) – auf den Aspekt der *steigenden Biomassenachfrage bei gleichzeitiger limitierten Flächenverfügbarkeit* ein. Es wird aufgeführt, dass Flächennutzungskonkurrenzen zwischen der Bereitstellung von Nahrungsmitteln, der Bioökonomie und Schutzziele bestehen. Dazu kommt, dass die Biomasseproduktivität durch externe Effekte, wie den Klimawandel, beeinträchtigt wird.
- (Perbandt et al. 2021): Der Druck auf die begrenzte Ressource Boden steigt durch den Verlust von Fläche im Zuge von *Übernutzung, Überdüngung, Bodenerosion* und durch Desertifikation und zunehmende Versiegelung.

2.1.4 Zusammenfassung der Literaturlauswertung

In diesem Abschnitt wurden 32 Studien zusammengestellt, deren Erkenntnisse für die Entwicklung einer Bioökonomiestrategie relevant sind. Dabei wurde einerseits untersucht, ob im aktuellen wissenschaftlichen Diskurs die für die Bioökonomiestrategie relevanten Themen angesprochen werden und welche Aussagen genau in den Studien zu den entsprechenden Themen getroffen werden.

Tabelle 2 gibt einen Überblick darüber, für welche Themen aus der vorausgegangenen Analyse Aussagen getroffen wurden.

Tabelle 2: Vorhandene Aussagen innerhalb der relevanten Themenbereiche (eine grüne Färbung bedeutet, dass hierfür in Kapitel 2.1.3 entsprechende Aussagen vorliegen)

	Umweltgerechte Biomassenutzung	Wechselwirkung zu planetaren Grenzen	Wechselwirkung zu den SDG's	Wechselwirkung zum Klimaschutz	Wechselwirkung zum Biodiversitätsschutz/ Naturschutz	Aspekte der Landnutzung/Landnutzungsänderung	weitere relevante Aspekte	Druck auf die biotische Ressource
(Fehrenbach et al. 2017a)								
(Goh 2017)								
(Forsell 2016)								
(Fehrenbach et al. 2021a)								
(Bringezu et al. 2021)								
(Möller et al. 2020)								
(Calicioglu, Bogdanski 2021)								
(Linser, Lier 2020)								
(Heimann 2019)								
(Grassi et al. 2021)								

	Umweltgerechte Biomassenutzung	Wechselwirkung zu planetaren Grenzen	Wechselwirkung zu den SDG's	Wechselwirkung zum Klimaschutz	Wechselwirkung zum Biodiversitätsschutz/ Naturschutz	Aspekte der Landnutzung/ Landnutzungsänderung	weitere relevante Aspekte	Druck auf die biotische Ressource
(Böttcher et al. 2020a)								
(Wilting et al. 2017)								
(Böttcher et al. 2020b)								
(Rupp 2020)								
(Fritsche et al. 2020)								
(Banse et al. 2020)								
(Hoff et al. 2018)								
(Eppler et al. 2021)								
(Material Economics 2021)								
(Adams et al. 2022)								
(Perbandt et al. 2021)								

Darstellung: ifeu

Die Analyse erfolgte systematisch entlang der für eine Bioökonomiestrategie als relevante erachteten Themen wie: „Umweltgerechte Biomassenutzung und Biomasseproduktion“, „Wechselwirkungen innerhalb des Konzepts der planetaren Grenzen oder vergleichbarer Konzepte“, „Wechselwirkungen zu den Zielen der Agenda 2030 (Sustainable Development Goals)“, „Wechselwirkungen zum Klimaschutz (THG-Minderung, Kohlenstoffspeicherung, natürliche Senken)“, „Wechselwirkungen zum Biodiversitätsschutz / Naturschutz“, „Aspekte der Landnutzung / Landnutzungsänderung“.

Den Ergebnissen zufolge werden alle relevanten Themen von den Studien adressiert. Es fällt auf, dass ein besonderer Fokus auf den Themen Landnutzung, Klimaschutz und umweltgerechte Potenziale und Biodiversität liegt, da diese Themen am häufigsten in den Studien adressiert werden.

In einem zweiten Schritt wurde die Auswahl von 21 Studien einer vertieften Analyse unterzogen, indem im Detail untersucht wird, welche Aussagen die Autorenschaft bezüglich der relevanten Themen konkret trifft. Dabei wurde eine Differenzierung der Aussagen vorgenommen nach Aussagen bezüglich der relevanten Themen, weitere relevante Aspekte und Aussagen bezüglich der Thematik des steigenden Drucks auf die biotische Ressource.

Aussagen bezüglich der relevanten Themen

Umweltgerechte Biomassenutzung und Biomasseproduktion:

Zu diesem Themenbereich werden sowohl Aspekte der Biomasseproduktion (Mobilisierung von ULC Flächen, Bewirtschaftungsoptionen der Biomasse), als auch Aspekte der Biomassenutzung (Darstellung unterschiedlicher Biomassenutzungen, Kaskadennutzung) genannt. Dabei werden auch Szenarien oder Fußabdrücke eingesetzt, um Konsequenzen unterschiedlicher Biomassenachfrage abbilden zu können. Um die Nachhaltigkeit abzubilden, werden Bewertungskonzepte, wie beispielsweise die „nachhaltige Ressourcenleistung“ oder der „human appropriation of net primary production (HANPP)“ eingebracht. Während einige Autor*innen die Begrenztheit der Ressource Biomasse betonen, wird von anderen argumentiert, dass vorerst ausreichend nachhaltige Biomasse zur Verfügung steht. Welche Potenziale und in welchem Umfang sie vorhanden sind, ist ebenso Gegenstand der Aussagen.

Wechselwirkungen innerhalb des Konzepts der planetaren Grenzen oder vergleichbarer Konzepte:

Es wird mehrfach betont eine Bioökonomie müsse sich innerhalb der planetaren Grenzen bewegen da eine Produktionssteigerung – auch auf Basis biotischer Ressourcen – zu Zielkonflikten mit fast allen planetaren Grenzen führt. Das Konzept der planetaren Grenzen kann somit als Leitrahmen bzw. Orientierung der Bioökonomie dienen.

Wechselwirkungen zu den Zielen der Agenda 2030 (Sustainable Development Goals):

Insbesondere zum Konzept der SDG bestehen zahlreiche Verbindungen. Bioökonomieziele, die auf eine Produktionssteigerung bzw. ein Wirtschaftswachstum abzielen, stehen hierbei häufig im Zielkonflikt zu einigen SDG. Während einige Synergien zwischen Bioökonomiezielen und den SDG (z.B.: Wissenstransfer) vorhanden sind, bestehen auf der anderen Seite auch Zielkonflikte zwischen den SDG und Aspekten der Bioökonomie (z.B: Leben an Land). Aufgrund der engen Verzahnung einer nachhaltigen Bioökonomie und den SDG, können die Konzepte dem gegenseitigen Monitoring dienen. Andere Autor*innen schlagen vor, die SDG als normatives Regelwerk für eine nachhaltige Bioökonomie zu verwenden.

Wechselwirkungen zum Klimaschutz (THG-Minderung, Kohlenstoffspeicherung, natürliche Senken):

In diesem Themenbereich wird einerseits erläutert, dass eine Bioökonomie nicht per se zu einer Reduktion von THG-Emissionen führen wird (Biokraftstoffe), sondern häufig eine Zunahme an THG Emissionen zu erwarten ist (Emissionen aus Landnutzungsänderungen, iLUC), die wiederum auf andere Schutzgüter (Biodiversität) Auswirkungen hat. Darüber hinaus wird angebracht, durch welche Maßnahmen die negativen Auswirkungen auf das Klima reduziert werden können (Kaskadennutzung, Optionen der Bewirtschaftung von Biomasse zum Aufbau des biogenen Speichers). Auch für diesen Themenbereich bestehen Szenarien, Konzepte und Indikatoren, um die Auswirkungen einer Bioökonomie auf das Klima sichtbar machen zu können (Klimafußabdruck). Insbesondere im Kontext waldbasierte Bioökonomie werden Fragen zur Nutzung von Holz aus Klimaschutzperspektive betrachtet.

Wechselwirkungen zum Biodiversitätsschutz / Naturschutz:

Aussagen dieses Themenbereichs beziehen sich teilweise auf die Art und Weise wie Biomasse genutzt werden kann, um negative Auswirkungen auf den Naturraum, die Ökosysteme und die Biodiversität zu verringern oder vermeiden. Darüber hinaus werden Nutzungskonflikte zwischen dem Schutz von Flächen und der Bewirtschaftung von Flächen deutlich, als auch Konsequenzen der Bioökonomie für Biodiversität (Naturrauminanspruchnahme). Auch diese können mit entsprechenden Konzepten und Indikatoren (Biodiversitätsfußabdruck, Hemerobie) aufgezeigt werden. Mehrfach wird der Aufbau der Waldsenke angesprochen, der neben

Klimaschutzaspekten auch zahlreiche positive Auswirkungen auf die Biodiversität (Totholz) und Ökosystemleistungen mit sich bringt.

Aspekte der Landnutzung / Landnutzungsänderung:

Aspekte der Landnutzung/-sänderung umfassen einerseits die durch die Bioökonomie belegten Flächen einschließlich der Landnutzungsänderungen, die häufig außerhalb der territorialen Grenzen erfolgen (iLUC). Für eine Quantifizierung der Flächenbelegung kann beispielsweise der Ackerflächenfußabdruck verwendet werden. Andererseits werden Gedanken zu noch ungenutzten Flächenpotenzialen aufgeführt und es wird diskutiert, wie die limitierte Ressource Fläche bewirtschaftet werden soll um Kohlenstoffsinken aufzubauen. Um sowohl Landnutzung, als auch Ressourceneffizienz betrachten zu können wird das Bewertungskonzept der nachhaltigen Ressourcenleistung erläutert. Darüber hinaus werden Nutzungskonflikte, beispielsweise zwischen Expansion der Landwirtschaft und Erhalt der Biodiversität diskutiert.

Weitere relevante Aspekte

Zusätzlich zu den bisherigen Themen werden in den Studien eine Vielzahl weiterer für eine Bioökonomiestrategie relevanter Aspekte erläutert. Dazu zählen methodische Aspekte (z.B.: Indikator Biomass Utilization Factor BUF), ökologische und ökonomische Betrachtungen der Bioökonomie, Vorschläge für Priorisierungen der Biomasseströme, Aspekte des Konsumverhaltens (Konsumgütersteuer) und Wirtschaftsparadigmas, das Konzept BioWEconomy, Kernstrategien einer nachhaltigen Bioökonomie und viele weitere Aspekte.

Druck auf die biotische Ressource

In zahlreichen Studien wird der Aspekt einer Steigerung der Nutzung biotischer Ressourcen vor dem Hintergrund des Ausbaus der Bioökonomie adressiert und er wird sehr kritisch wahrgenommen. Auf alle Flächen lastet aufgrund zahlreicher Nutzungskonflikte ein starker Druck. Die Bioenergiefrage führt beispielsweise zu einem besonders starken Druck auf die Wälder. Es werden Hintergründe des starken Drucks erläutert (Bioökonomie, Nutzungskonflikte, Bevölkerungswachstum, Konsumverhalten) und Optionen zukünftiger Biomassebewirtschaftung dargestellt (effektives und nachhaltiges Flächenmanagement, Kaskadennutzung), die den Druck auf die Ressource Fläche und Biomasse verringern sollen.

Die Erkenntnisse aus AP1.1 liefern somit Einblicke in die aktuellen Diskussionen zu Biomassepotenzialen und deren Verwendung, Wechselwirkungen und Konflikten der Bioökonomie mit bisherigen Nachhaltigkeitskonzepten und Umwelt- und Naturschutzbelangen. Darüber hinaus werden weitere Themen erläutert, die für eine Bioökonomiestrategie von großer Bedeutung sind.

2.2 Die nachhaltig verfügbare Biomasse

Im Folgenden wird auf die Arbeit von (Hennenberg et al. 2023b) Bezug genommen. Als Grundlage dienen dazu die Arbeiten im Rahmen der Szenarien aus

- dem Projekt BEPASO (Musonda et al. 2020), (Banse et al. 2020),
- den Langfristszenarien LFS 3 (Köppen, Rettenmaier 2023) und
- dem Klimaschutzinstrumente-Szenario 2030 - KIS 2030 (Repenning et al. 2023),

Diese Quellen wurden durch (Hennenberg et al. 2023b) wo nötig und möglich mit neueren Daten ergänzt (z. B. biogene Abfälle und Reststoffe). Außerdem wurden die aus diesen Szenarien resultierenden Biomassepotenziale angepasst, um auch aktuelle politische Entwicklungen abzubilden. Da solche neueren Entwicklungen nicht nur die Erzeugung, sondern auch die

Nutzung von Biomasse für bestimmte Anwendungen beeinflussen (z. B. RED III)², wurde das zukünftige Biomassepotenzial z.T. auch aufgeteilt nach stofflicher und energetischer Nutzung. Die Ergebnisse werden je Biomassetyp in unterschiedlichen, möglichst aussagekräftigen Einheiten ausgedrückt:

- ▶ Waldholz in Mio. Festmeter ohne Rinde (FM o.R. bzw. Mio. m³),
- ▶ agrarische Biomasse in Anbauflächen in Mio. ha,
- ▶ der Tierbestand in Millionen Großvieheinheiten (GVE) und
- ▶ biogene Abfälle und Reststoffe in Millionen Tonnen Trockenmasse (Mio. t_{TM}).

Folgende Ergebnisse sind in Tabelle 3 zusammengestellt:

- ▶ Die Biomassepotenziale zum Szenario BEPASO-Wende sind aus Banse et al. (2023, S. 60 ff.) übernommen.
- ▶ Die Biomassepotenziale der Szenarien LFS 3 und KIS 2030, die sich in der Zusammenfassung nach der Neuberechnung für Abfälle und Reststoffe und unter weiteren Annahmen zur stofflichen Nutzung von Biomasse ergeben.

Wie zu sehen ist, haben die drei Szenarienkonzepte unterschiedliche Zeithorizonte. Angesichts der ebenfalls unterschiedlichen Grundannahmen sind die Ergebniszahlen nicht eins zu eins miteinander vergleichbar. Sie zeigen in ihrem Gesamtbild jedoch einen soliden Korridor des Potenzials.

Wie sich die Restriktionen nach den Kriterien zu Flächensuffizienz und Klima-/und Naturschutzziele auf dieses Biomassepotenzial auswirken, wird in den nachfolgenden Abschnitten kurz beschrieben.

Tabelle 3: Flächennutzung und Biomassepotenziale in 2020 sowie in den Szenarien KIS 2030 (für das Jahr 2040), LFS 3 (für das Jahr 2045) und BEPASO-Wende (für das Jahr 2050)

	Einheit	2020	2040 KIS 2030	2045 LFS 3	2050 BEPASO
Forstwirtschaft					
Waldholz inkl. Restholz ^{a)} - stofflich - energetisch	Mio. Fm o.R. (= Mio. m³)	74,9 - 123,3	72,5 68,5 4,0	58,2 56,0 2,2	72,0
Landwirtschaft					
Ernährung & Futtermittel - Ackerland - Grünland	Mio. ha	14,0	13,84 9,60 4,24	14,54 10,39 4,15	13,34
NawaRo inkl. KUP - stofflich & energetisch - stoffliche Nutzung - energetische Nutzung ^{b)}	Mio. ha	2,58	2,70 1,10 1,60	1,47 1,08 0,38	2,79

² Richtlinie (EU) 2018/2001 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen (Neufassung), geändert durch Richtlinie (EU) 2023/2413; kurz als RED III bezeichnet (Renewable Energy Directive in der 3. Fassung)

	Einheit	2020	2040 KIS 2030	2045 LFS 3	2050 BEPASO
Biogene Abfälle und Reststoffe					
tierische Exkremente (anteilige Nutzung als Biogas)	Tierzahlen (Mio. GVE)	9,9	8,8	5,9	5,6
Summe der biogenen Abfälle und Reststoffe (stofflich, energetisch oder ungenutzt)	Mio. t _{TM}	101,4 ^{e)}	105,4	108,1	
holzige Abfälle & sonstige Reststoffe ^{a)} - technisches Potenzial - energetisch	Mio. t _{TM}	27,10 - 36,10	10,5	9,9	19,36
nicht-holzige Abfälle/Reststoffe ^{d)} (technisches Potenzial) (energetisch) ^{c)}	Mio. t _{TM}	52,4	34,7	28,2	48,9

Quelle: (Hennenberg et al. 2023b), Eigene Zusammenstellung, Thünen-Institut. KUP = Kurzumtriebsplantagen, Fm o.R. = Festmeter ohne Rinde, TM = Trockenmasse.

a) holzige Abfälle & sonstige Reststoffe umfasst Sägenebenprodukte, Rinde, Ablauge und Altpapier.

b) inklusive Paludikultur und Agroforst/KUP

c) weitere holzige Abfälle & sonstige Reststoffe umfasst sonstiges Industrierestholz, Altholz, Landschaftspflegeholz

d) ohne Tierexkremente.

e) Stand der Daten für das Jahr 2015: Summe stofflicher und energetischer Nutzung sowie mobilisierbarer Potenziale nach Daten DBFZ-Ressourcendatenbank

2.2.1 Waldholz

Die Restriktionen bei der Entnahme von Waldholz beruhen

- zum einen auf der Erfüllung der LULUCF-Ziele des Klimaschutzgesetzes, wonach nach der geltenden Fassung bis 2030 pro Jahr minus 25 Mio. t CO₂Äq. und weiter bis 2045 minus 40 Mio. t CO₂Äq. jährlich erfüllt werden sollen. Während ein Teil davon durch die Wiedervernässung von organischen Böden erreicht werden soll, muss ein weiterer Teil durch die Waldbewirtschaftung geleistet werden. Dies bedarf einer ausbalancierten Kombination aus Holzernte, Waldumbau und Vorratsaufbau. Trotz erhöhter Risiken durch natürliche Störungen wie Trockenheit, Käferkalamitäten und Sturm muss der Wald eine deutliche Senkenleistung erbringen (Hennenberg et al. 2024).
- Zum anderen darauf, dass diese zum Natürlichen Klimaschutz zählenden Maßnahmen gerade auch im Einklang mit den Zielen des Biodiversitätsschutz und Wildnisentwicklung stehen. Die nationale Biodiversitätsstrategie fordert dazu eine Entwicklung von 2 % Wildnisgebiete an der Landesfläche bis 2030 sowie eine natürliche Waldentwicklung (NWE) von der 5 % der Waldfläche Deutschlands bzw. 10 % der Waldfläche im öffentlichen Eigentum (BMUKN 2024).

Diese Ziele können erreicht werden, wenn der Einschlag bzw. die Entnahme von Waldholz von den in den letzten Jahren von weit über 70 Mio. m³ bis 2030 auf maximal 65 bis 70 Mio. m³ und bis 2045 auf 56 Mio. m³ verringert werden (Hennenberg et al. 2023b).

2.2.2 Agrarische Biomasse

Folgende Faktoren führen zur Reduktion der agrarischen Biomasseproduktion:

- ▶ Die Landwirtschaftsfläche von aktuell 11,66 Mio. ha Ackerland und 4,73 Mio. ha Grünland (BMEL 2021) reduziert sich aufgrund der Wiedervernässung von organischen Böden bzw. Moorboden (Ziel 85 %) um 1,05 Mio. ha; außerdem geht ein weiterer Anteil von rund 0,2 Mio. ha an die fortschreitende Flächenversiegelung sowie Anlagen für den Ausbau von EE-Strom.
- ▶ Die Erträge verringern sich durch
 - Ausweitung des **Ökolandbaus** von derzeit ca. 11 % auf 30 % in 2030.
 - Verringerung des **Stickstoffüberschusses** auf 70 kg N / ha.

Dies betrifft die Produktion an agrarischer Biomasse insgesamt, d.h. auch die Nahrungs- und Futtermittelproduktion.

Darüber hinaus verschiebt sich durch das in Kapitel 2.2.2 beschriebenen Ansatz der Flächensuffizienz (Hennenberg et al. 2023b) (Köppen, Rettenmaier 2023) die Palette an Biomasseproduktion:

1. Durch die Reduktion der Futtermittelproduktion wegen Reduktion des Fleischkonsums um 30 %.
2. Durch die Begrenzung der Anbaufläche auf die in Deutschland verfügbare (Rest-)Fläche – d.h. Flächenbilanz Import/Export auf Null.

Für das verbleibende Potenzial an Biomasse für den Nicht-Nahrungsbereich verbleiben damit von den derzeit genutzten ca. 2,6 Mio. ha zwischen 1,35 Mio. ha (nach LFS-3 - (Köppen, Rettenmaier 2023)) und 2,14 Mio. ha (nach KIS 2030 (Repenning et al. 2023)). Mit dem Szenario BEPASO-Bioökonomiewende liegt das Restpotenzial bei 1,47 Mio. ha (siehe Tabelle 3).

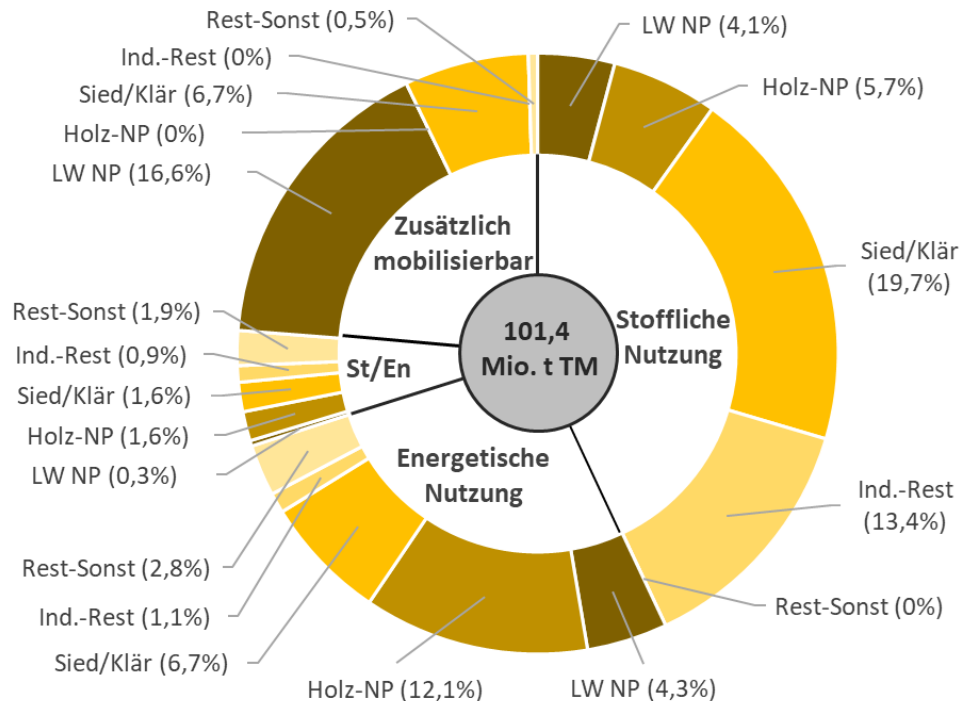
Im Mittel kann somit von einem **verfügbaren Flächenpotenzial von ca. 1,5 Mio. ha** für den Nicht-Nahrungsbereich angenommen werden.

2.2.3 Biogene Abfälle und Reststoffe

Das technische Potenzial³ an **biogenen Abfällen und Reststoffen** betrug im Jahr 2015 101 Mio. t an Trockenmasse (t_{TM} , ohne Waldrestholz und Rinde), wie in Abbildung 4 differenziert dargestellt. Teilerhebungen zeigen, dass diese Menge bis zum Jahr 2020 um gut 5 % abgenommen hat (Banse et al. 2023). Von dem Potenzial im Jahr 2015 befanden sich bereits 76 % in Nutzung. Dabei wurden etwa 46 % stofflich und 30 % energetisch verwendet (Hennenberg et al. 2023b). Mobilisierbare technische Potenziale für zukünftige stoffliche und energetische Nutzung bestehen noch bei Tierexkrementen, Getreidestroh, Siedlungsabfällen und Klärschlamm.

³ Das technische Potenzial beschreibt nach (Brosowski et al. 2015) die zeit- und ortsabhängige, primär aus technischer Sicht (z.B. Bergungsraten, aber auch gesetzlicher Beschränkungen) stofflich oder energetisch nutzbare Menge einer Biomasse.“

Abbildung 4: Technisches Potenzial der biogenen Abfälle und Reststoffe in Deutschland im Jahr 2015 differenziert nach stofflicher und energetischer Nutzung sowie mobilisierbarer Potenziale



Quelle: (Hennenberg et al. 2023b); Daten aus DBFZ-Ressourcendatenbank (DBFZ o.J.)

TM = Trockenmasse, St/En = stoffliche oder energetische Nutzung (nicht differenzierbar), LW-NP = Landwirtschaftliche Nebenprodukte, Holz-NP = Holz-Nebenprodukte, Sied/Klär = Siedlungsabfall und Klärschlamm, Ind.-Rest = Industrielle Reststoffe, Rest-Sonst = Reststoffe von sonstigen Flächen. Darstellung ohne Reststoffe aus dem Wald.

2.3 Bewertung der Umweltwirkungen von Biomasseerzeugung und Biomassenutzung

2.3.1 Beschreibung der Bewertungssystematik

Für die Bewertung von Umweltwirkungen von Biomasseerzeugung und Biomassenutzung bieten sich grundsätzlich ökobilanzielle Ansätze an. Diese sind für Lebenswegketten von Gütern und Dienstleistungen geeignet, je nach Rahmensetzung auch für Stoffströme. Das Konzept der Fußabdrücke orientiert sich ebenfalls eng an der Ökobilanzmethode mit dem Lebenswegansatz.⁴ Eine vollständige ökobilanzielle Bewertung des gesamten Biomassenstroms kann in dieser Arbeit jedoch nicht geleistet werden und entspricht auch nicht dem Ziel einer Übersichtsanalyse. Diese soll eine richtungssichere Einschätzung der Größenordnung von Wirkungen ermöglichen.

Der Übersichtsanalyse liegt eine eigens entwickelte und an die Fußabdruck-Methode angelehnte Systematik zu Grunde, in welcher folgende Komponenten integriert sind:

- ▶ Die Auswahl an betrachteten Umweltwirkungen;
- ▶ Die wesentlichen Biomasseströme (primäre agrarische, primäre forstliche sowie Rest- und Abfallstoffe), heute und im Jahr 2045;

⁴ Siehe: Kohlenstofffußabdruck nach ISO 14067 oder Wasserfußabdruck nach ISO 14046

- Die Ebenen der
 - Erzeugung der Biomasse (Anbau und Verarbeitung) und der
 - Nutzung (sowie dem Verbleib);
- Die kontrafaktische Seite, d. h.
 - Die wahrscheinlichen Alternativen zur genutzten Biomasse (Heute und in 2045) und
 - Die ökologischen Opportunitätskosten.

Die Systematik ist somit sehr umfangreich angelegt. Da die Bearbeitung in einem zeitlich engen Rahmen erfolgt, kann die Ausführung nicht in einer Detailtiefe und -genauigkeit erfolgen, wie sie im Grunde der Thematik angemessen wäre. Nicht alle Aspekte lassen sich in diesem Rahmen scharf quantifizieren, sodass auch halbquantitative Einschätzungen von Wirkungseffekten getroffen werden müssen. Auch können hier keine komplexen Modellrechnungen vorgenommen werden.

Der Anspruch ist es, eine insgesamt richtungssichere Einordnung der Umweltwirkung der Biomasseerzeugung und -nutzung in Deutschland zu liefern. Auf Wissenslücken und Forschungsbedarf wird dabei explizit eingegangen.

2.3.1.1 Umweltwirkungen

Ausgewertet werden folgende Umweltwirkungen:

- Klimaschutz (THG-Emissionen sowie Senken),
- Flächeninanspruchnahme mit dem Hauptaspekt der Wirkungen auf Biodiversität⁵,
- Feinstaubemissionen (inklusive Sekundärpartikel auf Basis von NO_x, NH₃, SO₂, organische Gase)
- Wasserfußabdruck (soweit möglich werden auch Einflüsse auf das Wasserregime in die Betrachtung einbezogen) und
- Nährstoffein- und austräge.

Damit bestehen Überschneidungen mit den SYMOBIO-Fußabdrücken zu Klima, Land (agrarisch genutzt), Wasser und der in Entwicklung befindliche Biodiversitätsfußabdruck.

Insgesamt wird ein Abgleich mit Daten von (Destatis 2020) vorgenommen.

2.3.1.2 Rahmen der betrachteten Biomasseströme

Es werden die wesentlichen Biomasseströme (primäre agrarisch, primäre forstliche sowie Rest- und Abfallstoffe) für die **Ist-Situation** und projiziert für **das Jahr 2045** betrachtet.

Systemrahmen

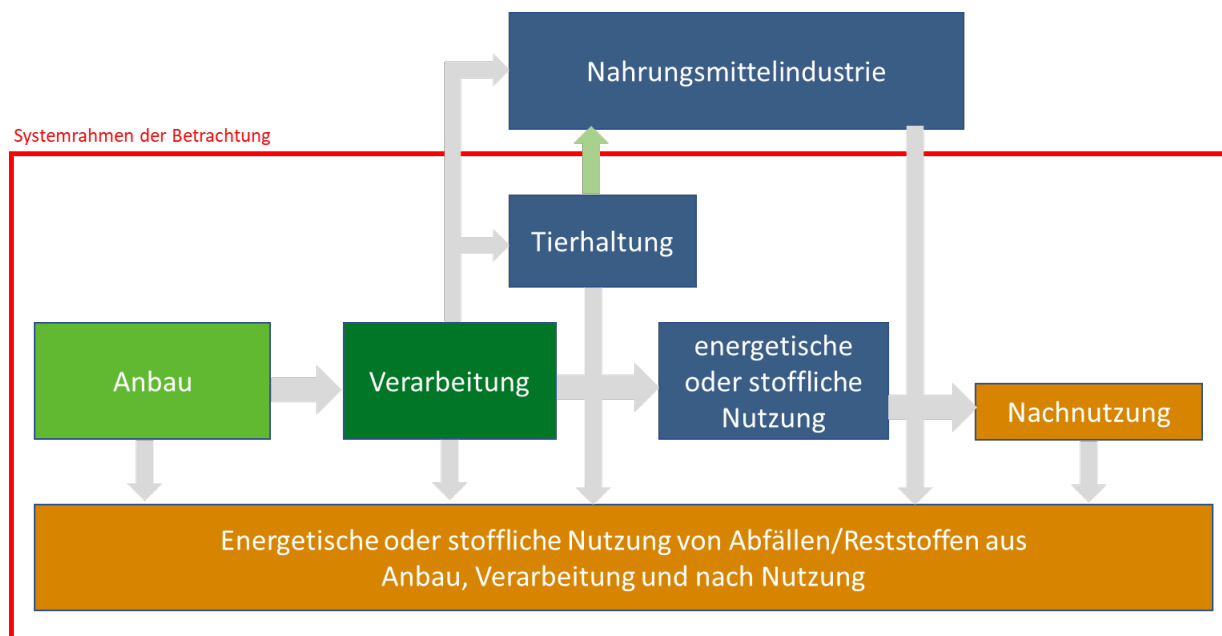
Der Betrachtungsrahmen umfasst die Produktion aller Biomassestoffströme, einschließlich der agrarische Produktion von Biomasse zu Nahrungs- oder Futtermittelzwecken und der Abfälle und Reststoffe, die aus der Tierhaltung und der Nahrungsmittelindustrie anfallen. Dabei werden

⁵ Der SYMOBIO Land-Fußabdruck beinhaltet nur die agrarischen Flächen; hier wären Forstflächen zu ergänzen und für eine kontrafaktische Analyse (Substitution) ggf. auch sonstige Flächen; außerdem bietet es sich hier, die mit der Flächenbelegung verbundene Wirkung auf Biodiversität einzubeziehen. Der in SYMOBIO 2.0 in Entwicklung befindliche Biodiversitätsfußabdruck ist derzeit noch nicht so weit anwendungsfähig, um hier zur Verfügung stehen zu können. Aus diesem Grund wird hier der für das UBA auf der Basis von Hemerobie entwickelte Flächenrucksack angewendet; Erläuterungen hierzu finden sich in Anhang C).

auch die Emissionen aus der Tierhaltung berücksichtigt⁶. Für die Bilanzierung der Umweltwirkungen werden jedoch die Prozesse der Nahrungsmittelindustrie, sprich die Verarbeitung zu Lebens- und Genussmitteln und der Konsum ausgenommen, da dies den Rahmen der Untersuchung extrem ausweiten würde. Abbildung 5 skizziert diesen Systemrahmen.

D.h. andererseits, dass Abfall- und Reststoffe, die nicht genutzt werden, hier nicht betrachtet werden. Das betrifft z. B. Stroh, das im Agrarbereich bleibt, weil es untergepflügt wird oder Gülle, die nicht vergoren, sondern direkt wieder als Wirtschaftsdünger in den Produktionszyklus zurückgeführt wird.

Abbildung 5: Systemrahmen für die Betrachtung der der Biomasseproduktion und Biomassenutzung in Deutschland.



Eigene Darstellung, ifeu

Geographischer Rahmen

Die Aufgabenstellung sieht die Bewertung der in Deutschland erzeugten **und** der in Deutschland konsumierten Biomasse vor. Exporte und Importe werden in der Darstellung der Umweltwirkungen wie folgt berücksichtigt:

1. Es werden die Umweltwirkungen aller in Deutschland erzeugten agrarischer und forstlichen Biomassen bilanziert
2. Hinzugefügt werden die Umweltwirkungen der nach Deutschland importierten Biomassen, wobei hierbei auf der Basis der jeweiligen Hauptbiomassearten nur Nettoexportüberschüsse eingerechnet werden⁷
3. Somit sind alle Biomassen einbezogen, die in Deutschland produziert werden plus derjenigen, die durch Nettoimport in den deutschen Konsum einfließen.

⁶ Beschränkt auf die Treibhausgase Methan und Lachgas sowie auf Ammoniak.

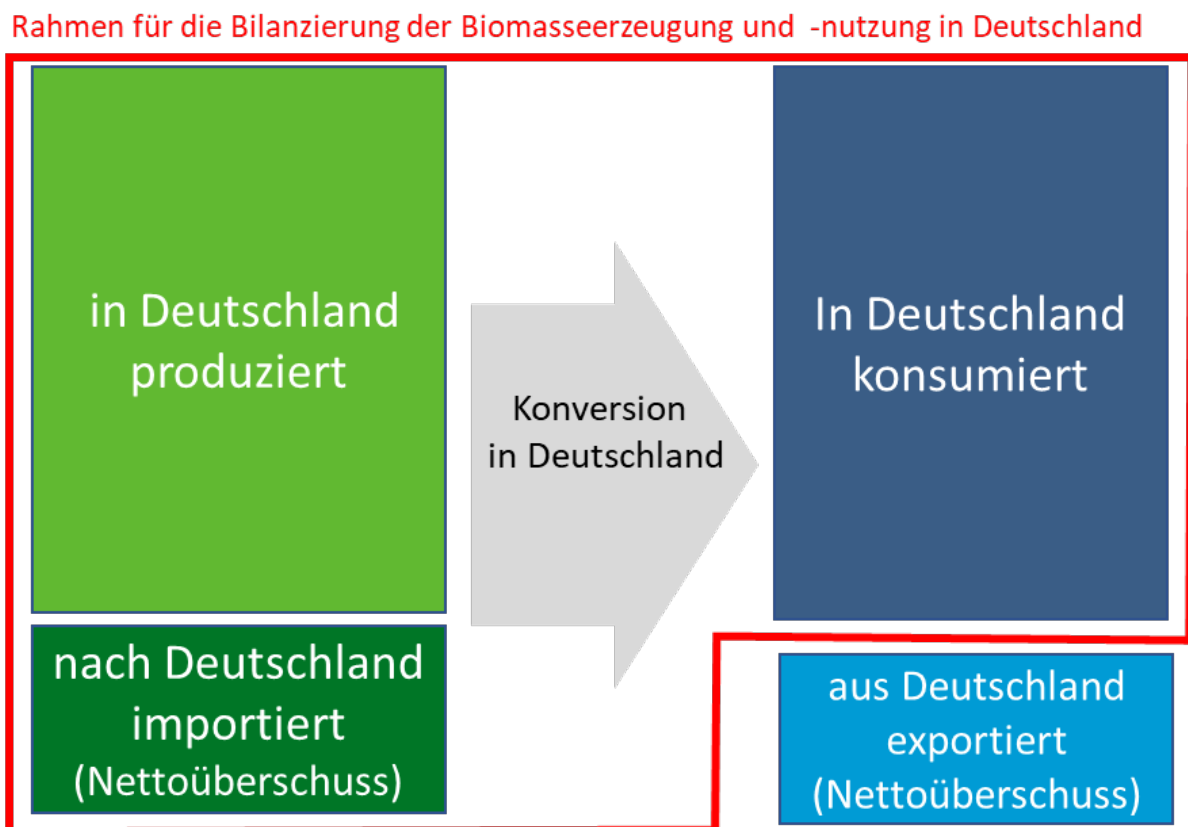
⁷ z.B. bei Leguminosen wie Sojabohnen, welche fast ausschließlich importiert werden, während bei Getreide ein Exportüberschuss vorliegt, weswegen die importierten Mengen hier nicht berücksichtigt werden.

4. Biomassen bzw. Erzeugnisse, die netto exportiert werden, werden separat ausgewiesen und können vom Gesamtbilanzergebnis abgezogen werden.⁸

Abbildung 6 skizziert diese Art der Rahmensetzung. Auf diese Weise ist es auch möglich, Gesamtbilanzen der Umweltwirkungen zu erstellen, in welchen die kontrafaktische Seite (z. B. substituierte Produkte) einbezogen werden. Dies kann jedoch nur mittels starker Vereinfachungen erfolgen, z.B. unter Vernachlässigung von importierten Fertigwaren (z. B. Möbel, verarbeitete Lebensmittel). In Abbildung 7 ist die Rahmensetzung für diese Betrachtung veranschaulicht. Zur Definition des kontrafaktischen Systems siehe auch in Kapitel 2.3.1.5.

Es sei darauf hingewiesen, dass bezüglich der Mengenströme auf die im folgenden Abschnitt beschriebenen Literaturangaben Bezug genommen wird, bzw. auf die im Rahmen des Projekts herangezogenen Zukunftsszenarien (BEPASO, KIS-2030, LFS-3). Dabei können keine eigenständigen Modellrechnungen durchgeführt werden, um z.B. eine genaue Abbildung der volkswirtschaftlichen Stoffströme zu erzielen.

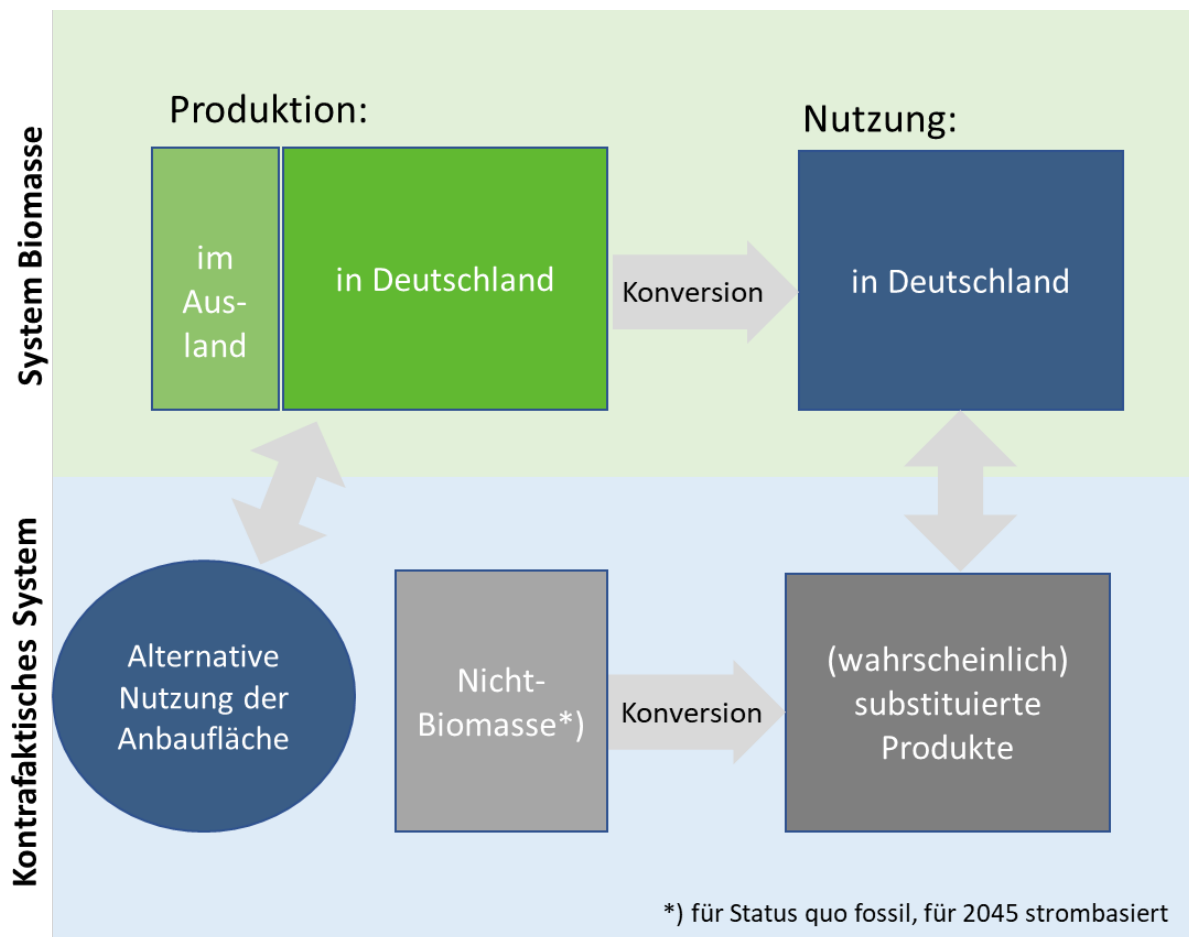
Abbildung 6: Geografische Rahmensetzung für die Betrachtung der territorialen Wirkungen der Biomasseproduktion (roter Rahmen).



Eigene Darstellung, ifeu

⁸ z.B. für Getreide oder Fleisch.

Abbildung 7: Systemgrenze für die Rahmensetzung zur Biomassenutzung in Deutschland inklusive der substituierten Systeme (kontrafaktisches System).



Eigene Darstellung, ifeu

Zeitlicher Rahmen

Aus den oben genannten geografischen Bezügen ergibt sich schon eine Vorgabe für den zeitlichen Rahmen: die in Deutschland **innerhalb eines Bezugsjahrs** produzierte/genutzte Biomasse. Wenngleich bei der Bilanzierung der Umweltwirkungen ein Lebenswegbezug (sprich vorgelagerte und auch nachgelagerte Prozesse) berücksichtigt wird, so spiegelt der zeitliche Bilanzraum für die Biomasseproduktion/-nutzung nicht den vollen Lebensweg wider, sondern bricht beim Jahresübergang ab. Für die energetische Nutzung von primärer Biomasse spielt das keine wesentliche Rolle, da die Produktion und Nutzung innerhalb eines Jahreszeitraums zu erwarten ist. Schon bei der Nutzung von Altholz wird dieser Zeitraum überschritten, denn Altholz stammt aus Produktionen früherer Jahre. Dies gilt selbstverständlich erst recht für stoffliche Nutzungen, die über den Jahreszeitraum hinausreichen und deren Lebenswegende somit in späteren Jahren anfällt.

Dieser Punkt spielt vor allem bei der Frage, wie temporäre Speicher berücksichtigt werden, eine Rolle. Würde man hier streng nach der ISO-Norm für carbon footprint von Produkten (ISO 14067) vorgehen, so wäre auch in langlebigen Produkten gespeicherter Kohlenstoff zu bilanzieren, als emittiertes CO₂ zum Zeitpunkt der Nutzung. Speichereffekte würden somit nicht in der Bilanz erscheinen. Mit der zeitlichen Bezugnahme auf ein Jahr eröffnet sich die Möglichkeit Speichereffekte in Analogie zur LULUCF-Methodik des UNFCCC-Berichtsformats einzubeziehen.

2.3.1.3 Vorgehensweise bei der ökologischen Bilanzierung der Erzeugung der Biomasse (Anbau und Verarbeitung)

Auch werden zwei zeitliche Ebenen definiert. Während für den Status quo aktuelle Daten (vorzugsweise Mittelwerte für den Zeitraum 2020-2022) zu Grunde gelegt werden, wird für die Szenarien 2045 auf die entsprechenden Setzungen für das nachhaltige Biomassepotenzial Bezug genommen, je nach Szenario mit Restriktionen zum Düngemiteleinsatz, mehr Ökolandbau und Effizienzgewinne. Dabei wird zumindest in weiten Ansätzen auch die Veränderung des Hintergrundsystems durch die Transformation von Energiewirtschaft und Industrie einbezogen. So wird der Strom in 2045 nahezu emissionsfrei sein wie auch z. T. die N-Düngerproduktion durch Einsatz „grünen Wasserstoffs“, wobei aufgrund der Komplexität der Gesamtsysteme vielfach vereinfachende Annahmen zu treffen sind. Insbesondere der Ausbaus hin zu 30 % Ökolandbau lässt die Frage offen, wie sich das konkret gestalten kann. (Böttcher et al. 2020b) zeigen hierzu, wie sich eine mehr oder weniger starke Extensivierung im Bereich Landwirtschaft und Forstwirtschaft auf die Produktion, die Produktarten sowie Effekte auf die Effizienz der Landnutzung darstellen lässt.

Die Methodik der Bilanz für die quantifizierbaren Wirkungen erfolgt im Prinzip analog zu UBA Emissionsbilanzen der Erneuerbaren Energien: mit E-Faktoren x Aktivität

Schwer Quantifizierbares (z.B. Auswirkungen auf das Wasserregime, jenseits eines Wasserfußabdrucks) wird halbquantitativ ausgewertet, wobei Erkenntnisse aus dem zuletzt veröffentlichten UBA-Vorhaben (Bunsen et al. 2022) berücksichtigt werden.

Für die Bewertung der Flächen und der nutzungsbedingten ökologischen Qualität der Flächen wird auf das UBA Projekt Flächenrucksäcke (Fehrenbach et al. 2021b) Bezug genommen.

2.3.1.4 Nutzung (sowie Verbleib)

Vergleichsweise einfach gestaltet sich hier die energetische Nutzung, die sich v.a. in den Emissionen der Verbrennung niederschlägt.

Bei der stofflichen Nutzung stellt sich dagegen die Frage

1. der Lebensdauer (→ temporäre Speicherung von Kohlenstoff) und
2. der Möglichkeit der Kaskadennutzung bzw. die Verlängerung der Lebensdauer des Materials durch Recycling

Hierbei kommt die in Kapitel 2.3.1.2 beschriebene zeitliche Systemgrenze ins Spiel. Aus Gründen der Konsistenz müssen auch hier die Emissionen aus dem Lebenswegende berücksichtigt werden, auch wenn sie erst lange nach dem Referenzjahr auftreten.

Die Art der Nutzung im Status quo ist durch die vorausgehenden Datenquellen ((Bringezu et al. 2020), (Hennenberg et al. 2022), (Jochem et al. 2022)) bereits abgedeckt. Zu gestalten ist dagegen ein Nutzungsszenario für das Jahr 2045. Hierbei sind zum einen die Ansätze für eine Priorisierung der stofflichen Nutzung (siehe Kapitel 4). Zum anderen werden hier die Ausarbeitungen zum nachhaltigen Potenzial für die drei Szenarien für das Jahr 2045 (Kapitel 2.2) zu Grunde gelegt. Auch hier ist zu beachten, dass sich die Nutzungswege bis in 2045 mit neuen technologischen Entwicklungen ausrichten (siehe Bioraffinerie).

2.3.1.5 Die kontrafaktische Seite

Eine Bewertung anhand eines ökobilanziellen Ansatzes ermöglicht auch immer die Berücksichtigung der kontrafaktischen Seite, das heißt: welche Effekte sind zu erwarten, wenn die zur Bewertung stehenden Produkte (hier: aus Biomasse für stoffliche und energetische Nutzung) nicht erzeugt würden? Dies schließt zwei Ebenen ein:

1. Welche alternativen Produkte werden durch Biomasseprodukte substituiert oder müssten erzeugt werden, wenn die Biomasse nicht dafür produziert und eingesetzt würde?
Hierbei ist wiederum zwischen der Ist-Situation und der Projektion auf das Jahr 2045 zu unterscheiden, wenn es kaum mehr fossile Rohstoffe zu ersetzen gilt, sondern mit anderen erneuerbaren Quellen nicht biogenem Ursprungs konkurriert wird.
2. Würden die Biomasseprodukte nicht erzeugt, welcher Nutzen könnte aus den dann nicht beanspruchten Flächen gewonnen werden bzw. welcher Nutzen entgeht durch die Biomasseproduktion (→ ökologische Opportunitätskosten)?

Beide Ebenen lassen sich nur durch Annahmen und Setzungen definieren. Sie sind nicht Bestandteil des eigentlichen Systemraums des Lebenswegs, sondern beschreiben eine alternative Welt – was jedoch für ökobilanzielle Bewertungen eine Standard-Fragestellung darstellt.

Alternativen zur genutzten Biomasse

Auch hier spielt der Zeitfaktor eine Rolle, denn in einem Status-quo Szenario werden mit hoher Wahrscheinlichkeit andere Produkte substituiert als im Jahr 2045. Während es für heute eher anzunehmen ist, dass fossile Produkte ersetzt werden, ist dies in einer de-fossilisierten Zeit nicht mehr gegeben. Dann konkurrieren biobasierte Produkte (inkl. Bioenergie) mit anderen erneuerbaren Quellen.

Hierzu werden somit die wahrscheinlichen Substitute für die erzeugten Biomasseprodukte definiert (für heute und in 2045) und die Umweltwirkungen der Erzeugung und Nutzung abgeschätzt. Dies ist für die energetische Biomassenutzung vergleichsweise eindeutig zu definieren, da sowohl für heute wie auch für die Zukunft Vorstellungen bestehen, wie sich Strom, Wärme und Transportantriebe durch Alternativen ersetzen ließe. Für stofflich genutzte Biomasse – und insbesondere die holzbasierten Produkte – ist dies komplexer und zwar aus drei Gründen: Erstens ist die Vielfalt an biobasierten Endprodukten zahllos. Zweitens sind die Endprodukte in der Regel komplex zusammengesetzt und bestehen nicht allein aus dem biogenen Basismaterial.⁹ Drittens ist bei etablierten Nutzungen von Biomasse wie z.B. Holzmöbel oder Papier¹⁰ nicht eindeutig, welche Produkte alternativ ersetzt werden oder würden. Kurz: Die Ermittlung der genauen Substitutionsleistung würde eine umfassende Detailarbeit anhand differenzierter Produktökobilanzen erfordern. Dies kann im Rahmen dieser Studie nicht geleistet werden.

Um dennoch eine Konsistenz in den Bilanzen unter Einbeziehung der kontrafaktischen Seite zu wahren, werden unter Vernachlässigung der Vielfalt an Produkten und Anwendungen einfach Bezüge hergestellt (z. B. Holzbalken vs. Stahlträger) lediglich die groben Rohstoffbedarfe der entsprechenden Substitutionsprodukte bzw. die mit deren Bereitstellung verbundenen Emissionen gegenübergestellt.

Die ökologischen Opportunitätskosten

Wie erwähnt, geht es hier um die Frage, wie sich die für die Biomasseproduktion genutzten Flächen entwickeln (Kohlenstoffspeicher/Biodiversität) könnten, wenn auf die Produktion verzichtet würde? Diese Frage gehört komplementär zur vorangehenden Produktsubstitution, denn das alternative System hat schließlich den Vorteil, dass die Fläche anderweitig nutzbar ist.

⁹ Ein Vollholzmöbelstück wie z.B. ein Schrank setzt nicht allein aus Holz zusammen, sondern benötigt neben anderen Baukomponenten auch holzspezifische Oberflächenbehandlungen (Lackanstriche), die sich bei einem alternativen Produkt aus z. B. Kunststoff ganz anders darstellen. Dies wäre in einer vergleichenden Produktökobilanz alles zu berücksichtigen.

¹⁰ Die Substitutionsleistung ist hier rein spekulativ, da z.B. die Mehrzahl an Möbeln aus Holz besteht und für Papiererzeugnisse keineswegs klar ist, welche alternativen Produkte sie ersetzen können: Kunststoff- oder Metallmöbel? Elektronische Medien statt graphischem Papier, Stromtrockner statt Hygienepapiere?

Für die agrarische Primärbiomasse wird in der vorliegenden Arbeit der Ansatz von (Fehrenbach, Bürck 2022) angewandt, mit welchem die CO₂-Opportunitätskosten für Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse ermittelt wurden. Dies kann auf jegliche andere agrarische Anbaubiomasse übertragen werden.

Für die forstliche Biomasse wird der vom Öko-Institut entwickelte CO₂-Speichersaldo¹¹ eingesetzt, siehe hierzu auch bei (Fehrenbach et al. 2022) und (Hennenberg et al. 2023a). Er kann hier analog zu den CO₂-Opportunitätskosten betrachtet werden, da mit ihm der entgangene Speichernutzen durch die Entnahme von Waldholz quantifiziert werden kann.

2.3.2 Ergebnisse der Bewertung

2.3.2.1 Landwirtschaftliche Biomasse

Gemäß der Systemgrenze wie in Abbildung 5 ist die Tierhaltung hier eingeschlossen, nicht nur was die Bereitstellung der Futtermittel betrifft, sondern auch die Emissionen der Tierhaltung, des Managements von Wirtschaftsdünger sowie der Biogaserzeugung und -nutzung aus Wirtschaftsdünger. Dieser Bereich wird somit in diesem Abschnitt behandelt, nicht unter den Abfällen und Reststoffen.

Tabelle 4 stellt die Differenzierung der agrarischen Biomassen zusammen und ordnet diese jeweiligen Nutzungswegen zu.

Tabelle 4: Differenzierung nach Produktgruppen und Nutzungsweisen

Produktgruppen	Nutzungen			
	Nahrungsmittel	Futtermittel	Stoffliche Nutzung	Energetische Nutzung
Körnergetreide (Weizen, Roggen, Gerste, Triticale, Hafer und Körnermais sowie Reis)	X	X	X	X
Silage (Mais und andere Ganzpflanzen)		X	X	X
Hackfrüchte (Zuckerrübe und Kartoffel),	X	X	X	X
Ölsaaten/Leguminosen (Raps, Sonnenblume, Soja, Körnerleguminosen)	X	X	X	X
Gemüse/Obst (auch v.a. auch importiertes Obst wie Bananen und Orangen),	X			
sonstige Agrarzeugnisse (Kaffee, Kakao, Baumwolle)	X		X	
Grünschnitt von Grünland und		X	X	X
Produkte aus Tierhaltung	X			
sonstige Agrarzeugnisse (Kaffee, Kakao, Baumwolle)	X		X	

Zusammenstellung ifeu

In den „Nutzungen“ sind die Wirkungen der netto importierten Produkte enthalten. Netto exportierte Produkte (bzw. deren Wirkungen) werden in den Darstellungen separat als Minus-

¹¹ <https://co2-speichersaldo.de/de/index.html>

Beträge ausgewiesen. Die saldierten Summen der dargestellten Staffeln beschreiben somit jeweils die Biomassenutzung in Deutschland. Die Nettoexporte geben zusätzlich einen Hinweis für in Deutschland erzeugten Produkte, die nicht hier konsumiert werden.

Flächenbelegung und Naturfernepotenzial

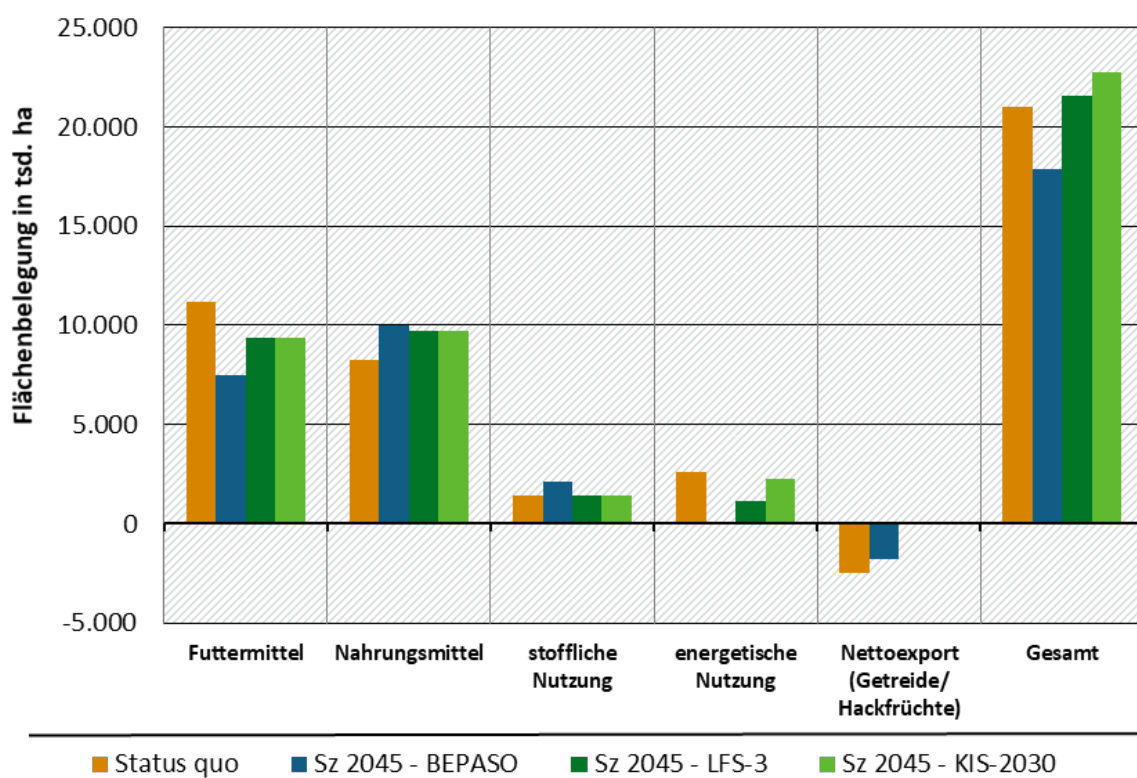
Ergebnisübersicht

Abbildung 8 fasst die Ergebnisse für den Status quo und die Szenarien für 2045 zusammen. Die Gesamthöhe an Flächenbelegung von 23,5 Mio. ha inklusive importierter Biomasse wird im Status quo zu 48 % von Futtermitteln verursacht. Der Anteil der Nahrungsmittel (inklusive Genussmittel) liegt bei 35 %. Für Biomasse zur stofflichen Nutzung werden 6 %, für energetische Nutzung 11 % belegt. Um die Fläche für die in Deutschland konsumierte Biomasse zu errechnen, sind 11 % für netto exportierte Erzeugnisse abzuziehen. Es resultieren somit 21 Mio. ha für den Biomassekonsum in Deutschland.

Im Szenario 2045 BEPASO Bioökonomiewende reduziert sich die Flächenbelegung durch den Biomassekonsum auf 17,8 Mio. ha, während nach LFS-3 und KIS-2030 die Werte sich auf 21,6 bzw. 22,7 Mio. ha erhöhen. Der Rückgang bei BEPASO erklärt sich v. a. durch den stärkeren Rückgang an tierischen Nahrungsmitteln sowie einem höheren Anstieg der Erträge (was auch weiter einen Nettoexport bei Getreide ermöglicht) als bei LFS-3 und KIS-2030.

Differenzierte Ergebnisanalysen finden sich in den folgenden Abschnitten.

Abbildung 8 Flächenbelegung der Produktion von in Deutschland genutzter landwirtschaftlicher Biomasse, Zusammenfassung der Ergebnisse für den Status quo und die Szenarien für 2045



Quelle: Berechnungen des ifeu; Darstellung ifeu

Status quo

Die Gesamtsumme an Flächenbelegung umfasst 23,5 Mio. ha im Rahmen der in Abbildung 6 beschriebenen Systemgrenze. Innerhalb Deutschlands werden nach dieser Bilanzierung 16,3 Mio. ha belegt, 7,2 Mio. ha kommen durch importierte Biomasse hinzu. Der Netto-Export liegt bei 2,5 Mio. t. Somit resultieren 21 Mio. ha Fläche für den Konsum Deutschlands. Diese „Flächenbilanz“ der Biomasseerzeugung und Nutzung in Deutschland Systematik von Abbildung 9 gibt Abbildung 6 wieder.

Abbildung 9: Flächenbilanz der agrarischen Biomasse nach der zu Grund gelegten Systematik der Biomasseerzeugung und -nutzung in Deutschland



Darstellung ifeu

In Abbildung 10 werden die Anteile genauer aufgeschlüsselt. Daraus zeigt sich, dass die **Futtermittel** mit 11,2 Mio. ha den größten Teil an Flächenbelegung einnehmen. Mit 42 % davon geht davon der größte Anteil aufgrund der vergleichsweise geringen Flächenerträge auf Grünland. 32 % werden durch Körnergetreide¹² und „nur“ 17 % durch Ganzpflanzensilage (hauptsächlich Mais) aufgrund vergleichsweise hoher Flächenerträge beansprucht. Diese Flächen finden sich im Inland. 8 % der Futtermittelfläche wird durch Ölsaaten und Proteinpflanzen (v.a. Soja) belegt, die sich jedoch zum größten Teil im Ausland befinden. Der Netto-Exportüberschuss wiederum (Balkengruppen ganz rechts Abbildung 10) resultiert überwiegend auf dem „indirekten Futtermittel-Export“ durch den Exportüberschuss an Fleisch und tierischen Produkten. Für den in Abbildung 9 aufgezeigten Inlandkonsum bedeutet dies eine 17 %-ige Reduktion der Anbauflächen, die in dieser Bilanz gleichmäßig über alle Futtermittel verteilt wird.

Die Darstellung der **Nahrungsmittel** in Abbildung 10 umfasst neben den Kulturen für die pflanzlichen Grundnahrungsmitteln (Körnergetreide, Hackfrüchte – das sind in diesem Fall überwiegend Kartoffeln – und Öl-/Proteinpflanzen) auch Gemüse, Obst sowie unter der Rubrik „Sonstiges“ auch Genussmittel wie Kaffee, Kakao und Tee. Die Gesamtbelegung liegt mit 8,3 Mio. ha nicht sehr viel niedriger als die für Futtermittel. Während jedoch für die Grundnahrungsmittel 2,8 Mio. ha weniger als alleine an Fläche für verfüttertes Körnergetreide belegt werden, fällt mit 5,5 Mio. ha ein deutlich größerer Anteil auf die Rubrik „Gemüse/Obst/sonst“. Dieser setzt sich vor allem durch zwei Importwarenströme zusammen:¹³

¹² Detailliertere Aufstellungen finden sich in Anhang B.1; die Hauptgetreidearten sind hier Weizen, Gerste und Mais.

¹³ Auch hierzu finden sich detailliertere Aufstellungen in Anhang B.1; nach Kakao und Kaffee folgen Trocken- und Schalenfrüchte, Gemüse, Weinbau, Zitrus- und andere Südfrüchte.

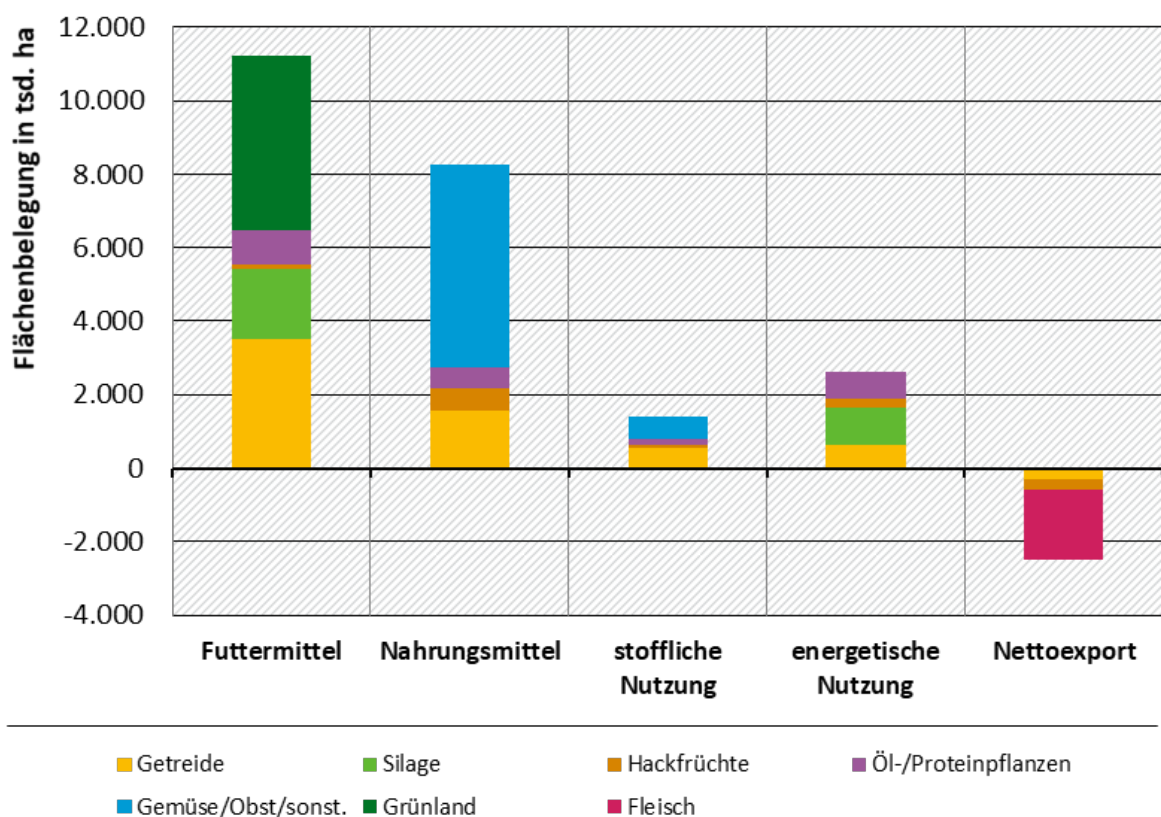
- Kakao mit 2,6 Mio. Hektar
- Kaffee mit 1,85 Mio. Hektar.

Sie nehmen zusammen damit mehr als die Hälfte der Fläche für pflanzliche Nahrungsmittel ein.

Biomasse für die **energetische Nutzung** belegt nach dieser Kalkulation 2,6 Mio. Hektar – und damit etwas höher als die Angabe der FNR (2,3 Mio. Hektar), da hier noch die importierte Fläche (Palmöl etc.) einbezogen ist. Bei der stofflichen Nutzung liegt der größte Anteil bei importierter Baumwolle.

Die **netto exportierte Flächenbelegung** enthält neben der bereits oben angeführten mit dem Export tierischer Produkte verbundene Futtermittelanbaufläche (1,9 Mio. ha) der direkte Nettoexport von Getreide (Weizen) und Hackfrüchten (Kartoffeln) mit zusammen 0,6 Mio. ha).

Abbildung 10 Flächenbelegung der Produktion von in Deutschland genutzter landwirtschaftlicher Biomasse, Status quo (Mittelwert über 2020-2022)



Darstellung ifeu

Szenario 2045 – BEPASO -Bioökonomiewende

Flächenbezogene Hintergründe zum Szenario 2045 sind in Kapitel 2.2.2 ausführlich beschrieben. Danach führt das BEPASO-Szenario zu einer Reduktion der für in Deutschland konsumierten Biomasse um gegenüber dem Status quo um 15 %.

Inklusive der unveränderten Importe bei „Gemüse/Obst/sonst.“ dreht sich hier die Rangfolge von Futtermittel (7,5 Mio. ha) und Nahrungsmittel (10 Mio. ha) in 2045 um. Ausschlaggebend ist die deutliche Reduktion des Fleischkonsums, was sich im Rückgang der Futtermittelfläche niederschlägt. Allerdings bleibt ein großer Teil dieser Fläche als Grünland erhalten, weswegen der Rückgang der Futtermittelflächen insgesamt nicht proportional zum Rückgang des

Tierbestand folgt. Ein Anteil hier wird ausgeglichen durch mehr pflanzliche Proteinpflanzen. Während die Fläche für stofflich genutzte agrarische Biomasse etwas steigt, entfällt die energetisch genutzte Anbaubiomasse. Durch die Annahme steigender Erträge verbleibt auch in diesem Szenario ein Nettoexportüberschuss bei Getreide (siehe dazu in Abbildung 11).

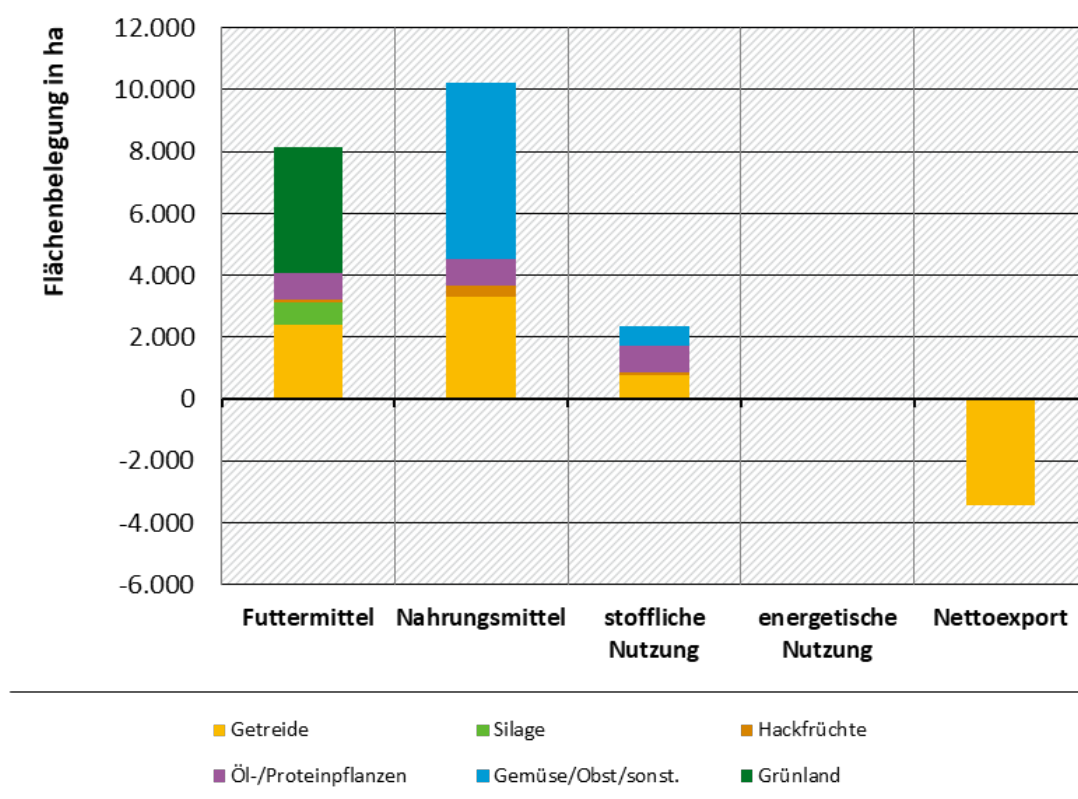
Szenario 2045 –KIS-2030 und LFS-3

Diese beiden Szenarien lassen sich im Zusammenhang beschreiben, da sie nur bei der energetischen Nutzung voneinander abweichen. Hier zeigt sich, dass die Reduktion des Fleischkonsums um 30% und damit der Futtermittel keine „dramatische“ Verringerung der Flächenbelegung nach sich zieht, da der nun verringerte Anbau von Silomais schließlich hohe Flächenenerträge aufweist und somit in Relation eher weniger Fläche freigibt. Auf der anderen Seite gilt es den reduzierten Fleischkonsum durch Leguminosenanbau auszugleichen, die auch verstärkt im erhöhten Ökolandbau angebaut werden. Gleichzeitig bleibt die Grünlandfläche bei deutlicher Extensivierung und insbesondere die Wiedervernässung organischer Böden im überschaubaren Umfang. Somit gleichen sich hier die Flächen für Futtermittel (9,4 Mio. ha) und Nahrungsmittel (9,7 Mio. ha) an.

Unverändert bleibt die stoffliche Nutzung in diesem Szenario, während die Bioenergie von 2,3 Mio. ha auf 1,1 Mio. ha praktisch halbiert wird und gemäß den Langfristszenarien mit Kurzumtriebsplantagen (KUP) belegt wird.

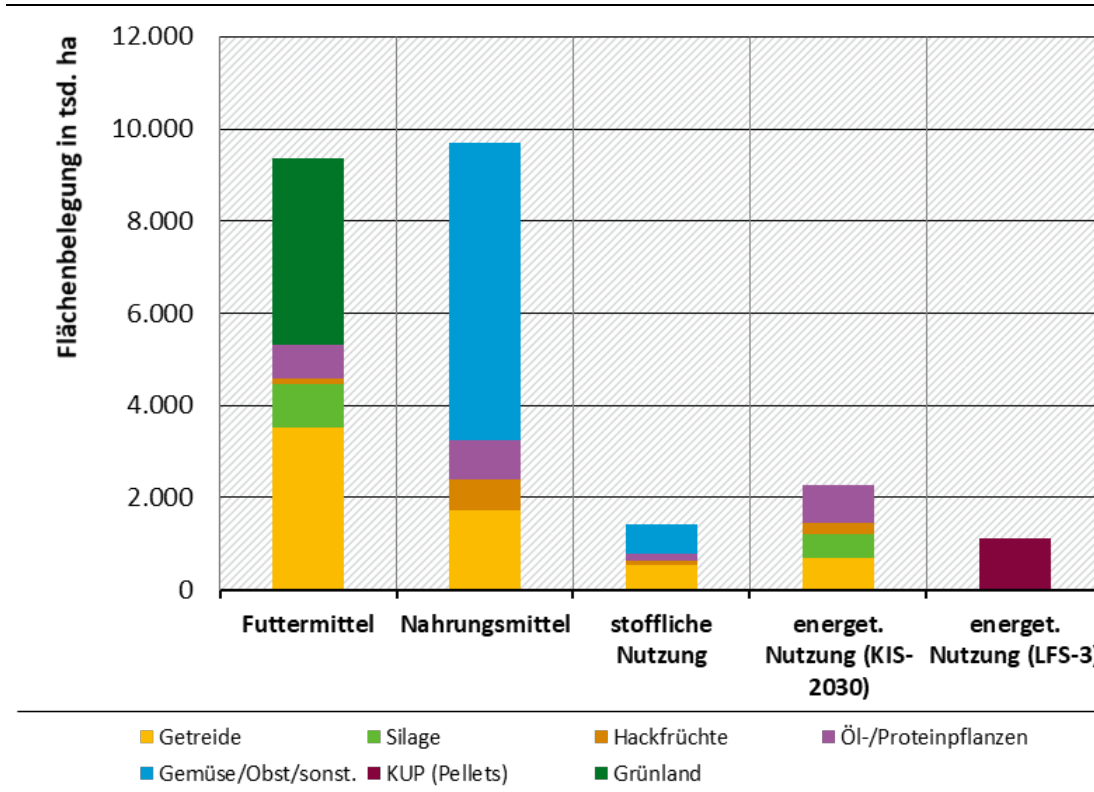
Der Nettoexport bei Getreide und Hackfrüchten entfällt im Zug der Flächensuffizienz (siehe dazu in Abbildung 12).

Abbildung 11 Flächenbelegung der Produktion von in Deutschland genutzter landwirtschaftlicher Biomasse, Szenario 2045 für BEPASO Bioökonomiewende



Quelle: Berechnungen ifeu; Darstellung: ifeu

Abbildung 12 Flächenbelegung der Produktion von in Deutschland genutzter landwirtschaftlicher Biomasse, Szenario 2045 für KIS-2030 und LFS-3 (die Subszcenarien variieren nur in der Menge bei energetischer Nutzung)

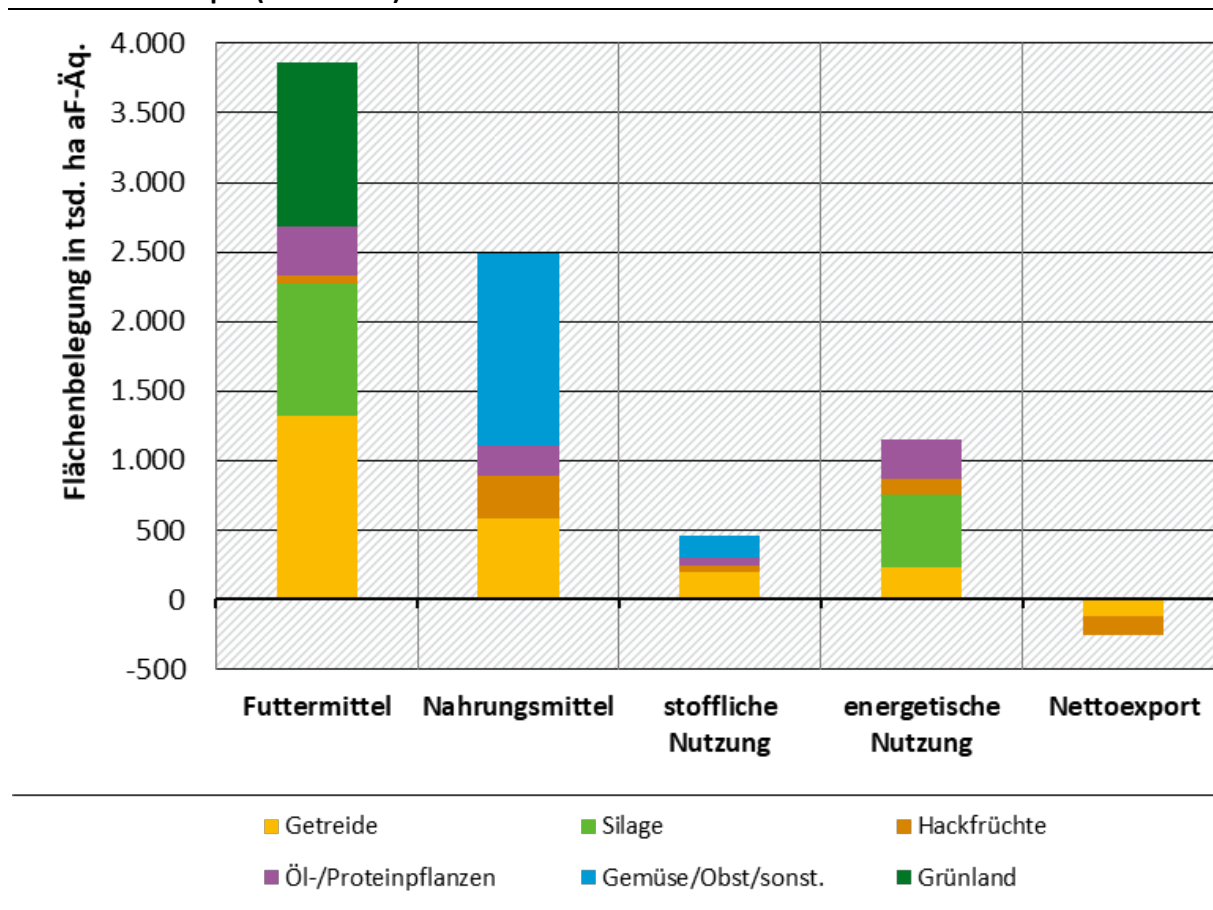


Quelle: Berechnungen ifeu; Darstellung: ifeu

Naturfernepotenzial

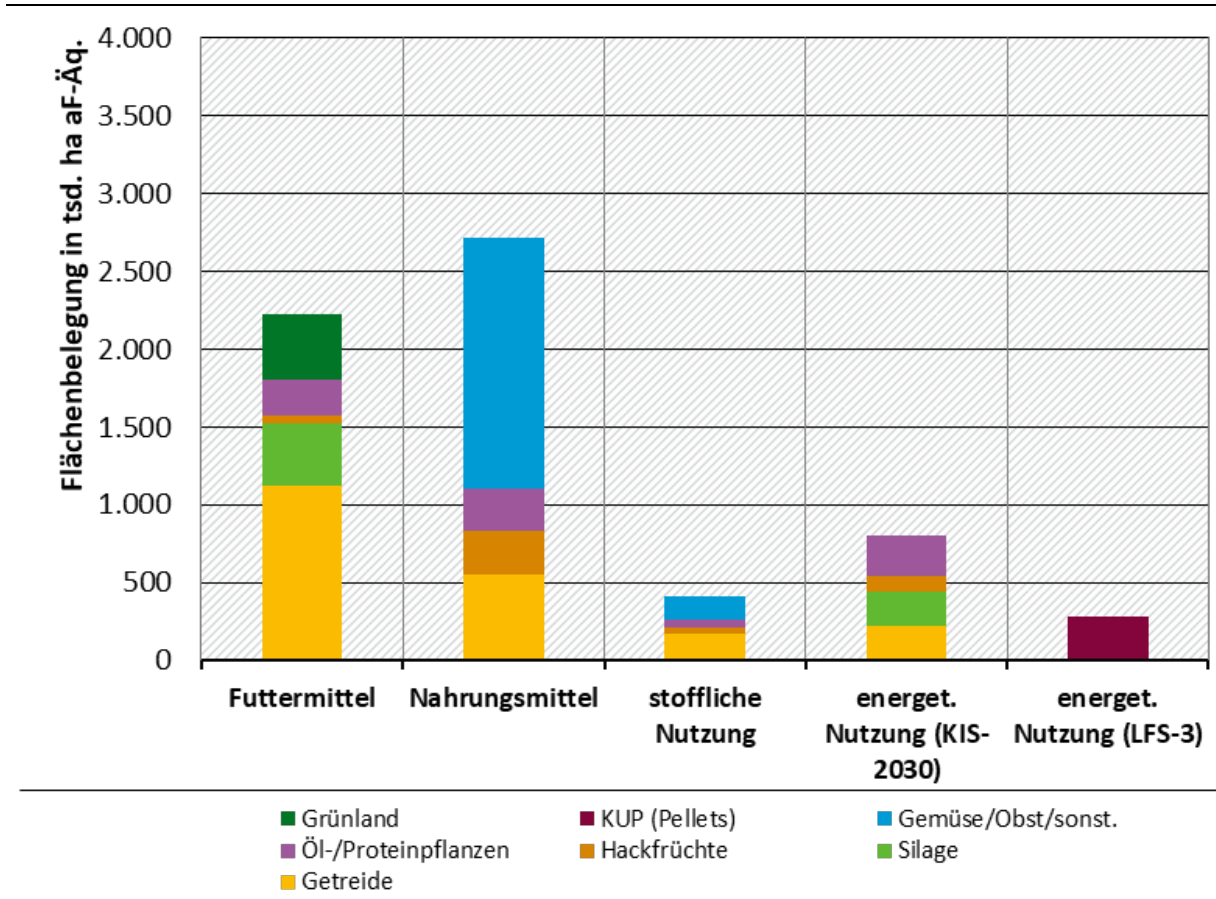
Die Flächenbelegung lässt sich auch anhand des sogenannten Hemerobiekonzepts in Naturfernepotenzial mit der Einheit Hektar artifizielle Fläche-Äquivalent (aF-Äq) ausdrücken. Dies ist in Abbildung 13 und Abbildung 14 dargestellt. Da sich die Flächenqualitäten der agrarischen Produkte nicht massiv in ihrer Naturferne-Wirkung unterscheiden, ähnelt das Muster der Ergebnisse dem der „reinen“ Flächenbelegung.

Abbildung 13 Naturfernepotenzial durch Produktion von landwirtschaftlicher Biomasse, Status quo (2020-2022)



Quelle: Berechnungen ifeu; Darstellung: ifeu

Abbildung 14 Naturfernepotenzial durch Produktion von landwirtschaftlicher Biomasse, Szenario 2045 für KIS-2030 und LFS-3 (die Subsznenarien variieren nur in der Menge bei energetischer Nutzung)



Quelle: Berechnungen ifeu; Darstellung: ifeu

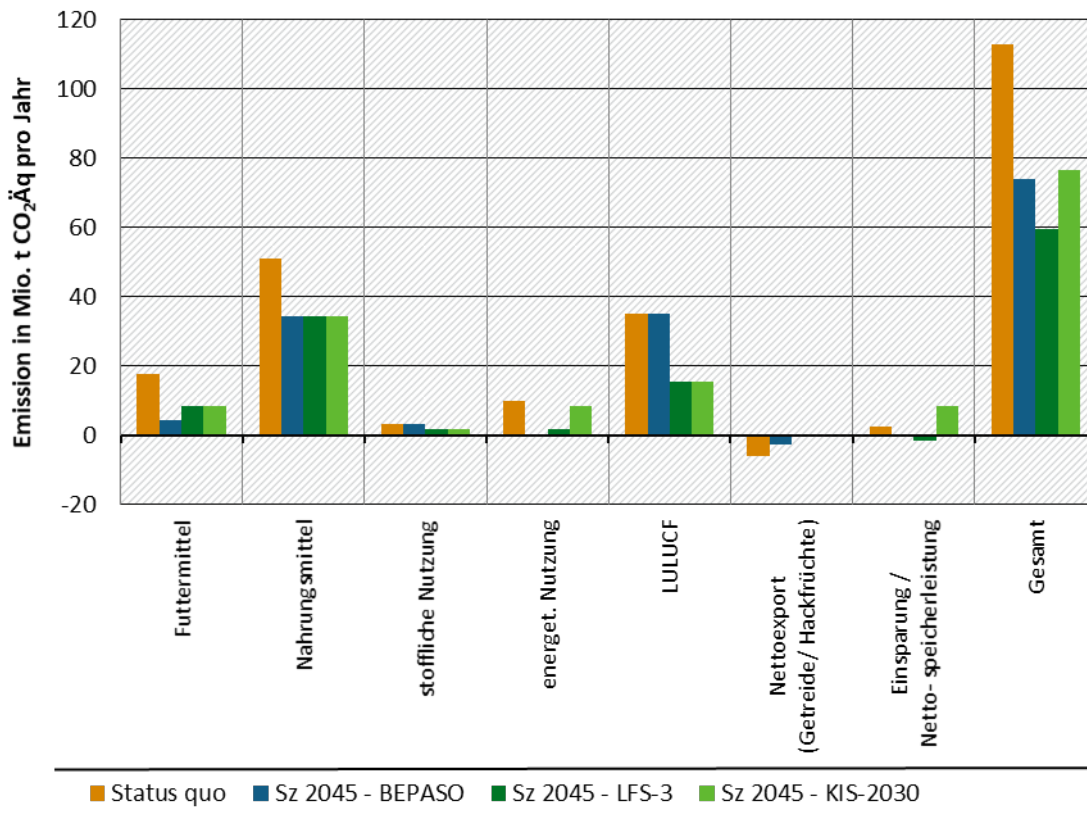
Klimawandel

Ergebnisübersicht

Wie Abbildung 15 zeigt, führen die Szenarien für 2045 durchgehend zu einer deutlichen Reduktion der THG-Emissionen durch agrarische Biomasseproduktion und -nutzung. Hauptbeiträge zur Status-quo-Gesamtemission für den Biomassekonsum in Deutschland von 108 Mio. t CO₂-Äq. werden zu 47 % von Nahrungsmitteln und zu 33 % von LULUCF, d. h. Emissionen aus der Entwässerung von kultivierten organischen Böden verursacht. Der Anteil der Futtermittel liegt bei 16 %. Durch Biomasse zur stofflichen Nutzung werden 3 %, für energetische Nutzung 9 % emittiert. Durch den Nettoexport sind 6 % abzuziehen. Durch kontrafaktische Emission (Einsparungen und entgangene Einsparungen) lassen sich weitere 3 % netto abziehen.

Im Szenario 2045 BEPASO Bioökonomiewende reduziert sich die Gesamtemissionen gegenüber dem Status quo auf 65 %, im LFS-3-Szenario auf 53 % und KIS-2030 auf 68 %. Während bei BEPASO der stärkere Verzicht auf tierische Produkte maßgeblich zum Rückgang beiträgt, kommen in dieser Betrachtung keine Emissionsminderungen unter LULUCF zum Tragen. Bei LFS-3 und KIS-2030 verhält es sich andersrum (weniger Rückgang bei Tierproduktion als im BEPASO-Szenario), dafür deutliche LULUCF-Reduktion durch Wiedervernässung. Differenzierte Ergebnisanalysen finden sich auch hier in den folgenden Abschnitten.

Abbildung 15 Treibhauspotenzial durch Produktion und Nutzung von landwirtschaftlicher Biomasse, Zusammenfassung der Ergebnisse für den Status quo und die Szenarien 2045



Quelle: Berechnungen ifeu; Darstellung: ifeu

Status quo

Die Gesamtsumme beträgt 117 Mio. t CO₂Äq. ohne Abzug des Nettoexports und der kontrafaktischen Emissionen. Dabei dominieren zwei Bereiche:

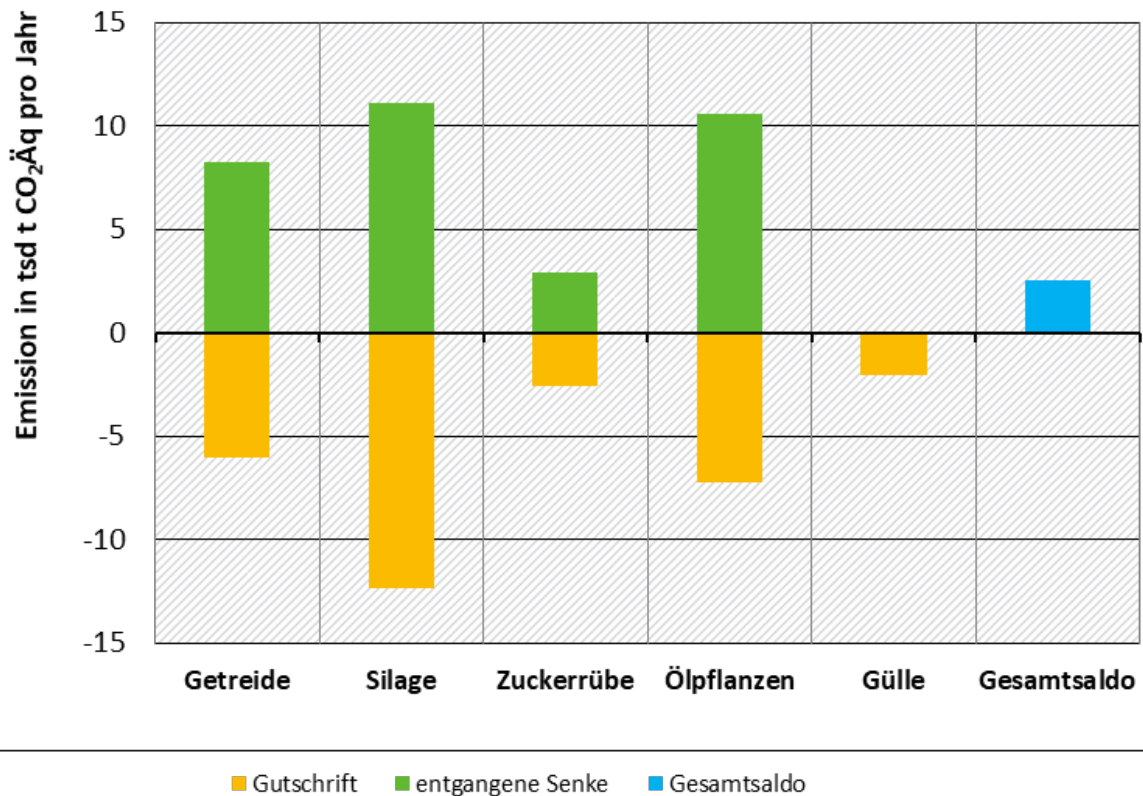
1. Die Emissionen aus der Tierhaltung im Block der Nahrungsmittel in Höhe von 34,8 Mio. t CO₂Äq., der gesamte Ernährungsbereich (ohne LULUCF) nimmt 59 % an der Gesamtsumme ein.
2. Die separat ausgewiesenen LULUCF-Emissionen aus der aktuellen Entwässerung von organischen Böden für Acker- und Grünland liegen zusammen bei 35 Mio. t CO₂Äq.

Zu Ersteren ist zu betonen, dass hier ausschließlich die Methan- und Lachgasemissionen bzw. das Gülle-Management berücksichtigt werden, nicht die technischen Prozesse der Tierhaltung.

Zu Zweitem sei erwähnt, dass hier keine Emissionen aus Landnutzungsänderung (LUC) einbezogen sind, weder für die inländische Produktion, noch die importierten Güter.

Die Gesamtsumme reduziert sich auf 108 Mio. t CO₂Äq., zieht man den Nettoexportwert von 6,2 Mio. t CO₂Äq. (hauptsächlich durch exportierte tierische Produkte) und die kontrafaktischen Emissionen (Gutschriften für Bioenergie, v.a. Biogas aus Gülle, sowie Schlechtschriften für CO₂-Opportunitätskosten) ab. Letztere wiegen sich im Saldo in etwa auf, bzw. es verbleibt eine Nettoemission von 2,5 Mio. t CO₂Äq. Dabei sind beide Beträge mit 30,2 Mio. t CO₂Äq. Gutschrift und 32,7 Mio. t CO₂Äq. CO₂-Opportunitätskosten jeweils sehr hoch, wie Abbildung 16 zeigt.

Abbildung 16 Gutschriften für die Substitution und stofflichen und energetischen Produkten, sowie entgangener Nutzen durch alternative Senkenleistung der Fläche für den Status quo.



Darstellung und Berechnungen ifeu

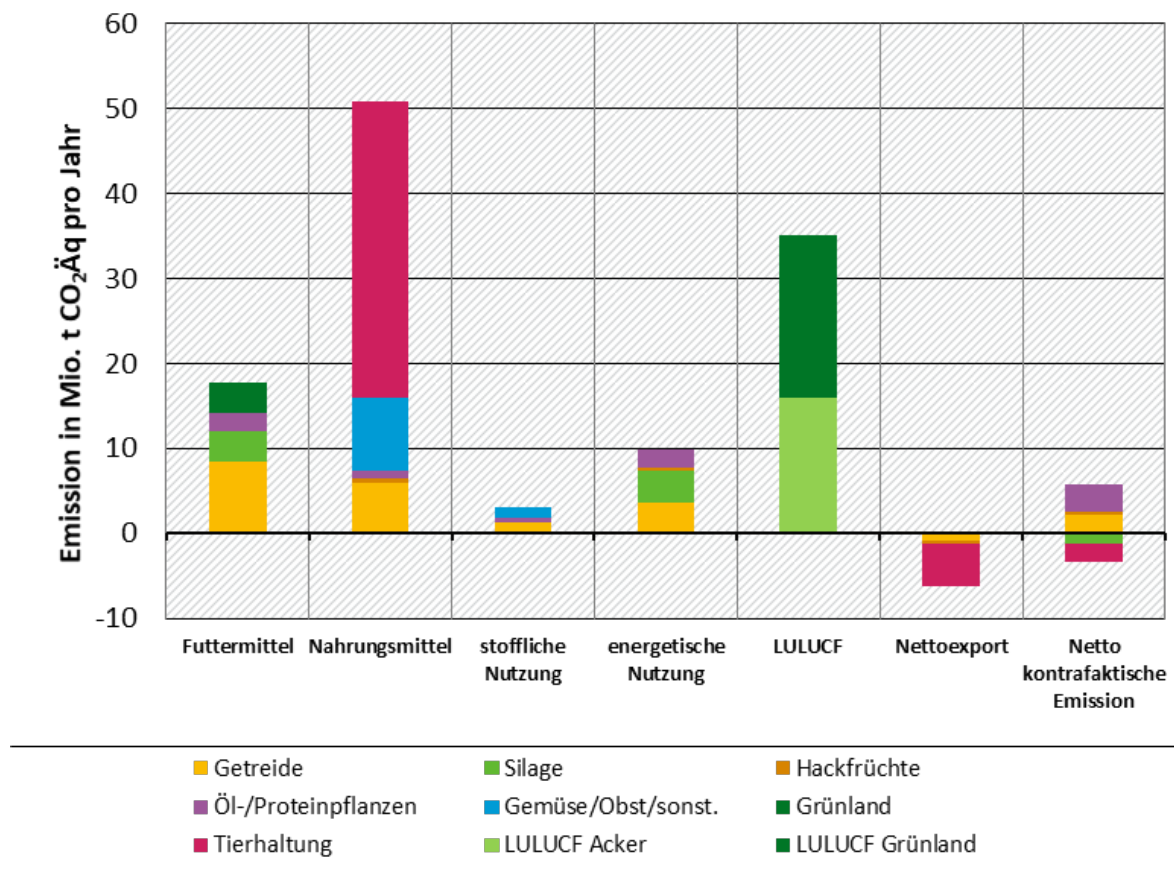
Durch die Bioenergie selbst werden 10 Mio. t CO₂Äq. emittiert, das sind 8,5 % der Gesamtemission.

Szenario 2045 – BEPASO -Bioökonomiewende

Die Gesamtemission – aufgeschlüsselt in Abbildung 18 – reduziert sich hier etwa auf zwei Drittel des Status quo, konkret 70,2 Mio. t CO₂Äq. Hierbei ist zu beachten, dass hier keine Reduktion der LULUCF-Emissionen aus der Entwässerung organischer Böden berücksichtigt wird, da dies nicht explizit in den BEPASO-Szenarien adressiert ist. Erhebliche Emissionsminderungen sind hier dagegen durch den starken Rückgang an Futtermitteln und Tierhaltung (um 61 %) zu vermerken. In der Summe sind dies 30 Mio. t CO₂Äq. Reduktion, wobei unterstellt wird, dass der Fleischkonsum insgesamt konstant bleibt, die Lücke gegenüber der stark reduzierten Tierhaltung zum Großteil durch Laborfleisch ersetzt wird. Ausgehend von einem Emissionsfaktor von 2,2 kg Mio. t CO₂Äq. pro kg Laborfleisch nach (Jetzke et al. 2019), gehen darauf insgesamt knapp 4 Mio. t CO₂Äq. zurück.

Ein weiterer Aspekt, der zur Reduktion insgesamt führt, ist die Annahme einer fortschreitenden Defossilisierung des Hintergrundsystems. Dies betrifft die Produktion von Düngemitteln, den Einsatz von Strom und vielen anderen Dingen.

Abbildung 17 Treibhauspotenzial durch Produktion und Nutzung von landwirtschaftlicher Biomasse, Status quo (2020-2022)



Darstellung und Berechnungen ifeu

Szenario 2045 –KIS-2030 und LFS-3

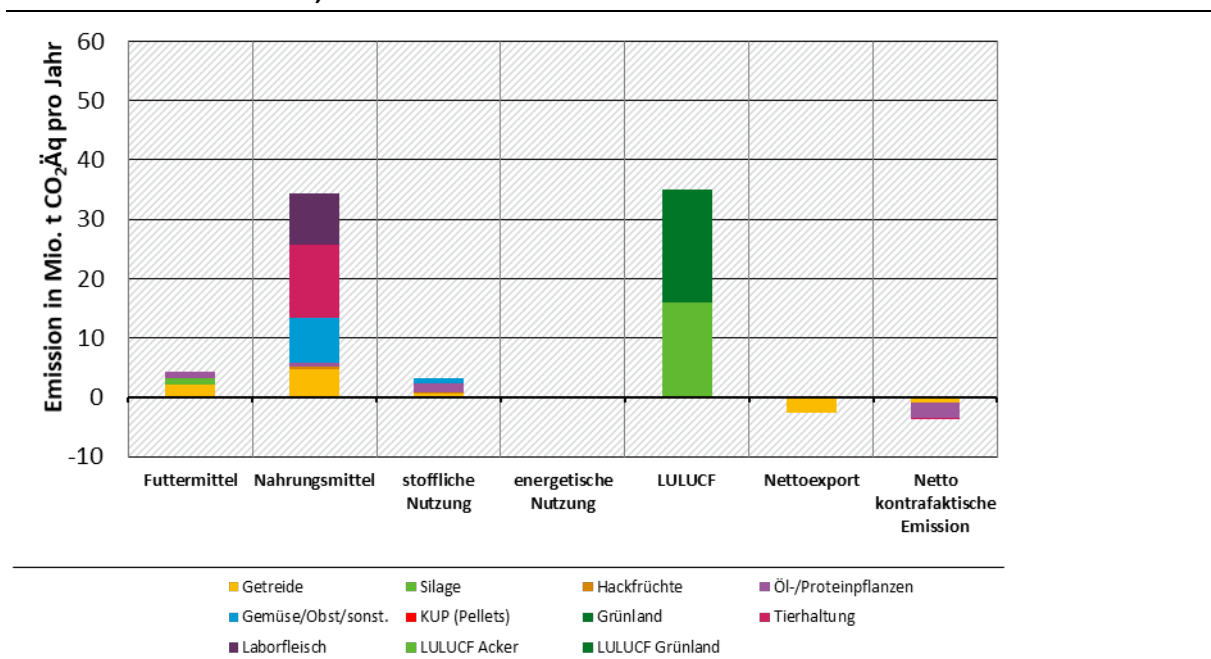
Hier reduzieren sich die Gesamtemissionen auf 67 Mio. t CO₂Äq. (KIS-2030) bzw. 59,5 Mio. t CO₂Äq. (LFS-3), was v.a. auf der Wiedervernässung der organischen Böden (Rückgang bei LULUCF um 19 Mio. t CO₂Äq. auf 16,3 Mio. t CO₂Äq.) beruht und der Reduktion des Fleischkonsums (um 12,7 Mio. t CO₂Äq. auf 22 Mio. t CO₂Äq.), der in diesem Szenario ausschließlich durch verstärkte pflanzliche Nahrungsmittel ausgeglichen wird.

Der gesamte Ernährungsbereich (ohne LULUCF) dominiert zwar weiterhin mit zwei Drittel Anteil die Gesamtemission und erhöht damit sogar den relativen Anteil daran. Die stoffliche Nutzung bleibt hier gemäß Annahme zum Szenario unverändert. Die Reduktion im Ergebnis beruht hier auf den Annahmen zur Defossilierung des Hintergrundsystems, wie oben im Szenario BEPASO bereits erwähnt.

Die beiden Szenarien unterscheiden sich lediglich bei der Bioenergie, die im Falle LFS-3 ihre Emission deutlich überproportional zum Flächenrückgang auf 1,5 Mio. t CO₂Äq. reduziert. Außerdem wiegen sich die CO₂-Opportunitätskosten hier im Zeitraum bis 2045 gegenüber dem dauerhaften Aufwuchs der Plantage praktisch auf. Dafür resultieren trotz hoher Energieeffizienz bei der Nutzung der Holzenergie nur geringe Substitutionsleistungen, da Strom und Wärme bis dahin weitgehend dekarbonisiert sind. Dies sieht bei KIS-2030 etwas anders aus: Der dort noch höhere Anteil an Biokraftstoffen aus Anbaubiomasse erzielt kaum mehr große Substitutionsleistungen, dafür bleiben die CO₂-Opportunitätskosten hoch. Auf diesem Grund

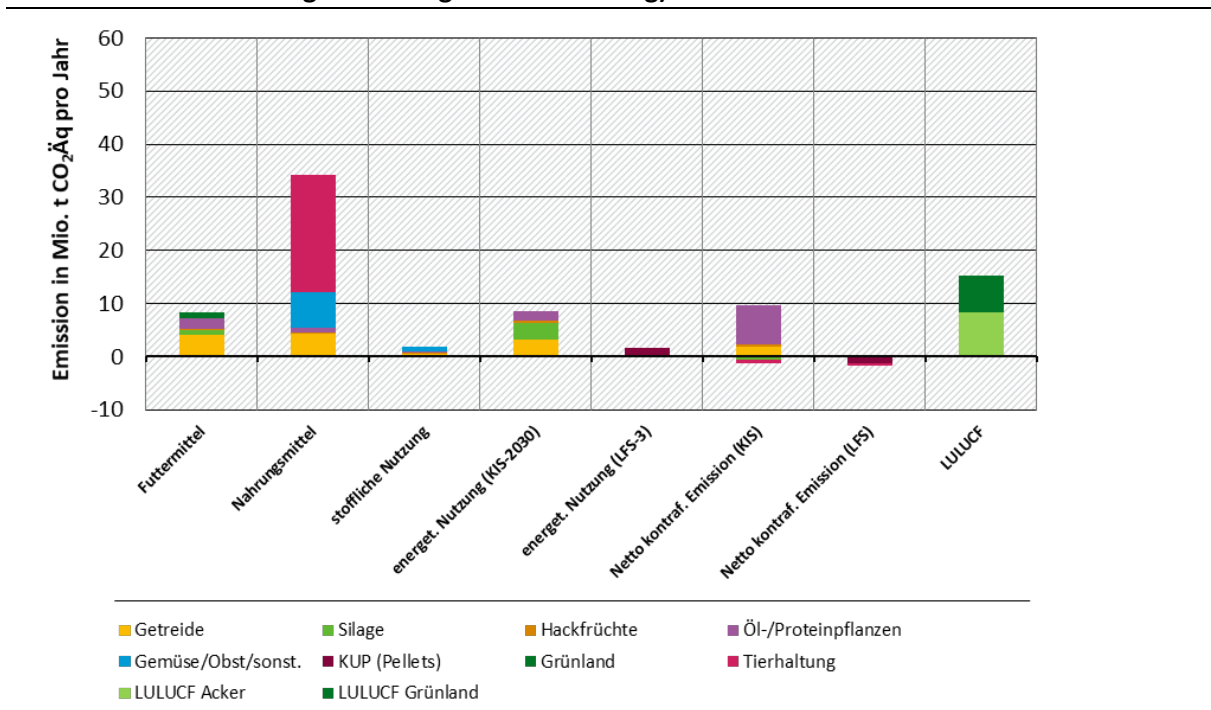
beruhen die insgesamt um 7,5 Mio. t CO₂Äq. höhere Emissionen des KIS-2030 Stenarios gegenüber LFS-3.

Abbildung 18 Treibhauspotenzial durch Produktion und Nutzung von landwirtschaftlicher Biomasse, Szenario 2045 für BEPASO



Darstellung und Berechnungen ifeu

Abbildung 19 Treibhauspotenzial durch Produktion und Nutzung von landwirtschaftlicher Biomasse, Szenario 2045 für KIS-2030 und LFS-3 (die Subszzenarien variieren nur in der Menge bei energetischer Nutzung)



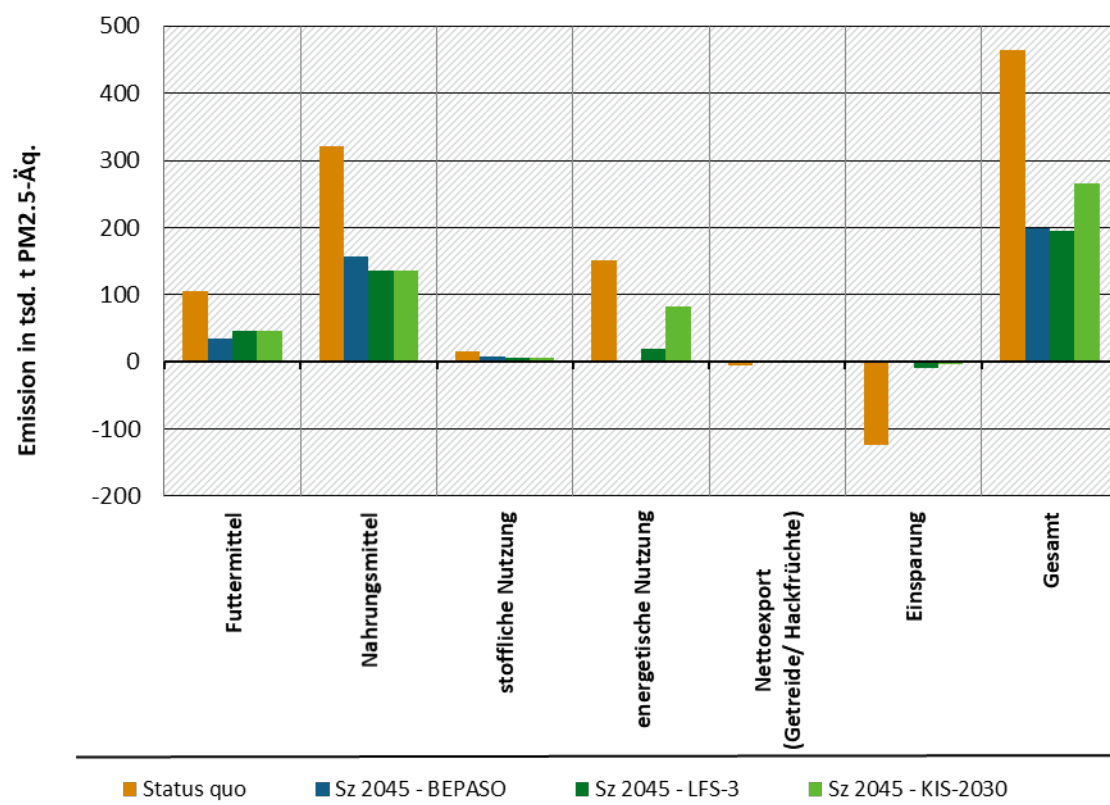
Darstellung und Berechnungen ifeu

Feinstaubbelastung PM2.5

Ergebnisübersicht

Wie Abbildung 20 zeigt, gehen ähnlich wie beim Klimawandel in den Szenarien für 2045 die Emissionen deutlich zurück. Am größten sind die Effekte für die Nahrungsmittelproduktion, die – wie weiter unten zu sehen ist – auch hier v.a. auf der Tierhaltung beruhen (Ammoniak). Den zweithöchsten Beitrag im Status quo liefert die energetische Nutzung, im Wesentlichen dominiert durch die Emissionen bei der Verbrennung. Diesen steht aktuell eine vergleichbar hohe Gutschrift gegenüber. Im Szenario KIS-2030 werden immer noch etwa die Hälfte an Biokraftstoffen produziert und eingesetzt, doch sind in 2045 die Gutschriften nur noch gering, weil die verbleibenden Verbrennerfahrzeuge hauptsächlich mit Elektrofahrzeugen konkurrieren werden. Dies ist auch der Grund, weswegen KIS-2030 mit einer höheren Gesamtsumme abschneidet als LFS-3 mit nur noch einem kleineren Anteil an KUP-Holz-Verbrennung. Da im Szenario BEPASO so gut wie keine agrarische Biomasse mehr energetisch genutzt wird und v.a. die Tierproduktion nochmals deutlich geringer ausfällt, weist dieses Szenario die geringsten Emissionen auf.

Abbildung 20 PM2.5-Emission durch Produktion und Nutzung von landwirtschaftlicher Biomasse, Vergleich Status quo und die Szenarien für 2045



Darstellung und Berechnungen ifeu

Status quo

Abbildung 21 zeigt die Emissionen von Feinstaub (PM2.5) durch Biomasseerzeugung und Nutzung. Hierbei werden nicht nur die primären Partikel, sondern auch die durch Vorläufersubstanzen wie Stickoxiden und Ammoniak berücksichtigt. Im Ergebnis zeigen sich zwei Blöcke als besonders relevant:

3. Die Tierhaltung mit relevanten Ammoniakemissionen:¹⁴ mit über 400.000 Tonnen NH₃ werden hier 250.000 t PM2.5-Äq. gebildet. Das ist mehr als die Hälfte der Nettogesamtemission.
4. Emissionen aus der Verbrennung der Bioenergieträger. Die gleiche Summe steht nochmals als Einsparung auf der kontrafaktischen Seite, da hier vereinfacht angenommen wird, dass die Verbrennung von Biodiesel, Bioethanol oder Biogas auf gleicher Energiebasis auch mit gleichen Emissionen durch den Einsatz von fossilem Diesel, Benzin oder Erdgas verbunden ist. Dies ändert sich deutlich im Szenario 2045 (s.u.)

Bei den übrigen Emissionsbeiträgen handelt es sich wiederum überwiegend um Ammoniak, hier aus der Düngung für die Anbaufrüchte.¹⁵

Szenario 2045 – BEPASO -Bioökonomiewende

In alle drei Szenarien fließen neben den Veränderungen der Produktströme- und Nutzungsweisen auch technische Faktoren ein, die insgesamt zu einer Verringerung der Emissionen führen. Wie bereits Abbildung 23 zeigt, ist dabei am bedeutendsten die Verringerung der Ammoniakemissionen aus der Tierhaltung, für die in diesem Szenario nicht nur 61% weniger Produktion, sondern die auch Reduktion der Emission um 50 % durch technische Maßnahmen eingerechnet sind. Eine 50%ige Reduktion der Emissionen ist als konservative Annahme auch für die anderen Produktionsprozesse angesetzt. Im idealen Fall sollten sich diese Emissionen bis 2045 durch den Wegfall vieler thermischer Prozesse noch weiter verringern.

In der hier vorliegenden Abschätzung verringert sich die Gesamtemission von 460.000 t PM2.5-Äq. im Status quo auf ca. 130.000 t PM2.5-Äq, d.h. eine Reduktion um 71 %.

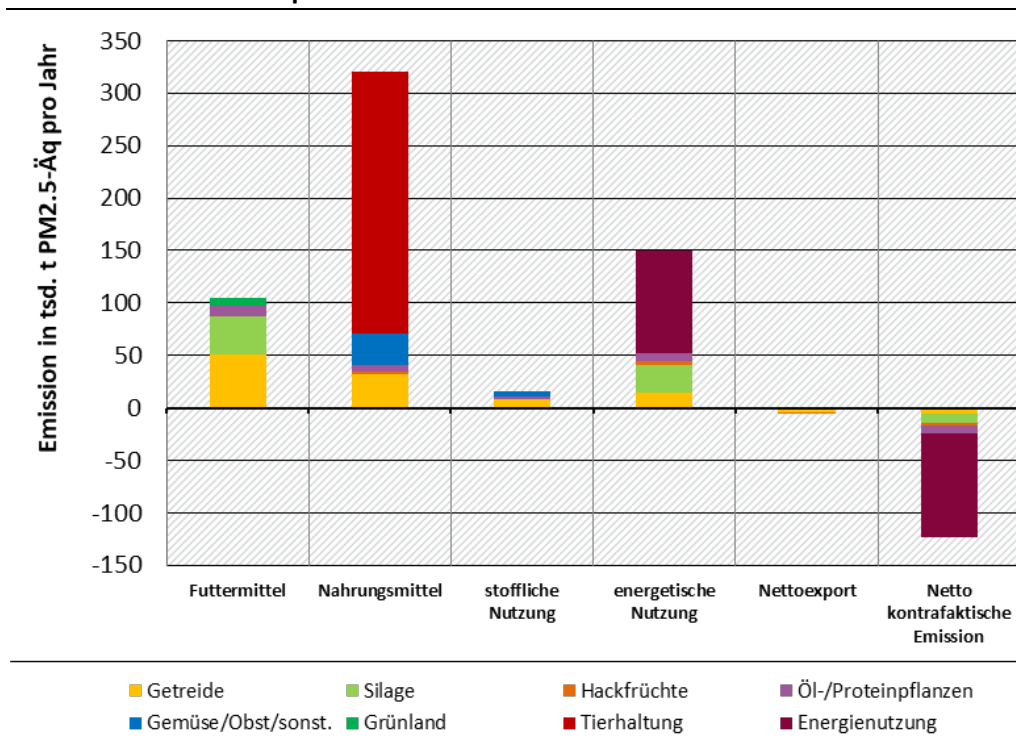
Szenario 2045 – KIS 2030 – LFS-3

Wie bereits weiter oben ausgeführt, fallen die PM2.5-Emissionen dieser beiden Szenarien höher aus als bei BEPASO, was an der höheren Tierhaltungszahl liegt (30 % Reduktion gegenüber 61 %). KIS-2030 weist nochmals höher Emissionen auf durch den Anteil an Bioenergie (v.a. Biokraftstoffe) für deren Emissionen nur noch sehr geringe Gutschriften in 2045 erteilt werden. Die Reduktion der Gesamtemission belaufen sich hier auf 58 % für LFS-3 und 43 % für KIS-2030.

¹⁴ Hier wurden Daten von (Fuß 2023) entnommen.

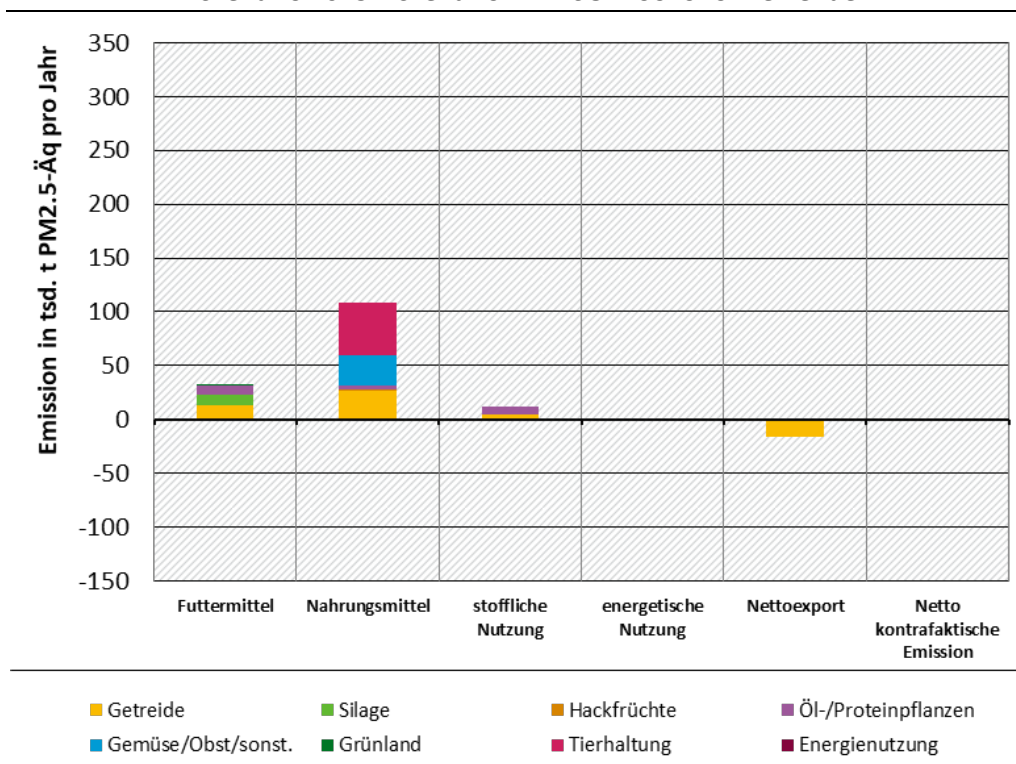
¹⁵ Es sei angemerkt, dass PM2.5-Emissionen aus der Produktionskette von Gemüse, Südfrüchten, Kaffee, Kakao, Baumwolle nicht in die Berechnung mit einbezogen sind.

Abbildung 21 PM2.5-Emission durch Produktion und Nutzung von landwirtschaftlicher Biomasse, Status quo



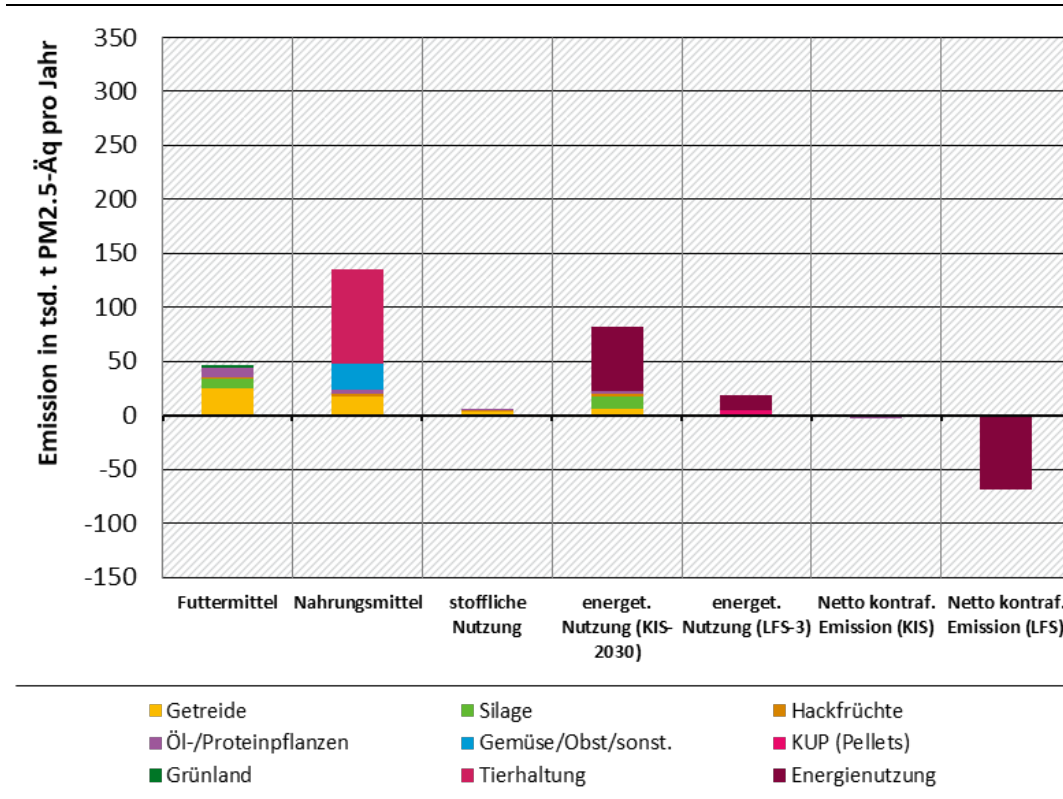
Darstellung und Berechnungen ifeu

Abbildung 22 PM2.5-Emission durch Produktion und Nutzung von landwirtschaftlicher Biomasse, Szenario 2045 – Szenario BEPASO Bioökonomiewende



Darstellung und Berechnungen ifeu

Abbildung 23 PM2.5-Emission durch Produktion und Nutzung von landwirtschaftlicher Biomasse, Szenario 2045 – Szenario KIS 2030/LFS-3



Darstellung und Berechnungen ifeu

Stickstoff – Ein- und Austräge

Status quo

Stickstoffeinträge werden im Rahmen der Bilanz zunächst als Dünger-Input in das jeweilige Anbausystem berechnet. Eine weitere Quelle reaktiven Stickstoffs sind Einträge aus der Luft, die teilweise selbst von der Landwirtschaft stammen (Ammoniak) jedoch auch durch das Verbrennen von Energieträgern (fossile wie biogene).

Für eine umfassende Bilanz der Ein- und Austräge kann die BMEL-Statistik herangezogen werden mit der Flächenbilanz für Stickstoff.¹⁶ Danach werden im Jahr 2020 insgesamt 3,31 Mio. t Stickstoff in die agrarische Fläche in Deutschland eingebracht, die sich wie folgt summieren:

- ▶ 42 % aus Mineraldünger
- ▶ 25 % aus (direkt eingesetztem) Wirtschaftsdünger
- ▶ 18 % aus Gärrest von Biogasanlagen (inkl. vergorenem Wirtschaftsdünger).
- ▶ 7 % aus biologischer N-Fixierung und
- ▶ 8 % Sonstiges (inklusive Eintrag aus Depositionen, mit hohem Anteil aus eigenen agrarischen Emissionen)

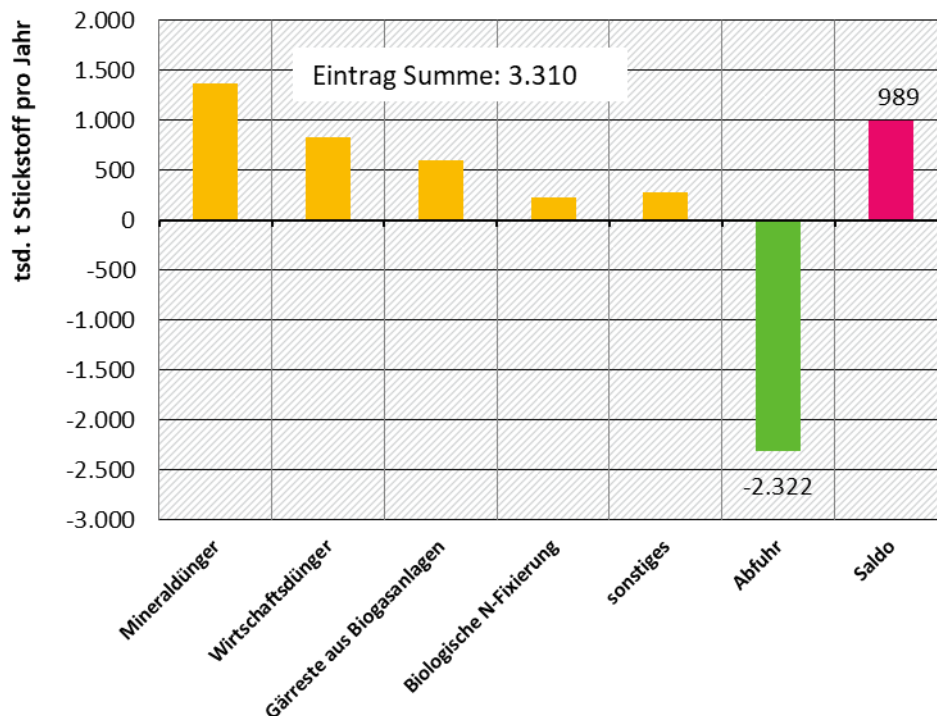
¹⁶ <https://bmel-statistik.de/fileadmin/daten/MBT-0111160-0000.xlsx>

Die Abfuhr wird seitens der BMEL-Statistik auf 2,32 Mio. t N berechnet. Damit verbleibt ein Überschuss von einer knappen Million Tonnen Stickstoff, wie auch Abbildung 24 zeigt. Bezogen auf die Agrarfläche wird damit im Jahr 2020 der Zielwert von 70 kg N/ha mit 59 kg N/ha klar unterschritten. Dies war jedoch im Mittel der vergangenen Jahre nicht der Fall, wie die Darstellung des UBA zeigt (Abbildung 25).

Eine Zurechnung auf die verschiedenen Anbauprodukte ist hier wenig sinnvoll, da ein spezifischer Bezug auf eine Düngerart nur in einzelnen Fällen (Silagemais, Leguminosen) begründbar ist.

Aus den hier erstellten Bilanzen lässt sich auch die Emission des Produktionssystems und der Nutzung der Biomasse analog zu den PM2.5-Emissionen ermitteln. Die Gesamtsumme an reaktivem Stickstoff aus Ammoniak und Stickoxiden beläuft sich dabei auf 380.000 t N. Dies entspricht 11,5 % des nach BMEL-Statistik eingetragenen Gesamt-N. Es liegt damit höher als die 8 % „Sonstiges“ (inklusive Eintrag aus Depositionen von Luftschadstoffen), aber in einer ähnlichen Größenordnung. Daher wird auch hier für die Bilanzierung und Auswertung dieser Umweltwirkung im Status quo die Angabe aus der BMEL-Statistik für die Einträge aus anderen Quellen außer dem Düngereintrag angesetzt, auch wenn dies u.U. eine leichte Unterschätzung bedeutet. Für das Szenario 2045 wird eine Absenkung analog zur Absenkung bei PM2.5 unterstellt.

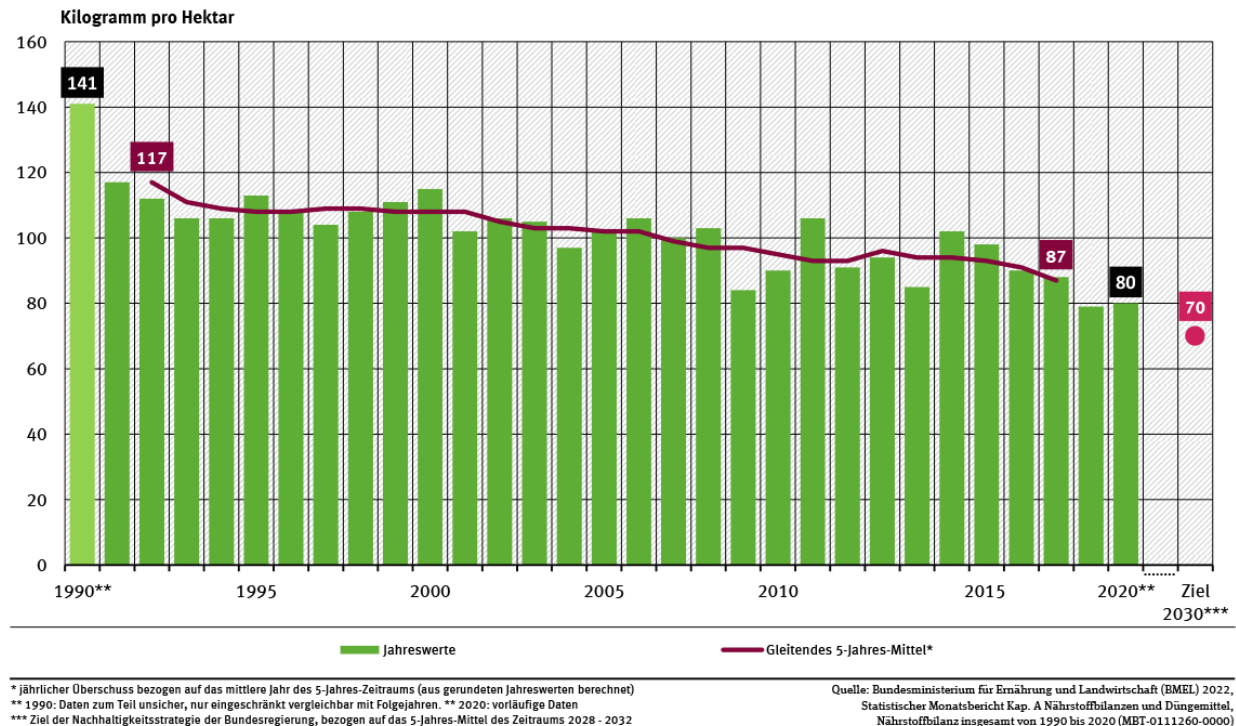
Abbildung 24 Stickstoff- und -austrag durch die Landwirtschaft im Status quo



Darstellung ifeu auf Basis von Daten des BMEL

Abbildung 25: Saldo der landwirtschaftlichen Stickstoff-Gesamtbilanz in Bezug auf die landwirtschaftlich genutzte Fläche

Saldo der landwirtschaftlichen Stickstoff-Gesamtbilanz in Bezug auf die landwirtschaftlich genutzte Fläche



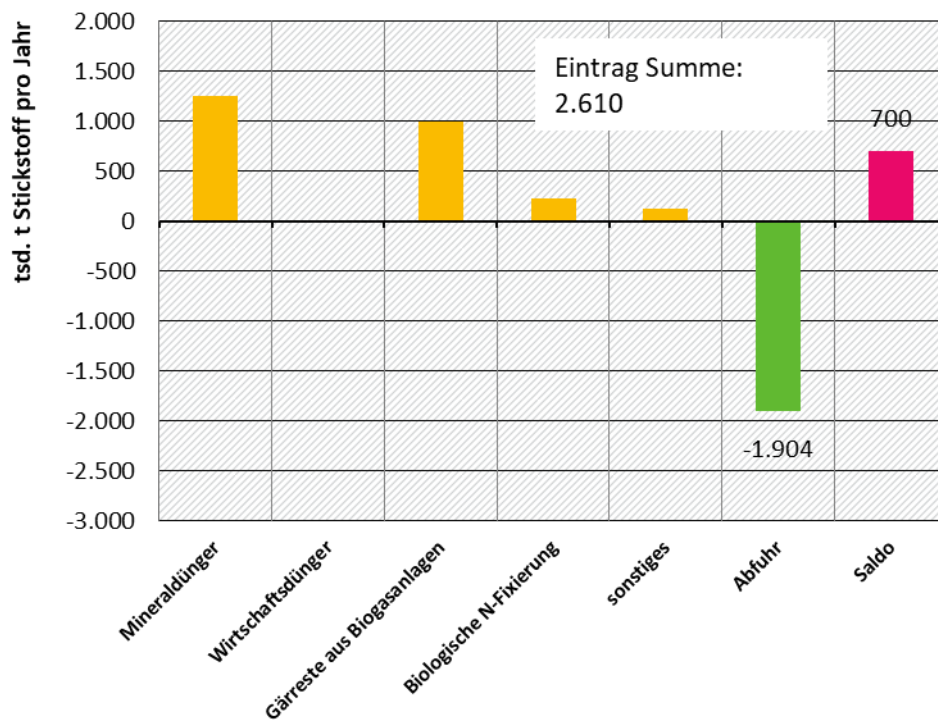
Quelle: UBA <https://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/stickstoffeintrag-aus-der-landwirtschaft#stickstoffuberschuss-der-landwirtschaft>

Szenario 2045

Die Reduktion der Anbaumassen im Szenario 2045 (v.a. bei den Futtermitteln) führen zu einer Reduktion des Stickstoffinputs um 18 %, unter der Annahme, dass die Düngintensität der einzelnen Agrarprodukte gegenüber dem Status quo unverändert bleibt. Dies ist unter der Voraussetzung plausibel, dass im Jahr 2020 der Zielwert für den N-Überschuss bereits erfüllt ist, als plausibel, wenngleich als konservative Annahme zu erachten. Dennoch bleibt die Verpflichtung, N-Verluste in der Landwirtschaft v.a. in Richtung Grundwasserbelastung weiter zu minimieren. Gleiches gilt für die Freisetzung von Ammoniak und Lachgas.

Abbildung 26 zeigt die Veränderung gegenüber dem Status quo. Die Reduktion der Tierhaltung (plus die Annahme fortschreitender Luftreinhaltungserfolge und damit reduzierter Depositionen) führen trotz insgesamt geringerer Gesamterträge zu einer leichten Erhöhung im Bedarf an Mineraldünger in 2045. Der Wirtschaftsdünger fällt dann ausschließlich als Gärrest an. Durch die Abnahme von Eintrag und Abfuhr reduziert sich der Überschuss gegenüber dem Status quo um 29 %.

Abbildung 26 Stickstoff- und -austrag durch die Landwirtschaft im Szenario 2045



Darstellung ifeu auf Basis von Daten des BMEL sowie Annahmen und Berechnungen des ifeu

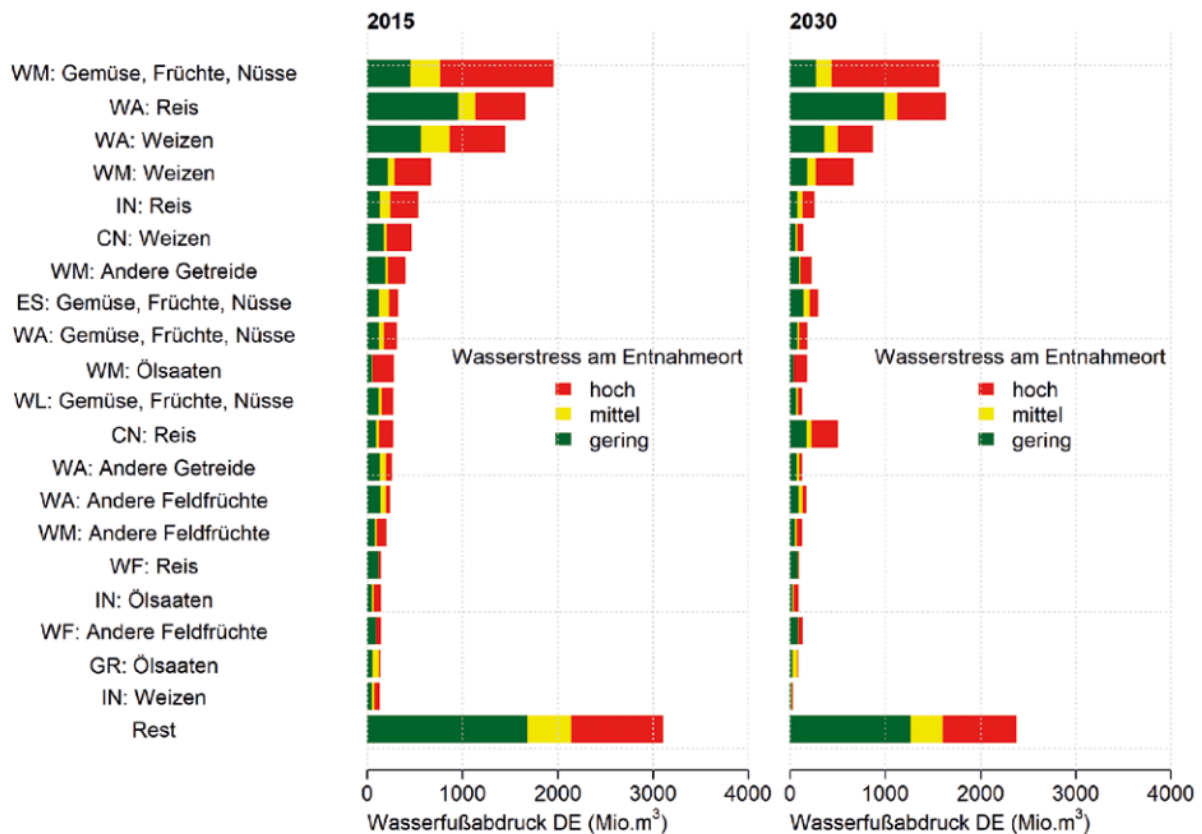
Wasserfußabdruck

Hierfür werden die Arbeiten zum Wasserfußabdruck aus dem Projekt SYMOBIO, wie sie u.a. im Pilotbericht zum Monitoring der deutschen Bioökonomie (Bringezu et al. 2020) veröffentlicht sind, herangezogen. Dieser Wasserfußabdruck bezieht sich auf das sogenannte „blaue Wasser“¹⁷ und berücksichtigt auch die Wasserknappheit in den entsprechenden Ländern, in den das Wasser entnommen wird. In Deutschland selbst spielt die Bewässerung in der Landwirtschaft (bislang) keine wesentliche Rolle. Daher wurden im Wasserfußabdruck des Pilotberichts vorrangig die importierten Agrargüter betrachtet, für die Bewässerung eingesetzt wird.

Die wichtigsten Herkunftsregionen für bewässerungsintensive importierte Agrarerzeugnisse sind danach Zentralasien, Südostasien und der Nahe Osten. Dies betrifft insbesondere den Anbau von Reis, Baumwolle, Weizen sowie Früchten und Gemüse. Eine Übersicht über den Aufwand an Bewässerungswasser für den deutschen Konsum nach Herkunftsregion und Feldfruchtklasse gibt Abbildung 27. Dabei wird auch für das Jahr 2030 prognostiziert.

¹⁷ Wasser, das aus Oberflächengewässern oder aus Grundwasser entnommen wird für den Einsatz für Bewässerung, Viehhaltung aber auch Haushalte und Industrie.

Abbildung 27: Aufwand an Bewässerungswasser für den deutschen Konsum nach Herkunftsregion und Feldfruchtklasse (Herkunftsregion: Feldfruchtklasse), differenziert nach Wasserstress am Ort der Wasserentnahme

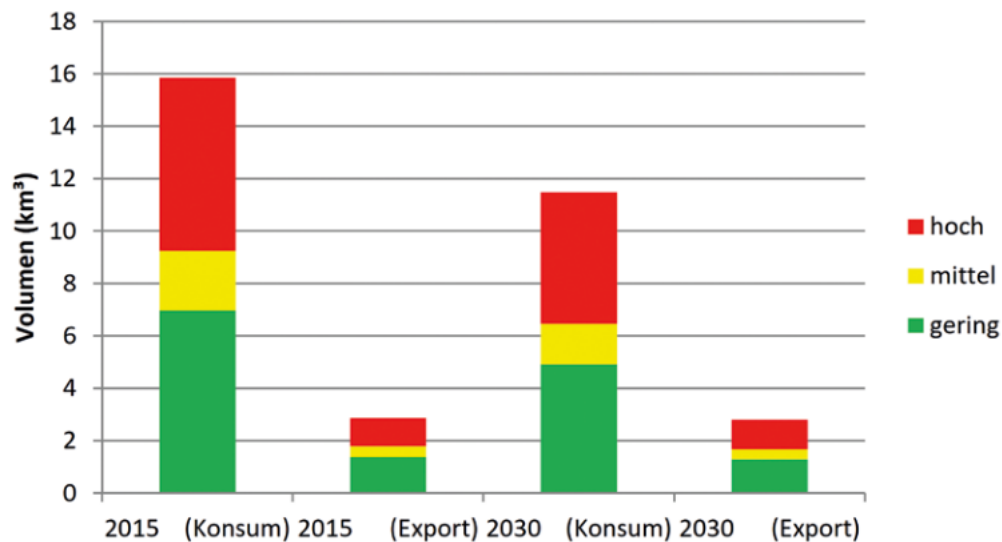


Quelle: Pilotbericht (Bringezu et al. 2020);

WM: Naher Osten., WA: Asien und Pazifikraum., WF: Afrika, WL: Lateinamerika, CN: China, IN: Indien, ES: Spanien, GR: Griechenland.

Die Projektion für 2030 berücksichtigt dabei, dass die Bewässerung in ariden Regionen weiter steigen wird. Eine Erhöhung um bis zu 21 % von 2015 bis 2030 wird erwartet. Gleichzeitig geht das Modell im Pilotbericht von Veränderung der Importe für den deutschen Konsum aus und kommt damit zu einer Verringerung um 28 % des damit verbundenen Bewässerungswassers von knapp 16 km³ (= Mrd. m³) auf 11,5 km³, wie Abbildung 28 zeigt.

Abbildung 28: Vergleich des Wasserfußabdrucks für den Konsum und den Export Deutschlands in 2015 und 2030, unterteilt nach Wasserstressniveau am Ort der Wasserentnahme



Quelle: Pilotbericht (Bringezu et al. 2020).

2.3.2.2 Holz-Biomasse

Aufgrund des Lebenswegbezugs der Bilanzierung der Umweltwirkungen werden hier neben der Entnahme und Nutzung von primärem Waldholz auch die Sägenebenenprodukte (inkl. weiteren Industrierestholzes) sowie die Nutzung von Recyclingströmen bzw. Verwertung von Reststoffen (v.a. Altholz) einbezogen. Diese Massenströme werden somit wie auch Wirtschaftsdünger nicht im Abschnitt zu Abfällen und Reststoffen behandelt.

Flächenbelegung und Naturfernepotenzial

Die Waldfläche Deutschlands liegt bei 11,4 Mio. ha und wird insgesamt auch für die Szenarien für 2045 konstant gehalten. Eine Zunahme der Waldfläche ist in keinem dieser Szenarien nicht vorgesehen. Stattdessen verringert sich in allen Szenarien die Entnahme von Holz aus der Waldfläche:

- Im BEPASO-Szenario verringert sich die jährliche Rohholzentnahme gegenüber dem Status quo¹⁸ um 18 %
- In den Szenarien KIS-2030 und LFS-3 verringert sich die Entnahme durch Berücksichtigung von LULUCF-Zielen sowie den Zielen zur Biodiversität und Wildnis (5% Natürliche Waldentwicklung) sogar um 29 %.

Dadurch verändert sich in allen Fällen die Einstufung des Naturwerts, der hier mit dem Hemerobieansatz (Naturferne-Potenzial, siehe auch Anhang C) bemessen wird. Als Grundlage für die Einstufung der Waldflächen in Hemerobieklassen werden zum einen die Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur (BMEL 2016) mit der Naturnähe der Bestockung: Bestandsbestockung als Grundlage für den Status quo und Jungbestockung als Indikation für den Zustand in 2045. Zum anderen wird die Klassifizierung wie sie für den Wald in Deutschland im Projekt „Flächenrucksäcke für Güter und Dienstleistungen“ (Fehrenbach et al. 2021c) erfolgt ist herangezogen. Die Verteilung ist in Abbildung 29 wiedergegeben.

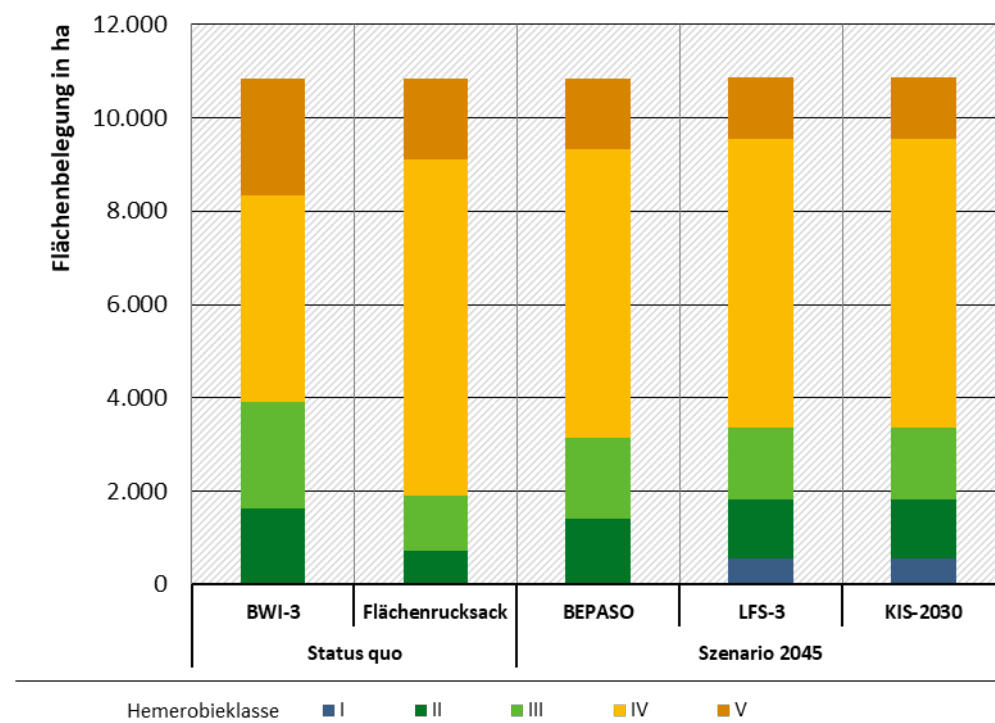
¹⁸ Angesetzt sind hier 82,4 Mio. m³ gemäß Einschlagsrückrechnung (Jochem et al. 2022)

Das Hemerobieklassensystem umfasst sieben Klasse von I bis VII (Klasse I für vom Menschen unbeeinflusste Ökosysteme bis Klasse VII für höchstes Maß an menschlicher Überprägung, z.B. Versiegelungen). Bewirtschaftete Wälder finden sich in den Klassen II bis V wieder.

Die Hemerobieklassen dienen in dem Konzept des Flächenrucksacks auch zur quantifizierenden Charakterisierung auf einer Skala von Null (für Klasse I, das gilt hier für aus der Nutzung genommene Fläche, Prozessschutz) bis eins (für Klasse VII). Die Schritte zwischen den Klassen bestehen aus Halbierungen bzw. Verdopplungen, d.h. Klasse VI hat einen Faktor 0,5, Klasse II einen Faktor 0,03125.

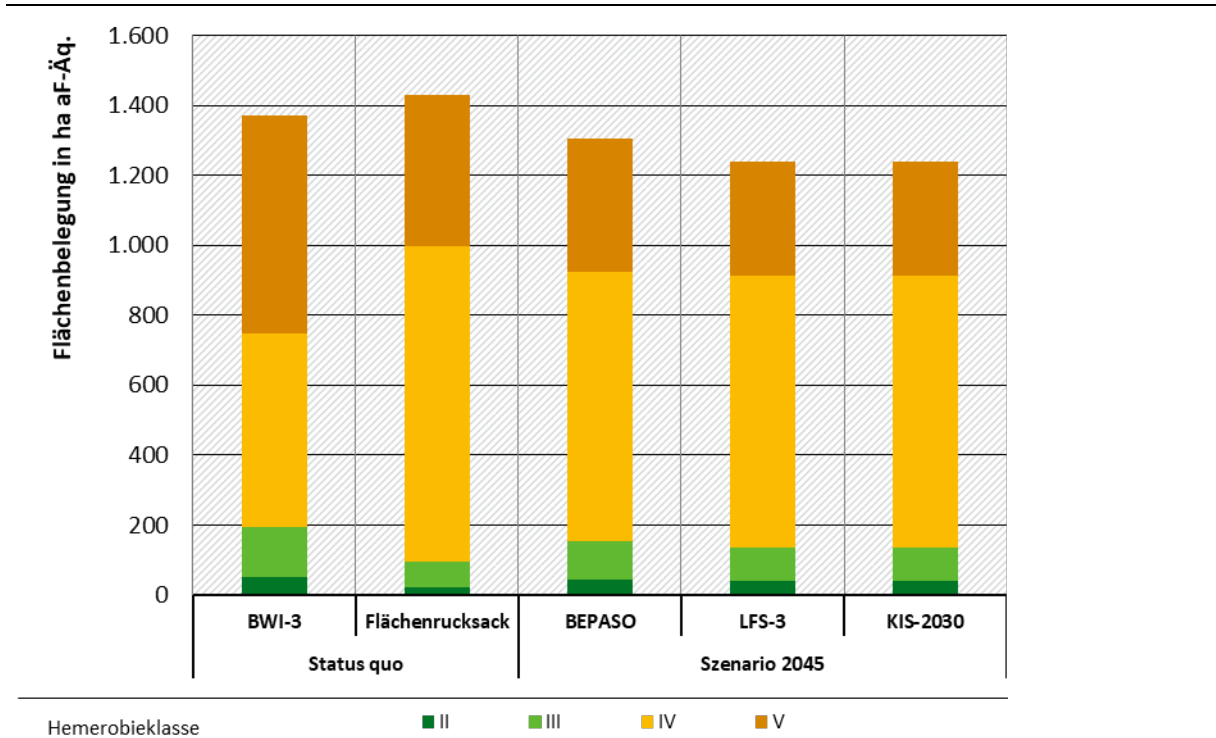
Das Ergebnis dieser Charakterisierung ist in Abbildung 30 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Unterschiede zwischen Status quo und Szenario 2045 nicht sehr groß ausfallen. Dies gilt sowohl für die Zugrundelegung der Daten der BWI-3 wie auch für die Schätzung nach Flächenrucksack, der hier insgesamt den konservativeren Ansatz beschreibt. Hierzu ist anzumerken, dass die Abschätzungen der Wirkung auf die Waldqualität nur sehr ungefähr erfolgen kann. Um die Maßnahmen in der künftigen Waldbewirtschaftung besser einschätzen zu können, wären umfassendere Analysen und Modellberechnungen notwendig. Es ist dabei zu beachten, dass der Zeitraum bis 2045 aus Sicht des Waldbaus vergleichsweise kurz ist. So gesehen, ist eine Entwicklung der Naturnähe des gesamten Waldes in Deutschland um einen Faktor 1,2 bis 1,3 durchaus beachtlich.

Abbildung 29 Waldfläche in Deutschland differenziert nach Naturferne (Hemerobie) nach BWI-3 und Flächenrucksack, Vergleich Status quo und Szenarien für 2045 (diese beziehen sich auf Status quo nach Flächenrucksack)



Darstellung ifeu; Quelle: (BMEL 2016) für BWI-3 (Bundeswaldinventur) und (Fehrenbach et al. 2021c) für (Flächenrucksack)
 I: ohne Nutzung (Prozessschutz); II: sehr naturnahe Bewirtschaftung, III: naturnahe Bewirtschaftung, IV: bedingt naturnahe Bewirtschaftung und V: naturferne Bewirtschaftung (kulturbetont bis kulturbestimmt)

Abbildung 30 Waldfläche in Deutschland charakterisiert nach Naturfernepotenzial, auf Basis von BWI-3 sowie Flächenrucksack, Vergleich Status quo und Szenarien für 2045 (diese beziehen sich auf Status quo nach Flächenrucksack)



Darstellung ifeu; Quelle: (BMEL 2016) für BWI-3 (Bundeswaldinventur) und (Fehrenbach et al. 2021c) für (Flächenrucksack)
 II: sehr naturnahe Bewirtschaftung, III: naturnahe Bewirtschaftung, IV: bedingt naturnahe Bewirtschaftung und
 V: naturferne Bewirtschaftung (kulturbetont bis kulturbestimmt)

Klimawandel

Die Gesamtemission an Treibhausgasen durch die Holzwirtschaft und damit verbundene Produktionszweige wird anhand des Modells HoLCA für den Status quo auf insgesamt 12,3 Mio. t CO₂Äq berechnet.¹⁹ Die größten Anteile nehmen dabei die Erzeugung von Zellstoff, Papier, Pappe, Karton, die Holzwerkstoffe sowie die Gesamtheit an Transporten im System, wie Abbildung 31 zeigt.

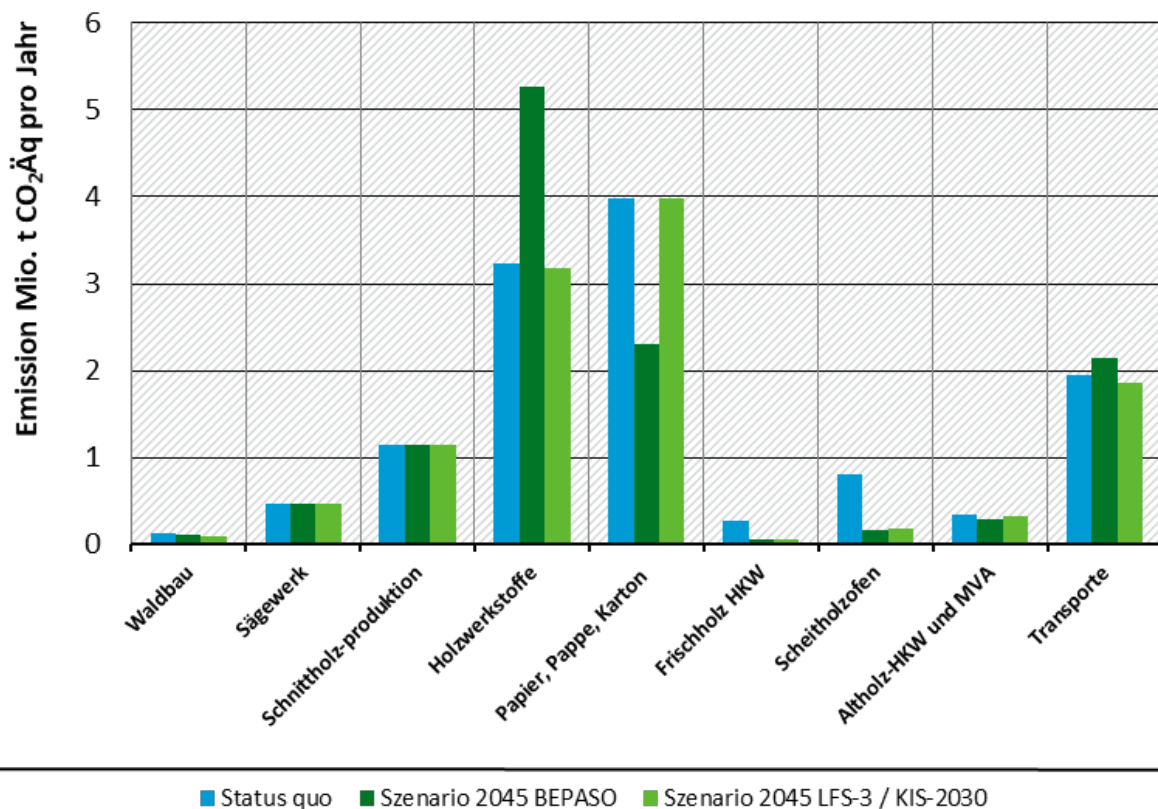
Insgesamt unterscheiden sich die Szenarien für 2045 lediglich in Details: die etwas höhere Holzentnahme bei BEPASO gegenüber KIS-2030 und LFS-3 fällt dabei kaum ins Gewicht. Die Verteilung von Sägenebenprodukten und Industrieholz bei BEPASO mehr in die Holzwerkindustrie und bei KIS-2030 und LFS-3 analog zum Status quo mehr in die Papierindustrie. Durch die Verringerung der Nutzung von Primärholz zu Energiezwecken auf ca. 11 Mio. m³ (entspricht einer Halbierung), verringert sich die Gesamtemission im Szenario BEPASO Bioökonomiewende für 2045 auf 12,0 CO₂Äq und in den Szenarien KIS-2030 und LFS-3 auf 11,6 CO₂Äq. Hierbei wurde ein Rückgang der Hintergrundemissionen in den anderen Prozessen (Sägewirtschaft, Transporte etc.) und Produktionszweigen (Holzwerkstoff-, Papierindustrie) nicht modelliert. In Abbildung 31 ist dies durch Schraffur der entsprechenden Systemkomponenten dargestellt. Es ist anzunehmen, dass wesentliche Emissionsquellen wie Strom und Prozesswärme für Sägewerke, Schnittholzverarbeitung, Herstellung von Holzwerkstoffen und Papier etc. sich massiv reduzieren werden. Dies gilt ebenso für Transporte.

¹⁹ Dies beinhaltet keine Senkeneffekte und nicht das CO₂ durch Verbrennung von Holz. Beides wird hier durch die Berücksichtigung der Veränderung des LULUCF-Werts berücksichtigt.

Setzt man dafür insgesamt nur eine konservative Reduktion von 80 % an, so verbleiben (in allen Szenarien) 2,7 Mio. t CO₂-Äq im Holzsektor im Jahr 2045.

Durch den verringerten Einsatz von Holzenergie verringert sich deren Emission von 1,4 Mio. t CO₂-Äq. auf 0,54 (BEPASO) bis 0,58 Mio. t CO₂-Äq. (KIS-2030 / LFS-3). Dies beruht auf den vermiedenen Methan- und Lachgasemissionen der Holzverbrennung. Die bei der Verbrennung von Waldholz (inklusive Sägenebenprodukte) entstehenden CO₂-Emissionen belaufen sich im Status quo im Übrigen auf ca. 56 Mio. t. In den Szenarien 2045 reduziert sich das auf ca. 12 Mio. t. Rechnet man die Verbrennung von Altholz hinzu, werden im Status quo etwa 63 Mio. t biogenes CO₂ freigesetzt und etwa die Hälfte dessen in den Szenarien für 2045. Da in diesem Modellansatz die Änderung des Kohlenstoffspeichers im Wald berücksichtigt wird, gehen die biogenen CO₂-Emissionen nicht in die Bilanz ein, da es sonst zu Doppelanrechnungen kommen würde (siehe dazu auch den Kasten auf nachfolgender Seite).

Abbildung 31 Treibhausgaspotenzial durch die Holzwirtschaft im Status quo sowie die Szenarien für 2045



Berechnungen und Darstellung ifeu;

Die Werte 2045 berücksichtigen hier nicht, dass im Zuge der Dekarbonisierung hier eine weitgehende Emissionsreduktion erfolgen sollte; siehe dazu im Text.

Umgang mit biogenen CO₂-Emissionen

In Ökobilanzen werden CO₂-Emissionen aus biogenen Quellen für die Anrechnung zum GWP100 praktisch durchgängig mit Null angesetzt.

Normative Regeln dazu finden sich in der ISO-Norm zu Product Carbon Footprints (ISO 14067), danach sind die separat zu berichten, so wie auch Speicheränderungen durch Produkte – dagegen sollen CO₂-Emissionen, die aus Landnutzungsänderungen (LUC) resultieren berücksichtigt werden

(in jedem Fall direkte Landnutzungsänderungen (dLUC), für indirekte (iLUC) liegt noch keine allgemein akzeptierte Methode vor).

Die Berücksichtigung von LUC in Ökobilanzen und Carbon Footprints für Produktionssysteme nimmt somit Bezug auf die IPCC Methode, wonach LUC im Rahmen des Sektor LULUCF in nationalen Inventare zu bilanzieren ist).

Aktuell findet eine intensive Diskussion zur Frage, ob CO₂-Emissionen aus biogenen Quellen als klimaneutral zu werten sind. Legt man die Prinzipien des IPCC zu Grunde, so gilt: Emissionen, die aus der Veränderung von existierenden Kohlenstoffspeichern entstehen, sind anzurechnen. Dies gilt für LUC und für Veränderungen des Kohlenstoffspeichers durch Holzentnahme aus Wäldern.

Hier in der Studie werden somit folgende Effekte biogenes CO₂ betreffend berücksichtigt:

In der **Landwirtschaft** und der Nutzung der Erzeugnisse werden:

- ▶ die Emissionen aus der Bewirtschaftung organischer Böden aus LULUCF-Sektor und.
- ▶ der entgangene Speicheraufbau (CO₂-Opportunitätskosten) im Rahmen der kontrafaktischen Effekte einbezogen; sozusagen alternativ zum LUC.

In der **Forstwirtschaft** und **Holznutzung** wird:

- ▶ der entgangene Speicheraufbau (Speichersaldo) im Wald und
- ▶ der temporäre Speicher in längerlebigen Produkten einbezogen.

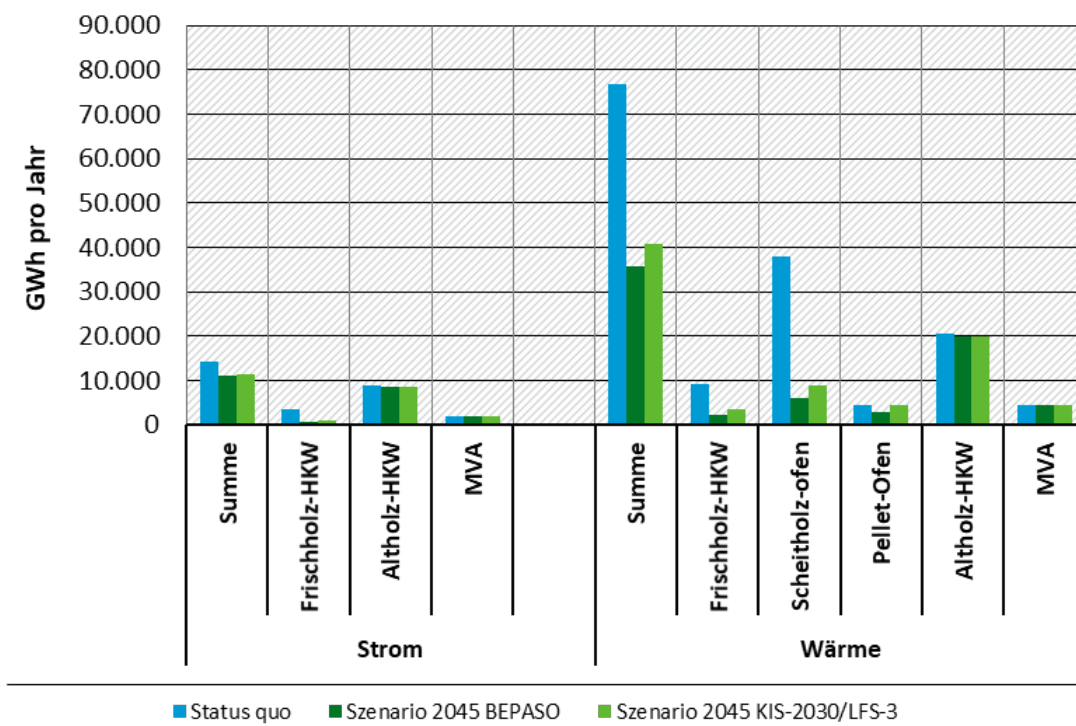
In allen Fällen wird hier die Emission des biogenen CO₂ bei der Nutzung (Verbrennung oder sonstiger Abbau) nicht eingerechnet. Dies könnte eine Alternative für die Bilanz darstellen, wenn die vorangehend genannten Emissionsquellen bzw. Senken außer Acht gelassen werden. Da jedoch bereits zur Definition des Szenarios 2045 die Senkenleistung aus dem Klimaschutzgesetz eine zentrale Basis darstellt, wurde hier dieser Weg gewählt.

Der Ansatz des Speichersaldos für den Wald bezieht sich auf (Hennenberg et al. 2023a). Für die Berücksichtigung des temporären Produktspeichers wird die Methode von (Helin et al. 2016).

Des Weiteren wird in dieser Studie die Option BECCS oder BECCU nicht betrachtet.

Abbildung 32 schlüsselt die Verringerung der Energieerzeugung durch die reduzierte Energieholznutzung auf. Diese betrifft lediglich das Waldholz, dessen energetische Nutzung auf 23 % (BEPASO) bis 34 % (KIS-2030/LFS-3) zurückgeht. Nahezu unverändert ist bei dieser Betrachtung auch die Energienutzung von Altholz und Holz im Restabfall. Auch die Anteile der Sägenebenprodukte in der Energienutzung bleiben konstant. Dass die Stromproduktion in etwa ähnlich hoch bleibt, liegt an dem weitgehend konstanten Anteil an Altholz in größeren HKWs. Durch die Reduktion des Waldholzeinsatzes reduziert sich die produzierte Wärmemenge dagegen auf etwa die Hälfte.

Abbildung 32 Energieerzeugung durch Holz im Status quo sowie die Szenarien für 2045



Berechnungen und Darstellung ifeu.

Abbildung 33 fasst das Treibhausgaspotenzial der Energieholznutzung zusammen. Dabei wird im linken Balken (schraffiert) auch die restliche Emission aus der Gesamtholzwirtschaft (außer der Energieholznutzung) abgebildet.

Temporärer Speicher durch holzbasierte Produkte

Während die in den Szenarien LFS-3 und KIS-2030 zu Grunde liegende Senkenleistung des Waldes durch die zur Erfüllung der Ziele des Klimaschutzgesetzes „zu füllende Lücke“ auf 6 Mio. t CO₂ berechnet wurde, ist auch der Effekt durch den (temporären Speicher) von Holzprodukten zu beachten. Hierzu gibt es bisher keine Standardmethode. Die ISO 14067 schreibt im Übrigen vor, dass alle Emissionen im Laufe der Lebenszeit eines Produktsystems „so zu berechnen sind, als wären sie zu Beginn des Bewertungszeitraums freigesetzt“. Werden THG-Mengen jedoch über mehr als zehn Jahre entzogen, sind „die zeitbezogenen Auswirkungen in der Sachbilanz darzustellen. Die Einrechnung in einen Klimafußabdruck (als CO₂-Äq.) ist separat zu dokumentieren.

Eine sinnvolle Methode zur Berechnung von zeitbezogene Auswirkungen durch temporäre Speicher liefern (Helin et al. 2016) mit . GWP-Korrekturfaktoren für verzögerte Freisetzung. Für die vorliegende Betrachtung werden hierzu folgende Faktoren für Produkte und Lebensdauern angesetzt:

- ▶ Lebensdauer <10 Jahre (Papierprodukte, aber auch biobasierte Verpackungskunststoffe etc.) GWP-Korrekturfaktor: 0
- ▶ Lebensdauer: 30 Jahre (Möbel) GWP-Korrekturfaktor: -0,25
- ▶ Lebensdauer: 60 Jahre (Bauholz) GWP-Korrekturfaktor: -0,5

Tabelle 5: GWP-Korrekturfaktoren für verzögerte Freisetzung verschiedener stofflicher Holzprodukte

	Lebensdauer	GWP Korrektur- faktor	t CO ₂ -Äq. pro t Holz im Produkt
Verpackungsholz	<10 Jahre	0	0
Möbelholz	30 Jahre	-0,25	-0,367
Bauholz	60 Jahre	-0,5	-0,733

Substitutionsleistung für holzbasierte Produkte

Wie in Kapitel 0 beschrieben, ist die Substitutionsleistung für biobasierte Produkte nicht einfach darzustellen. Während sich für Strom und Wärme als Produkte aus Energieholz die ersetzten Energieträger vergleichsweise einfach definieren lassen, ist dies für die kaum quantifizierbare Vielzahl an Endprodukten aus Holz nicht darstellbar. Dennoch soll für den Wirkungsaspekt Klimawandel der Konsistenz halber auch eine produktbezogene Substitutionsleistung für Bauholz, Holzmöbel, Verpackungsholz, Zellstoffprodukte wie Papier ansatzweise abgeschätzt werden. Unter Vernachlässigung der Vielfalt an Produkten und Anwendungen werden hier lediglich grundlegenden Rohstoffbedarfe anhand von folgenden Substitutionsbezügen gegenübergestellt:

- ▶ Bauholz: Balken als Tragwerkelement → Stahlträger
- ▶ Möbelholz: Schrankwände und Regalplatten → Kunststoffplatten
- ▶ Verpackungsholz: Paletten → Kunststoffplatten
- ▶ Graphisches Papier → elektronische Medien
- ▶ Hygienepapier → Stromtrockner

In Tabelle 6 werden die Mengengrundlagen und Emissionsfaktoren für die vereinfachte Substitutionsrechnung zusammengestellt. Wichtig dabei ist auch zu beachten, dass sich die Substitutionsleistung bis ins Jahr 2045 deutlich verändern wird. Stahl wird nach den Zielen der Industrie mit grünem Wasserstoff produziert, Kunststoff vermutlich ebenfalls als strombasierte Wasserstoffderivate. Die Angaben zu den zukünftigen Emissionsfaktoren sind daher sehr grobe Abschätzungen.

Die energetischen Substitutionsfaktoren beruhen dem derzeitigen Emissionsfaktor von 470 g CO₂Äq. pro kWh Strom²⁰ und 190 g CO₂Äq. pro kWh Wärme. Für 2045 gehen diese Faktoren runter auf 57 g CO₂Äq. pro kWh Strom und 14,4 g CO₂Äq. pro kWh Wärme (Dittrich et al. 2025).

²⁰ Mittel von 2020-2022 nach <https://www.umweltbundesamt.de/themen/co2-emissionen-pro-kilowattstunde-strom-stiegen-in>

Tabelle 6: Stoffliche Verwendung von Holz für den Status quo und die Szenarien für 2045, Substitute, Äquivalenz- und Emissionsfaktoren

	Menge SQ & LFS-3 in Tsd. t	Menge BEPASO in Tsd. t	Substitut	Äq-Faktor in t/t bzw. GWh/t	E-Faktor t CO ₂ Äq/t (GWh) 2020 2045	
Bauholz, Schnittholz	12.500	12.500	Stahlträger	0,8	1,72	0,3
Bauholz, Holzwerkstoffe	2.200	2.200	Leichtbauziegel	0,8	1,13	0,5
Möbelholz, Schnittholz/ Holzwerkstoffe	5.900	5.900	Kunststoff	1	1,6	0,2
Verpackungsholz	9.800	9.800	Kunststoff	0,5	1,6	0,2
Graphische Papiere (inklusive Zeitung etc.)	4.500	4.500	E-Medien (Strom)	2,2	470	57
Papier, Karton und Pappe für Verpackungszwecke	9.000	9.000	Kunststoff	0,5	1,6	0,2
Hygienepapiere	1.100	1.100	Strom	3,1	470	57

Quellen: Mengendaten für Bau-, Möbel-, Verpackungsholz nach (Pfeiffer et al. 2023), Papier, Karton, Pappe nach (Die Papierindustrie 2023); Substitutions- und Emissionsfaktoren aus (Hennenberg et al. 2023a), (Dittrich et al. 2025), (Liebich et al. 2023) sowie Schätzungen für das Jahr 2045.

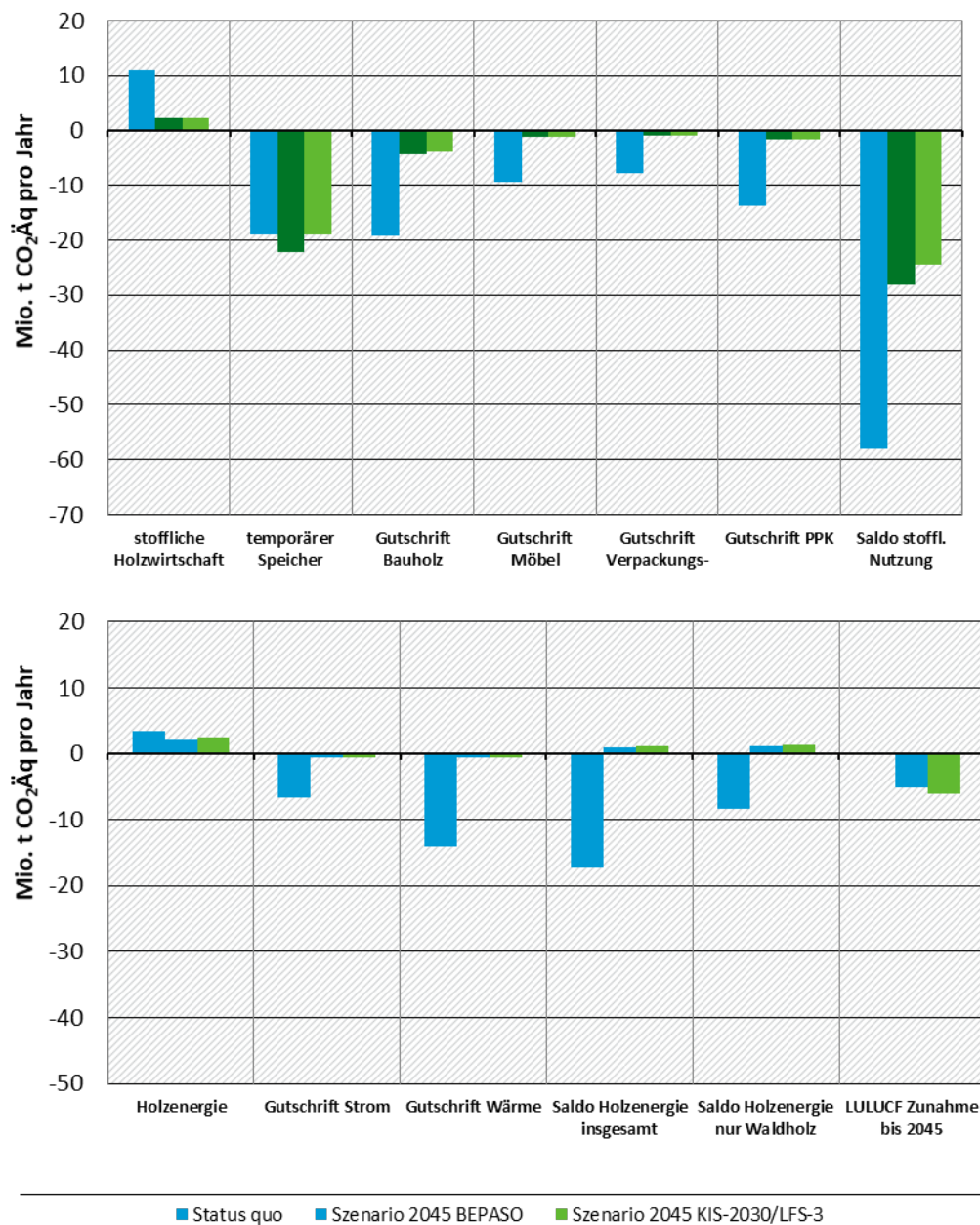
Nettobilanzen

Abbildung 33 zeigt in zwei Diagrammen oben die Emissionen der Holzwirtschaft und die Gutschriften für die stoffliche Nutzung und unten die Emissionen der Holzverbrennung jeweils saldiert mit den verschiedenen Gutschriften. Der Holzwirtschaft und Produktion von Holzwerkstoffen sowie Zellstoffrohwaren sind danach etwa 11 Mio. t CO₂Äq. an Emissionen im Status quo zuzurechnen. Würde man diese Produkte nicht auf Basis herstellen können, entstünden für alternative Produkte 50 Mio. t CO₂Äq. an Emissionen. Für die stoffliche Nutzung wird eine Nettoeinsparung von 39 Mio. t CO₂Äq. geschätzt. In den Szenarien für 2045 reduzieren sich die Emissionen gemäß der oben erwähnten Annahme von 80 % Gesamtminderung im System auf 2,2 Mio. t CO₂Äq.. Dies betrifft jedoch auch die Substitutionsleistung. Netto werden durch BEPASO 6 Mio. t CO₂Äq., durch LFS-3/KIS-2030 noch 5,5 Mio. t CO₂Äq. eingespart. Unter Berücksichtigung des temporären Speichers dagegen erhöht sich die Nettoemissionsvermeidung um 19 Mio. t CO₂Äq. im Szenario LFS-3/KIS-2030 (dies gilt ebenfalls für den Status quo) und um 22 Mio. t CO₂Äq. bei BEPASO.

Für den Anteil an energetisch genutztem Holz liegt die Netto-Einsparung für den Status quo 17,4 Mio. t CO₂Äq. Für das Jahr 2045 wechselt diese Netto-Einsparung in eine Nettoemission von 0,8 bis 1,2 Mio. t CO₂Äq., da dann kaum mehr fossile Energieträger ersetzt werden. Betrachtet man nur die Verbrennung von Frischholz (inkl. Sägenebenprodukte etc.), so reduziert sich die Netto-Einsparung für heute auf 5,5 Mio. t CO₂Äq., für 2045 erhöht sich Nettoemission leicht.

Da die reduzierte Holzentnahme in den Szenarien LFS-3 und KIS-2030 auf dem Ziel der Erreichung der LULUCF-Vorgaben beruht und der Schließung einer Lücke von um die 6 Mio. t CO₂Äq. entspricht, ist den Szenarien für 2045 diese LULUCF-Gutschrift anzurechnen. Im Szenario BEPASO ist die Holzentnahme ebenfalls reduziert, was in der Bilanz zu einem Speicherzuwachs von 5,2 Mio. t CO₂Äq. entspricht.

Abbildung 33 Treibhauspotenzial bzw. Emissionseinsparung durch die Nutzung von Holz zu stofflichen Zwecken (oberes Diagramm) und zu Energiezwecken (unteres Diagramm) für den Status quo sowie die Szenarien für 2045



Berechnungen und Darstellung ifeu.

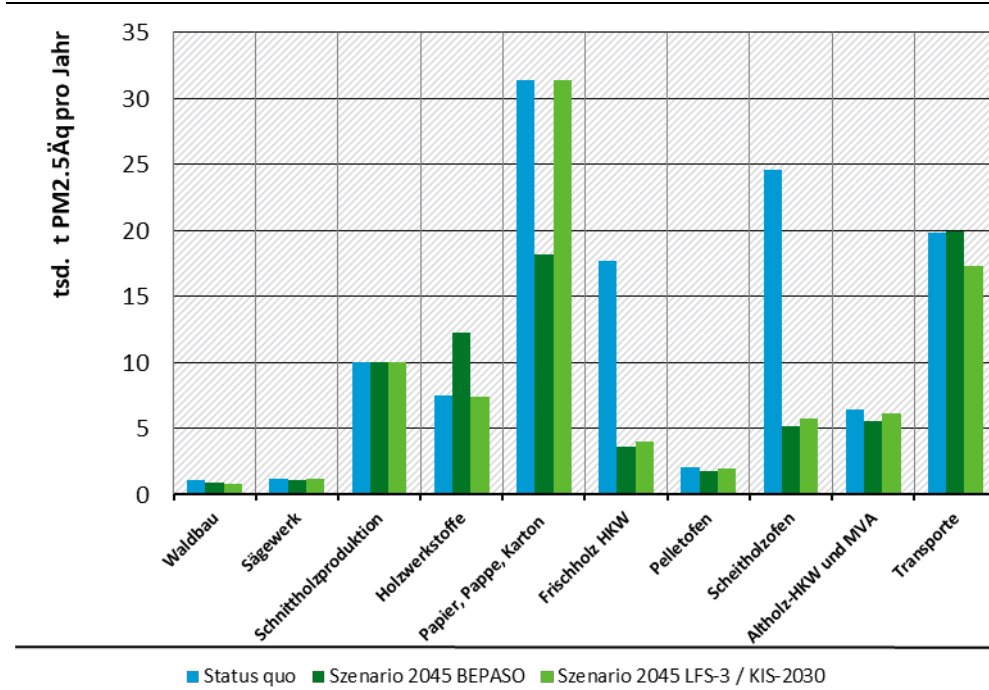
Feinstaubemission – PM_{2.5}

Mit dem Modell HoLCA werden auch die Gesamtemission an Staub und Sekundärpartikelbildner für die Holzwirtschaft die damit verbundenen Produktionszweige ermittelt. Diese summiert sich für den Status quo auf insgesamt 122.000 t PM_{2.5}-Äq. Wie beim Treibhauspotenzial nimmt auch hier die Erzeugung von Zellstoff, Papier, Pappe, Karton einen großen Anteil ein. Auf den Plätzen 2 bis 4 folgen dann jedoch Scheitholzöfen, die Summe der Transporte und die Verfeuerung von Frischholz in HKW.

Was die Szenarien für 2045 betrifft gelten hier im Grunde die gleichen Randbedingungen wie bei den THG-Emissionen, denn mit der Transformation des Energiesystems und der

Hintergrundprozesse werden auch Quellen für PM2.5-Emissionen zurückgefahren. Die bereits deutlich reduzierten Energieholznutzungen (deren Emission verringert sich im Szenario KIS-2030/LFS-3 von 44.400 auf 11.900 t PM2.5-Äq., im Szenario BEPASO sind die Beträge etwas geringer, weil insgesamt etwas weniger Holz verbrannt wird) verbleiben damit voraussichtlich als die zukünftig letzten wesentlichen PM2.5-Quellen aus diesem ganzen Cluster.

Abbildung 34 Feinstaubemissionen durch die Holzwirtschaft im Status quo sowie in den Szenarien für 2045

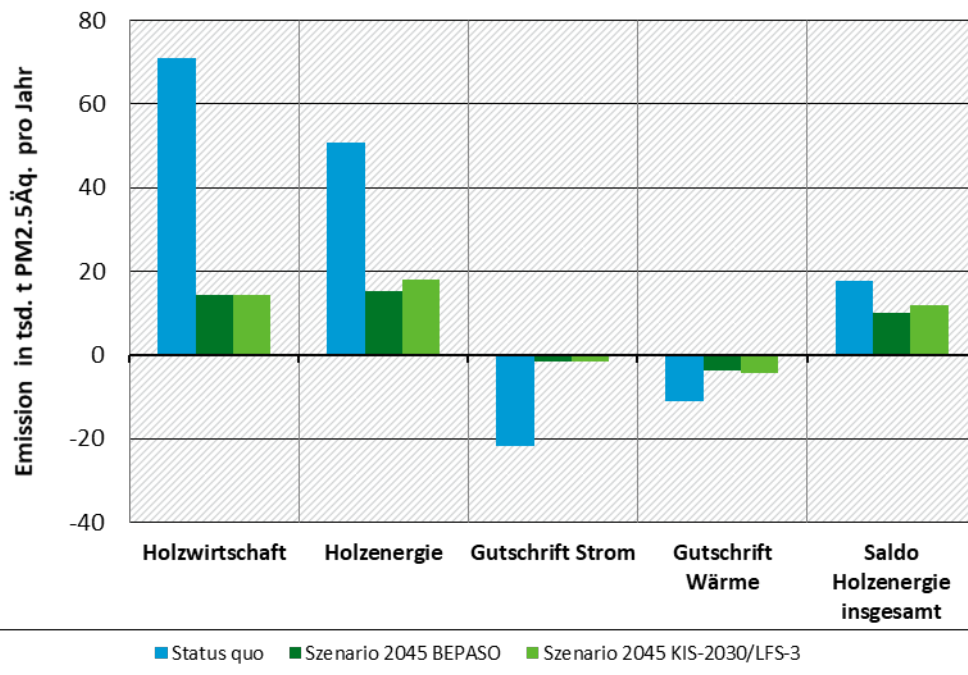


Berechnungen und Darstellung ifeu

In den Werten für 2045 ist nicht berücksichtigt, dass im Zuge der Dekarbonisierung auch für die Emission von PM2.5 (Verbrennungsmotoren, Strom, Prozessenergie) eine weitgehende Emissionsreduktion erfolgen sollte; siehe dazu auch im Text.

Auch für die Feinstaubemissionen stellt sich die Frage der Einsparung durch Substitution. Die Betrachtung hier beschränkt sich dabei auf die Holzenergienutzung, da die Abschätzungen für die PM2.5-Emissionen aus den substituierten stofflichen Nutzungen sehr hohe Unsicherheiten mit sich führen und aufwendige eigenständige Modellierungen erfordern würden. Wie in Abbildung 37 dargestellt, ergeben sich hier Netto-Emissionen sowohl im Status quo mit 17.900 t PM2.5-Äq. wie auch im Szenario KIS-2030/LFS-3 für 2045 mit 12.000 t PM2.5-Äq. und für BEPASO etwa 10.000 t PM2.5-Äq.

Abbildung 35 Feinstaubemission bzw. Emissionseinsparung durch die Nutzung von Holz zu Energiezwecken im Status quo sowie die Szenarien für 2045



Berechnungen und Darstellung ifeu.

Stickstoff – Ein- und Austräge

Wälder werden nicht aktiv mit Stickstoff gedüngt.²¹ Aktive Einträge erfolgen in bestimmten Fällen mit Kalk. Allerdings wird reaktiver Stickstoff in Form von Ammoniak und Stickstoffoxiden über die Luft in Wälder eingetragen und kann dort zu erheblichen Belastungen für die Ökosysteme führen. Die Quelle dieser Einträge sind die Landwirtschaft und das Verbrennen von Energieträgern (fossile wie biogene).

An dieser Stelle werden die Emissionen von Stickstoffverbindungen (NO_x) durch den Holzsektor inklusive der Verbrennung von Holz kurz quantifiziert. Dies beruht auf den gleichen Daten wie für die PM_{2.5}-Belastung, die bereits NO_x (und auch NH₃) einbezieht. Die Gesamtemission liegt bei ca. 25.000 t N, zu welche folgende Bereiche beitragen:

- ▶ 8.600 t durch Verbrennung in HKW (außerhalb der holzbezogenen Industrie) und Haushalten
- ▶ 5.600 t durch Transporte und
- ▶ 10.500 t durch Verbrennung in Anlagen der holzbezogenen Industrie (Waldwirtschaft, Sägewerke, Holzverarbeitung, Holzwerkstoff- und Papierindustrie)

Wasserfußabdruck

Die Methodik des Wasserfußabdrucks bezieht sich auf das sogenannte „blaue Wasser“, d.h., Wasser welches einem Gewässer und Grundwasser entnommen wird und dann einer Nutzung, z.B. Bewässerung oder industrieller Verbrauch, unterzogen wird. Im Falle der Forstwirtschaft

²¹ Seite 567 des Nationalen Inventarberichts (UBA 2023a): „No nitrogen fertilisation in Forest Land, Wetlands and Settlements is carried out in Germany.“

findet eine solche Bewässerung nicht statt, wobei bei der industriellen Verarbeitung von Holzrohstoffen durchaus Wasserverbräuche auftreten.

Die gilt insbesondere für die **Papierindustrie**, die nach dieser Bilanz ca. 280 Mio. m³ Prozesswasser verbraucht.²² Das sind immerhin 10 % bezogen auf den Verbrauch an Bewässerungswasser für Agrarprodukte für den deutschen Konsum (siehe Kapitel 0).²³

Mit Perspektive 2045 ist zum einen davon auszugehen, dass die Papierindustrie ihre Wasserverbräuche durch technische Entwicklungen deutlich reduzieren kann. Zum anderen wird prognostiziert, dass der Papierverbrauch (v. a. grafische Papiere) ebenfalls deutlich zurückgeht.

2.3.2.3 Sonstige Abfall- und Reststoffe

Anders als bei den Agrarerzeugnissen und Primärholz stellt sich für die Abfall- und Reststoffe für das Zukunftsszenario eine Mengenerhöhung dar. Von aktuell etwa 25 Mio. t (exklusive Rest- und Altholz sowie Wirtschaftsdünger) wird für das Szenario 2045 ein verfügbares Potenzial von gut dem Doppelten angesetzt. Der größte Teil dieser Steigerung beruht auf Stroh.

Wie in Kapitel 2.2 beschrieben, unterscheiden sich die Szenarien BEPASO Bioökonomiewende einerseits und KIS-2030/LFS-3 andererseits darin, dass in ersterem ein großer Anteil der Reststoffe auf die Erzeugung von fortschrittlichen Biokraftstoffen eingesetzt werden. Für KIS-2030/LFS-3 wird dagegen unterstellt, dass das verfügbare Strohpotenzial als über chemisch-technische Aufschluss in Form von Ethanol oder anderer Basischemikalien dem Chemiesektor zur Verfügung gestellt werden kann. Für diese steht aus derzeitiger Sicht nicht wie bei den Energien eine erneuerbare Alternative in Aussicht. Lediglich der strombasierte Pfad über Wasserstoff und CO₂ stellt sich als Zukunftsoption dar. Doch trotz großer theoretischer Potenziale sind hier noch große Fragen zum Ausbau und zur Verfügbarkeit offen. Es wird hier daher unterstellt, dass bis ins Jahr 2045 aus dem petrochemischen Sektor noch Substitutionspotenzial für fossile Rohstoffe besteht.

Im Szenario BEPASO wurde im Übrigen bereits eine Menge von 3 Mio. m³ Holz dem Chemiesektor als Rohstoff zugerechnet (siehe Kapitel 2.2.1). Es wird somit angenommen, dass das nachhaltig verfügbare Strohpotenzial von 11,1 Mio. t im Jahr 2045

- bei BEPASO in fortschrittlichen Biokraftstoff und
- bei KIS-2030/LFS-3 als Chemierohstoff verarbeitet werden.

Im Chemiesektor ist die Perspektive, dass der Rohstoff für Kohlenstoffverbindungen vollständig aus anderen erneuerbaren Quellen zur Verfügung stehen wird, ungleich geringer als im Energiesektor. Daher wird hier biogenen Quellen auch weiterhin eine bedeutende Rolle zur Substitution von fossilen Rohstoffen unterstellt. Was die Substitution von fossilen Kraftstoffen im Verkehrsbereich im Jahr 2045 betrifft, so weisen hier zwar die Ziele des Klimaschutzgesetzes auf eine Reduktion der THG-Emissionen auf Null. Doch wird dies zumindest für bestimmte Bereiche wie der Flug- und teilweise der Seeschiffsverkehr eine Herausforderung bleiben. Das Substitutionspotenzial kann somit nur auf Basis einer hypothetischen Schätzung bestimmt werden. Sie erfolgt anhand folgender Grundlagen:

- Für den Einsatz von fortschrittlichen Biokraftstoffen im Verkehrsbereich (Szenario BEPASO) wird angenommen, dass diese zu 25 % fossile Kraftstoffe ersetzen können;

²² Dies wurde mit dem Modell HoLCA errechnet. Seitens der Papierindustrie werden mit 250 Mio. m³ etwas niedrigere Werte berichtet (Die Papierindustrie o.J.)

²³ Im Pilotbericht (Bringezu et al. 2020) sind derartige industrielle Wasserverbräuche der Bioökonomie nicht abgebildet.

Diese Annahme wird durch die Zahlen des Projektionsberichts 2023 (UBA 2023b) begründet, wonach der Fossilanteil im Endenergiebedarf des Verkehrs im Jahr 2045 noch zwischen 15 % bis 30 % (bei einer absoluten Höhe von 195 bis 436 PJ)²⁴ liegt.

- Für den Einsatz von biobasierten Grundstoffen im Chemiebereich (Szenario KIS-2030/LFS-3) wird angenommen, dass diese zu 55 % fossile Rohstoffe ersetzen können; Diese Annahme wird durch Zahlen der Roadmap Chemie 2050 (Geres et al. 2020) begründet, wonach der Fossilanteil in den Rohstoffen für die Chemieindustrie im Jahr 2045 noch bei 55 % liegen soll.

Was die Nutzung der übrigen Mengenströme betrifft, wird im Wesentlichen am Status quo festgehalten bzw. eine energetische Nutzung angesetzt. Das bedeutet: aus vergärbaren Abfällen (wie Grüngut, Bioabfall) wird Biogas bzw. Biomethan für die Energieversorgung gewonnen, Abfälle wie Hausmüll, Klärschlamm, industrielle Substrate werden weiterhin verbrannt. Allerdings steht die daraus gewonnene Energie in Konkurrenz zu erneuerbaren Quellen, die in 2045 den Energiemarkt abdecken und führt daher nur noch in geringem Maße zu Substitutionsleistungen.

Im Folgenden konzentriert sich die Bewertung auf das Treibhausgaspotenzial, Feinstaub und die Stickstoffströme, da für die Bewertung der Umweltwirkungen der Nutzung von biogenen Abfällen und Reststoffen die Frage der Fläche wie auch des Wasserfußabdrucks zu vernachlässigen ist. Bezüglich der Mengenströme wird auf Daten aus BioRest (Fehrenbach et al. 2019a) zurückgegriffen.

Treibhauspotenzial

Abbildung 36 fasst das Treibhauspotenzial der energetischen Nutzung der sonstigen Abfall- und Reststoffe zusammen.

Der Massenstrom mit dem größten Potenzial – Stroh – wird aktuell nur im geringen Maße (energetisch) genutzt. Wo es nicht direkt in der Landwirtschaft bzw. Tierhaltung als Einstreu Verwendung findet, verbleibt es überwiegend auf dem Acker. Ausgehend von derzeit ca. 200.000 t energetischer Nutzung wird eine Einsparung durch vermiedene Erdgasfeuerung von 0,13 Mio. t CO₂Äq. geschätzt.

Die Ausschöpfung der Potenziale von 11,1 Mio. t nach BioRest bis 2045 bedeutet eine Erhöhung des Energienutzens um das 60fache.

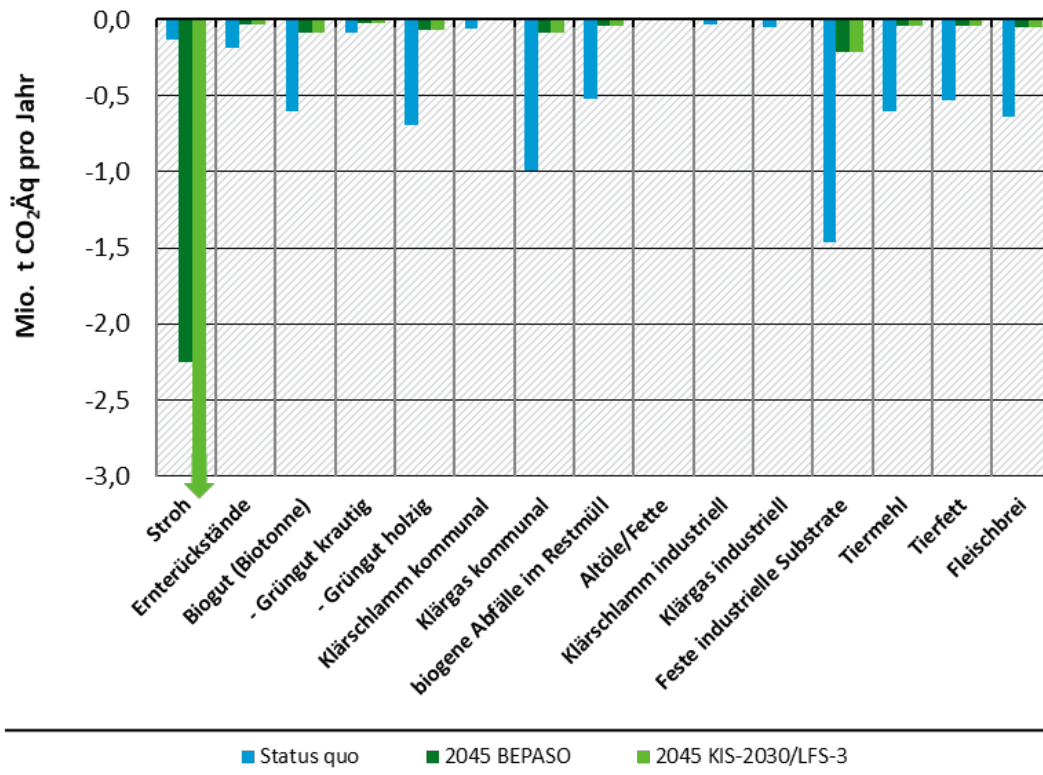
Für das Szenario BEPASO wird das Stroh unter Annahme eines 60 %igen Wirkungsgrads zu 95 PJ Bioethanol verarbeitet. Weiterhin unter der Annahme von 25 % Anrechnung einer Substitution von fossilem Kraftstoff, errechnet sich eine Einsparung von 2,2 Mio. t CO₂Äq.

Im Szenario KIS-2030/LFS-3 wird das Stroh via Bioethanol zu 4 Mio. t Bio-Naphtha umgewandelt. Daraus ergibt sich bei 55 % Anrechnung einer Substitution von fossilem Naphtha für die Bereitstellung des Kohlenstoff-Feedstocks auf Basis von Erdöl eine Einsparung von etwa 1,7 Mio. t CO₂Äq. emittiert. Außerdem ist dieser fossile Kohlenstoff am Lebenswegende des Produkts als fossile CO₂-Emission zu werten mit weiteren 7,0 Mio. t CO₂Äq. Insgesamt ergibt sich daraus eine Einsparung von 8,7 Mio. t CO₂Äq., die, wie Abbildung 36 zeigt, um mehr als das Zehnfache höher liegt als die gesamte energetische Nutzung aller anderen Abfall- und Reststoffe im Szenario KIS-2030/LFS-3. Bei diesen Zahlen sei nochmal betont, dass die hier im Rahmen der

²⁴ Je nach Szenario-Wahl: „Mit-Maßnahmen“ (MMS) für die höheren und „Mit-Weiteren-Maßnahmen“ (MWMS) für die niedrigeren Werte.

Bilanz zu Grunde gelegten Annahmen entscheidend sind. Mit den Ergebnissen wird jedoch die Bandbreite der Möglichkeiten deutlich.

Abbildung 36 Treibhauspotenzial (Einsparung) durch die Nutzung von sonstigen Abfällen und Reststoffen zu Energiezwecken im Status quo sowie Szenario 2045



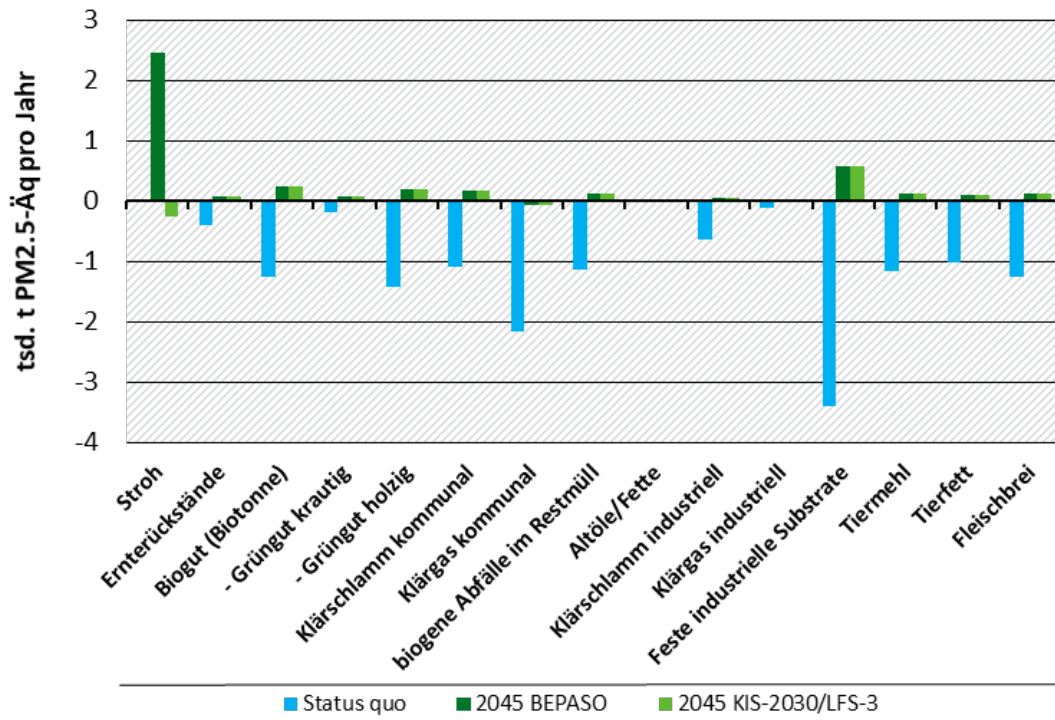
Berechnungen und Darstellung ifeu.

Feinstaubbelastung – PM_{2.5}

Durch die energetische Nutzung von biogenen Reststoffen (außer Holz und Gülle/Mist) wird aktuell eine Feinstaubbelastung von insgesamt 5.700 t PM_{2.5}-Äq. im Jahr verursacht. Dem steht eine Emissionseinsparung von 20.900 t PM_{2.5}-Äq. gegenüber. Im Jahr 2045 wird durch die überwiegend energetische Nutzung der Reststoffe keine Netto-Einsparung mehr erzielt. Im Szenario BEPASO wird der Erzeugung und Nutzung von biogenen Kraftstoffen für Verbrennungsmotoren zwar noch wie beim Klimawandel ein 25 %iger Ersatz für mit fossilen Kraftstoffen betriebenen Fahrzeugen gutgeschrieben. Damit verbleiben aber netto etwa 2.500 t PM_{2.5}-Äq. nur die Strohnutzung. Addiert man die Emissionen aus den anderen Reststoffnutzungen, summiert sich dies auf 4.280 t PM_{2.5}-Äq.

Im Szenario KIS-2030/LFS-3 ist das Ergebnis etwas günstiger aber dennoch mit Netto-Emission. Entscheidend dabei: Die Verarbeitung von Stroh zu Bio-Naphtha weist eine leicht geringere Emission auf als der konventionelle Weg. Zwar ist eine in das Jahr 2045 projizierte Abschätzung der Emissionen durch die biochemische Konversion von Stroh und der von Naphtha-basierten Grundchemikalien mit sehr hohen Unsicherheiten verbunden. Es kann jedoch als gesichert gesehen werden, dass die erdölbasierte Vorkette auch bei optimierten Raffinerie- und Cracking-Prozesse netto mehr an Feinstaub und Sekundärbildnern freisetzt als der deutlich kürzere biobasierte Pfad. Im weiteren Lebenswegverlauf sind beide Produkte in der Emission gleich zu bewerten. Bei einer Nettoeinsparung bei Stroh im Bereich von etwa 200 t PM_{2.5}-Äq. resultiert eine Netto-Gesamtemission von 1.560 t PM_{2.5}-Äq.

Abbildung 37 Feinstaubbelastung (netto) durch die Nutzung von sonstigen Abfällen und Reststoffen zu Energiezwecken im Status quo sowie Szenario 2045



Berechnungen und Darstellung ifeu.

Stickstoff – Ein- und Austräge

Wie bei der Holzbiomasse ist auch bei den sonstigen Abfall- und Reststoffen nur die Freisetzung von Stickstoffverbindungen durch die Verbrennung von Relevanz. Die Abgasstoffe NO_x und Ammoniak sind wie bei den Emissionen zu PM_{2.5} auch hier ausschlaggebend. Für den Status quo sind stehen hier 4.800 t N einer Einsparung von 18.000 t N gegenüber. Die Nettoeinsparung liegt bei 13.000 t N. Im Szenario 2045 steigt die Emission durch die Ausweitung der Potenzialnutzung bei vollständiger energetischer Nutzung. Dagegen sinkt die Einsparung durch den Wegfall der fossilen Substitute, sodass eine Netto-Emission von 2.600 t N verbleibt.

Im Vergleich zu den N-Strömen in der Landwirtschaft sind diese Mengen nahezu vernachlässigbar.

2.3.2.4 Gesamtschau

Im Folgenden werden die Ergebnisse für die landwirtschaftliche Biomasse, die Holzbiomasse und die biogenen Abfall- und Reststoffe zusammengeführt. Dabei werden jeweils die auf Konsum bezogenen Werte dargestellt, d. h. Importe sind einbezogen, Nettoexporte dagegen von der inländischen Produktion abgezogen.

Flächenbelegung und Naturfernepotenzial

Abbildung 38 zeigt auf der linken Seite die Belegung von Fläche durch die Produktion von landwirtschaftlicher und die forstliche Biomasse. Während die Fläche beim Forst vom Status quo hin zu den Szenarien 2045 gleichbleibt, verändert sich die Flächenbelegung bei der **Landwirtschaft** v.a. durch verschiedene gegenläufige Faktoren. Der größte Faktor ist die Verringerung des Konsums von tierischen Nahrungsmitteln, deren Flächenbedarf allein 11 Mio. ha der Summe von 21 Mio. ha im Status quo. Die deutliche Senkung des Fleischkonsums, wie im Szenario BEPASO mit 61 % Reduktion, schlägt sich auch sichtbar in der Summe nieder. Gleichzeitig wird von einem hohen Anteil an Substitution von Fleisch durch Laborerzeugnisse ausgegangen. Die Flächenreduktion bei BEPASO wird außerdem durch die Annahme von deutlichen Ertragszuwächsen verstärkt.

In den Szenarien KIS-2030 und LFS-3 werden 30 % Fleischkonsums durch pflanzliche Proteinpflanzen ausgeglichen, für die ebenfalls Fläche benötigt wird. Gegenläufig sind dagegen, dass mit der Annahme von 30 % Ökolandbau der Ertragszuwachs (auch bei BEPASO) gedämpft wird. Außerdem verlagert sich der Futtermittelanbau von ertragsstarkem Silagemais auf andere Futtermittel sowie Grünland, das nahezu vollständig erhalten bleibt, jedoch extensiviert wird. Abgezogen ist dabei schon die Fläche

- Für die Wiedervernässung von Acker- und Grünland auf organischen Böden (durch Paludikultur kann diese flächenbezogene Abnahme verringert werden, wobei die Flächenenerträge hier vergleichsweise gering ausfallen)
- zur Nutzung für Windkraft- und Solarenergieanlage, sowie für die weitere Ausdehnung der Siedlungsfläche.

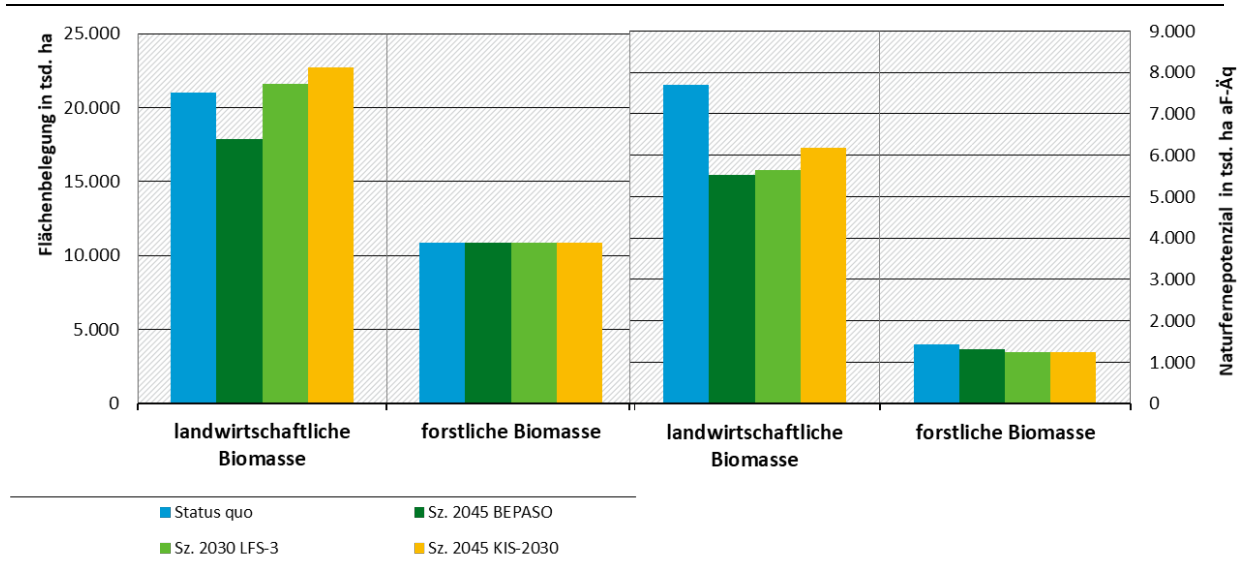
Von den 21 Mio. ha Belegung fallen im Status quo 7,3 Mio. ha im Ausland an. Große Anteile beruhen dabei auf Genussmittel wie Kakao und Kaffee, sowie Südfrüchte. Deren Konsum wird in den Szenarien für 2045 nicht verändert. Auch Rohstoffe für Biokraftstoffe und Futtermittel haben relevanten Anteil an den Importflächen. Im Gegenzug wird bei Getreide und Kartoffeln eine Anbaufläche von etwa 1,1 Mio. ha netto exportiert.

Im Szenario BEPASO entfallen die Flächen für Energiepflanzen (auch deren Importe), während weiterhin Getreide für den Export erzeugt wird. In den beiden anderen Szenarien steigt unter der Voraussetzung der „Flächensuffizienz“ (für Grundnahrungsmittel), sowie der Erhöhung des Ökolandbauanteils der für die Ernährung notwendige Anteil sogar insgesamt an, weswegen sich unter Beachtung der oben angeführten Flächenabnahme die verbleibende Fläche für Nicht-Nahrungspflanzen deutlich verringert. Ein vollständiger Verzicht auf Energiepflanzenanbau würde jedoch auch in beiden Szenarien zu einer insgesamt leichten Abnahme der landwirtschaftlichen Flächenbelegung führen.

Bezieht man die Frage der ökologischen Wertigkeit der Nutzflächen mit ein, verschiebt sich das Bild. Als Indikatorgröße wird hierfür das **Naturfernepotenzial** verwendet, welches zur Bewertung von Flächenrucksäcken (Fehrenbach et al. 2021c) entwickelt wurde. Der Indikator bezieht sich dabei auf die Intensität des menschlichen Eingriffs (Hemerobie). In Abbildung 38 sind die Ergebnisse hierfür auf der rechten Seite dargestellt. Zunächst wird dabei deutlich: Die

Relation zwischen den reinen Flächenwerten für Landwirtschafts- und Forstflächen wird weiter, da Waldökosysteme in ihrer Bandbreite unter einer eher geringeren Eingriffsintensität gegenüber agrarischen Ökosystemen stehen. Deutlich ist vor allem aber die Reduktion der Eingriffsintensität über die Szenarien für die landwirtschaftliche Biomasseproduktion und -nutzung.

Abbildung 38 Flächenbelegung (links) und Naturfernepotenzial (rechts) durch die Erzeugung und Nutzung von Biomasse (Gesamtschau) im Status quo sowie Szenario 2045



Berechnungen und Darstellung ifeu.

Treibhausgasbilanz

Abbildung 39 gibt die Netto-Ergebnisse für die Emission an Treibhausgasen inklusive von Senkenwirkungen wieder. Netto bedeutet hier: Emissionen

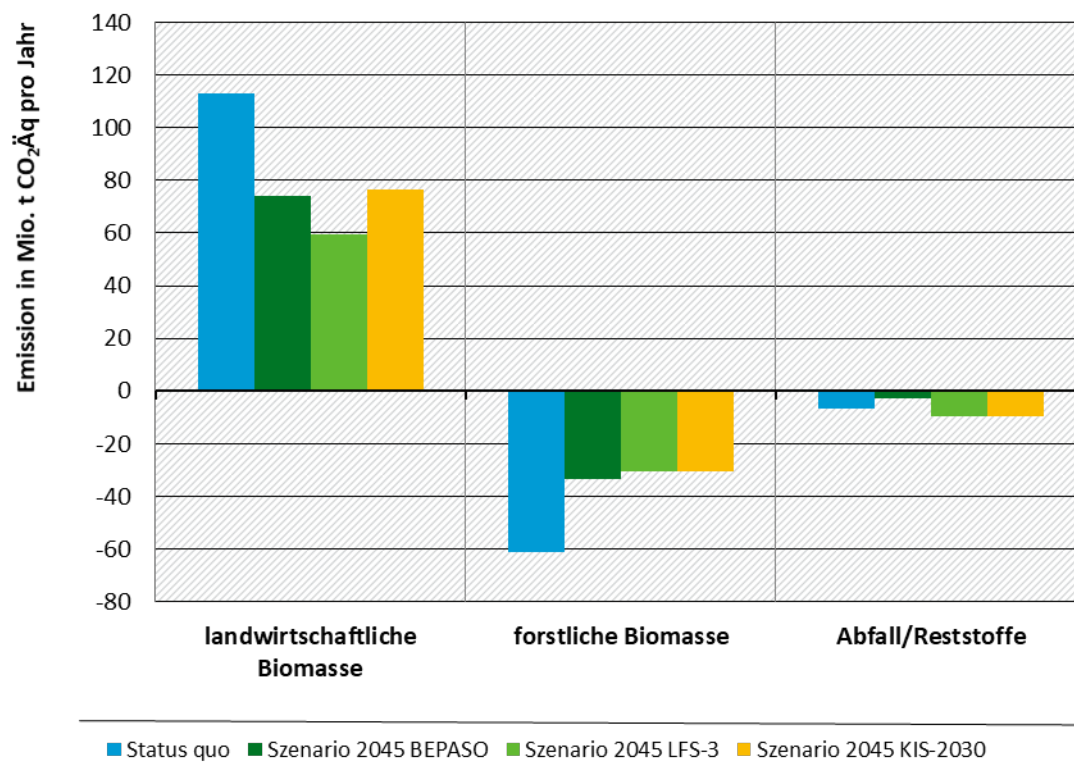
- ▶ durch Netto-Exporte sind abgezogen,
- ▶ durch substituierte Produktionsprozesse (energetische, stoffliche Nutzung) sind gutgeschrieben,
- ▶ sind gegen Senken aufgerechnet, das beinhaltet auch entgangene Senken durch Produktionsprozesse für die Substitutionen angerechnet werden und temporäre Produktspeicher.

Im Ergebnis sind hier anders als bei der Fläche erhebliche Veränderungen zu erkennen, allem voran im Bereich der **landwirtschaftlichen Produktion**. Hier wird eine Reduktion der aktuellen Gesamtemission von 113 Mio. t CO₂Äq. auf Werte zwischen ca. 60 Mio. t CO₂Äq. im Szenario LFS-3 und 77 Mio. t CO₂Äq. im Szenario KIS-2030 abgeschätzt. Demgegenüber zeichnen sich die Nettoergebnisse bei Holz-Biomasse und Abfall- und Reststoffen durch negative Werte aus: Für Holz werden im Status quo sogar -61 Mio. t CO₂Äq. erzielt, vergleichsweise gering fallen dagegen die Werte für den Abfall- und Reststoffbereich aus mit bis zu bis minus 9,3 Mio. t CO₂Äq. im Szenario LFS-3.

Abbildung 40 schlüsselt die Ergebnisse nochmals auf nach Nutzungsweisen. Daraus wird ersichtlich, wo und durch welche Annahmen die größten Effekte zustande kommen. Diese lassen sich wie folgt zusammenfassen:

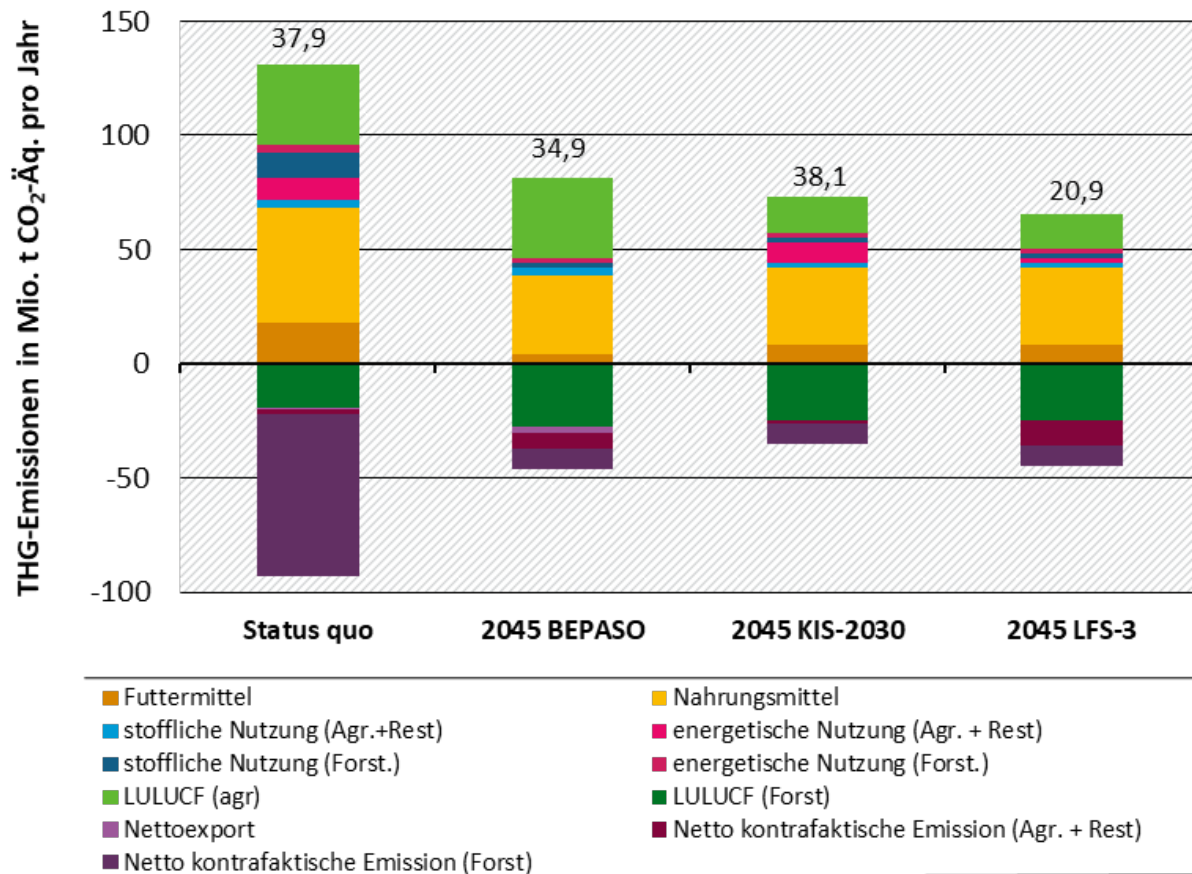
- ▶ Was die Reduktion im Gesamtbild besonders prägt, ist die Relevanz des Sektors LULUCF, sowohl im agrarischen wie im forstlichen Bereich: durch Wiedervernässung derzeit entwässerter organischer Böden: mit der Annahme einer Wiedervernässungsrate von 85 % werden allein 18,8 Mio. t CO₂Äq. erzielt. Im BEPASO-Szenario wurde dies nicht berücksichtigt, da die Wiedervernässung dort keine explizit enthaltende Maßnahme darstellt.
Zum forstlichen Bereich zählen die ca. 6 Mio. t CO₂Äq. an zusätzlicher jährlicher Senkenleistung in den 2045er Szenarien sowie der Speicher in den langlebigen holzbasierten Produkten (siehe auch weiter unten).
- ▶ Der andere, noch deutlicher im Ergebnis sich niederschlagende Komplex sind die tierischen Nahrungsmittel. Alle drei Szenarien weisen eine deutliche Reduktion des Fleischkonsums auf und vermeiden durch reduzierte Tierhaltung in erheblichem Maße THG-Emissionen, v.a. Methan aus der Wiederkäuerhaltung sowie dem Gülle-Management; Emissionen aus Letzterem werden zusätzlich durch die Annahme einer flächendeckenden Vergärung und Biogasproduktion reduziert. Insgesamt verringert sich die Emission in diesem Komplex um 12,7 Mio. t CO₂Äq.; von dieser Bruttoeinsparung sind jedoch noch 5 Mio. t CO₂Äq. für exportiertes Fleisch abzuziehen.
- ▶ Allein durch die Reduktion der Futtermittelproduktion werden 9 Mio. t CO₂Äq. eingespart. Diese wird jedoch z.T. durch zusätzliche Erzeugung von Proteinpflanzen aufgewogen, jedoch bei weitem nicht in der Höhe der Vermeidung durch die verzichtete Tierhaltung; insgesamt verringert sich der Ernährungskomplex von 68,5 auf 42,4 Mio. t CO₂Äq.
- ▶ Energetisch genutzte Biomasse wird in allen Szenarien reduziert, bei BEPASO sogar auf Null. Dies zahlt sich angesichts der stark zurückgehenden Gutschriften auch aus, denn anders als noch in der Status-quo-Bilanz werden in 2045 kaum mehr fossile Emissionen substituiert. Dagegen schlagen dann der entgangene Nutzen (C-Senke) als Emissionen zu Buche. Sehr deutlich zeigt sich der Rückgang bei den kontrafaktischen Emissionen der **Forstwirtschaft** und der Nutzung von **Holzbiomasse**. Während sich hier im Status quo noch Gutschriften von 71 Mio. t CO₂Äq. (zu 71 % durch Substitution durch stoffliche Nutzung im Bereich Baustoffe, Möbel, Papier) errechnen, gehen die Nettobilanzen in 2045 zurück auf 9,2 Mio. t CO₂Äq. Dazu trägt die Energieholznutzung gerade mal 1,1 Mio. t CO₂Äq. bei, während bei der Verbrennung allein 2,2 Mio. t CO₂Äq. durch Methan und Lachgas freigesetzt werden. Das bedeutet, die Holzenergienutzung weist in 2045 auch ohne Berücksichtigung von C-Senke und biogenem CO₂ keine Nettoeinsparung an THG-Emissionen mehr auf. Ein großer Anteil der Holzenergie stammt dabei aus dem Einsatz von Sägenebenprodukten und Altholz. Im Szenario 2045 wird die stoffliche Nutzung von Holz konstant gehalten bzw. bei BEPASO sogar erhöht, auf die energetische Nutzung von Waldholz verzichtet. Die damit verbundene Nettosenke liegt bei 6 Mio. t CO₂Äq. und ergibt zuzüglich des Speichereffekts durch stofflich genutzte Produkte von um die 20 Mio. t CO₂Äq. den in Abbildung 40 dunkelgrün punktierten Balkenteil.
- ▶ Die Bedeutung der stofflichen Nutzung von agrarischen Biomassen und Reststoffen wie Stroh zeigt im Gesamtbild im Szenario LFS-3 im dunkelblauen Gutschriften-Balken mit -11 Mio. t CO₂Äq. wovon -9,4 Mio. t CO₂Äq. auf die Gutschrift für stoffliche Nutzung von Stroh fallen. Die Zahlen zeigen umgekehrt die Problematik einer weiteren Nutzung von Agrarrohstoffen für Biokraftstoffe, wie sie teilweise in KIS-2030 abgebildet ist. Durch die geringe Gutschrift für Substitution und die CO₂-Opportunitätskosten egalisiert hier die Gutschrift für stoffliche Nutzung von Stroh und macht den entscheidenden Anteil am Ergebnisvorteil von LFS-3 gegenüber KIS-2030 aus.

Abbildung 39 Treibhauspotenzial (Netto) durch die Erzeugung und Nutzung von Biomasse (Gesamtschau) im Status quo sowie die Szenarien für 2045



Berechnungen und Darstellung ifeu.

Abbildung 40 Treibhauspotenzial (Netto) durch die Erzeugung und Nutzung von Biomasse (Gesamtschau aufgeschlüsselt nach den einzelnen Sektoren und Nutzungsweisen) im Status quo sowie die Szenarien für 2045



Berechnungen und Darstellung ifeu.

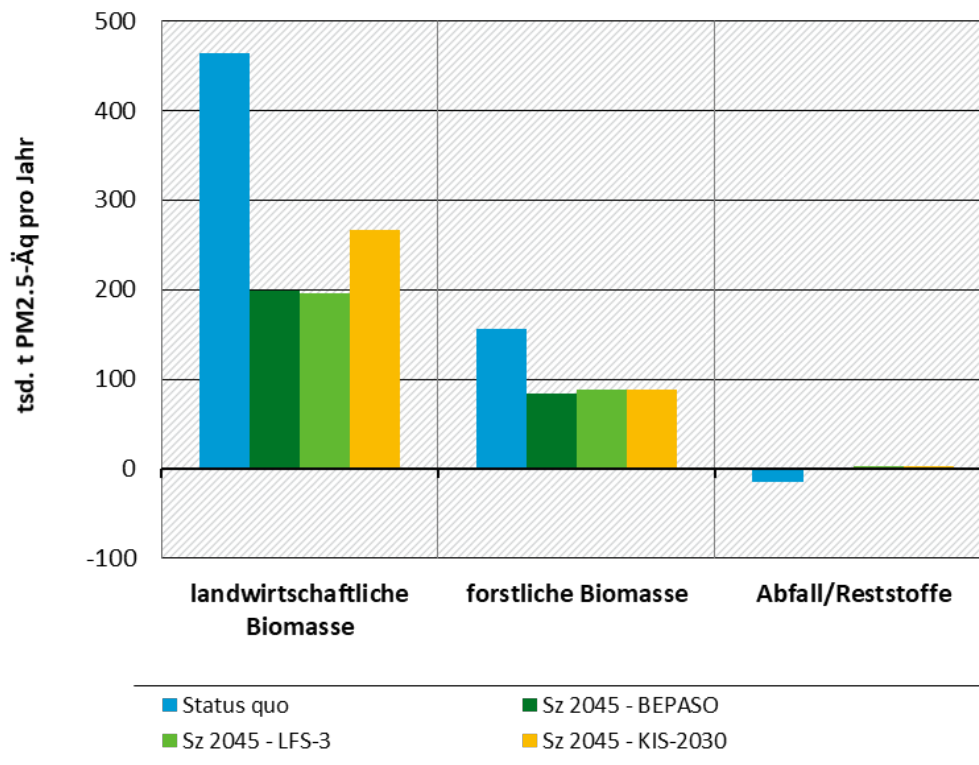
Feinstaubbelastung PM2.5

Diese Umweltwirkung tritt subsummiert die Emissionen nicht nur von primären Feinstaubpartikeln, sondern auch sekundäre Partikel, die sich durch Emission von Stickoxiden, Ammoniak oder organischen Verbindungen bilden. Somit spielen sowohl Emissionen aus der Landwirtschaft (Ammoniak) und als auch aus Verbrennungsemissionen (Stickoxide) eine entscheidende Rolle. Abbildung 41 zeigt, dass auch hier die landwirtschaftliche Produktion die Emission mit 460.000 t PM2.5-Äq. dominiert. Sie trägt damit 76 % zur Status-quo-Summe bei. Im Szenario 2045 wird durch entfallen der Anbaubiomasse für Biokraftstoffe in Szenario BEPASO und LFS-3 eine Verringerung auf etwas unter 200.000 t PM2.5-Äq. erzielt. In Szenario KIS-2030 werden daher noch 266.000 t PM2.5-Äq. emittiert. Die massive Verbesserung beruht auf den Reduktionen der Ammoniakemission durch Verringerung der Tierproduktion und der Annahme verbesserter technischer Maßnahmen.

Die Emission durch die Nutzung forstlicher Biomasse beruht auf Verbrennungsprozessen. Auch hier führt die Reduktion der Nutzung von Holzenergie und z.T. auch technische Maßnahmen zu mehr als einer Halbierung: von ca. 160.000 t auf 74.000 t PM2.5-Äq.

Die (überwiegend energetische) Nutzung von Abfall- und Reststoffen derzeit führt netto zu einer Einsparung von 15.000 t PM2.5-Äq. Trotz deutlicher Ausweitung der Nutzung derzeit noch ungenutzter Potentiale ist die Netto-Emission in 2045 nicht mehr negativ, sondern mit 3.000 t PM2.5-Äq. knapp über eine Netto-Null.

Abbildung 41 Feinstaubbelastung in PM2.5-Äq. (Netto) durch die Erzeugung und Nutzung von Biomasse (Gesamtschau) im Status quo sowie Szenario 2045



Stickstoff – Ein- und Austräge

Die Stickstoffeinträge durch den landwirtschaftlichen Bereich dominieren hier das Bild deutlich. Nach den Statistiken des BMEL wurde in 2020 insgesamt 3,31 Mio. t Stickstoff in die agrarische Fläche in Deutschland eingebracht, zu 85 % aus aufgebrauchten Düngemitteln, wovon die Hälfte auf Wirtschaftsdüngern inklusive Gärresten aus Biogasanlagen besteht.²⁵

Die Abfuhr (d.h. Entnahme durch Ernte inkl. Stroh, sofern es nicht auf der Fläche verbleibt) beträgt 2,32 Mio. t N. Damit verbleibt ein Überschuss von 0,99 Mio. t N, welcher z.T. zu einer Anreicherung im Boden führt, v.a. aber zu Emissionen in die Luft (Ammoniak, Lachgas) und Einträgen in Grund- und Oberflächenwasser. Bezogen auf die Agrarfläche wird damit im Jahr 2020 der Zielwert von 70 kg N/ha mit 59 kg N/ha klar unterschritten.

Demgegenüber sind die Einträge, die durch Emissionen der Holzverbrennung bzw. der Holzwirtschaft insgesamt auftreten, fast zu vernachlässigen. Sie belaufen sich in der Summe auf etwa 25.000 t. Dies liegt im Bereich unter 1 % des Eintrags durch die Landwirtschaft. Rechnet man die noch etwas niedrigeren Emissionen durch die Reststoffverbrennung hinzu, verändert diese Größenverhältnisse nicht.

Die Reduktion der Anbaumassen in allen drei **Szenarien für 2045** (v.a. bei den Futtermitteln) führen zu einer Reduktion des Stickstoffinputs um 18 %, unter der Annahme, dass die Düngeintensität der einzelnen Agrarprodukte gegenüber dem Status quo unverändert bleibt. Dies ist unter der Voraussetzung, dass im Jahr 2020 der Zielwert für den N-Überschuss bereits erfüllt ist, als plausibel, wenngleich konservative Annahme zu erachten. Dennoch bleibt die Verpflichtung, N-Verluste in der Landwirtschaft v.a. in Richtung Grundwasserbelastung weiter zu minimieren. Gleiches gilt für die Freisetzung von Ammoniak und Lachgas.

²⁵ <https://bmel-statistik.de/fileadmin/daten/MBT-0111160-0000.xlsx>

Die Reduktion der Tierhaltung (plus die Annahme fortschreitender Luftreinhaltungserfolge und damit reduzierter Depositionen) führen trotz insgesamt geringerer Gesamterträge zu einer leichten Erhöhung im Bedarf an Mineraldünger in 2045. Der Wirtschaftsdünger fällt dann ausschließlich als Gärrest an. Durch die Abnahme von Eintrag und Abfuhr reduziert sich auch der Überschuss um 24 %.

Wasserfußabdruck

Auch der Verbrauch von Wasser ist im Kontext der Biomasseproduktion und -nutzung eindeutig von der Landwirtschaft dominiert. Legt man den Wasserfußabdruck für „blaues Wasser“ zu Grunde, so ergeben sich für den deutschen Konsum agrarischer Produkte ein Volumen von 16.000 Mio. m³ für den Status quo. Dabei handelt es sich ausschließlich um Bewässerungswasser in den Ländern des Nahen und Mittleren Ostens sowie Südostasien, für Produkte, die Deutschland von dort bezieht. Geht man davon aus, dass diese Importe in Zukunft deutlich verringert werden, kann der Wasserfußabdruck verringert werden, auch wenn davon auszugehen ist, dass durch den Klimawandel die Bewässerung in ariden Regionen weiter steigen wird. Nach dem Modell im Pilotbericht werden in 2030 für den deutschen Konsum noch 11.500 Mio. m³ benötigt.

Demgegenüber ist z.B. der Wasserverbrauch der industriellen Verarbeitung von Biomasse – insbesondere in Zellstoff- und Papierindustrie mit ca. 280 Mio. m³ erheblich geringer.

2.3.3 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Ziel dieser Studie ist die Bewertung der Umweltwirkungen der Biomasseerzeugung und der Biomassenutzung in Deutschland. Die Aufgabenstellung ist komplex und umfangreich und kann nicht den Anspruch erheben, in allen Fragen und Problemstellungen vollständige und abschließende Antworten zu liefern. Dennoch wurde versucht, den Rahmen so weit wie möglich zu spannen und die als relevant erachteten Aspekte zu adressieren. Der Rahmen umfasst dabei zunächst alle in Deutschland produzierten Biomassen im Agrarbereich, im Forstbereich sowie biogene Abfälle und Reststoffe. Zusätzlich werden die nach Deutschland importierten biogenen Agrar- und Forstgüter einbezogen und die netto exportierten Erzeugnisse aus den Wirkungsbilanzen abgezogen. Die Ergebnisse stellen daher Bewertungen für den in Deutschland erfolgenden Konsum von Biomasse dar. Nicht berücksichtigt ist die Fischerei und auch nicht die Verarbeitung zu Endprodukten wie z.B. verkaufsfertige Nahrungsmittel oder gebrauchsfertige Holzmöbel oder Gebäude.

Bilanziert wurde der Status quo auf Daten, die den Zeitraum von 2020-2022 repräsentieren sowie der Ausblick auf 2045 anhand von drei Szenarien: BEPASO Bioökonomiewende, KIS-2030 und LFS-3. Da hinter diesen Szenarien jeweils eigenständige, teilweise sehr komplexe Modelle stehen, ist in der vorliegenden Studie auch eine eins-zu-eins-Entsprechung nicht erreichbar. Es bedurfte für das Bewertungsmodell hier daher auch Interpretationen und Einschätzungen durch die Autor*innen.

Auch der Rahmen der betrachteten Umweltwirkungen ist eingegrenzt. Im Vordergrund steht die Flächenfrage mit Bezug auch auf die Naturwert und Biodiversität, der Klimawandel, Emissionen von Feinstaub, die Frage von Stickstoffüberschüssen und die Wasserbilanz.

Die wesentlichen Schlussfolgerungen aus der Studie fassen sich wie folgt zusammen:

- Die **Reduktion von Tierhaltung und des Konsums tierischer Produkte** ist ein ganz zentraler Faktor zur Reduktion negativer Umweltwirkungen, was sich in allen betrachteten Wirkungskategorien niederschlägt.

- Zwar wird auch bei Umstellung auf mehr pflanzliche Ernährung ein hoher Flächenbedarf bestehen, doch wird dadurch eine Diversifizierung der Feldfrüchte und Anbausysteme gefördert; insgesamt wird daher trotz ähnlich hohem Flächenbedarf eine naturnähere und biodiversitätsfördernde Landnutzung erreicht.
 - Bei Klimawandel entfallen durch diesen Schritt THG-Emissionen in massivem Umfang. Gleiches gilt für die Emissionen von Feinstaub (Ammoniak als Hauptfaktor der Partikelbildung) und für Stickstoffüberschüsse.
- Die **stoffliche Nutzung von Biomasse bietet zahlreiche Möglichkeiten** zur Reduktion der Umweltwirkungen. Sie kann aber nur im Rahmen der Umnutzung bestehender Biomassennutzungen erfolgen, da zusätzlich nutzbare Biomasse nicht zur Verfügung steht (mit Ausnahme vielleicht der Strohpotenziale oder Biomassen aus neuen Renaturierungsflächen). Insbesondere die THG-Bilanzen zeigen, dass die Substitution von heute genutzten, nicht biogenen Werkstoffen erhebliche Umweltentlastung ermöglicht. Dabei ist aber zu beachten, dass diese Entlastungen in Zukunftsbilanzen verringern, da die Substitute wie Zement und Stahl auch in Zukunft mit geringeren Emissionen produziert werden (müssen).

Die stoffliche Nutzung in langlebigen Produkten hat dagegen nicht nur bilanztechnische, sondern auch inhärente Vorteile: mit dem Speichern von biogenem Kohlenstoff sind hier Senken möglich, in Grenzen zwar, die aber gegenüber anderen Nutzungen (wie der energetischen) deutlich zum Vorteil führen.

- Die **energetische Nutzung von Biomasse** profitiert mit dem gleichen bilanztechnischen Ansatz von der derzeitigen Substitutionsmöglichkeit gegenüber fossilen Brenn- und Kraftstoffen. Auf der Zeitachse bis 2045 wird dieser Bilanzeffekt immer geringer. Dabei bleibt der zentrale Nachteil dieser Option, dass die Biomasse vollständig und sofort als CO₂ in die Atmosphäre abgegeben wird. Gemäß der verbreiteten Auffassung, dass dieses CO₂ durch neuerliches Wachstum von Biomasse wieder eingebunden wird, ist entgegen zu halten, dass das Biomassewachstum auch ohne deren Ernte und Verbrennung wächst. Dies schlägt sich in den Bilanzen für Agrarbiomasse (CO₂-Opportunitätskosten) und Waldholz in den entgangenen C-Senken nieder.

Auch bei den Rest- und Abfallstoffen ist die energetische Nutzung gegenüber der stofflichen im Nachteil – wenn die Produkte langlebig sind, bzw. langdauernde Kaskadennutzung möglich ist. Dies unterliegt jedoch ebenfalls Grenzen. Am Ende wird ein Stoff jedoch einer thermischen Behandlung und damit einer Energienutzung zuzuführen sein. Die dann entstehenden CO₂-Emissionen sind entweder unvermeidlich oder ggf. durch Carbon Capture Technik zu verringern.

Die Möglichkeiten von BECCS oder BECCU wurden in dieser Studie nicht untersucht. Sie können grundsätzlich einen Beitrag zur Emissionsverringerung leisten, doch bleiben die Einsatzmöglichkeiten auch hier begrenzt. Sie werden daher nicht als systementscheidender Ansatz zur Ausweitung der energetischen Biomassennutzung eingeschätzt.

- Die oben bereits angeführte **Senkenleistung** in Agrar- und Forstsystemen hat dagegen relevanten Einfluss auf die Ergebnisse. Auch diese weisen natürlich Grenzen auf, die jedoch noch weit entfernt liegen. In zwei Szenarien wurde die Umsetzung der LULUCF-Ziele des Klimaschutzgesetzes vorangestellt. Ein großer Anteil davon kann durch konsequente Wiedervernässung von derzeit bewirtschafteten Moorböden erreicht werden. Der Klimabonus ist beträchtlich und erkennbar in dem Unterschied zum dritten Szenario, in

welchem diese Maßnahme nicht eingerechnet wurde. Ein weiterer großer Anteil wird jedoch auch aus der Forstwirtschaft kommen müssen. Große Flächenumwandlungen (sprich Aufforstungen von Agrarflächen sind nicht im größeren Stil zu erwarten).

In allen Szenarien wurde eine deutliche Reduktion der Energienutzung von Waldholz eingerechnet, was quasi direkt zur Erhöhung der Senkenleistung beiträgt. Auch dieser Beitrag ist eine relevante Größe bei der Verringerung von Umweltlasten, v. a. beim Klimawandel, durch die Zukunftsszenarien.

Zusammenfassend: Landwirtschaftsflächen und Wirtschaftswald machen über 80 % der Fläche Deutschlands aus. Anders gesagt, die Flächennutzung besteht im Wesentlichen aus der Bewirtschaftung von Biomasse. Fläche lässt sich nicht vermehren, der Steigerung der Produktion stehen Grenzen entgegen, da sie durch Intensivierung einerseits negativ auf den Naturhaushalt wirkt und andererseits durch Entwicklungen des Klimawandels überhaupt in Frage steht. Veränderungen in der Flächenbewirtschaftung sind folglich die entscheidenden Optionen, die überhaupt zur Verfügung stehen.

Hierbei lassen sich zwei grundlegende Handlungsoptionen erkennen, die maßgeblichen Einfluss auf die Umweltwirkung der Biomasseproduktion und Nutzung haben:

► Welche Biomasse wird produziert und zu welchem Konsumzweck?

Hier zeigen sich folgende klare Richtungen:

- Reduktion von Tierhaltung und Fleischkonsum und dafür Verlagerung der Futtermittelproduktion zugunsten pflanzlicher Nahrungsmittel.
- Stoffliche Nutzung wo möglich und sich Potenziale bieten der energetischen Nutzung vorziehen.

► Wie erfolgt die Bewirtschaftung?

- Reduktion der Intensität der Biomasseproduktion, d.h.
- Extensivierung im Agrarbereich und
- reduzierte Holzentnahme im Forstbereich.

3 Maßnahmenvorschläge für die Umsetzung einer nachhaltigen Bioökonomie

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse des Arbeitspakets 2 (Maßnahmenvorschläge für die Umsetzung einer nachhaltigen Bioökonomie unter besonderer Berücksichtigung von umwelt- und naturschutzrelevanten Aspekten) zusammengefasst.

3.1 Hintergrund

Mit der Nationalen Bioökonomiestrategie (NBÖ (BMBF 2020)) hat die Bundesregierung Leitlinien und Ziele ihrer Bioökonomie-Politik beschrieben. Der Bioökonomierat (BÖR) hat die Aufgabe, Vorschläge und Empfehlungen für einen Umsetzungsplan zu formulieren. Dieser soll potenzielle Konflikte thematisieren sowie Empfehlungen für konkrete politische Maßnahmen enthalten und dabei aktuelle Entwicklungen berücksichtigen. Zudem sieht die Strategie die Etablierung eines Bioökonomie-Monitorings vor, das Maßnahmen der Bundesregierung auf den unterschiedlichen Feldern der Bioökonomie (BÖ) auf ihre **Wirksamkeit** kontrolliert. Dieses soll die Entwicklung einer nachhaltigen Bioökonomie nachvollziehbar machen und als Grundlage für die politische Steuerung und Priorisierung dienen.

Die Nationale Bioökonomiestrategie formuliert **Handlungsfelder** zur Verbesserung der Rahmenbedingungen für eine nachhaltige Bioökonomie. Diese umfassen die „Minderung des Flächendrucks, die Sicherstellung der nachhaltigen Erzeugung und Bereitstellung biogener Rohstoffe, den Aufbau und die Weiterentwicklung bioökonomischer Wertschöpfungsketten und -netze, Instrumente zur Markteinführung und Etablierung biobasierter Produkte, Verfahren und Dienstleistungen, die Sicherstellung politischer Kohärenz, die Nutzung des Bioökonomie-Potenzials für die Entwicklung ländlicher Räume sowie die Nutzung der Digitalisierung für die Bioökonomie“ (BMBF 2020, S.4).

Dieses Kapitel evaluiert verschiedene Maßnahmenvorschläge für die Umsetzung einer nachhaltigen Bioökonomie unter besonderer **Berücksichtigung von umwelt- und naturschutzrelevanten Aspekten**. Es werden dabei Maßnahmen zur Gestaltung der notwendigen Rahmenbedingungen aber auch ordnungspolitische Maßnahmen berücksichtigt. Die Analyse baut auf Maßnahmen aus den Empfehlungen des BÖR auf, die bis Ende 2023 vorgelegt wurden.

3.2 Quellen und methodisches Vorgehen

3.2.1 Quellen für die Identifizierung von Maßnahmen

In einer Stellungnahme vom September 2022 schlug der Bioökonomierat eine Reihe von **Maßnahmen wie eine Entschärfung der durch den russischen Angriffskrieg auf die Ukraine ausgelösten Ernährungs- und Energiekrise** mit Hilfe der Bioökonomie gelingen kann (Bioökonomierat 2022b). Die Vorschläge setzen sich aus kurz- bis mittel- und langfristigen Maßnahmen zusammen, die darauf abzielen, die Ernährungskrise abzumildern und die Energie- und Rohstoffwende voranzutreiben. Die Empfehlungen zielen kurzfristig vor allem darauf ab, die Versorgung mit Lebens- und Futtermitteln zu unterstützen und die Energieversorgung zu stabilisieren, da aufgrund des Angriffskriegs auf die Ukraine Exporte entsprechender Rohstoffe und Güter aus dieser stark eingeschränkt sind. Empfehlungen die mittel- und langfristig ausgerichtet sind, zielen auf die Erhöhung der Resilienz der landwirtschaftlichen Produktion und die Abhängigkeit von Energie- und Rohstoffimporten zu reduzieren.

Im Mai 2023 veröffentlichte der Bioökonomierat eine Liste von **Handlungsempfehlungen zur Umsetzung der Nationalen Bioökonomiestrategie** (Bioökonomierat 2023a). Der BÖR identifiziert darin für verschiedene Handlungsfelder 57 Empfehlungen und konkrete Maßnahmen, die die Bundesregierung bei der Umsetzung der NBÖ unterstützen sollen. Dazu gehören unter anderem die nachhaltige Land- und Flächennutzung, Maßnahmen und Innovationen zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen, die Rohstoffwende hin zu erneuerbaren Rohstoffen und einer Kaskadenwirtschaft und die Schaffung verlässlicher Rahmenbedingungen für nachhaltige Innovationen im Bereich der Bioökonomie (Bioökonomierat 2023a).

Im August und Oktober 2023, sowie Anfang 2024 veröffentlichte der BÖR weitere Handlungsempfehlungen in Hintergrundpapieren zu spezifischen Themen. Die Empfehlungen und Maßnahmen in diesen sind insgesamt kurzgehalten und haben Stichpunktcharakter:

- ▶ Hintergrundpapier **Biogas- und Bioraffinerie-Technologien – Agrarperspektive**. Das Papier identifiziert Handlungsempfehlungen für die Bundesregierung bezüglich der Themen Forschung und Entwicklung, rechtliche Rahmenbedingungen, Ausbildung, Aufbau regionaler Netzwerke und Strukturen (Bioökonomierat 2022c)
- ▶ Hintergrundpapier **Agri-Photovoltaik (Agri-PV)**. Das Papier identifiziert Handlungsempfehlungen für die Bundesregierung bezüglich der Themen rechtliche Rahmenbedingungen, Forschungsbedarf, Synergien, spezifische DIN-Fragen, Kommunikation und zur internationalen Perspektive (Bioökonomierat 2022d).
- ▶ Hintergrundpapier **Agroforst- und mehrjährige Kulturpflanzensysteme**. Das Papier identifiziert Handlungsempfehlungen für die Bundesregierung bezüglich der Themen gesetzliche Rahmenbedingungen, Förder- und Steuerpolitik, Forschungspolitik, Forschungsbedarf, Umsetzung in die Praxis, Ausbildung und Information (Bioökonomierat 2022e).
- ▶ Hintergrundpapier **Industrielle Bioraffinerien**. Das Papier identifiziert Handlungsempfehlungen für die Bundesregierung bezüglich der Themen Kommunikation, Forschungsplattformen, Förderpolitik und rechtlicher Rahmen (Bioökonomierat 2022f).
- ▶ Hintergrundpapier **Rahmensetzung zur Ressourcenschonung**. Das Papier stellt beispielhaft Vorschläge auf der Grundlage der Studie „Modell Deutschland Circular Economy“ (MDCE) zusammen, die einen Bezug zur Bioökonomie und den dafür benötigten Ressourcen haben (Bioökonomierat 2023b).

Aus der Liste dieser Handlungsempfehlungen wurden zusätzliche Maßnahmen für eine Bewertung identifiziert. Zudem dienten diese Papiere als Hintergrundinformation bei der Bewertung von Maßnahmen.

3.2.2 Methodisches Vorgehen

Nicht alle Vorschläge, die im Rahmen der Erarbeitung des Umsetzungsplans präsentiert wurden, können tatsächlich als konkrete Maßnahmen gelten. Dies hängt zum einen von der Ebene ab, auf der Maßnahmen formuliert wurden. Die Analyse unterscheidet hier Handlungsansätze, Maßnahmen und Politikinstrument. Zudem hängt es von der konkreten Ausgestaltung des Vorschlags ab, d.h. inwieweit dieser konkrete **Ziele und Annahmen** formuliert und **Adressaten** besitzt. Auch ist relevant, inwieweit **Daten** zur Verfügung stehen, um die potenzielle Wirkung der Maßnahme ermitteln zu können. Auf der Basis dieser Informationen kann eine Auswahl von Maßnahmen getroffen werden, für die eine **Bewertbarkeit** gegeben ist.

Der Begriff der „Maßnahme“ grenzt sich von den Begriffen „Handlungsansatz“ und „Instrument“ wie folgt ab:

- ▶ Unter „**Handlungsansätzen**“ verstehen wir allgemeine Prinzipien darüber, wie politische Ziele (hier: einer nachhaltigen Bioökonomie) umgesetzt werden können. Beispiele sind „Stärkung eines nachhaltigen Land- und Flächenmanagements“, „Internalisierung externer Kosten“ oder „Ökologisierung des Handelsrechts“.
- ▶ Mit „**Maßnahmen**“ meinen wir konkrete Aktivitäten bzw. Veränderungen im Handeln von Adressaten (hier: Landnutzer*innen), Beispiele sind die Anlage von Kurzumtriebsplantagen, die Umstellung auf Ökolandbau bzw. FSC-zertifizierte Forstwirtschaft oder die Reduktion von Tierbeständen.
- ▶ „**(Politik-)Instrumente**“ sind Mechanismen, die seitens des Staates erlassen werden, damit → Handlungsansätze oder → Maßnahmen umgesetzt werden. Sie können ordnungs- oder planungsrechtlicher Natur sein, anreiz- oder informationsbasiert aber auch prozedural. Beispiele sind gesetzliche Nachhaltigkeitsanforderungen (z.B. zur Kaskadennutzung), Förderprogramme, Beratungsangebote, staatlich moderierte Runde Tische etc.

Übergänge zwischen Handlungsansätzen, Maßnahmen und Instrumenten können teils fließend sein, was eine Abgrenzung erschwert. Die Einordnung dient allerdings dazu, die Bewertbarkeit der Vorschläge einschätzen zu können. Generell sind Handlungsansätze schwieriger zu bewerten, da sie oft allgemeiner und ohne ein konkretes quantitatives Ziel formuliert werden. Maßnahmen und Instrumente dagegen sind oft konkreter formuliert und deshalb potenziell leichter einer Bewertung zu unterziehen. In allen Fällen erfordert eine Bewertung aber die Formulierung von **Annahmen**, die für Begleitumstände der Umsetzung getroffen werden, um Wirkungen der Maßnahmen abzuschätzen.

Um Maßnahmen miteinander vergleichen zu können, wurden diese einem einheitlichen Schema unterworfen. Dadurch ergeben sich steckbriefartige Beschreibungen der Maßnahmen mit vergleichbaren Merkmalen. Die **Bewertung** der Vorschläge wurde anhand folgender Kriterien vorgenommen:

- ▶ Auswirkungen auf das Biomassepotenzial (quantitativ, als Potenzial in Masse oder Energie pro Flächeneinheit) und die Biomassequalität
- ▶ Die zeitliche Entwicklung des Biomassepotenzials bzw. der Maßnahme (kurzfristig (1-5 Jahre), mittelfristig (6-15 Jahre), langfristig (>10 Jahre))
- ▶ Die zu erwartenden Kosten für Staat, Produzent*innen und Verbraucher*innen (gering, mittel, hoch)
- ▶ Auswirkungen auf die Flächenbelegung und Risiken der Flächenkonkurrenz und dadurch die Gefahr indirekter Landnutzungseffekte (gering, mittel, hoch)
- ▶ Die Gefahr von Verdrängungseffekten durch Verlagerung der Produktion ins Ausland (gering, mittel, hoch)
- ▶ Andere ökonomische Wirkungen, z.B. Synergien oder Konflikte mit Zielen der ländlichen Entwicklungspolitik (neutral, positiv, negativ)
- ▶ Synergien oder Konflikte mit anderen Umweltzielen, inklusive Ressourcenschutz, Klimaschutz, Wasserschutz und Biodiversitätsschutz (neutral, positiv, negativ).

Mit berücksichtigt wurden die vorrangig betroffenen Bevölkerungsgruppen, Besitzstrukturen und andere sozioökonomische Aspekte. Auch wurden wichtige Voraussetzungen für die Realisierung von Maßnahmen, der mögliche Politikrahmen für die Umsetzung, sowie mögliche Politikmaßnahmen für die Begleitung der Umsetzung einbezogen.

Weitere Maßnahmenvorschläge wurden auf Basis einer **Fehlstellenanalyse** der ersten Ansätze des Umsetzungsplans zur Bioökonomiestrategie erarbeitet, die auf die in der Strategie identifizierten Handlungsfelder konkret Bezug nimmt.

3.3 Bewertung von vorgeschlagenen Maßnahmen

3.3.1 Einordnung der Bewertbarkeit

Einige der vorgeschlagenen **Maßnahmen zur Entschärfung der durch den russischen Angriffskrieg auf die Ukraine ausgelösten Ernährungs- und Energiekrise mit Hilfe der Bioökonomie** (Bioökonomierat 2022b) haben eher den Charakter von Handlungsansätzen. Für eine Bewertung der Vorschläge müssen diese ausreichend konkret sein. Dies gilt u.a. für die Bewertung des Flächenpotenzials und Risiken der Flächenkonkurrenz, Biomassepotenziale und -qualität; aber auch Implikationen für Zielkonflikte.

Generell fehlen den Empfehlungen konkrete Zielwerte, um sie einer Bewertung des potenziellen Beitrags zur Umsetzung einer nachhaltigen Bioökonomie unterziehen zu können. Tabelle 27 im Anhang liefert eine allgemeine Einordnung der Bewertbarkeit der vom Bioökonomierat vorgeschlagenen Maßnahmen auf Basis der Stellungnahme des Bioökonomierat. Insgesamt wurden fünf der 20 vorgeschlagenen Maßnahmen bewertet:

- ▶ Den Fokus auf Ernährungssicherung legen, Agrarprodukte nicht mehr für die Erzeugung von Energie einsetzen,
- ▶ Tierbestände zeitlich befristet reduzieren und Futtermittel umlenken,
- ▶ Den Fleischkonsum durch steuerliche Anreize und Investitionen in neue Verfahren senken,
- ▶ Möglichkeiten der nationalen Umsetzung der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) besser nutzen, um die landwirtschaftliche Produktivität nachhaltig zu erhöhen,
- ▶ Den Energieverbrauch im Verkehr anpassen.

Auch der überwiegende Teil der vorgeschlagenen Optionen des BÖR zur **Umsetzung der Nationalen Bioökonomiestrategie** (Bioökonomierat 2023a) hat den Charakter von Handlungsansätzen. Für eine Bewertung der Vorschläge müssen diese ausreichend konkret sein. Generell fehlen den Empfehlungen aber konkrete Beschreibungen der möglichen Umsetzung, eine Eingrenzung der Zielgruppen und der Umfang möglicher Maßnahmen (z.B. benötigte Fördermittel). Tabelle 27 im Anhang A liefert eine allgemeine Einordnung der Bewertbarkeit der vom BÖR vorgeschlagenen Maßnahmen auf Basis der Veröffentlichung vom Mai 2023. Insgesamt wurden sieben der 57 vorgeschlagenen Maßnahmen, Instrumente und Handlungsansätze als potenziell bewertbar eingestuft:

- ▶ Empfehlung #22 schlägt vor, regionale Leuchtturm- und Modellprojekte sowie Demonstrationsvorhaben als geschützte Innovationszonen zur schnelleren Umsetzung von Agroforst- und mehrjährigen Kulturpflanzensystemen in die Praxis zu etablieren. Ggf. wäre hier die Bewertung einzelner Projekte möglich, wenn entsprechende Daten vorliegen.

- ▶ Empfehlung #28 zielt darauf ab, bei Einsatz von Agri-PV flächeneffiziente Lösungen verbindlich zu bevorzugen. Dieser Handlungsansatz kann nur teilweise anhand bestehender Regelungen zum flächeneffizienten Einsatz von Agri-PV bewertet werden (z.B.: 85 % des Ertrags muss erhalten werden)
- ▶ Empfehlung #33 zielt auf die Förderung des Konsums nachhaltiger pflanzlicher Proteine und alternativer Proteinquellen durch Instrumente der Prozesspolitik wie durch die Anpassung des Mehrwertsteuer-Satzes oder die Einbindung in den Emissionszertifikatehandel. Ein solches Instrument und dessen Wirkung ließe sich ggf. mit Ökonomiemodellen bewerten.
- ▶ Empfehlung #38 stellt fest, dass die Rohstoffbasis von Biogasanlagen nachhaltig transformiert werden muss und weniger abhängig von einjährigen und in Monokultur angebauten Energiepflanzen, wie Energiemais sein sollte. Diese Handlungsansatz kann nur allgemein hinsichtlich der möglichen Auswirkungen auf den Methanertrag von Biogasanlagen bewertet werden.
- ▶ In der Empfehlung #51 wird vorgeschlagen, dass die Verwendung von Holz in langfristig nutzbaren und klimateffizienten Konstruktionen gezielt gefördert werden soll. Ein solches Instrument könnte hinsichtlich seiner Wirkung auf den Wald und die THG-Bilanz der Holznutzung bewertet werden.
- ▶ Empfehlung #53 zielt darauf ab bei der Verwertung biogener Rohstoffe der thermischen Verwertung gegenüber der stofflichen Nutzung keinen Vorrang zu geben, z.B. durch eine Angleichung der Mehrwertsteuersätze aller Verwertungswege, um eine Begünstigung thermischer Verwertung zu beenden. Hier wäre eine Bewertung möglich, wenn Informationen zur konkreten Ausgestaltung und zu Instrumenten vorliegen.
- ▶ Empfehlung #55 hat zum Ziel eine Anpassung von Anreizstrukturen und Förderinstrumenten vorzunehmen, um langlebige Produkte, Wiederverwendung und Nutzungskaskaden zu fördern. Eine Bewertung wäre hier möglich, wenn Informationen zur konkreten Ausgestaltung und zu Instrumenten vorliegen.

Weitere Maßnahmen abgeleitet aus den Handlungsempfehlungen in Hintergrundpapieren sind:

- ▶ Einführung von Flächenausweisungsrechten, die nach landwirtschaftlicher Ertragskraft differenziert sowie handelbar sind. Diese müssen über einen definierten Zeitraum durch staatlichen Herauskauf vermindert werden, um das gesteckte Ziel von 30 Hektar pro Tag bis 2030 zu erreichen.
- ▶ Maßnahmen zur Verringerung von Lebensmittelverschwendung und Nachernteverlusten, beispielsweise durch Anpassung von Qualitätsparametern und Haltbarkeitsangaben oder durch Ernährungsbildung sowie Formulierung verbindlicher Ziele zur Vermeidung von Lebensmittelverschwendung.

Eine Voraussetzung zur Bewertung der Vorschläge ist allerdings das Vorhandensein von zusätzlichen Informationen zu den Maßnahmen und Handlungsansätzen. Diese müssen entweder durch die Handlungsempfehlungen in der Publikation des BÖR dargestellt werden oder durch die Bewertenden durch Annahmen festgelegt werden.

3.3.2 Annahmen der Bewertung

Die Maßnahmen des Bioökonomierats vom September 2022 und der Handlungsempfehlungen basieren zum Teil auf bereits quantifizierten potenziellen Maßnahmen (Beispiel Tempolimit).

Allerdings reichen die Informationen in den Dokumenten in den meisten Fällen nicht aus, um eine Bewertung vorzunehmen (siehe Anhang A Tabelle 27 und Tabelle 28). In manchen Fällen können Annahmen aus der Literatur getroffen werden, in der die beschriebenen Maßnahmen bereits quantifiziert und bewertet wurden. Für die Bewertung der BÖR-Vorschläge wurde so auf Bewertungen von Maßnahmen in den folgenden Studien zurückgegriffen:

- ▶ (Scheffler, Wiegmann 2022): Gesundes Essen fürs Klima. Auswirkungen der Planetary Health Diet auf den Landwirtschaftssektor: Produktion, Klimaschutz, Agrarflächen.
- ▶ (Wiegmann et al. 2022): Klimaschutz in der GAP 2023 – 2027.
- ▶ (Repenning et al. 2019): Folgenabschätzung zu den ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Folgewirkungen der Sektorziele für 2030 des Klimaschutzplans 2050 der Bundesregierung.
- ▶ (Osterburg et al. 2019): Folgenabschätzung für Maßnahmenoptionen im Bereich Landwirtschaft und landwirtschaftliche Landnutzung, Forstwirtschaft und Holznutzung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050.

3.3.3 Ergebnis der Bewertung

Tabelle 7 stellt die Ergebnisse der Bewertung von 12 bewertbaren Maßnahmen der verschiedenen Stellungnahmen des BÖR vor. Eine detaillierte Übersicht liefert Tabelle 29 im Anhang.

Wenig konkret lassen sich Biomassepotenzial und -qualität der Maßnahmenvorschläge bewerten. Hierzu fehlen in der Beschreibung der Empfehlungen meist die notwendigen Detailinformationen. Meist kann nur eine Aussage darüber getroffen werden, welche Art von Biomasse die Vorschläge betreffen und über eine mögliche Verringerung oder Erhöhung des Potentials spekuliert werden.

Die zeitliche Entwicklung des Biomassepotenzials bzw. der Maßnahme ist kurzfristig, wenn es sich um Maßnahmen der Informationsbereitstellung oder Regelungen handelt. Maßnahmen, die auf technische Entwicklungen zielen sind dagegen eher als mittelfristig eingestuft.

Die Bewertung von Kosten der Vorschläge kann ebenfalls nur sehr grob erfolgen. Kosten können sowohl für den Staat, als auch Produzent*innen und Verbraucher*innen entstehen und unterschiedlich von den Akteur*innen bewertet werden. Zudem können Kosten direkt und indirekt auftreten und hängen von den Rahmenbedingungen ab. Die Einschätzung ist deshalb mit hohen Unsicherheiten belastet.

Flächenbelegung und Risiken der Flächenkonkurrenz durch die vorgeschlagenen Maßnahmen werden durchgehend bis auf Maßnahme 9 (siehe Anhang A, Tabelle 7, Umstellung von Biomasseanlagen) als gering eingeschätzt. Insgesamt dürften die Maßnahmen so zu einer Verringerung der Konkurrenz um Flächen für die Bioökonomie führen. Allerdings gilt auch hier, dass die konkreten Effekte stark von der Ausgestaltung und dem Umfang abhängen. Mittlere Gefahr von Verdrängungseffekten der Produktion wird dagegen relativ vielen Maßnahmen zugeschrieben. Vor allem wenn diese die Produktionsmenge beeinflussen können, ist das Risiko gegeben, dass diese sich in andere Länder verlagert. Hier sind flankierende Maßnahmen notwendig, die z.B. gleichzeitig den Konsum adressieren oder Effizienz erhöhend wirken.

Andere ökonomische Wirkungen können sich sehr unterschiedlich gestalten. Während der flächeneffizientere Einsatz von Agri-PV (Maßnahme 7, siehe Tabelle 7) eher positive Effekte erzielt, sind Maßnahmen, die die Tierbestände zeitlich befristet reduzieren und Futtermittel

umlenken sollen (2) oder den Fleischkonsum durch steuerliche Anreize und Investitionen in neue Verfahren senken (3), mit negativen ökonomischen Wirkungen verbunden. Auch hier ist die Wirkung abhängig von dem Vorhandensein von Ausgleichsleistungen und alternativen Einkommensquellen, die durch flankierende Politiken verfügbar werden.

Mit dem Blick auf Synergien und Konflikte mit anderen Umweltzielen fällt auf, dass nahezu alle Maßnahmen zum Klimaschutz beitragen. Eine Ausnahme ist die Maßnahme zum Fokus auf Ernährungssicherung (1), die voraussichtlich eine neutrale Wirkung hat, da die Emissionen durch Anbauformen gleichbleiben. Am geringsten scheinen Synergien für Biodiversitätsschutz (4 von 12 Maßnahmen) und Wasserschutz (5 von 12 Maßnahmen) zu bestehen. Zum Ressourcenschutz tragen dagegen 7 von 12 Maßnahmen bei.

Generell fehlen den meisten der Empfehlungen konkrete Zielwerte, um sie einer Bewertung des potenziellen Beitrags zur Umsetzung einer nachhaltigen Bioökonomie unterziehen zu können. Konkrete Maßnahmenvorschläge des BÖR zur Umsetzung der Nationalen Bioökonomiestrategie beinhalten die Maßnahmen zur Reaktion auf die Energie- und Ernährungskrise, ausgelöst durch den Angriffskrieg Russlands gegen die Ukraine.

Im Folgenden wird auf Basis einer Fehlstellenanalyse eine Auswahl von möglichen weiteren konkreten Maßnahmen und Handlungsansätzen diskutiert, die mit Blick auf die Handlungsfelder als zielführend erachtet werden können.

Tabelle 7: Ergebnisse der Bewertung von bewertbaren Maßnahmen der Stellungnahmen des Bioökonomierats (BÖR)

Nr	Titel Maßnahme	Biomassepotenzial	Biomassequalität	Zeitliche Entwicklung des Potenzials bzw. Der Maßnahme	Kosten	Flächenbelegung und Risiken der Flächen-konkurrenz	Gefahr von Verdrängungseffekten der Produktion	Andere ökonomische Wirkungen, z.B. Synergien/Konflikte mit Zielen der ländlichen Entwicklungspolitik	Synergien und Konflikte mit anderen Umweltzielen			
									Ressourcenschutz	Klimaschutz	Wasserschutz	Biodiversitätsschutz
1	Den Fokus auf Ernährungssicherung legen, Agrarprodukte nicht mehr für die Erzeugung von Energie einsetzen	Entspricht der für Energiezwecke angebauten Biomasse: 2019 ca. 800 Tha, davon 2/3 Raps, 1/3 sonstige Getreide; 1 Mio. ha Mais für Biogas; insgesamt 1,8 Mio. ha (FNR 2020)	hoch	kurzfristig	mittel	gering	mittel	neutral	neutral	neutral	neutral	neutral
2	Tierbestände zeitlich befristet reduzieren und Futtermittel umlenken	Nicht quantifizierbar da unklar wie Wirkung auf Biomassepotenziale sein wird.	hoch	kurzfristig	mittel	gering	mittel	negativ	neutral	positiv	positiv	neutral
3	Den Fleischkonsum durch steuerliche Anreize und Investitionen in neue Verfahren senken	Nicht quantifizierbar da unklar wie Wirkung auf Biomassepotenziale sein wird.	unbekannt	mittelfristig	mittel	gering	mittel	negativ	positiv	positiv	positiv	positiv
4	Möglichkeiten der nationalen Umsetzung der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) besser nutzen, um die landwirtschaftliche Produktivität nachhaltig zu erhöhen	Nicht quantifizierbar da unklar wie Wirkung auf Biomassepotenziale sein wird.	unbekannt	mittelfristig	gering	gering	mittel	neutral	positiv	positiv	positiv	positiv
5	Den Energieverbrauch im Verkehr anpassen	Verringerter jährlicher Verbrauch von 800 Mio. L Kraftstoff	hoch	kurzfristig	mittel	gering	mittel	neutral	neutral	positiv	neutral	neutral
6	Regionale Leuchtturm- und Modellprojekte sowie Demonstrationsvorhaben als geschützte Innovationszonen zur schnelleren Umsetzung von Agroforst- und mehrjährigen Kulturpflanzensystemen in die Praxis etablieren	Nicht quantifizierbar da unklar wie Wirkung auf Biomassepotenziale sein wird.	hoch	mittelfristig	unbekannt	unbekannt	unbekannt	unbekannt	unbekannt	unbekannt	unbekannt	unbekannt

7	Bei Einsatz von Agri-PV flächeneffiziente Lösungen verbindlich bevorzugen	Nicht quantifizierbar da unklar wie Wirkung auf Biomassepotenziale sein wird.	unbekannt	mittelfristig	unbekannt	gering	gering	positiv	neutral	positiv	neutral	neutral
8	Förderung des Konsums nachhaltiger pflanzlicher Proteine und alternativer Proteinquellen durch Instrumente der Prozesspolitik wie durch die Anpassung des Mehrwertsteuer-Satzes oder die Einbindung in den Emissionszertifikatehandel	Potenzial steigt, da weniger Fläche für Futtermittel (weniger Fläche pro kcal) benötigt wird.	unbekannt	kurzfristig	mittel	gering	gering	positiv	positiv	positiv	positiv	positiv
9	Rohstoffbasis von Biogasanlagen muss nachhaltig transformiert werden und weniger abhängig von einjährigen und in Monokultur angebauten Energiepflanzen, wie Energiemais werden	Potenzial verringert sich durch weniger hohe Erträge alternativer Substrate.	unbekannt	mittelfristig	mittel	mittel	mittel	neutral	positiv	positiv	positiv	positiv
10	Die Verwendung von Holz in langfristig nutzbaren und klimaeffizienten Konstruktionen gezielt fördern.	Potenzial für Altholz sinkt durch längere Nutzung von Produkten.	unbekannt	mittelfristig	gering	gering	gering	positiv	positiv	positiv	neutral	neutral
11	Priorisierung in der Holznutzung: stofflich vor energetisch	Verschiebung des Potenzials von energetisch zu stofflich, Herausforderung verschiedener Qualitäten.	unbekannt	kurzfristig	mittel	gering	mittel	neutral	positiv	positiv	neutral	neutral
12	Anpassung von Anreizstrukturen und Förderinstrumenten um langlebige Produkte, Wiederverwendung und Nutzungskaskaden zu fördern	Potenzial für Altholz sinkt ggf. durch längere Nutzung von Produkten.	unbekannt	mittelfristig	gering	gering	gering	positiv	positiv	positiv	neutral	neutral

	keine Angabe/unbekannt
	Risiken/Kosten/Konflikte gering, kurzfristig, positive Wirkungen
	Risiken/Kosten/Konflikte mittel, mittelfristig, neutrale Wirkungen
	Risiken/Kosten/Konflikte hoch, langfristig, negative Wirkungen

Quelle: eigene Darstellung.

3.4 Fehlstellenanalyse

Die in der Nationalen Bioökonomiestrategie formulierten Handlungsfelder zur Verbesserung der Rahmenbedingungen für eine nachhaltige Bioökonomie sollen im Folgenden als Basis für eine Fehlstellenanalyse dienen. Diese hat zum Ziel, weitere Maßnahmen für die Umsetzung der Bioökonomiestrategie aus den Handlungsfeldern abzuleiten, die bisher nicht formuliert wurden. Die Analyse zielt vor allem auf Handlungsfelder, die einen Bezug zu umwelt- und naturschutzrelevanten Fragen haben, wie die Minimierung von Flächenkonkurrenzen, die nachhaltige Erzeugung und Bereitstellung von Agrar- und Waldbiomasse, Wechselwirkung mit Zielen zur Stärkung der natürlichen Senken, sowie die Minimierung der negativen Wechselwirkungen zum Biodiversitätsschutz.

3.4.1 Minimierung der Konkurrenz um Fläche und Biomasse

Die Landfläche ist eine wichtige Ressource, die für viele Nutzungen aus verschiedenen Sektoren in Anspruch genommen wird. Dies reicht von der land- und forstwirtschaftlichen Nutzung über Rohstoffabbau, Naturschutzmaßnahmen bis hin zur Entwicklung von Siedlungsflächen. Ausgelöst wird die Landnutzung durch die Nachfrage nach biogenen Rohstoffen wie Lebensmittel, Futter, Holz etc., nach nicht biogenen Rohstoffen wie Sand- und Kies, Braunkohle, etc. und nach Infrastruktur für menschliche Aktivitäten wie Mobilität, Wohnen, industrielle Produktion, Freizeit, etc. In letzter Konsequenz konkurrieren alle diese Landnutzungen miteinander. So können Flächenkonkurrenzen auf unterschiedlichen Ebenen betrachtet werden:

- ▶ Flächenkonkurrenzen innerhalb der Bioökonomie (Kapitel 3.4.1.1) bezieht sich auf die Konkurrenz um land- und forstwirtschaftliche Flächen. Beispielsweise kann auf einer Ackerfläche entweder eine Feldfrucht, für die ein Nutzung oder eine andere Feldfrucht für eine andere Nutzung angebaut werden. Auch können Effizienzsteigerungen beim Anbau bzw. in der Nutzung der Biomasse den Flächenbedarf und damit den Konkurrenzdruck verringern.
- ▶ Flächenkonkurrenzen zwischen der Bioökonomie und anderen Sektoren (Kapitel 3.4.1.2). Das typischste Beispiel ist die Ausweitung von Siedlungs- und Verkehrsfläche auf land- und forstwirtschaftliche Flächen.
- ▶ Flächenkonkurrenzen innerhalb oder zwischen anderen Sektoren. Diese Konkurrenz wie z.B. die Konkurrenz zwischen Wohnen, Industrie und Erholung um eine mögliche Baugebietsfläche stehen i.d.R. nicht im Zusammenhang mit der Bioökonomie. Sie werden in dieser Studie nicht betrachtet.

Als ein weiterer Punkt kann es innerhalb der Bioökonomie zu Konkurrenz um biogene Rohstoffe kommen. Bei Anbaubiomasse fällt diese Konkurrenz unter die oben genannte Flächenkonkurrenz innerhalb der Bioökonomie. Für biogene Reststoffe und Abfälle greift die direkte Konkurrenz auf Ebene der Biomasse selbst, da kein Bezug mehr zu einer Anbaufläche besteht. Da diese Konkurrenz aber auch mit Anbaubiomasse verbunden sein kann (z.B. Biogas aus Wirtschaftsdünger versus Biogas aus Silage-Mais), kann ein indirekter Bezug zur Anbaufläche bestehen.

3.4.1.1 Flächenkonkurrenzen innerhalb der Bioökonomie

Um Flächennutzungskonkurrenzen zu entschärfen, können verschiedene Ansätze verfolgt werden. Hierzu gehören Maßnahmen, die der Steigerung der Ressourceneffizienz dienen. Beispielsweise können mithilfe von Infrastrukturen und Prozessschritten die Trennung und

Rückgewinnung von Sekundärstoffen befördert oder durch die Anwendung von Verfahren für die Koppel- und Kaskadennutzung der Rohstoffeinsatz allgemein gemindert werden. Darüber hinaus kann insbesondere der Einsatz biogener Ressourcen, die mit keinem oder nur geringem Flächenbedarf verbunden sind (zum Beispiel Abfall- und Reststoffnutzung) maßgeblich zur Minderung der Flächennutzungskonkurrenz führen. Einen weiteren Ansatz stellt die Rekultivierung degradierter, ungenutzter oder nicht effizient genutzter Flächen dar. Beispiele für konkrete (politisch zu instrumentierende) Maßnahmen sind:

- ▶ Maßnahmen zur Bewirtschaftung degradierter Flächen, z.B. Bergbaufolgeflächen oder Grenzertragsstandorten in der Landwirtschaft. Brachflächen oder extensiv genutzte Flächen haben allerdings besondere Bedeutung für Umweltleistungen und Artenvielfalt, weshalb nachhaltige Potenziale begrenzt sein können. Eine nachhaltige Bewirtschaftung kann aber auch mit positiven Effekten, wie Vermeidung von Erosion und der Erhöhung der Biodiversität, einhergehen.
- ▶ Maßnahmen zur Steuerung der Biomassenachfrage. Ganz direkt lassen sich Flächenkonkurrenzen entschärfen durch eine Verringerung der Nachfrage nach Biomasse. Dies kann durch Effizienzsteigerungen entlang der Bearbeitungskette oder Konsistenz- und Suffizienzmaßnahmen erreicht werden. Letztere stellen Maßnahmen dar, die die Biomasseerzeugung naturverträglicher gestalten (Konsistenz) bzw. die Nachfrage nach nicht-nachhaltigen Gütern senken (Suffizienz) und insofern generell dazu geeignet sind, Umwelt- und Naturschutzaspekte der Biomassenutzung zu adressieren. Dazu zählen u.a. Maßnahmen ohne oder mit geringerem Landnutzungsbezug, wie z.B. die Erzeugung von Algenbiomasse (Konsistenz) oder Maßnahmen zur Minderung von Überkonsum, beispielsweise in Bezug auf biobasierte und fossile Kunststoffprodukte oder tierische Produkte.

Auch zu berücksichtigen sind Rückkopplungseffekte zwischen unterschiedlichen politischen Zielsetzungen. Eine Ökologisierung der Landwirtschaft ist beispielsweise nötig, um Ziele der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie und der Nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt zu erreichen. Eine resultierende Verringerung der Dünge- und Pestizidgabe führt zu geringeren Erträgen bzw. einem höheren Flächenbedarf und damit zu einer steigenden Flächenkonkurrenz. Die Suffizienz-Maßnahme einer verringerten Nachfrage nach der Anbaubiomasse kann der steigenden Flächenkonkurrenz durch den ökologischen Landbau entgegenwirken oder auch sie im konventionellen Landbau verringern (vgl. Kapitel 3.4.2).

3.4.1.2 Flächenkonkurrenzen zwischen der Bioökonomie und anderen Sektoren

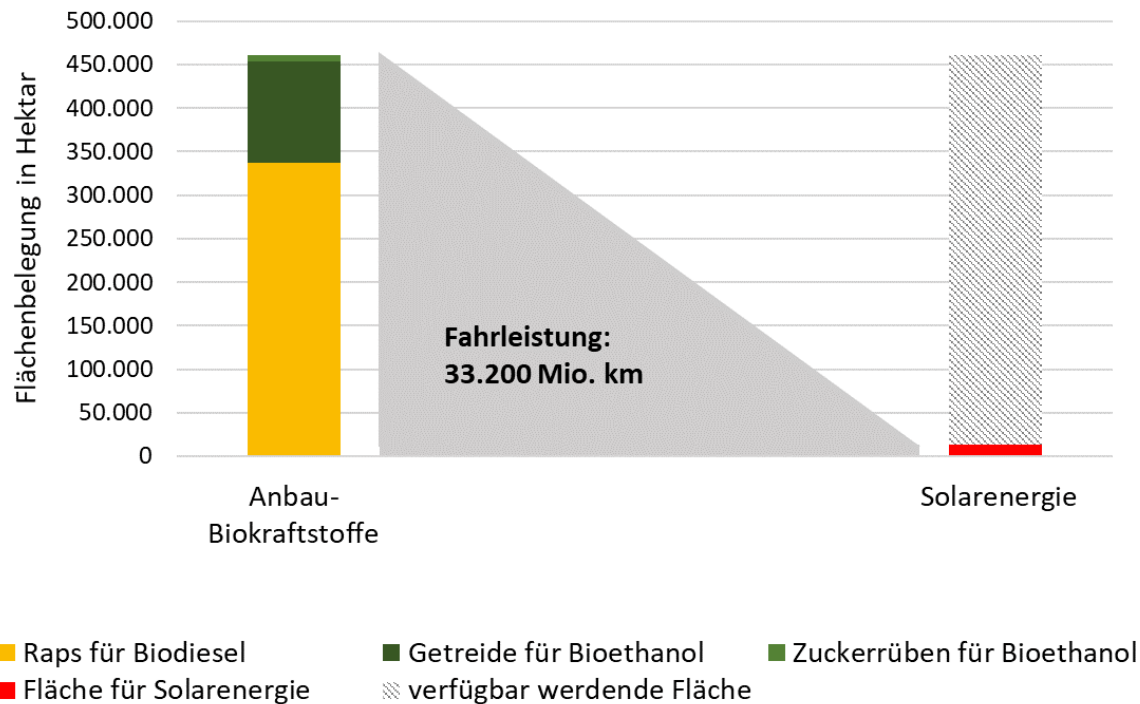
Eine starke Anbindung zur Landnutzung bzw. zum Flächenbedarf findet sich besonders in den Bereichen Siedlungs- und Infrastrukturentwicklung (Sektor Siedlung), Solarenergie im Energie-Sektor und natürliche Senken im LULUCF-Sektor. Anhand dieser drei Sektorbeispiele werden im Folgenden Flächenkonkurrenzen zur Land- und Forstwirtschaft als Teil der Bioökonomie aufgezeigt.

- ▶ Sektor Siedlung. In Deutschland wurden im Jahr 2018 für die Entwicklung von Siedlungs- und Verkehrsfläche 56 ha/Tag (ca. 20.400 ha/Jahr) verbraucht. Dieser Wert soll bis zum Jahr 2030 auf unter 30 ha/Tag sinken, bis zum Jahr 2050 auf Netto-Null (Bundesregierung 2021). Der Flächenverbrauch geht zu großen Anteilen zu Lasten von Ackerflächen (50 %) und Grünland (40 %) und zu kleineren Anteilen zu Lasten von Wald (9 %) und Feuchtgebieten und sonstigen Flächen (1 %) (UBA 2023a). So verringern die Aktivitäten im Sektor Siedlung kontinuierlich die land- und forstwirtschaftliche Fläche, auf der Biomasse als Rohstoff für die Bioökonomie produziert wird. Hinzu kommen naturschutzfachlich notwendig

Ausgleichsmaßnahmen, die einen zusätzlichen Flächenbedarf darstellen können, der wiederum vor allem in Konkurrenz zur Ackernutzung steht.

- ▶ LULUCF-Sektor: Mit dem Bundes-Klimaschutzgesetz werden im LULUCF-Sektor Senkenziele angestrebt (z.B. -25 Mio. t CO₂ im Jahr 2030). Eine Reihe von Maßnahmen, die die Senkenleistung der Landfläche in Deutschland erhöhen, sind bereits im „Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz“ (ANK) adressiert. Wirkmächtige Maßnahmen sind die Wiedervernässung von trocken genutzten landwirtschaftlichen Moorfolgeböden, die Anlage von Agroforstsystemen, Hecken und Kurzumtriebsplantagen, die Aufforstung von landwirtschaftlichen Flächen sowie die Extensivierung der Laubbaumnutzung im Wald. Diese Maßnahmen schränken die Biomasseproduktion auf den betroffenen Flächen deutlich ein. Eine quantitative Einschränkung kann durch eine Reduktion der Biomasseproduktion eintreten (z.B. weniger Holzernte im Wald, Nutzungsaufgabe bei Vernässung von Moorböden). Eine qualitative Einschränkung kann durch eine Veränderung der Art der produzierten Biomasse entstehen. Beispiele sind die Produktion von holziger Biomasse aus Agroforstsystemen oder von Paludikulturen (Schilf, Torfmoos, etc.) auf wiedervernässten Flächen statt von z.B. annuellen Ackerkulturen.
In Bezug auf angestrebte Treibhausgasminderungen können Maßnahmen im natürlichen Klimaschutz eine höhere Flächeneffizienz zeigen. Beispielsweise ist die THG-Bilanz von Waldenergieholz schlechter als die von fossilen Brennstoffen, wenn die Veränderung der Waldsenke in die Bilanz einfließt (Fehrenbach et al. 2022). Mit der Wiedervernässung von Moorböden kann eine THG-Minderung von über 30 t CO₂-Äq. je ha und Jahr erreicht werden (Tiemeyer et al. 2020), mit der Produktion und Nutzung von Biogas aus Silomais im Vergleich zu fossilen Energieträgern aber nur eine THG-Minderung von 8,0 t CO₂-Äq je ha und Jahr (Hennenberg, Böttcher 2023). Ein Vergleich der CO₂-Senkenleistung durch Renaturierung von Anbauflächen mit der THG-Minderung, die durch Biokraftstoff erreicht werden kann, zeigt, dass die THG-Minderung durch die Renaturierung um den Faktor 1,8 höher ist als der Biokraftstoffpfad (Fehrenbach, Bürck 2022).
- ▶ Die Produktion von Solarenergie hat im Vergleich zur Biomasseproduktion eine sehr hohe Flächeneffizienz (siehe Abbildung 42). Beispielsweise wird für die gleiche Fahrleistung mit einem Elektroauto und Solarenergie nur 3 % der Fläche benötigt, die mit einem Verbrennungsmotor und Biokraftstoff nötig ist (Fehrenbach, Bürck 2022). Vergleichbare Analysen kommen ebenfalls zu deutlich höheren Flächeneffizienzen von PV-Anlagen im Vergleich zu Bioenergiepfaden (Wirth 2022) (Wirth 2025).

Abbildung 42: Vergleich der Flächenbelegung durch Bereitstellung der Energie für die Fahrleistung eines Pkw anhand Solarenergie (PV-Freiflächenanlage) und Biomasse (Biodiesel)



Quelle: (Fehrenbach, Bürck 2022)

3.4.2 Nachhaltige Erzeugung und Bereitstellung von Agrar- und Waldbiomasse

Landwirtschaftliche Flächen, Wald- und Wasserökosysteme bilden die Grundlage für die Bereitstellung biogener Ressourcen in der Bioökonomie. Zusätzlich dienen biogene Rest- und Abfallstoffe als Rohstoff. Zur Erhaltung natürlicher Lebensgrundlagen muss die Ressourcennutzung im Einklang mit den Zielen des Umwelt-, Klima- und Naturschutzes sowie mit den sozio-ökonomischen Nachhaltigkeitszielen erfolgen. Dies erfordert die Berücksichtigung aller eingehenden Faktoren der Produktionssysteme, sowie standortspezifische Anforderungen und Nachhaltigkeitsaspekte der Produktion. Beispiele für konkrete Maßnahmen hierzu sind:

- ▶ Vermeidung nicht-nachhaltiger Bewirtschaftungspraktiken in Land- und Forstwirtschaft, z.B. Grünlandumbruch, Monokulturen nicht standort-heimischer Baumarten, ackerbauliche Nutzung organischer Böden.
- ▶ Ausweitung nachhaltiger Bewirtschaftungspraktiken in Land- und Forstwirtschaft, beispielsweise:
 - Anlage von Kurzumtriebsplantagen (KUP). Je nach Wahl der anzubauenden holzigen Pflanzen, des Standorts, der Bewirtschaftungsform und notwendiger Inputs für die Produktion erzeugen diese zusätzliche Biomasse für eine stoffliche oder energetische Verwendung. Im Vergleich zu anderen Anbauformen, insbesondere ggü. annuellen Pflanzen, können KUP ökologische Vorteile bieten (siehe auch Maßnahme 6 in Kapitel 3.3.3).
 - Maßnahmen zum Waldbau und zur Waldanpassung. Qualität und Quantität von Waldbiomasse ist zunehmend abhängig von der Resilienz der Wälder gegenüber natürlichen biotischen (z.B. Käferfraß) und abiotischen Störungen (z.B. häufigere

Sturmereignisse oder Dürre als Auswirkungen des Klimawandels). Maßnahmen zur nachhaltigen Erzeugung könnten deshalb auf die bessere Anpassung von Wäldern und den Waldumbau von labilen zu klimaresilienten Beständen zielen. Diese Maßnahmen sind vor allem langfristig ausgerichtet, können durch Waldumbau, welcher eine verstärkte und vorgezogene Nutzung erfordern kann, kurzfristig Biomassepotenziale erhöhen.

- Ausweitung von Ökolandbau und FSC-zertifizierter Forstwirtschaft oder vergleichbaren nachhaltigen Formen der Biomassebereitstellung. Mit der Ausweitung des Ökolandbaus ist jedoch ein größerer Flächenbedarf verbunden, zumindest so lange signifikant geringere Erträge als im konventionellen Landbau erzielt werden. Auch die Zertifizierung von Waldbewirtschaftung kann kurz- bis mittelfristig zu einem Rückgang des Holzaufkommens führen. Langfristig gleicht eine nachhaltigere Waldbewirtschaftung aber auch potenzielle Einbußen konventioneller Bewirtschaftung, etwa durch Kalamitäten, aus. Sie ist zudem meist weniger kostenintensiv, da stärker natürliche Prozesse genutzt werden (z.B. bei der Verjüngung).
- Reduzierung der bestehenden Förderung der energetischen Nutzung von Biomasse zugunsten stofflicher Nutzung. In Deutschland wird Laubholz zum überwiegenden Teil direkt energetisch genutzt (Hennenberg et al. 2022). Allein der Scheitholzverbrauch von privaten Haushalten beträgt jährlich um die 20 Mio. m³. Dieses Biomassepotenzial könnte zu einem gewissen Teil in Form von Faser- und Spanplatten einer stofflichen Nutzung im Bau oder auch innovativen Holzprodukten in anderen Anwendungen zugeführt werden. Allerdings sind gerade Laubholzsortimente aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften in diesen Bereichen noch nicht weit verbreitet, da Produktionsverfahren kostenintensiver sind als für Nadelholz. Das gleiche gilt für die Nutzung als Konstruktionsholz, für das höhere Qualitätsanforderungen gelten. Andererseits birgt das aktuelle als Brennholz entnommene Holz auch ein großes Potenzial für einen Aufbau von Biomasse im Wald, wenn Energieholz z.T. nicht geerntet und so der Holzvorrat erhöht wird. (siehe Kapitel 3.4.3 und Maßnahme 11 Kapitel 3.3.3).

Politikinstrumente können solche Maßnahmen im Rahmen von Förderinstrumenten und regulativen oder informationellen Maßnahmen fördern. Diese können sich zum einen auf Deutschland und / oder die EU beziehen. Beispiele sind: Anpassung der Gemeinschaftsaufgabe „Verbesserung der Agrarstruktur und des Küstenschutzes“ (GAK) bzw. auf europäischer Ebene der Gemeinsamen Agrarpolitik, Konkretisierung und Verschärfung der guten fachlichen Praxis in Land- und Forstwirtschaft, Novellierung des Naturschutzrechts, Neuausrichtung der Agrarberatung, Biomasseförderung in RED III und EEG, Ausgestaltung der Nationalen Biomassestrategie, Aufnahme von Nachhaltigkeitskriterien in staatliche Beschaffungspolitik zu Produkten der Bioökonomie etc. Zum anderen können sie sich auch auf Produktionsländer außerhalb der EU beziehen, z.B. im Rahmen von Entwicklungszusammenarbeit, Nachhaltigkeitsstandards in Handelspolitiken, Einführung umweltbezogener Sorgfaltspflichten wie im Lieferkettengesetz, Stärkung von internationalen Governance- und Fördermechanismen für nachhaltiges Land- und Flächenmanagement etc.

3.4.3 Wechselwirkung mit Zielen zur Stärkung der natürlichen Senken

Durch den Aufbau von Kohlenstoffvorräten in verschiedenen Pools, wie lebende und tote Biomasse, Streu und Boden können land- und forstwirtschaftliche Flächen zur Festlegung von CO₂ und damit zur Minderung der THG-Konzentration in der Atmosphäre beitragen. Allerdings kann die Nutzung dieser Flächen für die Bioökonomie einer optimalen Senkennutzung

entgegenstehen. So ist die Entnahme von Holzbiomasse mit einer Verringerung des Kohlenstoffvorrates im Wald und mit einer Minderung der Senkenleistung verbunden (Soimakallio et al. 2022b). Die Verluste auf der Waldseite können durch eine Nutzung der Biomasse als langlebige Holzprodukte verringert und die Gesamtbilanz durch Substitutionseffekte positiv sein (Fehrenbach et al. 2022). Allerdings nehmen Substitutionseffekte zukünftig mit fortschreitender Dekarbonisierung ab. Der Nettonutzen für die Atmosphäre durch die Biomassenutzung hängt von bestimmten Voraussetzungen ab, die die Bioökonomiepolitik gestalten muss, um Zielkonflikte zwischen Bioökonomie und Klimaschutz zu vermeiden. Beispiele für konkrete Maßnahmen sind:

- ▶ Anlage von Agro-Forstsystemen, Heckenstrukturen und Kurzumtriebsplantagen (KUP). Durch die Anlage lässt sich ein Aufbau von Biomasse und Bodenkohlenstoffvorräten erreichen, der kurz- bis mittelfristig damit eine Senkenleistung bzw. verringerte Emissionen bewirken kann im Vergleich zum Anbau von einjährigen Kulturen (siehe auch Maßnahme 6 in Kapitel 3.3.3).
- ▶ Maßnahmen zur Wiederbewaldung. Der Aufwuchs von Bäumen führt bereits kurzfristig zu einer Senkenleistung, die mittelfristig in etablierten Beständen stark ansteigt. Die Wiederbewaldung sollte mit Anpassungsmaßnahmen einhergehen, damit langfristig eine Senkenleistung durch die Akkumulation von Kohlenstoff in lebender Biomasse, Totholz, Streu und Boden erfolgen kann und dadurch die Senkenleistung von Waldflächen erhöht wird. Mittel- bis langfristig lassen sich so auf den neuen Waldflächen hohe Kohlenstoffpools aufbauen.
- ▶ Maßnahmen zur Reduktion der direkten energetischen Nutzung von Holz. Durch Maßnahmen, die darauf abzielen, Sortimente der derzeitigen rein energetischen Nutzung zugunsten einer verstärkten stofflichen Nutzung zuzuführen, kann Kohlenstoff durch Speicherung in langlebigen Holzprodukten von der Emission zurückhalten und damit die THG-Emissionen senken. Einen ähnlichen Effekt haben Maßnahmen zur Verbesserung der Kaskadennutzung. Verbleibt das Energieholz im Wald, kann dort die Senke erhöht werden (siehe auch Maßnahme 11 in Kapitel 3.3.3).
- ▶ Anlage von Paludikulturen. Die Wiedervernässung trocken genutzter landwirtschaftlicher Moorfolgeböden und Anmooren erhält den Torfkörper und reduziert so die CO₂-Emissionen. Auf diesen Flächen können nassetolerante Pflanzen für eine stoffliche oder energetische Nutzung angebaut werden.

3.4.4 Minimierung der negativen Wechselwirkungen zum Biodiversitätsschutz

Land- und Forstwirtschaft sind zentrale Pfeiler der biobasierten Wirtschaft. Gleichzeitig tragen sie durch Intensivierung der Nutzung zu einem Verlust biologischer Vielfalt bei. Der Erhalt der Biodiversität und der Qualität von Böden und Wasserkörpern als Voraussetzung für Ökosystemleistungen sind in Maßnahmen stärker zu berücksichtigen, und Mehrkosten für den Erhalt sind in biobasierte Produkte einzupreisen.

Ein Beispiel für konkrete Maßnahmen hierzu sind Agroforstmaßnahmen. Eine verstärkt integrierte Holz- und Agrargüterproduktion kann bei gleicher Fläche insgesamt zu Ertragssteigerungen führen. Durch den Mischanbau ergeben sich positive Effekte, die mit der Verbesserung der Bodeneigenschaften und der Wasserinfiltration durch die Gehölze in Verbindung. Dadurch können ggf. Flächenverluste für Agrargüteranbau durch die Etablierung von Gehölzen kompensiert werden. Agroforstsysteme können die Kohlenstoffspeicherung

verbessern und Vorteile für die Biodiversität in Agrarökosystemen bedeuten (Dmuchowski et al. 2024).

3.5 Exkurs zu weiteren spezifischen Maßnahmen

Im Folgenden werden drei weitere Handlungsfelder der Bioökonomie und mögliche Maßnahmen diskutiert. Die drei Handlungsfelder stehen exemplarisch für unterschiedliche Bereiche der Bioökonomie und ihre Akteurskonstellationen. Betrachtet werden Maßnahmen zu einer gesunden und nachhaltigen Ernährung, Maßnahmen zur Ausweitung des Holzbaus und Maßnahmen zur Suffizienz in Bezug zur Bioökonomie.

3.5.1 Maßnahmen zu einer gesunden und nachhaltigen Ernährung

Die Planetary Health Diet (PHD) beschreibt, wie eine nachhaltige und gesunde Ernährung für eine wachsende Weltbevölkerung bis 2050 aussehen könnte und wurde durch die EAT Lancet Kommission entwickelt (Willett et al. 2019). Für Deutschland bedeutet dies, den Verzehr von tierischen Produkten um 75 % gegenüber heute zu reduzieren, während die Menge an Obst, Gemüse, Nüssen und Hülsenfrüchte sich zum Teil mehr als verdoppeln müsste. Zudem müsste die Lebensmittelverschwendung durch Lebensmittelabfälle halbiert (Scheffler, Wiegmann 2022).

(Scheffler, Wiegmann 2022) untersuchten im Rahmen einer Greenpeace-Studie, welche Auswirkungen eine Ernährungsumstellung nach dem Vorbild der PHD auf die landwirtschaftliche Produktion in Deutschland hätte und welche neuen Möglichkeiten sich daraus ergeben würden. Dabei legen die Autorinnen die Einhaltung bestehender politisch festgelegter flächenrelevanter Umwelt- und Klimaziele zugrunde. Deren Erfüllung würde bedeuten, dass die inländische Agrarfläche nicht ausreicht, um die heutige Nachfrage nach landwirtschaftlichen Gütern zu befriedigen. Allein durch die Umsetzung von Moorschutz und Biodiversitätsschutz würden ca. 1,6 Mio. ha weniger produktive Agrarfläche zur Verfügung stehen. Gleichzeitig wird mehr produktive Fläche für die Ausweitung des Ökolandbaus mit geringeren Erträgen benötigt (Scheffler, Wiegmann 2022).

Eine Ernährungsumstellung nach dem Vorbild der Planetary Health Diet würde dazu führen, dass nur noch 60% der aktuellen Nutzfläche für die Ernährung der inländischen Bevölkerung belegt wären und dadurch 1,6 Mio. ha Grünland und 4,6 Mio. ha Ackerland für alternative Verwendungszwecke zur Verfügung stünden. Die gleichzeitige Erreichung dieser Ernährungsumstellung und die Umsetzung der Umweltziele würde die Emissionen des Landwirtschaftssektors inklusive der CO₂ Emissionen aus der landwirtschaftlichen Nutzung der Moorstandorte von heute ca. 95 Mio. t CO₂e auf 23 Mio. t CO₂e senken. Insgesamt würden die Emissionen pro Hektar von heute ca. 8,3 t CO₂e auf 2,5 t CO₂e sinken (Scheffler, Wiegmann 2022).

Im März 2024 hat die Deutsche Gesellschaft für Ernährung e.V. (DGE) neue lebensmittelbezogene Ernährungsempfehlungen für Deutschland veröffentlicht (Schäfer et al. 2024). Im Gegensatz zu den vorherigen DGE-Empfehlungen wird für Fleisch- und Wurstwaren eine Obergrenze von max. 300 g pro Woche empfohlen. Damit entspricht die Obergrenze den Ernährungsempfehlungen der Planetary Health Diet. Frühere DGE-Empfehlungen legten eine Spannweite von 300 bis 600 g Fleisch und Wurstwaren pro Woche zugrunde. Auch die Empfehlungen für Milchprodukte wurde von bisher ca. 700 g Milchäquivalent pro Tag auf 400 g Milchäquivalent reduziert. In der Planetary Health Diet liegt die Empfehlung für den Milchkonsum bei 250 g Milchäquivalent pro Tag.

Die neuen Ernährungsempfehlungen der DGE sehen gegenüber den alten Empfehlungen einen deutlichen Rückgang des Konsums tierischer Produkte vor und sind fast im Bereich der Planetary Health Diet.

Zur Umsetzung der Ziele geben (Scheffler, Wiegmann 2022) auch Hinweise auf Maßnahmen, die vor allem auf eine Reduzierung des Fleischkonsums und der Tierbestände zielen. Konkret genannt werden:

- ▶ Progressive Zielvorgaben und Ernährungsempfehlungen, die im Einklang mit den Umwelt- und Klimazielen stehen.
- ▶ Eine intensivere Aufklärung der Verbraucher*innen und verbesserte Lebensmittelkennzeichnung in Bezug auf Tierwohl, Klima und die Gesundheit.
- ▶ Die Unterstützung und Förderung der Erforschung und Erzeugung alternativer Protein-Produkte.
- ▶ Die Reform der Lebensmittelbesteuerung, so dass klimaschädliche Lebensmittel mit einem vollen Mehrwertsteuersatz belegt werden, klimafreundliche und gesunde Produkte dafür günstiger werden.
- ▶ Die Einführung einer Fleischabgabe zur Finanzierung des Umbaus der Tierhaltung.
- ▶ Die Verschärfung der Anforderungen an die Nutztierhaltung, damit für alle Nutztiere ein Leben nach den Standards des Tierschutzgesetzes möglich ist.
- ▶ Benennung konkreter Ziele für den Abbau der Tierhaltung (siehe Niederlande) und Begleitung der Umsetzung durch gezielte Maßnahmen (z.B. Herauskaufen der Tierhaltung von Moorstandorten und in Intensivregionen); Stallumbau nur für bestimmte Ziel-Betriebe fördern.
- ▶ Die aktive Förderung des Anbaus von Hülsenfrüchten, Obst, Gemüse und Nüssen, um das regionale Angebot dieser Lebensmittel auszubauen und Einkommensmöglichkeiten im Bereich des Pflanzenbaus zu erweitern.

Weitere Empfehlungen hierzu finden sich bei (Möller et al. 2020):

- ▶ Eine steuerliche Förderung für vegetarische und vegane Angebote in der Gastronomie.
- ▶ Reduzierung von Lebensmittelverlusten auf Angebots- und Nachfrageseite und konsequente Anwendung der „Food Use Hierarchy“ (z.B. Rückführung von Nährstoffen in den landwirtschaftlichen Kreislauf vor energetischer Verwertung).

3.5.2 Maßnahmen zur Ausweitung des Holzbaus

Maßnahmen zur Ausweitung des Holzbaus werden vielfach als „Mehrgewinnstrategie“ dargestellt (WGBU 2020) (Churkina et al. 2020) (Mishra et al. 2024). Tatsächlich bietet der Einsatz von Holz im Bau eine Reihe von Vorteilen im Vergleich zu Nicht-Holzmaterialien, vor allem energie- und emissionsintensiven, wie Stahl und Beton. Etwa 14 % der CO₂-Emissionen in Deutschland stammen aus dem Gebäudesektor, wobei noch einmal die gleiche Menge an Emissionen durch die Herstellung von Strom und Fernwärme oder von Baustoffen in anderen Sektoren (Energie und Industrie) entstehen (UBA 2023c). Holzbau kann eine klimafreundliche Alternative zum zement- und stahlbasierten Bauen sein, die einerseits materialbezogene THG-Emissionen reduziert aber auch biogen gebundenen Kohlenstoff langfristig speichert wird (Hafner et al. 2017).

Der Bedarf an Holz für die Ausweitung des Holzbaus kann durch eine Verschiebung der Holznutzung gedeckt werden, wodurch die Auswirkungen auf die Kohlenstoffspeicherung im Wald reduziert werden können. Wahrscheinlicher ist aber eine Erhöhung des Holzbedarfs durch verstärkten Holzbau. Dieser kann Landnutzung positiv beeinflussen, wenn dadurch Anreize entstehen degradierte Flächen wieder zu bewalden und die Bewirtschaftung der Wälder extensiv erfolgt (Mishra et al. 2024). Wirkungen können aber auch negativ sein, wenn der zusätzliche Bedarf zu intensiverer Nutzung bestehender Wälder führt. (Soimakallio et al. 2022a) schätzen, dass in temperaten und borealen Wäldern eine Intensivierung der Holzernte zu verpassten Senkenleistungen des Waldes von 1 – 2 t CO₂ pro Kubikmeter Holz führt. Diese können durch den Holzspeicher allein auch in langlebigen Produkten nicht kompensiert werden. Werden allerdings auch Substitutionseffekte einbezogen, kann die intensivere Holznutzung zum Klimaschutz beitragen .

Nach (Osterburg et al. 2019) führt die Realisierung einer erhöhten Holzbauquote (55 % für Einfamilienhäuser und 15 % für Mehrfamilienhäuser) zu einem Mehrbedarf an durchschnittlich 1,9 Mio. m³ Nadelholz , was einer Reduktion von ca. 2,5 Mio. m³ im Wald bedeutet. Geht man davon aus, dass der Mehrbedarf an Rohholz aus heimischer nachhaltiger Bewirtschaftung stammen soll, verringert sich die zu erwartende Senkenwirkung des Waldes in Deutschland bis 2030 um knapp 1 Mio. t CO₂-Äq. pro Jahr (Osterburg et al. 2019).

(Wolf et al. 2020) stellen fest, dass für die Konkurrenz zu Holz als Baustoff auch in Zukunft vor allem die Konkurrenz zur energetischen Nutzung relevant sein wird. Eine Senkung des Ressourcenverbrauchs durch gesetzliche Rahmenbedingungen, die einer einseitigen Förderung der energetischen Nutzung entgegenwirken, kann die Konkurrenz verringern. Ebenso kann laut (Wolf et al. 2020) eine verstärkte Kaskadennutzung die Ressourceneffizienz erhöhen. Diese wird derzeit vor allem wegen mangelnder Quantität und Qualität von Altholz aber auch durch fehlende Prozesse in ihrem Potenzial begrenzt. Eine konsequentere Getrenntsammlung unterschiedlicher Altholzqualitäten würde es ermöglichen, mehr Altholz für weitere stoffliche Nutzungen verfügbar zu machen. Allerdings muss sichergestellt werden, dass die Kaskadennutzung für die stoffliche Mehrfachnutzung in einer geringen Umweltwirkung resultiert und dass das für die energetische Nutzung fehlende Altholz nicht durch qualitativ hochwertiges Frischholz substituiert wird (Wolf et al. 2020).

Ambitionierte Holzbaustrategien können nur erfolgreich sein, wenn es zu einer Wandlung von Stadtarchitektur, Wertschöpfungsketten und der Akteurslandschaft kommt, die bestehende Pfadabhängigkeiten in der Bauwirtschaft überwinden hilft (WGBU 2020). Der Kreis der Stakeholder einer nachhaltigen Bauwirtschaft umfasst verschiedenste Akteure aus Wirtschaft, Zivilgesellschaft und Politik, wie Großkonzerne (z.B. Stahl- und Zementindustrie), ausführende Betriebe, Sägeindustrie, Zimmerleute aber auch Waldbesitzende. Die heterogene Konstellation schafft Hemmnisse durch Interessenkonflikte, bietet aber auch Multiplikatoren für wirkungsvolle Veränderungsimpulse in Richtung Nachhaltigkeit, etwa durch Impulse großer Bauträger in Richtung mehr Holznutzung (WGBU 2020).

Produkte für den Holzbau werden bislang vor allem aus Nadelhölzern hergestellt. Durch den auch durch den Klimawandel bedingten Anstieg des Absterbens von Nadelholzbeständen aber auch einen forcierten Waldumbau ist zu erwarten, dass in den nächsten Jahren das Nadelholzaufkommen durchaus hoch sein wird. Langfristig ist aber bei gleichbleibender oder sogar steigender Nachfrage mit einer Nadelholzlücke zu rechnen (Osterburg et al. 2019). Diese zeitliche Dynamik kann dazu führen, dass die technisch mögliche Verwendung von Bauprodukten aus Laubholz wirtschaftlich weiterhin weniger attraktiver bleibt und damit wichtige Investitionen, Innovationen und Markteinführungen ausbleiben und damit auch notwendige Änderungen in der Struktur der Holzverarbeitenden Industrie nicht passieren.

Maßnahmen zur Förderung des Holzbaus sind daher vor allem auf folgende Aspekte auszurichten (WGBU 2020):

- ▶ Förderung des nachhaltigen Bauens insgesamt. Eine Maximierung des Holzanteils als Baustoff ist aus Ressourcenschutzsicht und Effizienzbetrachtung heraus nicht sinnvoll. Stattdessen sollte technologieoffen nachhaltiges Bauen insgesamt gefördert werden. Dies beinhaltet auch die Nutzung von Nichtholzprodukten, wie recyceltem Stahl und Beton, Lehm- und Holzbau, Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen wie Stroh, Hanf, Schilf etc. Dies könnte erreicht werden durch die Entwicklung einer Strategie zur nachhaltigen Baustoffnutzung. Diese sollte regional unterschiedliche Ausgangssituationen und Entwicklungen berücksichtigen. Neben der Ausstattung mit biogenen Ressourcen zählt dazu auch die Verfügbarkeit von Arbeitskräften, regionale Bau-traditionen, existierende Gebäudebestände, demografische Trends und daraus resultierende Baubedarfe.
- ▶ Internalisierung realer Kosten. Nachhaltiges Bauen wird relativ zum konventionellen Bauen attraktiver, wenn Umweltwirkungen in die Kosten der Baustoffe integriert werden. Die dadurch gesteigerte Nachfrage nach biogenen Materialien, darf dabei nur aus nachhaltigen Quellen gedeckt werden. Dies könnte z.B. durch eine höhere effektive CO₂-Bepreisung von Zement und Stahl im EU-ETS (und gegebenenfalls eine Border Tax sowie härtere Auflagen für Sand) erreicht werden. Gleichzeitig muss nachhaltige Forstwirtschaft und der Schutz von Primärwäldern durch Zertifizierung und die Nachweispflicht von nachhaltigen Lieferketten erreicht werden.
- ▶ Abbau der Benachteiligung nachhaltiger Bauweisen. Bestehende Bauvorschriften, Normen und Standards (z.B. zu Statik, Brandschutz und Dämmung) sowie Ordnungsrecht müssen angepasst werden, da sie vielfach nachhaltiges Bauen benachteiligen. Holzbau sollte zudem bei der energetischen Sanierung konventionellem Bauen gleichgestellt werden. Weitere Maßnahmen betreffen Vorgaben zum Ökodesign von Gebäuden (z.B. Modularität, Wiederverwendbarkeit, Energieeffizienz), verbesserte Zertifizierung nachhaltiger Baumaterialien, sowie eine verbesserte Sortierung von belastetem und unbelastetem Holz beim Abriss.

Im Juni 2023 beschloss die Bundesregierung die Holzbauintiative²⁶, die verschiedene Lösungsansätze innerhalb von acht Handlungsfeldern zugunsten des Holzbaus vorsieht. So soll die Forschung um den Holzbau verstärkt werden und neue Techniken entwickelt werden. Dabei sollen auch Gesetze und Verordnungen überprüft werden, um den Holzbau zu erleichtern. Auch das Monitoring und die Datenverfügbarkeit zum Holzbau, vor allem zur Evaluierung klimarelevanter Effekte soll verbessert werden.

3.5.3 Maßnahmen zur Suffizienz

Konsum, Lebensstile und konsumbezogene Leitprinzipien der Produktionsseite der Bioökonomie (z.B. Geschäftsmodelle wie Nutzen statt Besitzen, Sharing etc.) entscheiden maßgeblich darüber, welche Ressourcen wie und in welchen Mengen genutzt werden. Für die Entwicklung einer nachhaltigen Bioökonomie ist die moderate und auf tatsächliche Bedürfnisse abgestimmte Nutzung natürlicher Ressourcen unverzichtbar (Chatalova 2022). Die Änderung des Konsumverhaltens durch Suffizienz kann dafür ein wirkungsvolles Mittel sein.

Unter Suffizienz verstehen wir „Änderungen in Konsummustern, die helfen, innerhalb der ökologischen Tragfähigkeit der Erde zu bleiben, wobei sich Nutzenaspekte des Konsums

²⁶ <https://www.bmwsb.bund.de/SharedDocs/downloads/Webs/BMWSB/DE/veroeffentlichungen/bauen/holzbauintiative.html>

ändern“ (Fischer, Grieshammer 2013).²⁷ Das kann umfassen: den *Verzicht auf oder die Reduzierung von besonders ressourcenintensiven Güterarten* (z.B. Fernseher, Fleisch); ein *Weniger an Größe, Funktionen oder Komfort* (eine kleinere Wohnung, ein Auto ohne Klimaanlage); den *Ersatz von Gütern durch qualitativ andere* (Fahrrad statt Auto); die *Verlängerung der Nutzungsdauer*, wenn ökologisch vorteilhaft (z.B. Handy, Kleidung); eine *seltener Nutzung* (z.B. von elektrischen Geräten); die *Eigenproduktion* oder auch die *gemeinsame Nutzung*, wenn ökologisch vorteilhaft (Sharing, Tausch); oder auch verändertes, *umweltfreundlicheres Nutzungsverhalten* (z.B. max. 120 km/h auf Autobahn) (ebd., S. 9 sowie (Heyen et al. 2013)). Produkte und Dienstleistungen der Bioökonomie lassen sich grob unterscheiden in Nahrungs- und Futtermittel, Bioenergie (energetische Nutzung) sowie biobasierte Produkte (stoffliche Nutzung) wie Baustoffe, Chemikalien, Textilien, Kosmetik, Schmierstoffe oder Verpackungen etc. Durch die Vielfalt unterschiedlicher Produktarten stellt sich die Frage, wie suffizienter Konsum aussieht, jeweils etwas unterschiedlich.

Mit dem obigen, nutzenbezogenen Verständnis kann Suffizienz klar von Effizienz- und Konsistenzstrategien abgegrenzt werden: Denn diese beiden Strategien wollen den gleichen Nutzen auf umweltverträglichere Weise bereitstellen – Effizienz, indem der Ressourceninput oder der Emissionsoutput bei der Erzeugung desselben Nutzenbündels quantitativ verringert wird; Konsistenz, indem der Ressourceninput oder Emissionsoutput durch neue Technologien qualitativ verändert wird – so, dass sie sich in Naturkreisläufe einbetten lassen (ebd., S. 10-11).

Suffizienz ist wichtig, weil Effizienz und Konsistenz erstens häufig nicht ausreichen werden, um den Naturverbrauch auf ein nachhaltiges Maß zu beschränken. So können Rebound-Effekte und allgemeines Wirtschaftswachstum im Kontext von Effizienzstrategien einen Teil der erwarteten Einsparungen wieder „auffressen“, und auch naturverträglichere Technologien im Rahmen von Konsistenzstrategien sind mit (spätestens bei ihrer Hochskalierung problematischen) Ressourcenverbräuchen und Umweltauswirkungen verbunden. Teils verbinden sich neue Technologien auch mit noch nicht voll absehbaren Risiken. Zweitens kann Suffizienz zuweilen sogar die einfachere und leichter zu akzeptierende Strategie sein. Im Vergleich zu (technologielastigen) Effizienz- und Konsistenzstrategien sind beispielsweise geringe(re) Investitionsbedarfe zu erwarten. Suffizienz geht nicht mit Verlagerungseffekten einher – während beispielsweise die Wirksamkeit einer Prämie für die Abstockung von Tierbeständen durch den Import von Fleisch aus dem Ausland gehemmt werden kann, würde suffizienteres Ernährungsverhalten – hier: eine pflanzenbasierte Kost – keinen entsprechenden produzentenseitigen Verlagerungseffekt auslösen. In dem Maße, in dem Minderungen in bestimmten Bereichen des Konsums dazu führen, dass drastische Einsparmaßnahmen an anderer Stelle oder der Einsatz umstrittener Technologien (z.B. CCS; BECCS) vermieden werden können, kann Suffizienz auch zusätzliche Handlungsspielräume und Potenziale ermöglichen, Konflikte vermeiden und letztlich mit höherer Akzeptanz einhergehen (Fischer, Grieshammer 2013).

Wie kann die Bioökonomie suffizienter werden, und wie kann Suffizienz auch außerhalb der Bioökonomie den Druck auf Landnutzung senken? Hierzu besen aus Sicht der Autor*innen folgende Forschungsbedarfe bzw. politischen Handlungsoptionen:

²⁷ Dass von „Nutzenaspekten“ statt einfach von Nutzen gesprochen wird, soll ausdrücken, dass Güter und Dienstleistungen kaum je nur einen einzigen Nutzen haben. Fast immer bringen sie einen Strauß verschiedener Nutzenaspekte. Das eigene Auto bringt uns nicht nur von A nach B – es tut das schnell, trocken, anstrengungsfrei, und mit der Möglichkeit, weitere Personen und Güter zu transportieren. Das Fahrrad leistet das alles vielleicht nicht – dafür hält es uns fit, lässt uns an der Luft sein, erfordert keinen Führerschein und erspart uns die Parkplatzsuche. Der Umstieg vom Auto auf das Fahrrad ändert also den Nutzen „Transport einer Person von A nach B“ nicht – wohl aber viele andere Nutzenaspekte. Daher kann hier auch von „Nutzenbündeln“ gesprochen werden (Fischer, Grieshammer 2013) S. 10).

- ▶ Forschungsbedarf zur „Suffizienzschwelle“: Eine notwendige und hinreichende Bedingung für Suffizienzmaßnahmen und Verteilungsgerechtigkeit besteht darin, dass gegenwärtige und zukünftige Generationen ausreichend versorgt sind und einen bestimmten Schwellenwert bzgl. des Wohlergehens überschreiten (Möller et al. 2020). Kritisch ist dabei die Festlegung der „Suffizienzschwelle“, d.h. des Punkts, ab dem die Menschen mit dem versorgt werden, was sie für ein gutes Leben brauchen. Eine Auseinandersetzung wäre wichtig, wie eine solche Suffizienzschwelle bestimmt werden kann, wo sie (in Deutschland) liegen könnte, und was dies für die Priorisierung von Biomassenutzungen bedeutet.
- ▶ Gesellschaftliches Bewusstsein und Akzeptanz für Suffizienz stärken: Bislang besteht erst ein geringes gesellschaftliches Bewusstsein für die ökologischen und sonstigen Vorteile suffizienter Lebensstile, teils auch eine geringe Akzeptanz davon. Um das allgemeine Bewusstsein für mehr Suffizienz bei Konsument*innen zu stärken und mehrheitsfähig zu machen, kann die Bundesregierung neben Informationskampagnen auch Reallabore initiieren. Das Verständnis von suffizientem Konsum sollte sich dabei einerseits auf die Bioökonomie beziehen. Andererseits geht es aber auch um Sektoren und Bedürfnisfelder außerhalb der Bioökonomie (z.B. in Bezug auf Wohnen, Mobilität, Freizeit etc.), die Auswirkungen auf Landnutzung haben.
- ▶ Suffizientes Verhalten politisch ermöglichen und stärken: Suffizienter Konsum sollte allerdings nicht nur auf den Schultern der (End-) Verbraucher*innen lasten. Da deren Handeln in strukturelle Zwänge eingebettet ist, ist es weder fair noch zielführend, auf die Einsicht und das freiwillige Handeln des Individuums allein zu setzen. Damit Gesellschaft in ausreichendem Maße suffizient wird, bedarf es politischer Leitplanken, die suffizientes Handeln auf individueller Ebene erleichtern, aber auch suffizienzerleichternde Handlungen von Unternehmen, Dritten und nicht zuletzt vom Staat selbst fordern und fördern (vgl. Textbox mit Beispielen auch aus Nicht-Bioökonomie-Sektoren). Nicht zuletzt können Mehrwertsteuer-Anpassungen für Verbraucherinnen und Verbraucher Anreize schaffen, den Konsum von ökologisch problematischeren Bioökonomie-Produkten zu mindern, z.B. die direkte Verbrennung von Holz (zur Minderung des Konsums tierischer Lebensmittel siehe Kapitel 3.5.1).

Ansatzpunkte für Suffizienzpolitik

Suffiziente Handlungen auf **Verbraucherebene**:

- ▶ ein Weniger an (ressourcenintensiven) Gütern und Güternutzung
 - vollständiger Verzicht auf bestimmte Güter (z.B. Autobesitz, Fernreisen)
 - Reduzierung der Menge bestimmter Güter (z.B. Fleisch, Fernsehgeräte)
 - seltenere Nutzung von Gütern (z.B. des Autos, des Fernsehers)
- ▶ evtl. Ersatz durch qualitativ andere, umweltfreundlichere Güter (z.B. Rad statt Auto)
- ▶ Wahl einer Variante des (gleichen) Gutes mit einem Weniger an Größe, Funktionen oder Komfort (z.B. kleinerer Fernseher, kleinere Wohnung, Auto ohne Klimaanlage)
- ▶ Eigenproduktion, wenn ökologisch vorteilhaft (z.B. ökologischer Gemüseanbau im Garten)
- ▶ gemeinsame Nutzung, wenn ökologisch vorteilhaft (z.B. Nachbarschaftsauto)
- ▶ verändertes, umweltfreundlicheres Nutzungsverhalten (z.B. max. 120 km/h auf Autobahn)
- ▶ Verlängerung der Nutzungsdauer, wenn ökologisch vorteilhaft (z.B. Handy, Kleidung)

Suffizienzerleichternde Handlungen des **Staates**:

- ▶ Ausbau von Infrastrukturen und staatlichen Planungsleitbildern, die suffizientes Handeln fördern (z.B. Fuß- und Radwege, ÖPNV, kurze Wege, Innenentwicklung statt Zersiedlung etc.)
- ▶ Produktpolitik: Vorgaben u.a. zu Reparierbarkeit oder Garantie von Produkten, zur Angabe von absoluten Verbräuchen durch Hersteller etc.
- ▶ Förderung von Nutzen-statt-Besitzen-Angeboten (z.B. Carsharing im Rahmen kommunaler Parkraumbewirtschaftung, kommunale Ausleihzentren für Gebrauchsgegenstände)
- ▶ Abbau von Anreizen (u.a. Subventionen), die insuffizientes Handeln fördern (z.B. niedriger MWSt-Satz für Tierprodukte)
- ▶ Schaffung oder Stärkung von Anreizen, den Konsum von ökologisch problematischer(er) Produkten zu mindern (im Kontext Bioökonomie z.B. Bioenergie, Bioplastik; zur Minderung des Konsums tierischer Lebensmittel siehe Kapitel 3.5.1)
- ▶ Abbau von Subventionen, die insuffizientes Handeln fördern (z.B. niedriger MWSt-Satz für Tierprodukte)
- ▶ Kommunikation: stärkere Suffizienzorientierung bestehender Kampagnen, neue Informationskampagnen und -aktionen (z.B. zu vegetarischem Essen, Nutzen-statt-Besitzen)

Suffizienzerleichternde Handlungen auf **Unternehmensebene**:

- ▶ Angebot und Bewerbung umweltfreundlicherer Güter mit veränderten Nutzenaspekten (z.B. Produktion eines kleinen Geräts und günstige Platzierung im Geschäft)
- ▶ Nutzen-statt-Besitzen-Angebote für eine intensivere Nutzung (z.B. Werkzeugverleih)
- ▶ Herstellung von Gütern mit längerer Haltbarkeit bzw. Angebote, die eine längere Nutzung ermöglichen (z.B. günstige Reparatur und auswechselbarer Akku beim Laptop)

- ▶ Reduzierung der neu angebotenen Güter pro Jahr (z.B. Modekollektionen)
- ▶ Bereitstellung von Umweltinformationen (z.B. absoluter Energieverbrauch)
- ▶ Setzen entsprechender Anreize bei Mitarbeitern (z.B. BahnCard statt Dienstwagen)

Suffizienzerleichternde Handlungen **Dritter** (z.B. Verbände, Initiativen, „Prosumenten“):

- ▶ Bereitstellung von Angeboten, die suffizientes Handeln erleichtern (z.B. Verleihladen)
- ▶ Durchführung von Kampagnen, Bereitstellung von Informationen, Vergabe von Labels

Quelle: basierend auf Heyen et al. 2013

3.6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die vom Bioökonomierat vorgelegten Vorschläge und Empfehlungen für einen Umsetzungsplan der Bioökonomiestrategie haben in weiten Teilen die Form von Handlungsansätzen. Deshalb lassen sie sich nur in wenigen Fällen als Maßnahmen bewerten und auf die mögliche Wirkung hin untersuchen. In diesem Bericht wurden Vorschläge des BÖR bewertet und in einer Fehlstellenanalyse weitere mögliche Maßnahmen den Handlungsfeldern der Bioökonomie folgend hergeleitet.

Die Nutzung von Landfläche ist eine zentrale Grundlage für die Biomasseproduktion und somit ist die Konkurrenz um Flächen ein zentraler Faktor, der im Rahmen einer Bioökonomiestrategie berücksichtigt werden sollte. Dabei darf aber der Fokus der Flächenkonkurrenz nicht nur innerhalb der Bioökonomie liegen, da auch Sektoren außerhalb der Bioökonomie um diese Flächen konkurrieren.

Für zahlreiche Nutzungen bestehen biogene und nicht-biogene Alternativen. Ein zentrales Element einer Bioökonomiestrategie sollte es sein, die Vorteile und Nachteile biogener Nutzungspfade gegenüber nicht-biogenen Nutzungspfaden zu analysieren und nur dann biogene Nutzungspfade zu priorisieren, wenn die Vorteile überwiegen. Dabei sind explizit Nutzungsoptionen auf Flächen außerhalb der Bioökonomie zu berücksichtigen, da diese z.T. sehr vorteilhafte sein können (z.B. Solarenergie, Wiedervernässung).

Auf der anderen Seite gibt es Nutzungen, für die keine nicht-biogene Alternative besteht (z.B. Biomasse in der Lebensmittelproduktion). Aus diesen Zusammenhängen lässt sich zwei generelle Leitlinien für die Entwicklung von Maßnahmen ableiten:

- ▶ Rahmensetzungen:
 - Das Konzept der Zirkularität ist ein wichtiger Baustein für die Reduktion der Flächenintensität der Bioökonomie. Grundsätzlich braucht es einen Politikrahmen, der Zirkularität ermöglicht und fördert. Dies können z.B. Regelungen sein, die für eine verbesserte Sortierung von Altholz sorgen und die damit Nutzungsoptionen und Potenziale von Biomasse erhöhen (siehe auch Maßnahme 12 in Kapitel 3.3.3).
 - Eine Biomassenutzung sollte nur im Rahmen nachhaltiger Biomassepotenziale erfolgen. Die Überprüfung dieser Potenziale sollte in regelmäßigen Abständen erfolgen.²⁸

²⁸ Beispiel: Im Szenario Klimaneutrales Deutschland 2045 (Agora Think Tanks 2024) wurde ein Bioenergiepotenzial von 322 TWh in 2050 angenommen. Neuere Analysen im Szenario T45 der „Langfristszenarien“ (<https://langfristszenarien.de>) nehmen nur noch 250 TWh im Jahr 2050 an.

- Eine Analys*e von Potenzialen sollte sektorübergreifend angelegt sein und Ziele anderer Strategien berücksichtigen. Dies gilt insbesondere für die geplante Nationale Biomassestrategie (NABIS), das Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz, die Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie, die Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt, die Nationale Moorschutzstrategie und das Bundes-Klimaschutzgesetz.
 - Effizienzsteigerungen und Veränderungen des Nutzerverhaltens innerhalb bioökonomischer Handlungsfelder bis hin zur Suffizienz (vgl. Kapitel 3.5.2) können ebenfalls den Nutzungsdruck auf biogene Rohstoffe sowie die Flächenkonkurrenz verringern.
 - Der Flächenverbrauch für Siedlungs- und Verkehrsfläche sollte möglichst klein gehalten werden, um den Druck auf die Flächenkonkurrenz von dieser Seite nicht zu erhöhen. Hier sind Suffizienzstrategien auch in Sektoren außerhalb der Bioökonomie (wie Wohnen und Mobilität) wichtig.
- Biomassenutzungen, für die es keine Alternative gibt, sollten Vorrang haben.
- Vorrang für die Produktion pflanzlicher Nahrung, um die inländische Nachfrage zu decken und Vorrang für die Produktion pflanzlicher Nahrung für den Export, wenn dort Engpässe bestehen (siehe auch Maßnahme 1 in Kapitel 3.3.3).
 - Vorrang für die Produktion von Tierfutter, um die inländische Nachfrage nach Tierprodukten zu decken. Dieser Umfang sollte an Empfehlungen für eine gesunde Ernährung ausgerichtet sein.²⁹
 - Vorrang einer stofflichen oder energetischen Biomassenutzung, die nur schwer oder nicht durch Alternativen ersetzt werden und die gegenüber nicht-biogenen Vergleichssystemen positiv zu bewerten ist. In Bereichen, in vorteilhafte Alternativen verfügbar sind, sollten diese genutzt werden (z.B. Solarenergie statt Bioenergie). Hier ist auch zu prüfen, ob eine stoffliche Nutzung gegenüber einer energetischen Nutzung von Vorteil ist.

²⁹ Siehe z.B. <https://www.dge.de/>

4 Ansatzpunkte zur Priorisierung von Biomasseströmen und Biomassenutzungen

4.1 Vorgehensweise

4.1.1 Ausgangsbasis für Ansatzpunkte für einen Steuerungsmechanismus

Es liegt eine Vielzahl an Ansatzpunkten für die Bewertung verschiedener Arten von Biomassenutzungen vor. Für eine Anwendung solcher Ansatzpunkte zur Priorisierung und eines damit verknüpften Nutzungskonzepts liegen jedoch wenige Beispiele vor. So existieren zwar vergleichende Ökobilanzen (Lebensweganalyse, LCA). Diese sind zumeist jedoch sehr fallspezifisch und erlauben selten einen Blick auf ganze Stoffströme. Solche stehen dagegen Indikatoren- oder Monitoringsystemen zu Grunde. Kriterien lassen sich außerdem aus politischen Strategien ablesen, wie z.B. die EU-Bioökonomie Strategie, der Nationalen Bioökonomiestrategie aber auch der EU Green Deal sowie die Empfehlungen des Nationalen Bioökonomierats (BÖR).

Im Folgenden wird beschrieben, welche Ansatzpunkte und welche Kriterien oder Indikatoren seitens solcher bestehenden Beispiele verwendet werden bzw. daraus für die vorliegende Aufgabe abgeleitet werden können. Ziel ist es, Kriterien für die Priorisierung nicht „frei zu erfinden“, sondern anhand bestehender Rahmensetzungen eine solide normative Basis herzustellen. Die übergreifenden Strategien zur Bioökonomie und der damit verflochtenen Bereiche wird zuerst betrachtet.

4.1.1.1 Strategien zur Bioökonomie und damit verbundene Bereiche

Von grundlegender Bedeutung ist die **Bioökonomiestrategie der EU** (European Commission 2018) wie auch die Nationale Bioökonomiestrategie der Bundesrepublik (BMBF 2020), da sie in der Formulierung von strategischen Zielen auch Ansatzpunkte zur Bewertung bieten.

Die fünf strategischen Ziele der Bioökonomie seitens der EU lauten:

1. Nahrungsmittel- und Ernährungssicherheit
2. Nachhaltiger Umgang mit natürlichen Ressourcen
3. Reduktion der Abhängigkeit von nicht erneuerbaren und nicht nachhaltigen Ressourcen
4. Verringerung des und Anpassung an den Klimawandel
5. Wettbewerbsfähigkeit und Arbeitsplätze

Es ist erkennbar, dass diese Ziele in erster Linie dem Gedanken der ökologischen wie auch sozialen Nachhaltigkeit folgen. Mit dem Ziel der Wettbewerbsfähigkeit (in Ziel Nr. 5) ist auch die Ökonomie adressiert.

Auf diesen fünf Zielen baut auch das im November 2020 gestartete EU Bioeconomy Monitoring System (EU-BMS) der Europäischen Kommission auf (Kilsedar et al. 2021). Diese von Joint Research Centre (JRC) verwaltete Initiative soll der EU und ihren Mitgliedstaaten ermöglichen, Trends in der Bioökonomie mithilfe von Indikatoren aktiv zu überwachen (EU Kommission o.J.). An die strategischen Ziele werden insgesamt 19 normative Kriterien mit jeweils zwei bis vier Schlüsselindikatoren geknüpft.

Die **Bioökonomiestrategie der Bundesregierung** (BMBF 2020) formuliert sechs strategische Ziele:

1. Bioökonomische Lösungen für die Nachhaltigkeitsagenda entwickeln,
2. Potenziale der Bioökonomie innerhalb ökologischer Grenzen erkennen und erschließen,

3. Biologisches Wissen erweitern und anwenden,
4. Ressourcenbasis der Wirtschaft nachhaltig ausrichten,
5. Deutschland zum führenden Innovationsstandort der Bioökonomie ausbauen,
6. Gesellschaft einbinden, nationale und internationale Kooperationen intensivieren.

Das 1. Arbeitspapier des III. **Bioökonomierats** hat eine Reihe von politischen Strategien und normativen Setzungen als Orientierungspunkte für eine nachhaltige Bioökonomie herausgehoben, die sich thematisch mit den vorangehend aufgelisteten Zielen teilweise überschneiden. Es handelt sich dabei um:

- ▶ Den EU-Green Deal
- ▶ Die neue EU-Biodiversitätsstrategie
- ▶ Das Bundesklimaschutzgesetz
- ▶ Das Bundes-Bodenschutzgesetz
- ▶ Die EU Circular Economy

Als prioritäre Handlungsfelder beschreibt der BÖR dabei:

- ▶ Nachhaltige Land- und Flächennutzung
- ▶ Maßnahmen und Innovationen zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen
- ▶ Stabile Rahmenbedingungen für bioökonomische Innovationen
- ▶ Rohstoffwende („Ressourcen-Shift“ – Defossilisierung)

In Tabelle 8 ist eine Übersicht über Themen, Kriterien oder Indikatoren aus übergreifenden Strategien zur Bioökonomie bzw. damit verflochtenen Bereichen zusammengestellt. Sie lassen sich zu insgesamt sechs Themenkomplexen: Ressourcenschutz, nachhaltige Landnutzung (inklusive Schutz von Biodiversität & Ökosystemleistungen), Klimaschutz, Ernährungs- und Nahrungsmittelsicherheit, Gesundheit und Umwelt sowie Ökonomische Nachhaltigkeit.

Tabelle 8: Übersicht über Themen, Kriterien oder Indikatoren aus übergreifenden Strategien zur Bioökonomie bzw. damit verflochtenen Bereichen

Themenkomplex	EU Green Deal	EU Bioökonomie Strategie	Nationale Bioökonomiestrategie	BÖR Handlungsfelder	EU-Biodiversitätsstrategie	Bundesklimaschutzgesetz	Bundes-boden-schutzstrategie
Ressourcenschutz		Verringerung der Abhängigkeit von nicht erneuerbaren, nicht nachhaltigen Rohstoffen	Umweltgerechte Biomassenutzung/-produktion	Rohstoffwende („Ressourcen-Shift“ – Defossilisierung)			
nachhaltige Landnutzung; Schutz von Biodiversität & Ökosystemleistungen	Naturkapital der EU schützen	Nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen	Landnutzung-sänderung, Biodiversität, Naturschutz	Nachhaltige Land- und Flächennutzung	10 % landwirtschaftliche Fläche wieder als Landschaftselemente mit großer Vielfalt; 30 % Landfläche & Meere der EU unter Schutz, 10 % unter strengen Schutz		Sicherung der Ökosystemleistungen des Bodens
Klimaschutz	bis 2050 eine klimaneutrale Wirtschaft	Verringerung des und Anpassung an den Klimawandel	Minderung von THG-Emissionen	Maßnahmen & Innovationen zur THG-Reduzierung		DE bis zum Jahre 2045 klimaneutral	
	Landnutzungssenne		Senken fördern			Ausbau natürlicher CO2-Senken	310 Mio. t CO2äq pro Jahr im Sektor LULUCF
						Nationaler Emissions-handel ausweiten	
						sektorspezifische nationale Emissionsminderungsziele	
Erährungs- und Nahrungs-mittelsicherheit		Sicherung von Nahrungsmitteln und Ernährung					
Gesundheit und Umwelt	Gesundheit und Wohlergehen vor umweltbed. Auswirkungen schützen				bis 2030 25 % ökologischer Landbau Pestizideinsatz um 50% reduzieren		
Ökonomische Nachhaltigkeit	Abkopplung Wirtschaftswachstum von Ressourcennutzung	Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit, Schaffung von Arbeitsplätzen		Stabile Rahmenbedingungen für BÖ Innovationen			

Zusammenstellung: ifeu

4.1.1.2 Anknüpfungspunkte aus dem Konzept der planetaren Grenzen

Das Konzept der Planetaren Grenzen mit seinem global übergreifenden Ansatz bietet einige Anknüpfungspunkte an die Bewertung von Biomasseproduktion und -nutzung, sprich für die Bioökonomie. Es umfasst nach der jüngsten Aktualisierung (Richardson et al. 2023) folgende Themen, hier gereiht nach dem Rang an Risikostatus:

- ▶ Hochrisikobereich:
 - Klimawandel (CO₂-Konzentration, Strahlungsantrieb)
 - Veränderung von geochemischen Kreisläufen (Stickstoff-, Phosphor-Kreislauf)
 - Veränderung der Integrität der Biosphäre (genetische Vielfalt und funktionale Integrität)
- ▶ Unsicherheitsbereich:
 - Veränderung der Landnutzung
 - Veränderung in Süßwassersystem („Grünes Wasser“, „Blaues Wasser“)
- ▶ derzeit nicht bewertbar, aber jenseits des sicheren Handlungsraums:
 - Überladung mit neuartigen Stoffen
- ▶ sicherer Handlungsraum
 - Zunahme der Aerosolbelastung
 - Ozeanversauerung
 - Ozonabbau in der Stratosphäre

Insbesondere die vier erst genannten Themen sind unmittelbar mit der Bioökonomie verbunden.

4.1.1.3 Nachhaltigkeitsindikatoren für die Bioökonomie

Ansatzpunkte für Priorisierungs-Kriterien für die Biomassenutzung können grundsätzlich auch aus Indikatoren- oder auch Monitoringsystemen für Biomassenutzung bzw. für die Bioökonomie abgeleitet werden. Zahlreiche solcher Systeme wurden in einem vor der Fertigstellung stehenden Vorhaben des UBA *Weiterentwicklung des Monitoringsystem Bioökonomie unter besonderer Berücksichtigung von Aspekten des vorsorgenden Umweltschutzes (MonBio)* analysiert (Best et al. 2025). Dabei stand im Vordergrund, inwieweit diese geeignet sind zur Bewertung von potenziellen Auswirkungen einer Ausweitung der Bioökonomie auf Umwelt und Natur im Zeitverlauf.

Das vom Bundesforschungsministerium (BMBF) geförderte Projekt *Systemische Modellierung und Monitoring der deutschen Bioökonomie (SYMOBIO)* sei hier an erster Stelle genannt. Es betrachtet die Nutzung von Biomasse in Deutschland unter Einbezug der Im- und Exporte. Als Indikatoren werden dabei Fußabdrücke entwickelt zum Verbrauch von Material, dem Verbrauch von Forstholz, der Belegung von Agrarfläche, dem Verbrauch von Wasser und einem Klimafußdruck. Der Pilotbericht aus der ersten Phase von SYMOBIO wurde bereits weiter erwähnt (Bringezu et al. 2020).

Dimensionen der Nachhaltigkeit zur Bioökonomie werden im Kontext von nationalen und EU-Strategien und der Agenda 2030 betrachtet. Neben der Entwicklung von Flächenerträgen und deren (Um-)Nutzung, wird auf Rest- und Abfallströme geblickt. Kaskadennutzungen und

kommende Technologien werden ebenso einbezogen, wie Veränderungen im Konsumverhalten. Als ergänzende Indikatoren werden die Entwicklung holzbasierter Rohstoffverwendung aus Forst-, Landwirtschaft und Reststoffen, die Potenziale an ausgewählten Reststoffen, Nebenprodukten und Abfällen, die Kaskadennutzung in der Holzwirtschaft, die Einsatzmengen von Biomasse-Rohstoffen für Strom- und Wärmeerzeugung sowie Biokraftstoffe betrachtet (Bringezu et al. 2020), (Bringezu et al. 2021).

Mit dem Nachfolgevorhaben SYMOBIO 2.0 erfolgte die Fortentwicklung und Erweiterung der Indikatoren. Eine wesentliche Ergänzung stellt dabei der Biodiversitäts-Fußabdruck dar (Beck-O'Brien et al. 2024).

Als relevant wird in diesem Sinne auch das im November 2020 *gestartete EU Bioeconomy Monitoring System* (EU-BMS) der Europäischen Kommission erachtet (Kilsedar et al. 2021). Diese von Joint Research Centre (JRC) verwaltete Initiative soll der EU und ihren Mitgliedstaaten ermöglichen, Trends in der Bioökonomie mithilfe von Indikatoren aktiv zu überwachen.³⁰ Das Indikatorensystem des EU-BMS baut auf den fünf strategischen Zielen der EU-Bioökonomie-Strategie auf (diese sind in Kapitel 4.1.1.1 aufgeführt). An die strategischen Ziele werden insgesamt 19 normative Kriterien jeweils mit zwei bis vier Schlüsselindikatoren geknüpft.

Im MonBio-Projekt wurden die Indikatoren von weiteren mehr als 50 Konzepten und Systemen analysiert (Best et al. 2025).

Ein wichtiges Rahmendokument für die Bewertung der Nachhaltigkeit von Bioenergie stellen die GBEP Sustainability Indicators (GSI) dar (FAO - GBEP 2011). Wie eine Kurzstudie im Rahmen der GBEP Task Force on Sustainability belegt, sind die GSI im Wesentlichen auch für die Anwendung auf den weiteren Rahmen der Bioökonomie geeignet (Köppen et al. 2022). Dies wird in Abbildung 43 verdeutlicht.

³⁰ https://knowledge4policy.ec.europa.eu/visualisation/eu-bioeconomy-monitoring-system-dashboards_en

Abbildung 43: Auswertung von 19 Referenzarbeiten mit umweltbezogenen Nachhaltigkeitsindikatoren für die Bioökonomie in Bezug auf Übereinstimmung mit den Nachhaltigkeitsindikatoren der GBEP (GSI)

GBEP Indicator (in addition to GSI)		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	Σ
Environmental indicators																				
1	Lifecycle GHG emissions	X	X	X	X		X	X	X	X	(x)	X	X	X	(x)	X	X	X		16
	Land with high carbon stock	X	X	(X)										X	X	(x)		(X)		7
2	Soil quality	X	X	X				X	X					X		X	X	X	X	9
3	Harvest levels of wood resources	X			X		X	X	X	X	X			X		(x)			X	9
4	Emissions of non-GHG air pollutants	X	X	X			X	X	X				X	X	(x)	(x)		X		11
5	Water use and efficiency	X	X	X	(x)		X	X	X	X	(x)							X	X	10
6	Water quality	X	X	X			X	X	X				X	X			X	X	X	10
	Pesticide use	X	X	X					X					X				X		6
7	Biological diversity in the landscape	X	X	X	X		X	X	(x)	(X)	X	X	X	X		X		X	X	14
	Resilience of ecosystems	X						X											X	2
	Ecosystem services	X						(x)			X			(x)				X	X	5
	Buffer zones and corridors																	X	X	1
	No invasive species	X	X	X				X										X		5
8	Land use and land-use change	X		X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				13
	Resource efficiency, waste prevention and waste re-use	X	X	X	X		X	X	X	X	X			X	X			X	X	12
	Energy efficiency	X		X			X	(x)												4
	Waste management	X	(X)	X	X						X			X				X	X	7
	Food loss and waste	X					(x)	X	X	X										5

Quelle: (Köppen et al. 2022)

4.1.1.4 Anwendungsbeispiel für Priorisierungs-Kriterien im Biomassekontext

In dem Forschungsprojekt BioRest (Fehrenbach et al. 2019a) wurde ein Ansatz entwickelt, um ein Gesamtnutzungskonzept für biogene Abfall- und Reststoffe im Energiesystem zu erstellen (siehe Box 1).

Box 1: Anwendungsbeispiel für eine Priorisierung von Nutzungswegen für Biomasse: BioRest

Im Rahmen des Vorhabens BioRest wurde für konkrete Biomassearten geeignete Konversionstechnologien zugewiesen und über einen Kriterienkatalog der unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten optimale Einsatzweg eruiert. Insgesamt 24 biogene Reststoffe und Abfälle mit einem jährlichen Potenzial von rund 210 Mio. Tonnen und mit einem Energiegehalt von insgesamt rund 920 PJ bildeten die stoffliche Basis. Auf der Ebene der Technologien wurden 19 Optionen auf bestmögliche Eignung zur energetischen Nutzung unter Berücksichtigung der jeweiligen Stoffeigenschaften bewertet. Auf dieser Basis wurden die Stoffe und Technologien zu sinnvollen Einsatzpfaden zusammengeführt und dabei auch zugeordnet, welcher Teil des Energiesystems damit jeweils bedient werden kann. Welche Kombinationsmöglichkeiten aus Einsatzpfaden und Energieprodukten zu priorisieren sind, wurde zum Schluss anhand folgender ökologischer, ökonomischer und technischer Kriterien bewertet:

- Energieeffizienz
- Treibhausgasbilanz
- Kostensituation

- Weitere ökologische Aspekte (wie z.B. Luftschadstoffemissionen, Wasserkonsum oder Abwasser)
- Kompatibilität zur Transformation des Energiesystems

Das Ergebnis von BioRest mündet in eine Priorisierung des größten Anteils der Biomassen für die Nutzung zur Wärmeerzeugung (insbesondere für industrielle Wärme). Ausschlaggebend dafür sind die hohe Energieeffizienz sowie hohe Einsparraten in der *Treibhausgasbilanz*. Auf der Kostenseite ist die Wärmenutzung der Biomasse ebenfalls im Vorteil gegenüber der Strom- oder Kraftstofferzeugung beim Vergleich mit fossilen Alternativen und sie weist eher wenig Nachteile in anderen ökologischen Aspekten auf. Ein weiteres Argument liefert das Kriterium der *Kompatibilität zur Transformation des Energiesystems*. Die Deckung des Wärmebedarfs insbesondere in der Industrie ist weit weniger durch andere erneuerbare Quellen zu decken als in den Bereichen Strom und Verkehr.

Die im Rahmen von BioRest angeführten Kriterien lassen sich im vorliegenden Vorhaben auf den ersten Blick ebenso anwenden, da sie fundamentale Aspekte der Nachhaltigkeitsbewertung beschreiben. Sie reichen für den vorliegenden Fall jedoch nicht aus, da anders als in der BioRest-Studie hier nicht nur Abfälle und Reststoffe betrachtet werden, sondern alle Arten von Biomasse, insbesondere auch Anbaubiomasse. Dies zieht zusätzliche Kriterien nach sich bzw. eine Erweiterung der bestehenden Kriterien. Insbesondere die Fragen des Naturschutzes und des natürlichen Klimaschutzes kommen hier ins Spiel, dem mehr Gewicht zukommt, als unter „*weitere ökologische Aspekte*“ subsummiert zu werden.

Darüber hinaus ist einzuräumen, dass für die Bewertung der stofflichen Nutzung von Biomasse andere Mess- und Vergleichsskalen erforderlich sind. Andernfalls droht die Gefahr nicht unerheblicher Fehleinschätzung. Vergleicht man energetische Systeme, so lassen sich die zu substituierenden (fossilen) Referenzen vergleichsweise schlicht definieren: Es ist immer ein Energiewert, mal als Strom, Wärme oder kinetische Energie. Die stoffliche Nutzung dagegen führt zu einer unüberschaubaren Anzahl unterschiedlicher Produkte oder Produktkategorien und jedes einzelne davon benötigt im Grunde ein eigenes Referenzprodukt. Es bedarf hier folglich eines vereinfachten Ansatzes, um dieser Vielfalt zu begegnen und das Verfahren gleichzeitig nicht zu überfrachten.

Dabei kann Bezug genommen werden zu bereits entwickelten Ansätzen zur Nachhaltigkeitsbewertung von stofflicher Biomassenutzung, wie z. B. im UBA-Vorhaben *Ökologische Innovationspolitik - Mehr Ressourceneffizienz und Klimaschutz durch nachhaltige stoffliche Nutzungen von Biomasse*³¹. Die dort formulierten Vorschläge bieten Ansätze insbesondere Kriterien wie die Energieeffizienz und die Treibhausgasbilanz in adäquater Weise sowohl für stoffliche wie energetische Nutzung anwendbar zu machen (Carus et al. 2014).

4.1.1.5 Zusammenfassung der Ausgangsbasis

Der Vorschlag für einen Kriteriensatz setzt auf der in den vorangehenden Kapitel 4.1.1.1 bis 4.1.1.4 beschriebenen Ausgangsbasis auf und reflektiert außerdem Vorarbeiten im Forschungsprojekt (AP1, AP2) und baut auf den dort erzielten Ergebnissen hinsichtlich der Analyse wesentlicher Umweltwirkungen der Biomassenutzung (AP A3) auf.

³¹ Carus et al. (2014): <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/oekologische-innovationspolitik-mehr> (siehe Kapitel 6)

Tabelle 9 fasst die für eine Priorisierung grundsätzlich in Frage kommenden Kriterien aus eben diesen Strategien/Normen sowie aus dem Konzept der Planetaren Grenzen und dem Anwendungsbeispiel BioRest zusammen.

Tabelle 9: Zusammenstellung von Ansätzen zu Priorisierungs-Kriterien aus politischen Strategien/Normen^{a)} sowie aus dem Konzept der Planetaren Grenzen^{b)} und dem Anwendungsbeispiel BioRest^{c)}

Themenkomplex	Aus anderen Strategien und Normen	Planetare Grenzen	BioRest
Ressourcenschutz	• Verringerung nicht erneuerbare Ressourcen • Verringerung Importabhängigkeit • Rohstoffwende	<i>mittelbar</i>	Energieeffizienz
Schutz von Biodiversität & Ökosystemleistungen	• Naturkapital der EU schützen • Schutz der Biodiversität • 10 % der landw. Fläche als Landschaftselemente mit großer Vielfalt • 30 % Landfläche & Meere der EU unter Schutz, 10 % unter strengen Schutz • Sicherung der Ökosystemleistungen des Bodens	• Veränderung der Landnutzung • Veränderung der Integrität der Biosphäre • Veränderung von geochemischen Kreisläufen (Stickstoff-, Phosphor-Kreislauf) • Veränderung in Süßwassersystem • Ozeanversauerung	Weitere ökologische Aspekte
nachhaltige Landnutzung	• Nachhaltige Land- und Flächennutzung • bis 2030 25 % ökologischer Landbau	• Veränderung der Landnutzung	Weitere ökologische Aspekte
Klimaschutz	• EU bis 2050 klimaneutral (DE bis 2045) • Minderung von THG-Emissionen • Förderung natürlicher CO₂-Senken • Nationaler Emissionshandel ausweiten und sektorspezifische Minderungsziele	• Klimawandel	Treibhausgasbilanz
Ernährungs- und Nahrungsmittelsicherheit	Sicherung von Nahrungsmitteln und Ernährung	<i>mittelbar</i>	-
Gesundheit und Umwelt	• Gesundheit und Wohlergehen vor umwelt-	• Überladung mit neuartigen Stoffen	Weitere ökologische Aspekte

Themenkomplex	Aus anderen Strategien und Normen	Planetare Grenzen	BioRest
	- bedingten Auswirkungen schützen • Pestizideinsatz um 50% reduzieren	• Zunahme der Aerosolbelastung • Ozonabbau in der Stratosphäre	
Ökonomische Nachhaltigkeit	• Abkopplung Wirtschaftswachstum von Ressourcennutzung • Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit Europas und Schaffung von Arbeitsplätzen • Stabile Rahmenbedingungen für BÖ Innovationen		Kostensituation
Kohärenz			Kompatibilität zur Transformation des Energiesystems

Zusammenstellung ifeu

a) beinhaltet EU Green Deal, EU-Bioökonomie Strategie, Nationale Bioökonomiestrategie, BÖR Handlungsfelder, EU-Biodiversitätsstrategie, Bundesklimaschutzgesetz, Bundesbodenschutzstrategie

b.) <https://www.pik-potsdam.de/de/produkte/infothek/planetare-grenzen/planetare-grenzen>

c.) (Fehrenbach et al. 2019a)

Die Zusammenstellung in Tabelle 9 dient im Folgenden als Basis für die Ableitung und Definition von Priorisierungskriterien. Dabei ist die Art der Biomasse und der Nutzung stets in Kombination zu sehen. Im Kern geht es schlussendlich um die Priorisierung bestimmter Biomasseströme bezüglich alternativer Nutzungen. Nur in zweiter Linie gilt es auch um die Frage ob bestimmte Biomasseströme gegenüber anderen Biomasseströmen zu bevorzugen sind. Letzteres kann – wie in Kapitel 4.2 angeführt – nur ansatzweise und in grober Kategorisierung erfolgen.

4.1.2 Notwendige Grundlage: Welches Biomassepotenzial steht nachhaltig zur Verfügung?

Eine Priorisierung von unterschiedlichen Nutzungsweisen von Biomasse auf dem Prinzip der Nachhaltigkeit setzt ein Verständnis voraus, welches Potenzial an Biomasse überhaupt nachhaltig und umweltgerecht zur Verfügung steht. Die Bevorzugung einer bestimmten Nutzung kann jenseits einer quantifizierten Grenze der Nachhaltigkeit nicht mit Kriterien der Nachhaltigkeit begründet werden.

Die zwei Fragestellungen – nachhaltiges Potenzial einerseits und priorisierte Nutzung andererseits – erscheinen auf den ersten Blick als unabhängig voneinander. Bei der Definition von Priorisierungskriterien zeigen jedoch Wechselbeziehungen und Abhängigkeiten, wobei zwei Faktoren sind dabei maßgeblich sind:

- Das oberste der fünf strategischen Ziele der Bioökonomie seitens der EU lautet *Nahrungsmittel- und Ernährungssicherheit* (siehe in Kapitel 4.1.1.1). Dies bedeutet im Grunde eine vorab-Priorisierung: vor allen anderen Biomassenutzungen muss die Verfügbarkeit für

den erforderlichen Bedarf an Lebensmitteln sichergestellt sein. Biomasse für Nahrungsmittel und solche für andere Nutzungen sollen nicht miteinander konkurrieren und anhand von „technischen“ Kriterien zugeteilt werden. Es bedarf somit eines vorausgehenden Schritts der Abgrenzung einer Menge vom verfügbaren Biomassepotenzial für die Ernährungssicherheit. Dies wiederum setzt einen Ansatz voraus, wie diese für die Ernährung erforderliche Menge³² zu definieren ist. Solche Ansätze werden im folgenden Kapitel 4.1.3 erörtert.

- In der Aufgabenstellung zu diesem Vorhaben wird den Themenbereichen des *Biodiversitäts- und Naturschutzes* sowie der *Landnutzung und Landnutzungsänderung* große Bedeutung beigemessen. Für eine Priorisierung von Biomassenutzungen müssen diese Themen bereits mit der Biomasseproduktion abgearbeitet werden. Die Frage, welche Art der Nutzung für die erzeugte Biomasse erfolgt, stellt sich für diese Themen im Grunde erst an zweiter Stelle. Eine Güterabwägung, in welcher ein mehr oder weniger schwerer Eingriff in die Natur für eine bestimmte Nutzung (z. B. Herstellung eines bestimmten Materials) eher akzeptabel wäre als für eine andere Nutzung (z. B. als Brennstoff) ist im Rahmen dieses Vorhabens nicht Ziel. Eine Ausnahme bildet hier lediglich die vorangehend angesprochene Biomasseproduktion zu Nahrungszwecken, der besondere Priorität eingeräumt wird. D.h. es bedarf einer Potenzialanalyse zur Ermittlung der Biomassemenge, die der Bioökonomie nach restriktiver Abgrenzung durch Kriterien des Naturschutzes, der Biodiversität sowie der für Ernährung zur Verfügung steht.

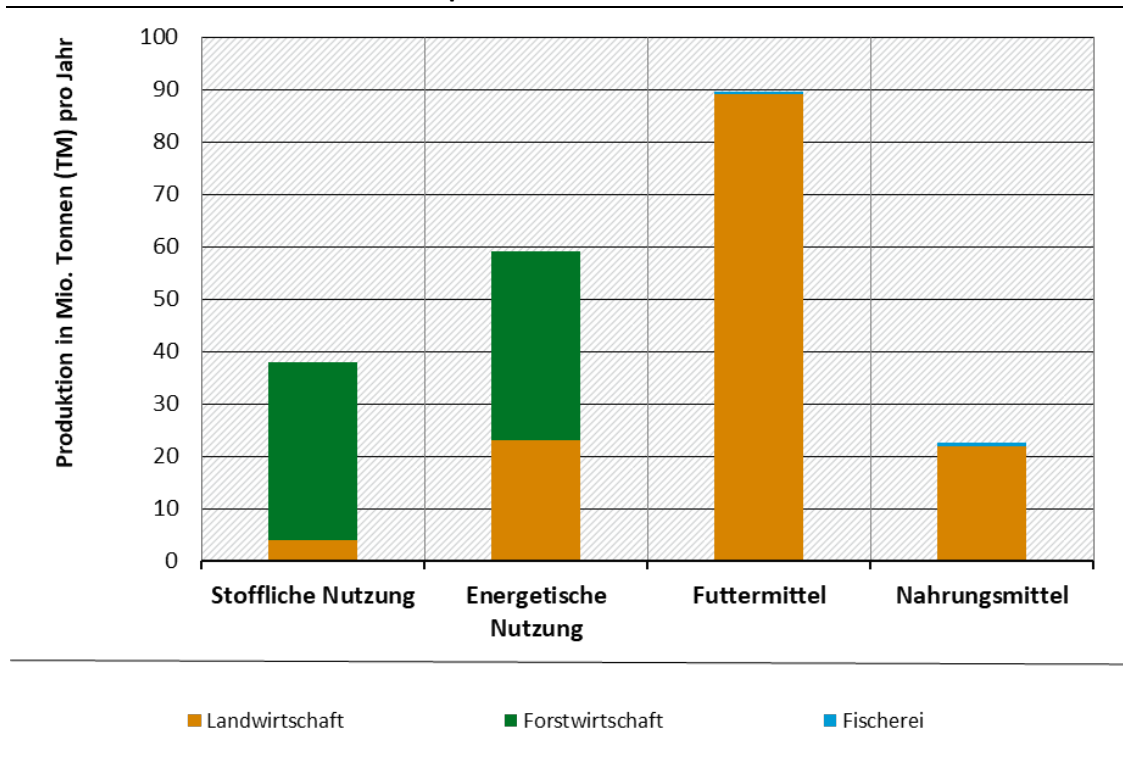
4.1.3 Besondere Betrachtung der Nahrungs- und Futtermittel

Wenn es um die Frage der Priorisierung von Biomassenutzungen geht, ist es nahezu unumstritten, dass oberste Priorität der Nahrungsmittelsicherheit gilt. Einfache und eingängige Formeln wie „Food First“ wirken hier selbstverständlich. Umso bemerkenswerter ist es, dass diese Priorisierung bislang an keiner Stelle durch normative Maßnahmen gesetzt oder adressiert wird.

Betrachtet man, wie sich die aktuelle Nutzung von Biomasse in Deutschland verteilt, so wird nicht nur das Hauptgewicht des Nahrungssektors deutlich, sondern ebenfalls die Dominanz der darin enthaltenen Futtermittel (siehe Abbildung 44 und Abbildung 45). Dies wirft bereits ein erstes Konfliktfeld bezüglich möglicher Ansatzpunkte auf. Setzt man „Food First“ als Prämisse, wie verhält es sich dann mit der Art der Lebensmittel - „Food First – inklusive tierische Produkte“? Eine normative Setzung ist in diesem Kontext problematisch. Allerdings liegen fundierte Empfehlungen dazu, wie eine gesundheitlich und auch durchaus unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten adäquate Ernährung definiert werden kann, vor. Beispiele werden weiter unten erörtert.

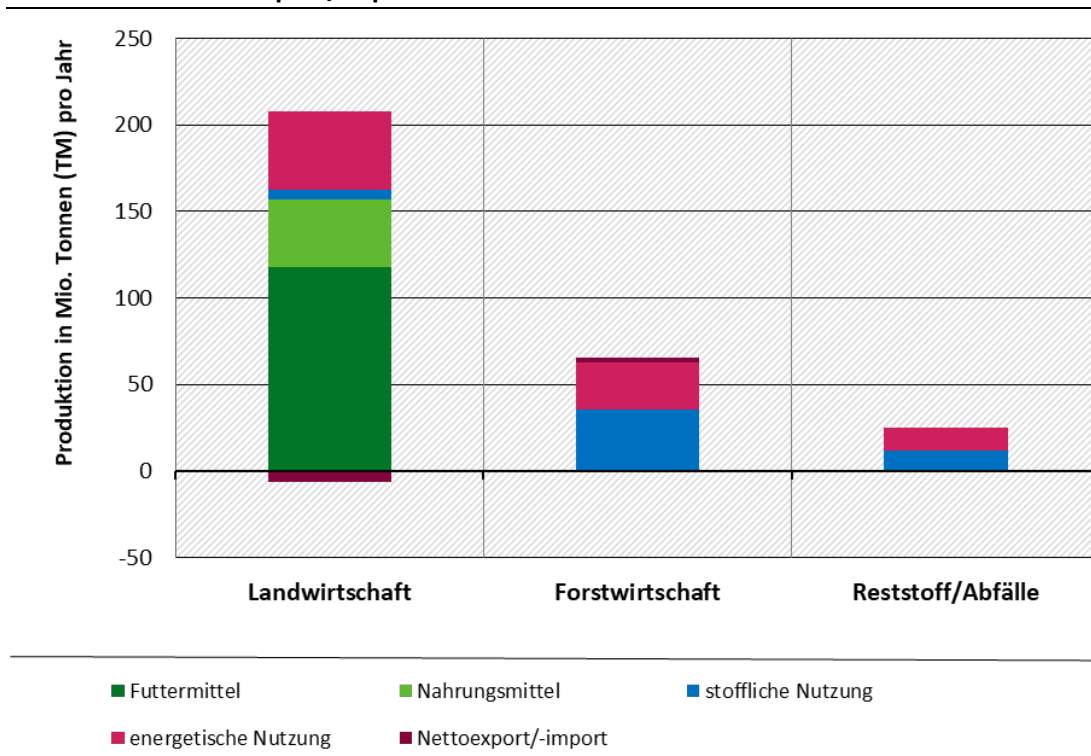
³² Und dabei geht es nicht allein um die Menge, sondern auch um gesunde und vollwertige Ernährung.

Abbildung 44: Nutzung von Biomasse in Deutschland – inklusive der importierten Warenströme und exklusive der Exporte



Quelle: eigene Darstellung anhand Daten aus (Bringezu et al. 2020)

Abbildung 45: Nutzung von primärer Biomasse und biogenen Restabfallstoffen in Deutschland – mit Export/Import-Saldo



Quelle: Berechnungen ifeu, eigene Darstellung

Bei der Priorisierung der Nutzung von Biomasse ist daher die Forderung nach einer Ernährungswende und deren Gründe zu berücksichtigen. Die Frage der Ernährungswende ist jedoch ein gesellschaftlich hoch komplexes Thema, für welches im Rahmen dieser Arbeit drei Eckpunkte definiert werden:

1. Die Gewährleistung der Ernährungssicherheit³³ muss eine Grundvoraussetzung für jegliche Art der Biomassenutzung sein.
2. Ernährungssicherheit bedeutet nicht, dass jegliche Art der Nahrungsmittelproduktion damit frei von Nachhaltigkeitskonflikten sei und auch nicht, dass der Status quo der Ernährungsweise nicht zu hinterfragen sei. Es wird jedoch als über die Aufgabenstellung dieses Vorhabens deutlich hinausreichende Frage erachtet, wie eine nachhaltige Ernährung zu definieren ist bzw. welcher Anteil an tierischen Produkten in der Ernährung (noch) als nachhaltig gelten kann. Hier können folgende, z.T. oben angesprochene Beispiele (siehe Kapitel 3.5.1) angeführt werden:
 - a. Empfehlungen der Deutschen Gesellschaft für Ernährung e. V. (DGE). Im Jahr 2017 betrug der Pro-Kopf-Verzehr von Fleisch 62,4 kg Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (2019), während die DGE eine Menge von 300 – 600 g / Woche empfiehlt (DGE 2017). Das entspricht einem jährlichen Pro-Kopf-Verbrauch von ungefähr 15,6 – 31,2 kg. (Köppen, Rettenmaier 2023),
 - b. EAT Lancet (Willett et al. 2019):
Danach soll der Konsum von Obst und Gemüse, Hülsenfrüchten und Nüssen ungefähr verdoppelt, der Verzehr von Fleisch und Zucker dagegen halbiert werden. Außerdem müssten die Lebensmittelproduktion verbessert und Lebensmittelabfälle stark reduziert werden. Auf dieser Basis könnten bis zum Jahr 2050 etwa 10 Milliarden Menschen auf der Erde gesund zu ernähren, ohne den Planeten zu zerstören.
 - c. KlimaTeller (KlimaTeller 2024):
Basierend auf der Studie des (WWF 2012) bietet diese Anwendung³⁴ Gerichtzubereitungen an, die zu weniger als 50% Treibhausgasmissionen verursachen gegenüber durchschnittlichen Gerichten.
3. Die Produktion von Nahrungs- und Futtermitteln wird analog zu anderen Biomassenutzungen anhand von Umwelt- und Naturschutzaspekten eingeordnet. Nahrungs- und Futtermittel werden dabei durchaus differenziert betrachtet, jedoch ohne dabei bestimmte Erzeugnisse gegenüber anderen explizit zu priorisieren. In Einzelfällen sollen jedoch besonders negativ oder positiv zu wertende Erzeugnisse auch als solche herausgestellt werden.

Eine Ernährungswende mit einer Verlagerung von mehr pflanzlicher gegenüber tierbasierter Nahrung würde außerdem in großem Umfang Flächen freisetzen, die einerseits für die stoffliche oder energetische Biomassenutzung zur Verfügung stünden, andererseits aber auch für die Ausweitung des Ökolandbaus oder andere Nachhaltigkeitsziele der BReg, auch im Bereich Naturschutz, genutzt werden könnten.

³³ Gemäß FAO ist Ernährungssicherheit gegeben, wenn alle Menschen zu jeder Zeit physischen und ökonomischen Zugang zu genügend und sicherer Nahrung haben und die diätischen Bedürfnisse sowie die Präferenzen für ein gesundes und aktives Leben sichergestellt werden können.“ (FAO 2006)

³⁴ app.klimateller.de

Der Nahrungsmittelbereich wirft im Übrigen auch eine methodische Problematik auf, wenn es um generell für Biomassenutzung eingesetzte Priorisierungs-Kriterien geht: Hier fehlt eine eindeutige Referenz, sprich ein Produkt, das durch ein (nicht-biogenes) Produkt substituiert werden kann, wie es bei stofflicher und energetischer Biomassenutzung der Fall ist. Eine Referenz wäre nur gegeben, wenn verschiedene Ernährungsmuster und –szenarien ausgestaltet vorliegen und miteinander verglichen werden (z.B. fleischbetonte Ernährung, vegetarisch, vegan oder Bioprodukte vs. konventionelle, oder regionale Produkte vs. globaler Markt). Solche Szenarien und deren Auswertung gehen jedoch weit über den Rahmen und das Ziel dieses Vorhabens hinaus. Es wird daraus jedoch nochmals deutlich, dass Nahrungsmittel einerseits und stoffliche/energetische Biomassenutzung andererseits nicht anhand einheitlicher Nachhaltigkeitskriterien gegeneinander bewertet werden können.

Der Bereich der Nahrungs- und Futtermittel wird von der Nachhaltigkeitsbewertung jedoch nicht ausgegrenzt, sondern einer eingeschränkten Betrachtung unterzogen bzw. ihm kommt im Rahmen der Anwendung der Kriterien für die Skizzierung eines Gesamtnutzungskonzepts eine Sonderrolle zu (siehe hierzu unter Kapitel 4.3.3).

4.1.4 Geographischer Rahmen

Eine Nationale Bioökonomiestrategie muss beide Blickwinkel berücksichtigen:

1. Die **Biomasseproduktion** im Inland, was auch Produkte, die in den Export gehen, einbezieht.
2. Der **inländische Konsum an Biomasseprodukten**, was importierte Waren beinhaltet, die exportierten Produkte andererseits ausschließt.

Die importierten Mengenanteile sind durchaus relevant, wie die Analyse im Pilotbericht zum Monitoring der deutschen Bioökonomie (Bringezu et al. 2020) zeigt. Danach importiert Deutschland pro Jahr 72 Mio. Tonnen (Trockenmasse) Biomasse in Form von Rohstoffen und verarbeiteten Waren. Das sind 37 % der in Deutschland genutzten Biomasse. Gleichzeitig exportiert Deutschland mit 65 Mio. Tonnen zwar etwas weniger Biomasse, aber in ähnlicher Größenordnung wie das Importvolumen. Daher liegt die Höhe der Inlandsproduktion (190 Mio. Tonnen) knapp ähnlich hoch wie die Inlandsnutzung (197 Mio. Tonnen). Mit der importierten Biomasse können jedoch völlig andere Auswirkungen auf die Umwelt und Naturschutzaspekte verbunden sein, als mit der inländisch produzierten Biomasse. Beispielhaft kann als besonders relevanter Fall der Import an Soja als Futtermittel aus Brasilien herausgestellt werden, dem Land, welches aufgrund massiver Ausdehnung der Anbaufläche sich weiter stark ausweitete und mit 163 Mio. t Sojabohnen längst weit an der Spitze der Erzeugerländer steht³⁵ – mit der Folge fortschreitender Entwaldung in der Amazonas-Region wie auch im Cerrado (Campos et al. 2022).

Im Übrigen gilt die mehr oder weniger ausgeglichene Massenbilanz nicht für die Flächenbilanz. Nach Destatis (2019)³⁶ weist Deutschland durch seinen Inlandsverbrauch von Ernährungsgütern ein Flächendefizit von 5 Mio. Hektar auf. Nach dem UBA-Ressourcenbericht für Deutschland 2022 (Lutter et al. 2022) ergaben im Jahr 2018 alle Landwirtschafts-, Weide- und Waldflächen für in Deutschland konsumierte Güter einen Flächenfußabdruck von weltweit

³⁵ <https://de.statista.com/infografik/19136/erntemenge-der-fuehrenden-anbaulaender-von-sojabohnen/>

³⁶ Statistisches Bundesamt (destatis) (2019): Umweltökonomische Gesamtrechnungen - Flächenbelegung von Ernährungsgütern 2010 - 2017

74 Mio. ha – somit ist der deutsche Flächenfußabdruck mehr als doppelt so groß wie die Fläche Deutschlands.

Für die Definition von Kriterien für die Priorisierung der Biomassenutzung wird die Frage, ob die Biomasse aus dem Inland kommt oder importiert wird, keine Rolle spielen. Anders gesagt, für inländische wie auch importierte Biomasse muss der gleiche Maßstab gelten. Das kann dazu führen, dass z. B. Biomasseströme, die mit erheblichen Risiken für Biodiversität durch Landnutzungsänderungen verbunden (konkret solche Biomassen wie Palmöl oder Soja)³⁷ sind auch entsprechend nachteilig zu bewerten sind. Allerdings entfallen für die Erzeugung importierter Biomasse jegliche Steuerungsmechanismen bezüglich alternativer Nutzung aus der Perspektive der deutschen Politik bzw. dem Empfehlungsrahmen eines deutschen Bioökonomierats. Hier können die Empfehlungen lediglich auf einen Verzicht oder – im Rahmen des rechtlich Möglichen – auch ein Importverbot bzw. eine Importbeschränkung (mittels Auflagen) hinauslaufen.

Dies bedeutet, dass – wenngleich die Ansatzpunkte für einen Steuerungsmechanismus auf Biomasse generell ausgerichtet sein müssen (d.h. grundsätzlich auch auf importierte Biomasse) – in der konkreten Anwendung die inländisch produzierte bzw. anfallende Biomasse im Vordergrund stehen wird.

4.2 Definition von Biomasseströmen und Biomassenutzungen

Im Folgenden werden sowohl die Biomasseströme als auch die Nutzungen anhand übergreifender Typisierung definiert. Eine solche Typisierung der Biomasseströme erfolgt anhand der in Tabelle 10 gegebenen Aufschlüsselung. Dabei geht es hierbei nicht darum, ein vollständiges und hochdifferenziertes Inventar aufzustellen, sondern die für die Bioökonomie relevanten Hauptströme zu berücksichtigen und zu beschreiben. Die Darstellung der mit den Biomasseströmen verbundenen Mengen (Status quo und Abschätzung für die Zukunft) gibt außerdem einen Hinweis für die quantitative Relevanz einzelner Ströme.

Tabelle 10: Typisierung von Biomasseströmen

Herkunft	Stofflicher Charakter	Konkrete Arten
Anbaubiomasse, agrarisch	Öl-/Proteinpflanzen	- Raps - Sonnenblumen - Soja - etc.
	Stärkepflanzen	- Weizen - Roggen - Mais - etc.
	Zuckerpflanzen	Zuckerrübe
	Faserpflanzen	- Baumwolle - etc.
	Arzneipflanzen	Hochdiverse Arten

³⁷ https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/P-9-2023-002310_EN.html#def3

Herkunft	Stofflicher Charakter	Konkrete Arten
	Energiepflanzen (Ganzpflanzen)	- Mais - Miscanthus - etc.
	- Holz aus Kurzumtriebsplantagen - aus Agroforsten - aus weiteren Agrarhölzen (z.B. Hecken)	- Pappel - Weiden - Diverse Gehölzarten
Anbaubiomasse, forstlich	- Waldholz als Stammholz, - Industrieholz - Waldrestholz, - Rinde	- Laubholz (Buche, Eiche etc.) - Nadelholz (Fichte, Kiefer etc.)
In Bioreaktoren erzeugte Biomasse	- Mikroalgen, - Bakterien	
Landschaftspflegematerial	Grüngut etc.	
Agrarische Reststoffe	- Getreidestroh, - Ernterückstände, - Gülle, Mist. - etc.	
Industrielle Reststoffe	- Industrierestholz, - Gebrauchte Fette/Öle - Tallöl - Schwarzlauge - etc.	
Siedlungsabfälle	- Altholz, - Bioabfall, - kommunaler Klärschlamm etc.	

Zusammenstellung: ifeu

Ebenfalls nur orientierenden Charakter hat die Aufstellung der Biomassenutzungen in Tabelle 11, da sich auch hier mannigfaltige Optionen eröffnen.

Tabelle 11: Typisierung von Biomassenutzungen

Nutzungskategorie	Nutzungsgut	Nutzungsgut, weiter spezifiziert
Energetische Nutzung	Strom	- Grundlast - Mittellast - Spitzenlast
	Wärme	- Gebäudewärme (dezentral) - Gebäudewärme (Wärmenetz) - industrielle Wärme
	Kraftstoffe	- Biodiesel (Straßenverkehr) - Ethanol (Straßenverkehr) - Bio-Kerosin - Schiffstreibstoff

Nutzungskategorie	Nutzungsgut	Nutzungsgut, weiter spezifiziert
Stoffliche Nutzung	• Basischemikalien	• Ethanol • Methanol • etc.
	• Spezialchemikalien	• Additive
	• Polymere	• Biokunststoffe, Komposite
	• Fasern	• Textilien • Zellstoffprodukte • Neuartige holzbasierte Produkte
	• Vollholz	• Bauholz • Möbel • Verpackungsholz
	• Holzwerkstoffe	• Bauholz • Möbel • Verpackungsholz
	• Biotechnische Nutzung	• Nahrungsergänzungsmittel • Enzyme • Pharmaka

Zusammenstellung: ifeu

Nicht alle Biomassearten sind geeignet oder werden verwendet für alle Nutzungsarten. In Abbildung 46 wird aus den Biomasseströmen und Biomassenutzungen in Form einer Matrix sinnvolle Kombinationen gebildet, die für die spätere Anwendung der Priorisierungs-Kriterien zu Grunde gelegt werden (siehe Kapitel 4.4).

Die Betrachtung zieht importierte und in Deutschland genutzte Biomassen mit ein. Diese können nicht außer Acht gelassen werden, da sie u. U. größere Konflikte mit Umwelt- und Naturschutz mit sich führen können. Die Priorisierung zielt im Rahmen dieser Arbeit allerdings vorrangig auf die Nutzung. Ob bestimmte Biomasseströme gegenüber anderen Biomasseströmen zu bevorzugen sind, steht dabei nicht im Vordergrund. Eine solche Bewertung würde nochmals spezifischere Kriterien und sehr detaillierte Analysen erfordern, da damit Wertungen verbunden wären, wie z. B.: „Welche Ölpflanze ist nachhaltiger gegenüber anderen?“

Wo die Anwendung der Kriterien eindeutige Aussagen in diese Richtung zulässt, werden solche Wertungen auch im Rahmen dieser Arbeit möglich sein. Dies erfolgt in Kapitel 4.4 anhand eines in Kapitel 4.3.4 beschriebenen Kriterienvorschlags.

Abbildung 46: Kombinationsmatrix von Biomasseströmen und Biomassenutzungen

BIOMASSESTRÖME		Biomassenutzungen										Energetische Nutzung				
		Stoffliche Nutzung			Fasern		Holzprodukte		Labortechnische Produkte			Strom	Raumwärme Einzel-gebäude	Wärmenetz	ind. Wärme	Kraftstoffe
		Chemie, Polymere	Biokunststoffe	Komposite	Textilien	Zellstoffprodukte	Vollholz	Holzwerkstoffe	Nahrungs-ergänzungs-mittel	Enzyme	Pharmaka					
Anbaubiomasse, agrarisch	Ölpflanzen															
	Stärkepflanzen															
	Zuckerpflanzen															
	Faserpflanzen															
	Energiegräser															
	Kurzumtriebsplantagen															
Anbaubiomasse, forstlich	Arzneipflanzen															
	Waldholz als Stammholz															
	Industrieholz oder Waldrestholz															
Landschaftspflegematerial	Rinde															
	Grüngut etc.															
Agrarische Reststoffe	Getreidestroh															
	Ernterückstände															
	Gülle, Mist															
Industrielle Reststoffe	Industrierestholz															
	Fette/Öle,															
	Tallöl															
	Schwarzlauge															
Siedlungsabfälle	Altholz															
	Bioabfall															
	kommunaler Klärschlamm															
Technisch erzeugte Biomasse	Mikroalgen															
	Bakterien															
	Enzyme															

Quelle: Zusammenstellung ifeu

Kritisch ist dies insbesondere auch im Kontext importierter Biomasse zu sehen. Das viel beschriebene Beispiel Palmöl zeigt, welche Konfliktfelder hier auftreten können und wie gleichzeitig komplex sich die Sachlage darstellt. So führt Palmöl aufgrund seiner starken Wettbewerbsfähigkeit auf dem Weltmarkt zu weiterwachsenden Anbauflächen und einem damit verbundenen Verlust von tropischen Waldgebieten. Die EU-Kommission weist Palmöl als „Rohstoff mit hohem Risiko indirekter Landnutzungsänderungen“ aus.³⁸ Gleichzeitig zählt Palmöl zu den Ölpflanzen mit dem höchsten Flächenertrag, ist somit vergleichsweise flächeneffizient. Ein alleiniger Bann auf dieses Erzeugnis muss angesichts der bestehenden (und ggf. wachsenden) Nachfrage nach Pflanzenöl auf dem Weltmarkt nicht zur Verringerung von Landnutzungsdruck führen, wenn der Bedarf durch weniger flächeneffiziente Ölpflanzen gedeckt wird. Dennoch – oder gerade deshalb – müssen für neue zusätzliche Nachfragen solcher Rohstoffe, hinterfragt werden, woher sie künftig stammen sollen.

4.3 Vorschlag für einen Satz an Kriterien zur Priorisierung

4.3.1 Grundprinzipien und Detailtiefe der Bewertung anhand von Kriterien

Die Aufgabe besteht darin anhand der Kriterien folgende Fragen zu beantworten:

- ▶ Welche Biomassenutzungen sind unter Umwelt- und Naturschutzaspekten als umweltgerecht zu priorisieren?
- ▶ Welche Biomassenutzungen sind im Umkehrschluss nicht umweltgerecht zu gestalten und sollten deshalb eingeschränkt werden?

Sind die Kriterien in ihren Themen benannt, gilt es weitere Punkte festzulegen, bei deren Diskussion deutlich wird, dass grundsätzlich unterschiedliche Herangehensweisen möglich sind und sinnvoll sein können. Dabei handelt es sich um folgende Fragen:

1. Ist die Auswahl der Kriterien ausreichend für die Aufgabenstellung? Werden dabei Aspekte übersehen?

Während wie z.B. beim *EU Bioeconomy Monitoring System* (Kilsedar et al. 2021) grundsätzlich eine hohe Anzahl an Kriterien und Indikatoren denkbar sind, zielt der Ansatz hier auf eine überschaubare, jedoch durchaus thematisch breite Auswahl. Das bedeutet aber auch, dass hier nicht auf alle u.U. für bestimmte Fälle relevanten Aspekte und Wirkungseffekte eingegangen werden kann. Für spezifischere Betrachtungen, wenn z. B. konkretere Nutzungsoptionen bewertet werden, wären ggf. auch weitere Kriterien einzuführen (z. B. spezifischere Ressourcenparameter wie Phosphor oder Wasser oder konkrete Toxizitätsindikatoren).

2. Wie differenziert soll bei der Bewertung vorgegangen werden? Wie viel Vereinfachung ist zu rechtfertigen?

Die Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse sind innerhalb der großen Kategorien stoffliche und energetische Nutzung extrem vielfältig. Dies gilt insbesondere im stofflichen Bereich, in welchem die Betrachtung von sehr spezifischen Produkten auch ein sehr spezifisches Vorgehen bei der Bewertung verlangen würde. Im Rahmen dieser Studie kann auf diese differenzierte Vielfalt jedoch nicht eingegangen werden. Die notwendige Vereinfachung führt somit dazu, dass die hier durchgeführte Vorgehensweise für die Bewertung spezifischer Produkte im Zweifelsfall nicht ausreichend abdeckt. Umgekehrt bedeutet dies, dass außerhalb der hier durchzuführenden

³⁸ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R0807>
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52019DC0142&from=EN>

Bewertung für gesonderte Fälle auch passgenauere Bewertungen (z.B. Ökobilanzen) durchgeführt werden können und sollten.

3. Sind durchgängig quantifizierbare Kriterien erforderlich oder sollen auch qualitative Einschätzungen zulässig sein? Und wie vereinigt man die verschiedenen Kriterien (ob quantitativ oder qualitativ) zu einem Gesamtergebnis?

Für bestimmte Kriterien wie die Einsparung von Treibhausgasemissionen oder auch Ressourceneffizienz ist eine Quantifizierung selbstverständlich. Für andere Kriterien ist eine Quantifizierung anhand einer numerischen Indikatorgröße eher schwierig, wie z.B. für *Substitutionsrelevanz*. Hierfür werden Einschätzungen anhand von Argumenten als geeigneter angesehen. Dies wirft aber die Frage auf, wie diese Einschätzungen in Wertergebnisse überführt werden. Eine übliche Vorgehensweise wäre hier, von einer qualitativen Einschätzung in einer ordinalen Skala (z.B. gut, mittel, schlecht – oder weiter differenziert) auf Erfüllungspunkte (1, 2, 3) oder ganz ohne Zahlen auf eine Farbskala (grün, gelb, rot) zu schließen. Diese Vorgehensweise ist unvermeidlich mit subjektiven Wertungen verbunden. Sie erfordert Transparenz bei der Begründung und auch im Hinblick darauf, wie dies die Ergebnisbildung beeinflusst.

Ein weiterer Schritt, der nicht ohne stark subjektive Werthaltung durchführbar ist, ist die Zusammenführung der verschiedenen Kriterien zu einem Gesamtergebnis. Dies erfordert in den beschriebenen Beispielen eine Abwägung von x kg CO₂Äq. im Kriterium Klimawandel mit einem Punktwaltergebnis von y für ein Kriterium Substitutionsrelevanz, insbesondere sofern die quantitativen Bilanzergebnisse mit Punktwerte aggregiert werden. In selbem Maß müssen hier daher Transparenz und eine Prüfung der Sensitivität der Vorgehensweise sichergestellt werden.

Ein grundsätzlich alternativer Ansatz könnte so aussehen: Quantifiziert wird allein die THG-Bilanz mit dem Argument, dass der Klimaschutz einen zentralen Treiber für eine Förderung der Bioökonomie darstellt. Die anderen Kriterien könnten zur Prüfung eingesetzt werden, ob das THG-Ergebnis gestützt wird oder inwieweit gegenläufige Aspekte vorliegen. Da die Bioökonomiestrategie, wie die Analysen in Kapitel 2.3 zeigen, jedoch differenzierte Kriterien sinnvoll erscheinen und Klimawandel nicht allein im Vordergrund steht, wird für die vorliegende Aufgabe ein Ansatz ausgewählt, der die verschiedenen Kriterien mehr oder weniger gleichrangig nebeneinanderstellt.³⁹

4. Mit welcher Bezugsgröße sollen die unterschiedlichen Nutzungsoptionen verglichen werden?

Die Bewertung verschiedener Nutzungsoptionen von Biomasse erfordert – zumindest für quantifizierte Kriterien – eine einheitlichen Bezugsgröße. Wegen der Unterschiedlichkeit der Produkte ist der Bezug auf eine (nicht vorhandene) einheitliche Outputgröße kompliziert. Dies ist anders für Bezugssysteme wie die RED, welche nur Energienutzung betrachtet und sich als Bezugsgröße der energetische Nutzwert der Biomasse mit der Bezugsgröße 1 MJ vereinheitlichen lässt.⁴⁰ Wegen dieser Problematik, bietet sich der Biomasse-Input als Bezugsgröße an, z. B. in Form von 1 kg Biomasse (Trockenmasse) oder 1 kg Kohlenstoff. Bei agrarisch produzierten Biomassen könnte die Input-Referenz auch die belegte Fläche in Hektar sein. Für forstliche Biomasse (Waldholz) gilt dies gleichermaßen.

³⁹ Auch in Ökobilanzen werden die Umwelteffekte eines Produkts oder einer Dienstleistung anhand mehrerer Wirkungskategorien beurteilt, wie auch in den für das UBA erarbeiteten Methodenvorschlägen zur Ökobilanz (Detzel et al. 2016)

⁴⁰ Wobei auch hier auf gleichen Energieniveaus geachtet werden muss: 1 MJ Biobrennstoff kann nicht mit 1 MJ Strom verglichen werden, sondern nur auf der gleichen Ebene – entweder auf Nutz- bzw. Endenergieebene (Strom mit Strom) oder Brennstoffebene (Primärenergie mit Primärenergie).

Auf der anderen Seite ergibt eine Bezugsgröße auf den Biomasseinput bezogen keinen Sinn für die Anwendung eines Indikators für die Rohstoffeffizienz. Diese schließt das Verhältnis Produkt zu Rohstoff zwingend ein. Da ein solcher Indikator als besonders relevant eingeschätzt wird, bedarf es einer Lösung für eine Output-bezogene Bezugsgröße. Diese kann wie folgt aussehen: Bezugsgröße ist die Masse Kohlenstoff im zuletzt als Material vorliegenden Produkt. Im Fall einer energetischen Nutzung wäre das 1 kg C in Holzhackschnitzel oder in Holzpellets. Diese Bezugsgröße kann für die Ressourceneffizienz wie auch für das Kriterium Klimawandel verwendet werden.

Hier wäre folgender alternativer Ansatz möglich, der nicht die einzelnen Produkte nebeneinander vergleicht, sondern verschiedene Szenarien definiert zur Nutzung der gesamten nachhaltig verfügbaren Biomasse (diese wird in Kapitel 2.2 beschrieben). Hierfür wären die Bedarfe der einzelnen Nutzungsoptionen festzulegen, z.B. in Form eines Vergleichs des Status quo zu Szenarien mit verschiedenen gesetzten Priorisierungen (z. B. Ausbau des Einsatzes als Bauholz oder verstärkte Nutzung des aktuell als Energieholz verwendeten Waldholzes für stoffliche Zwecke oder Ausdehnung der Energieholzes). Gegen diesen Ansatz spricht, dass der Vergleich von einzelnen Nutzungsoptionen ein kompakteres Bild über eine größere Anzahl an Optionen erlaubt. Der Ansatz über Szenarien würde andererseits die Integration von Kaskadennutzung ermöglichen, wie im folgenden Punkt nochmals erläutert wird.

5. Sollen Nutzungsoptionen als Einzelsysteme gegeneinander bewertet werden oder ist eine Bewertung von Stoffnutzungsszenarien (z.B. mit integrierten Kaskadennutzungen) zielführender?

Mit einer stofflichen Nutzung wird zumeist die Möglichkeit einer Kaskadennutzung verknüpft. Die Bewertung von nutzengleichen Produkt-Systemen einmal mit und einmal ohne Kaskade anhand einer „klassischen“ Produkt-Ökobilanz führt allerdings zu keiner (maßgeblichen) Differenzierung in der Quantifizierung der Umwelteffekte. Unter dem Strich gleichen sich in Produkt-Ökobilanzen die Ergebnisse in den verglichenen Systemen aus. Wie in früheren UBA-Vorhaben erkannt, benötigen Umweltbewertungen für die Kaskadennutzung daher umfassende Stoffstrombilanzen, die die gesamte Kaskade integriert bewertet (Fehrenbach et al. 2017b). Eine solche Betrachtungsweise integriert und fördert automatisch den Ansatz der Zirkularität beziehungsweise Kreislaufwirtschaft. Den Lasten einer gesamten Kaskade werden dann die vermiedenen Lasten durch sämtliche ersetzte äquivalente Produkte (siehe der folgende Punkt 6.) gegenübergestellt.

Dies wäre auch für den hier vorliegenden Fall der zu bevorzugende Ansatz. Er ist jedoch vergleichsweise aufwändig, weil hierzu komplexe und umfangreiche Modellrechnungen für jede Art der Nutzung durchzuführen sind.⁴¹ Aus diesem Grund wird auf den Ansatz hier verzichtet und stattdessen die Nutzungsoptionen in den Kriterien mit Quantifizierungen (das sind Materialeffizienz und Klimaschutz) in Form von Einzelsystemen mit vergleichsweise scharf zu geschnittener Systemgrenze bilanziert, wo. Für die energetische Nutzung von primärer Biomasse schließt sich eine Kaskade sowieso aus. Für die stoffliche Nutzung wird der Verbleib nach dem Lebenswegende des primären Produkts außer Acht gelassen (cut-off).

6. Wie soll mit Referenzsystemen umgegangen werden?

⁴¹ Eine solche Vorgehensweise wäre sinnvollerweise mit dem unter Punkt 3. angeführten alternativen Ansatz mit ausschließlicher aber dann sehr umfassender Quantifizierung der THG-Bilanz.

Bei der Quantifizierung von Wirkungsaspekten der Biomassenutzung ist entscheidend, ob und in welcher Weise die kontrafaktische Seite berücksichtigt wird: Wie müsste man, würde die Biomasse nicht in der betrachteten Weise genutzt, diese Nutzung durch nicht-biogene Rohstoffe/Produkte bereitstellen und was wären deren Auswirkungen? Anders gesagt: Welche negativen Umwelteffekte werden dadurch vermieden, dass durch ein Biomasseprodukt ein funktionsgleiches, nicht-biogenes Produkt substituiert wird?

Diese Frage gilt es, wie erwähnt, für quantitative Kriterien wie z.B. Klimawandel anhand einer THG-Bilanz zu beantworten. Eine Klimabilanz ohne Referenzsystem ist unvollständig. Für andere Kriterien wie Ressourcenschutz, nachhaltige Landnutzung oder Gesundheitsaspekte sowie ökonomische Kriterien ist die Referenzseite gleichfalls relevant. Erfolgt jedoch keine Quantifizierung, so werden die Substitutionsaspekte bei der qualitativen Einschätzung mit in die Argumentation einbezogen.

Bei der Bestimmung von Referenzsystemen gibt es u.a. folgende Fragen zu klären:

1. Aufgrund welcher Kriterien werden die Referenzsysteme definiert?
2. Wie verhält es sich mit Projektionen in die Zukunft?
3. Wie ist mit der großen Vielfalt an Nutzungsoptionen in der Bioökonomie umzugehen?

Abgesehen von großen Teilen der Ernährung, sowie für bestimmte Maßnahmen zur Förderung der Biodiversität sind für alle Nutzungen von Biomasse auch nicht-fossile Alternativen vorhanden. Manche dieser Alternativen liegen praktisch auf der Hand, weil die biogene Option bereits mit dem nicht-fossilen Optionen am Markt konkurriert und anstrebt diese zu ersetzen (z. B.: Biokunststoffe, Bioenergie, Holzbau). In manchen Bereichen ist Biomasse jedoch bereits der dominierende Rohstoff (z. B.: Papier/Zellstoff, Möbel). Völlig eindeutig zu bestimmen ist das Referenzprodukt jedoch in seltensten Fällen. Annahmen und Setzungen darüber, was genau ersetzt wird oder werden könnte, müssen stets getroffen werden. Im vorliegenden Fall werden für die Betrachtung der heutigen Situation aktuell vorliegende Produktmixe bzw. markttypische Produkte angenommen. Da hier keine detaillierte Marktanalyse erfolgen kann, werden vereinfachte Annahmen getroffen.

Annahmen werden umso spekulativer, je weiter man ein Szenario in die Zukunft legt. Es ist davon auszugehen, dass sich die Grundlage, auf der Produkte heute produziert werden und auf welcher das in Zukunft erfolgen wird (jenseits der Biomasse), in den nächsten Jahrzehnten grundlegend verändern wird. Eine Datengrundlage für THG-Emissionen und andere Lebenswegdaten bieten die Ergebnisse des UBA-Projekts REFINE (Dittrich et al. 2025). Welche Produkte jedoch ersetzt werden, muss unabhängig von Datenverfügbarkeiten festgelegt werden. So ist es beispielsweise in einem Referenzjahr 2045 unwahrscheinlich, dass ein Biokunststoff noch einen fossilen Kunststoff verdrängt, sondern vielmehr mit strombasierten Produkten (Wasserstoff und Luft-CO₂ zu PtX für die Polymerisation) in Konkurrenz stehen wird.

Mit Blick auf die immense Produktvielfalt der Bioökonomie stellt sich ein weiteres Problem für die hier vorliegende Aufgabe, die darin besteht, in möglichst breiter Form eine Bewertungsgrundlage für eine Priorisierung zu liefern. Auf welcher Detaillierungsebene kann oder muss mit dieser Vielfalt umgegangen werden? Versteht man das Vorgehen für die vorliegenden Aufgabe als eine Art Screening, so kann dies durch eine starke Vereinfachung erfolgen. Die Referenzsysteme werden dabei pauschal groben Kategorien zugeordnet, für die jeweils ein einheitlicher Emissionswert ausgewiesen wird (z. B. einfache Kohlenwasserstoffe als Plattformchemikalien wie Ethen, Propen, Buten u.a. alle einheitlich versehen mit einem

aktuellen Herstellungsemissionswert von 3 kg CO₂-Äq./kg). Weitere Vorschläge für vereinfachte Referenzwerte finden sich bei (Carus et al. 2014), die einen solchen Ansatz bereits in einer UBA-Studie vorschlagen.

Für spezifischere Analysen erscheint eine solche Vereinfachung nicht angemessen und auch nicht erforderlich, weil sich spezifische Fälle schließlich auch mit entsprechend spezifischen Daten bearbeiten lassen. Eine solche Vorgehensweise bietet sich daher an, wenn über die hier vorliegende Arbeit hinaus differenziertere Fälle bewertet werden sollten.

Mit Blick auf den unter Punkt 5 angeführten Ansatz, gesamtheitliche Stoffnutzungsszenarien (inklusive integrierten Kaskadennutzungen) zu bilanzieren, würde gerade das Referenzsystem die entscheidenden Effekte für das Ergebnis liefern. Für diesen Fall wäre eine nicht-fossile Ökonomie ohne Nutzung von Biomasse als theoretisches Vergleichssystem heranzuziehen, in welchem bereits als wesentliche Elemente Strom-, Wasserstoff- und CO₂-basierte Produkte eingesetzt würden. Aus einer solchen Betrachtungsweise könnten, was die Rolle der Biomasse in so einem System bedeutet, folgende Erkenntnisse erzielt werden:

1. Für welche aktuellen Nutzungen von Biomasse und fossilen Ressourcen wäre die Biomasse die zu priorisierende Option, da absehbar keine praktikablen Alternativen sind, weil sie entweder nicht vor 2045 verfügbar sind oder nicht ressourceneffizient eingesetzt werden?
2. Für welche Nutzungen gibt es effiziente Alternativen und bis wann könnten diese in welchem Ausmaß verfügbar sein?

Eine Szenarienanalyse würde auch die Betrachtung einer Kombination von Alternativen ermöglichen. Erste Szenarien, die diese Systeme quantitativ beschreiben, wären zum Beispiel aus dem REFINE-Projekt verfügbar.

Bis zu welchem Zeitpunkt ein möglicher Einsatz von Biomasse daher fossilen Kohlenstoff ersetzt und ab wann er anderen erneuerbaren Kohlenstoff ersetzen würde, ist jedoch nicht anhand von naturwissenschaftlichen Erkenntnissen (z.B. aufgrund Verfügbarkeit von Ressourcen) zu ersehen. Vielmehr hängt dies in großen Teilen von verschiedenen politischen Detail-Entscheidungen innerhalb und außerhalb von Deutschland ab. Weitere Faktoren sind die Investitionsgeschwindigkeit, die Fachkräfteverfügbarkeit, oder die Geschwindigkeit technischer Neuentwicklungen überhaupt. Dies führt zwangsläufig zu einer großen Bandbreite an Referenzsystemen und wird höchstwahrscheinlich keine umfassende generelle Beantwortung der Frage zulassen, wo Biomasse am sinnvollsten eingesetzt werden kann. Stattdessen müssten konkretere Entscheidungsrelevante Einzelfragestellungen formuliert werden, an die man sich im Rahmen der Unsicherheit mit Hilfe dieses Vergleichs und der unten formulierten Kriterien annähern kann.

Eine solche Bewertungstiefe geht jedoch, wie mehrfach erwähnt, über den Rahmen der vorliegenden Aufgabenstellung hinaus, die in einem deutlich gröberen Rahmen Ansatzpunkte für eine Priorisierung von (gröber spezifizierten) stofflichen und energetischen Biomassenutzungen liefern soll. Das bedeutet letztlich auch, dass der hier vorgeschlagene Ansatz nicht die ultimative Lösung bietet und für feinere Analysen nicht angemessen ist.

4.3.2 Kriterien für die relevanten Themenkomplexe

Im Folgenden werden die Kriterien entlang der in Tabelle 9 aufgeführten Themenkomplexe beschrieben.

4.3.2.1 Material- oder Rohstoffeffizienz

Übliche Indikatoren

Grundsätzlich lässt sich Materialeffizienz durch eine einfache Formel wie „Produkt-Output (kg) / Rohstoff-Input (kg)“ ausdrücken. Tatsächlich befinden sich zu Material- oder Rohstoffeffizienz verschiedene Messgrößen oder Indikatoren in Ökobilanzen oder Stoffstromanalysen auf der Makro-Ebene in Anwendung. Bereits (Giegrich et al. 2012) legten eine umfassende Ausarbeitung zu solchen Größen vor. Zusammenstellungen finden sich auch bei (Bringezu et al. 2019) sowie (Mostert, Bringezu 2019). Erwähnt seien hier:

- ▶ *Abiotische Ressourcenerschöpfung (ADP)*: ein standardmäßig in Ökobilanzen eingesetzter Wirkungskategorienindikator, der sich auch in der Standardliste der Environmental Footprint-Wirkungskategorien der PEF-Verordnung⁴² findet.
- ▶ *Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA)*: ebenfalls ein Standard-Indikator in Ökobilanzen, der aus der „Summe der zur Herstellung und zum Transport eines Produktes aufgewendeten Primärrohstoffe, inklusive Energierohstoffe, entlang der Wertschöpfungskette“ (VDI 2018). Primärrohstoffe bedeutet hier: die genutzte Extraktion. Diese kann differenziert werden in die Unterkategorien

- Energierohstoffe, nicht erneuerbar
- mineralisch-metallische Rohstoffe
- mineralisch-nicht metallisch, Rohstoffe
- biotische Rohstoffe.

Für biotische Rohstoffe (KRA_{biotisch}) gilt als Basis für die Bilanzierung das Handelsgewicht und die Handelsfeuchte. Mit zu berücksichtigen ist dabei die nicht verwertete Entnahme von Rohstoffen. Bei biotischen Rohstoffen sind dies z. B. auf dem Feld oder im Wald verbleibende Ernterückstände der Land- und Forstwirtschaft (Stroh oder sogenanntes Waldrestholz). Sie sollten separat ausgewiesen werden.

- ▶ *Rohstoffindex Raw Material Input (RMI)*: die Menge an genutzter Extraktion, also den Aufwand an Primärrohstoffen, welche der Umwelt entnommen und zur Bereitstellung von Produkten, Dienstleistungen und Infrastrukturen sowie ggfs. deren Nutzung und Abfallmanagement weiterverarbeitet werden.
- ▶ *Total Material Requirement (TMR)*: stellt die gesamte Menge an abiotischem und biotischem Primärmaterial, das für die Bereitstellung von Produkten, Dienstleistungen und Infrastrukturen sowie ggfs. deren Nutzung und Abfallmanagement innerhalb der Umwelt bewegt bzw. aus der Umwelt entnommen wird. Diese Gesamtextraktion wird zum Teil in Form von Rohstoffen genutzt, während der als solcher stofflich nicht weiterverarbeitete, „ungenutzte“ Teil als Abfall (z.B. beim Bergbau) oder für Infrastrukturgestaltung (z.B. beim Straßenbau) in der Umwelt verbleibt.
- ▶ *Rohstoffkonsum, Raw material consumption (RMC)*: bildet die Primärrohstoffnutzung für den inländischen Konsum und die Investitionen („Primärrohstoffkonsum“) ab und unterteilt sich wie der KRA in die Rohstoffkategorien Biomasse, fossile Energieträger, nicht-metallische Mineralien und Metalle. Die Rohstoffansprachnahme der international gehandelten Güter

⁴² <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021H2279> (siehe Tabelle 2)

wird in sogenannten „Rohstoffäquivalenten“ (RME) berechnet, um Rohstoffextraktionen im In und Ausland vergleichbar darzustellen. Rohstoffäquivalente sind die Menge der Primärrohstoffe, die für ein im- oder exportiertes Produkt gebraucht wird.⁴³

- *Materialfußabdruck*: Als materialbezogener Indikator im Projekt SYMOBIO (Bringezu et al. 2021) ausgearbeitet. Er gibt die für den Inlandsverbrauch aufgewendete Menge an Primärbiomasse aus Landwirtschaft, Fischerei im In- und Ausland geerntete Biomasse) wieder. Ein zusätzlicher SYMOBIO-Indikator ist der *Forstfußabdruck* (Rohholzeinschlag im In- und Ausland für den Endverbrauch holzbasierter Güter); diese Indikatoren haben bereits einen direkten Bezug zur Bioökonomie.

Der Begriff der Ressourceneffizienz greift über die Material- oder Rohstoffeffizienz hinaus, da unter Ressourcen außerdem auch physischer Raum (Fläche), die Umweltmedien (Wasser, Boden, Luft), strömende Ressourcen (z.B. Erdwärme, Wind-, Gezeiten- und Sonnenenergie) sowie die Biodiversität gezählt werden (UBA 2012).

Ein weiterer aussagekräftiger Indikator der „Nachhaltigen Ressourcenleistung“ (Böttcher et al. 2020b) beruht auf der Erkenntnis, dass auch eine steigende Ressourceneffizienz nicht zwangsläufig verhindert, dass die Grenzen der Nachhaltigkeit durch weiter steigende Nachfragen nach Rohstoffen überschritten werden. Dieser Indikator bezieht somit Grenzwerte in die Bewertung direkt mit ein und ermöglicht auf diese Weise einen besseren Vergleich zwischen Produktionssystemen unterschiedlicher Produktivität. Durch Skalierung der Inanspruchnahme verschiedener natürlicher Ressourcen sowie Skalierung der Nutzen (bzw. Produktivität) von Produktionssystemen jeweils in relationale Bewertungsskalen erfolgt eine mehrdimensionale Bewertung der nachhaltigen Ressourcenleistung.

Im hier vorliegenden Fall steht der **biogene Rohstoff** im Vordergrund. Als grundsätzlich geeigneter Indikator kann somit der Kumulierte Rohstoffaufwand (KRA) dienen, ausgewiesen als **KRA_{biotisch}**.

Mögliche weitere Ressourcenindikatoren

Neben einem generellen Indikator für Rohstoffe sind u.U. auch andere natürliche Ressourcen von Relevanz für die Beurteilung der Biomasseproduktion und -nutzung. Zu nennen wären insbesondere Wasser und Phosphat.

Für Wasser gibt es verschiedene Ansätze und Betrachtungsweisen:

- „blaues“ Wasser: aus Grund- oder Oberflächenwasser entnommen, spielt nur bei Bewässerung oder Prozesswasserbedarf eine Rolle,
- „grünes“ Wasserstoff: das ist die Evapotranspiration der Pflanzen, bei Anbaubiomasse also von Prinzip hoch),
- Indikatoren mit Wasserknappheit: da Wasserkonsum in Regionen, in denen keine Wasserknappheit herrscht, eher als unkritisch zu betrachten ist, ist es sinnvoll, den Konsum mit regionaler Wasserverfügbarkeit zu koppeln. Hierzu gibt es verschiedene Ansätze. Auch im SYMOBIO-Projekt wurde ein entsprechender Wasserfußabdruck zu blauem Wasser in Verbindung mit Wasserknappheit entwickelt (Schomberg et al. 2021).

⁴³ <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-rohstoffkonsum#welche-bedeutung-hat-der-indikator>

Infrage käme hier ein Indikator ähnlich dem von SYMOBIO 2.0. Ein kritischer Wasserkonsum wird jedoch in den allermeisten Fällen beim Anbau mit Bewässerung vorliegen. Eine Differenzierung durch die verschiedenen Arten der Biomassenutzung ist nur in speziellen Fällen zu erwarten, weswegen der Indikator hier nicht weiter betrachtet wird.

Phosphat kann definitiv durch keine Alternative ersetzt werden. Die genaue Ausgestaltung der biogenen Lebenswege ist entscheidend, ob es erhalten bleibt oder verloren geht. Aber wie beim Wasser ist der Haupteinsatz beim Anbau lokalisiert, unabhängig von der Art der Nutzung der Biomasse. Daher wird im Rahmen des hier knapp gehaltenen Katalogs an Kriterien der Phosphatfußabdruck nicht aufgenommen.

Umgang mit Sekundärrohstoffe sowie Rohstoffehalt

Üblicherweise führt der KRA (wie auch andere Rohstoffindikatoren) bei aufwendigen Lebenswegen (z.B. Herstellung eines stofflichen Produkts) in der Regel zu höheren Werten als eine einfache Nutzung (z. B. Verbrennung). Nicht berücksichtigt wird darin, wenn das Material am Ende der Nutzung (erster Lebensweg) noch erhalten ist und als Sekundärrohstoff für eine weitere Nutzung zur Verfügung stehen kann. Während sich eine Rohstoffeinsparung im KRA (und anderen Rohstoffindikatoren) erst bei der Erzeugung des Sekundärprodukts niederschlägt (dann für diese Produkte entfällt der Primärrohstoffverbrauch), verbleibt dem Primärprodukt unabhängig vom Erhalt des Materials am Nutzungsende die volle Anrechnung des Primärrohstoff bei der Herstellung.

Korrekt wäre in diesem Fall ein Ansatz, der das erhaltene Rohstoffpotenzial zum Nutzungsende einer solchen Nutzung auch anrechnet. Da sich diese Frage beim Nutzungsende eines Sekundärprodukts erneut stellt, kann auf diese Weise auch eine mehrstufige Kaskadennutzung bewertet werden.

Diese Vorgehensweise begründet sich in der „Umkehrung“ der Sichtweise für die vorliegende Aufgabenstellung, da hier die Rohstofffrage explizit an die Frage der Nutzungsbewertung gekoppelt ist. Dies unterscheidet sich somit vom Kontext einer üblichen Ökobilanz, die den Rohstoffaufwand anhand KRA für ein stoffliches wie ein energetisches Produkt grundsätzlich gleich bewertet. Eine Ökobilanz, die nutzengleiche Produkt-Systeme bewertet, führt zu keiner (maßgeblichen) Differenzierung in der Ressourceneffizienz einer Kaskadennutzung, da die jeweilige alternative Nutzung anstelle einer Kaskade hier ebenfalls zu Rohstoffaufwendungen führt. Unter dem Strich gleichen sich in Produkt-Ökobilanzen die KRAs in den verglichenen Systemen daher aus. Kaskadennutzungen benötigen daher einen angepassten Indikator, wenn sie nicht anhand von umfassenden Stoffstrombilanzen bewertet werden (Fehrenbach et al. 2017b).

Besondere Beachtung ist der Beurteilung von Abfall- und Reststoffen zu widmen. Nach der VDI-Richtlinie 4800 Blatt 2 (VDI 2018) werden Sekundärrohstoffe nur mit ihrem Transport- und Aufbereitungsaufwand berücksichtigt. Durch die Einführung des hier definierten Rohstoffehalts-Faktors, der am Ende eines Nutzungszyklus eines Biomasseprodukts berücksichtigt, wieviel vom ursprünglich eingesetzten Rohstoff noch für eine weitere Nutzung zur Verfügung steht, ist jedoch auf Konsistenz mit der Bewertung für Abfallstoffe zu achten. Ein Abschlag für verbleibende sekundäre Rohstoffnutzung am Lebenswegende eine aus primären Rohstoffen erzeugten Produkts schließt einen „Null-KRA“ für Sekundärprodukte aus. Biogene

Sekundärrohstoffe müssen daher ebenfalls ausgewiesen werden, werden jedoch als Solche separat aufgeführt.

Bezugsgröße

Als quantifizierter Indikator ist hier ein Bezugsgröße erforderlich. Die grundsätzlichen Möglichkeiten dafür wurden in Kapitel 4.3.1 unter Punkt 4 bereits diskutiert. Die eingangs dieses Kapitels beschriebene einfache Formellösung mit Bezug auf den Produkt-Output ist leider für die Aufgabenstellung hier nicht trivial. Schließlich gilt es explizit stoffliche Produkte, z.B. ein Holzbauteil, eine Chemikalie - in der Einheit kg - mit Energieprodukten (Wärme/Strom) - in Einheiten wie MJ oder kWh – in Vergleich zu setzen sind. Für die jeweiligen Endprodukte als Solche gibt es somit keine einheitliche Bezugsgröße. Die Einführung jeweils eines Referenzsystems mit der auf die Einsparung des Rohstoffverbrauchs durch das biobasierte Produkt im Vergleich zum angenommenen substituierten Produkt aufgerechnet wird, wäre eine Möglichkeit. Diese ist beim Kriterium Klimawandel (siehe nachfolgendes Kapitel 4.3.2.2) auch unverzichtbar, würde aber die Intention eines zugespitzten Indikators für die Rohstoffeffizienz für Biomasse unterlaufen, da dann KRA_{biotisch} mit KRA_{fossil} oder $KRA_{\text{mineralisch}}$ abgewogen werden müssen.

Der bereits in Kapitel 4.3.1 unter Punkt 4 beschriebene Ansatz der Masse Kohlenstoff im zuletzt als Material vorliegenden Produkt wird hierfür verwendet.

Vorschlag eines Rohstoffeffizienz-Kriteriums:

Der Ansatz des KRA_{biotisch} wird in Anlehnung an die VDI 4600 Blatt 2 als Basisansatz vorgeschlagen. Die Beschränkung auf den biogenen Anteil wird damit begründet, dass mineralische Rohstoffe bei Biomasseprodukten eher eine untergeordnete Rolle spielen und fossile Ressourcen in dem Kriterium zu Klimaschutz abgedeckt werden. Außerdem würde der Indikator durch verschiedene KRA -Arten aufgesplittet, was die Bewertung am Ende verkomplizieren würde.

Der KRA_{biotisch} wird hier ergänzt durch einen Rohstofferhaltungs-Faktor (REF). Das Prinzip dieses Faktors wird anhand Abbildung 47 erläutert. Daraus ergibt sich ein „effektiver“ $KRA_{\text{bio-eff}}$, der sich wie folgt errechnet:

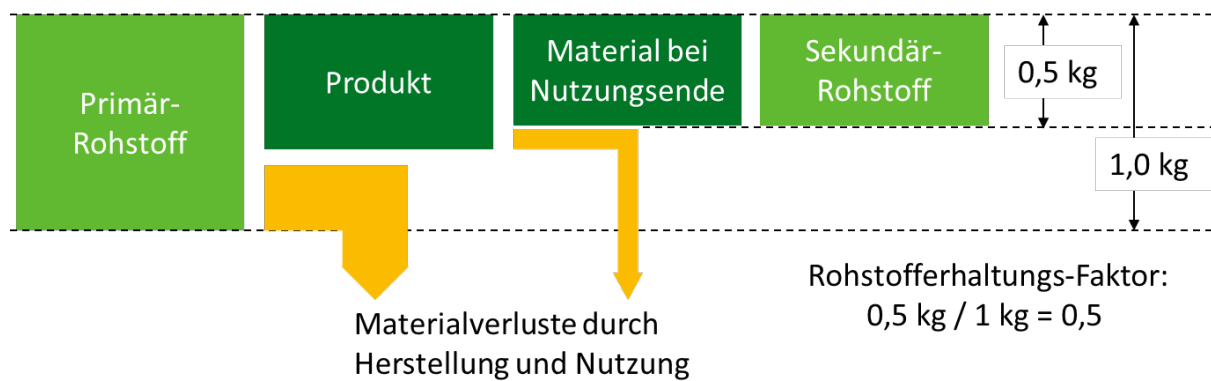
$$KRA_{\text{bio-eff}} = KRA_{\text{bio}} - 1 + 1 \cdot (1 - \text{REF}).$$

Außerdem werden auch biogene Abfall- und Rohstoffe einbezogen, jedoch separat ausgewiesen als $KRA_{\text{bio-rest}}$.

Bezugsgröße ist die Masse Kohlenstoff im zuletzt als Material vorliegenden Produkt:
 $KRA_{\text{bio-eff}}$ pro kg C.

Für die Gesamtbewertung werden die Ergebnisse pro kg C in Form von Belastungspunkten angesetzt: 1 Punkt pro 1 kg $KRA_{\text{bio-eff}}$ /kg C Biomasseprodukt

Abbildung 47: Prinzip des „Rohstofferhaltungs-Faktors“



Eigene Darstellung: ifeu

4.3.2.2 Klimaschutz

Aufgrund der Vordringlichkeit des Klimaschutzes ist ein Kriterium dazu im Rahmen jeglicher Umweltwirkungsbewertung unabdingbar. Dies gilt für Maßnahmen der Bioökonomie umso mehr, als sie mit ihrem Ziel der Defossilisierung ihre wesentliche Rechtfertigung in der zu erwartenden Einsparung an Treibhausgasen sowie der Möglichkeit von C-Senken begründet.

Methodische Standards zur Bilanzierung von Treibhausgasemissionen und -bilanzen liegen zahlreich vor. Diese sind fester Bestandteil von Ökobilanzen und es liegen internationale Normen und Vorgaben vor wie z. B. in der ISO 14067, im Greenhouse gas protocol oder auch in der RED II/III.

Folgende für eine THG-Bilanz **allgemein geltende Grundsätze** sind insbesondere zu erfüllen:

- ▶ Der Bilanzierungsrahmen muss eindeutig festgelegt sein: auf was (welche funktionelle Einheit) wird die Bilanzierung bezogen? Dies kann 1 kg eines Produkts einer definierten Funktion sein (oder eine Energieeinheit bei Bioenergie) oder die Gesamtheit an erzeugter und genutzter Biomasse.
Für die Betrachtung hier wird die THG-Bilanz wie in Kapitel 4.3.1 unter Punkt 4 beschrieben, jeweils auf 1 kg C im Produkt (welches bei Bioenergie der Brennstoff darstellt) bezogen.
- ▶ Beim Vergleich von verschiedenen Materialien (hier: verschiedene Biomassen) oder Nutzungen muss im funktionellen Nutzen Gleichheit bestehen. Ein direkter Vergleich der THG-Bilanz der Produktion und Nutzung eines Möbelstücks aus Holz mit der Nutzung desselben Holzes zu Energiezwecken ist unzulässig, sofern die verschiedenen Funktionsnutzen nicht einbezogen werden. Dies kann z.B. durch Einbeziehung von Referenzprodukten (Substitution) erfolgen.
Siehe hierzu Kapitel 4.3.1 unter Punkt 6.
- ▶ Bilanzierung erfolgt über den Lebensweg (*cradle to grave*), was bei Biomasse für Energiezwecke mit der Nutzung endet, bei stofflicher Nutzung einer Festlegung der Nachnutzungsphase und wie diese in der Bilanz zu berücksichtigen ist, bedarf.
Siehe hierzu in Kapitel 4.3.1 unter Punkt 5.
- ▶ Emissionen aus der Hintergrundprozessen (Vorketten für z.B. Strom, Düngemittel, Transporte etc.) werden einbezogen.

- Emissionen durch Herstellung von Investitionsgütern (Anlagen, Infrastruktur) sind einbezogen oder werden transparent begründet ausgeschlossen.
Hier empfiehlt sich ein Ausschluss, wodurch der Bilanzraum vereinfacht wird. Im Übrigen besteht so eine Konsistenz mit der THG-Berechnungsmethode nach der RED III. Zu beachten ist allerdings, dass die strombasierten Produktionsoptionen im Referenzsystem mit vergleichsweise höheren Infrastrukturaufwendungen verbunden sind als fossile und biomassebasierte Systeme.

Ein weiterer entscheidender Faktor für die THG-Bilanz ist der **zeitliche Horizont**. Dies gilt in zweierlei Hinsicht: Erstens für das Referenzsystem, dessen Substitution durch das Biomasse-Produkt unterstellt wird. Im Status quo per heute ist in vielen Fällen anzunehmen, dass vermehrte Biomasse-Produkte fossile oder andere nicht-erneuerbare Produkte ersetzen. Aufgrund der nicht allein durch ein Wachstum der Bioökonomie stattfindenden Defossilisierung ist in der Zukunft zunehmend von einer Konkurrenz mit anderen erneuerbaren Produktionssystemen, z.B. auf Basis von grünem Wasserstoff und CO₂ aus der Luft auszugehen, sogenannte PtGLS.⁴⁴

Für eine ausreichende Entscheidungsbasis bedarf es daher zumindest zweier Referenzwerte:

1. Für den Status quo per heute → Emissionswert für fossiles Referenzsystem
2. Für die Zukunft → Substitution prospektiver Systeme, d.h. in abnehmender Form fossile Systeme, dagegen eher konkurrierende Systeme auf Basis anderen erneuerbaren Quellen wie z.B. grünem Wasserstoff und CO₂ aus der Luft, oder im Falle von z.B. Stahl oder Zement mit der erwarteten THG-Emission dieser Produkte in der Zukunft.

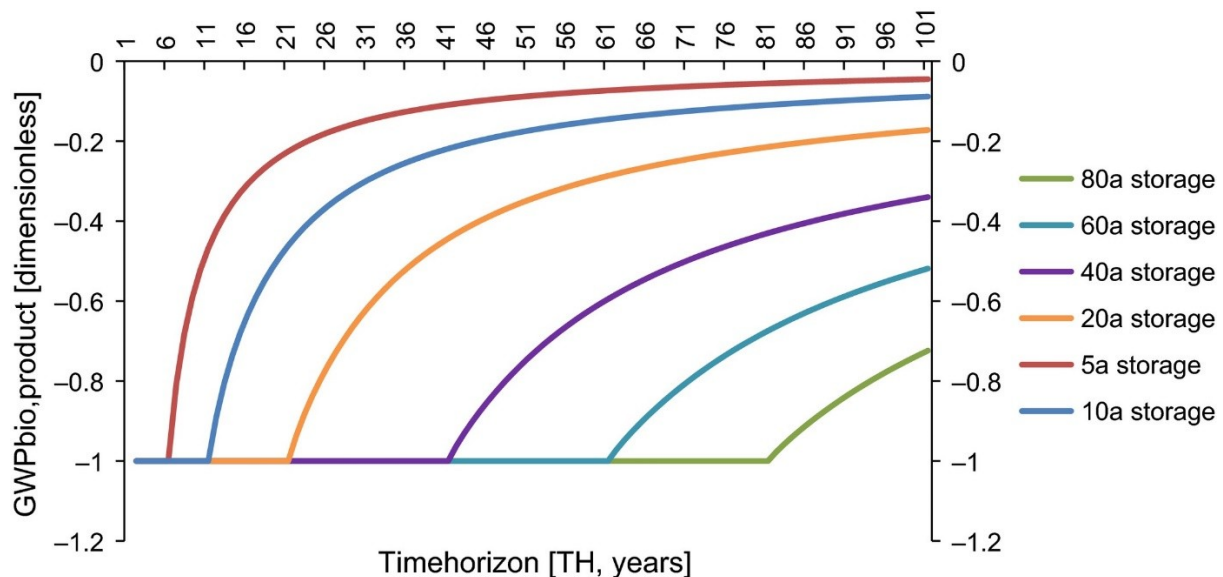
Der zweite zeitbezogene Aspekt betrifft die **Dauer der Speicherwirkung** der Produkte. Zum einen gilt, dass der Kohlenstoff in den biobasierten Produkten je nach Art des Produkts über einen mehr oder weniger langen Zeitraum gespeichert bleibt. Ansatzpunkte hierfür finden sich z. B. in den IPCC-Leitlinien zu Harvested Wood Products (HWP), beschrieben in Kapitel 12 der 2019 überarbeiteten IPCC-Leitlinien Vol. 4 (IPCC 2019). Die IPCC-Methode erlaubt mehrere Ansätze, richtet sich aber explizit an jahresbezogenen Emissionsinventare aus, nicht auf lebenswegbezogene Produktbilanzen. Hierfür schlagen (Soimakallio et al. 2022b) in einer umfassende Literaturrecherche zu Substitutions- und Kohlenstoffspeicherungseffekten von holzbasierten Produkten eine fundierte Lösung vor, wie man die zeitliche C-Speicherung durch biobasierte Produkte unterschiedlicher Lebensdauer zuordnen kann. Die Begründung bezieht sich auf die folgende Tatsache: Es ist allgemein üblich, dass Nicht-CO₂-THGs in Kohlendioxid-Äquivalente umgerechnet werden, indem man ihren kumulativen Strahlungsantrieb über 100 Jahre verwendet. Es kann gerechtfertigt sein, die gleiche Grundlage für die vorübergehende Kohlenstoffspeicherung und die verzögerten Emissionen in der Lebenszyklusbewertung anzuwenden. (Soimakallio et al. 2022b) verweisen auf (Helin et al. 2016), die die vorübergehende Kohlenstoffspeicherung für verschiedene Speicherdauern berechnen (siehe Abbildung 48). So entspricht beispielsweise eine Emission von 100 kg CO₂ nach 40 Jahren Lagerzeit einer sofortigen Emission von 66 kg CO₂ $[100 \text{ kg CO}_2 * (1 - 0,34)]$.⁴⁵

Den gleichen Ansatz gilt es auch für die substituierten Produkte anzuwenden.

⁴⁴ PtGLS: Power to Gas, Liquid, Solids: zu verstehen für die gesamte Produktpalette, die auf Basis von grünem Wasserstoff mit CO₂ erzeugt werden kann, für energetische wie auch stoffliche Nutzung.

⁴⁵ Der Wert -0,34 wird in dem Diagramm in Abbildung 48 an der rechten y-Achse abgelesen.

Abbildung 48: Zeitabhängiger Gewichtungsfaktor auf der Grundlage des kumulativen Strahlungsantriebs und ausgedrückt als globales Erwärmungspotenzial (GWP_{bio}) für verschiedene (5, 10, 20, 40, 60 und 80 a) temporäre Lagerungszeiten von Kohlenstoff in geernteten Holzprodukten



Quelle: (Helin et al. 2016).

Da hier wie beim vorangehenden Kriterium der Rohstoffeffizienz quantitative Größen verglichen werden, muss hier eine einheitliche Bezugsgröße für stoffliche und energetisch genutzte Größen gewählt werden. Daher wird wie für die Rohstoffeffizienz die Masse Kohlenstoff im zuletzt als Material vorliegenden Produkt verwendet, d.h. für Energienutzung jeweils 1 kg C des eingesetzten Brennstoffs.

Vorschlag eines Klimaschutz-Kriteriums:

Anstelle einer prozentualen Einsparrate wird ein absoluter Bilanz-Wert in Form von g CO₂Äq. pro kg eingesetzter Primärbiomasse ermittelt. Dabei wird wie üblich der Rahmen des Lebenswegs bilanziert (Last) und davon der Referenzwert für das vergleichbare nicht-biogene Produkt abgezogen. Die Ermittlung des Referenzwerts erfolgt gemäß dem Vorschlag aus (Carus et al. 2014) anhand von Grundstoffen (Basischemikalien).

Die Bilanz wird a.) mit einem fossilen oder mineralischen Referenzprodukt für den Status quo und b.) für den prospektiven Fall mit einem Referenzprodukt wie es in einer weitgehend dekarbonisierten Wirtschaft im Jahr 2045 prognostiziert oder einem nicht-biogenen erneuerbaren Referenzprodukts gebildet.

Beide Ergebnisse werden in die Bewertung einfließen, wodurch das Klimaschutz-Kriterium gegenüber den anderen Kriterien an Gewicht gewinnt, was für den hier vorliegenden Bewertungsvorgang als angemessen eingeschätzt wird. Grundsätzlich kann je nach Anwendungsziel eine Bevorzugung von entweder a.) oder b.) oder einer Kombination daraus getroffen werden.

In die Bewertung fließt auch hier das quantitative Ergebnis der THG-Bilanz in kg CO₂Äq./kg C im Biomasseprodukt, wobei negative Werte (Netto Einsparwerte) als Entlastung, positive Werte (Netto für Netto-Emissionen) als Belastung gerechnet werden.

4.3.2.3 Substitutionsrelevanz des biogenen Produkts gegenüber erneuerbaren Alternativen

Die Frage der Substitution eines Referenzprodukts durch das Biomasse-Produkt spielt in der THG-Bilanz eine entscheidende Rolle. Sie weist jedoch auch eine weitere Facette aus: die Frage, wie weit das Biomasse-Produkt für die Defossilisierung als „alternativlos“ einzustufen ist. Diese Erwägungen spielen u.a. auch in der RED III wie auch der bisherigen nationalen Umsetzung in deutsches Recht eine Rolle, wo aufgrund spezieller Quotenverpflichtungen eine Priorisierung von fortschrittlichen Biokraftstoffen oder mittels grünen Stroms erzeugten Kraftstoffen⁴⁶ im Flugsektor festzustellen ist. Dies begründet sich damit, dass anders als bei bodengebundenem Verkehr ein brennstoffbasierter Antrieb schwieriger durch z.B. batterie-elektrische Alternativen ersetzt werden kann.

Die Frage, wie einfach oder schwierig sich aus heutiger Sicht Alternativen zu biobasierten Lösungen für bestimmte Produkte oder Dienstleistungen anbieten, wird daher als eigenständiges Kriterium vorgeschlagen. Ein vergleichbares Unterkriterium wurde auch im Projekt BioRest für die *Kompatibilität zur Transformation des Energiesystems* angewendet.

Ein Stück weit kann auch hier Bezug genommen werden auf die **Handlungsempfehlungen zur Umsetzung der Nationalen Bioökonomiestrategie** (NBÖ) des Bioökonomierats (Bioökonomierat 2023a), wie sie in Kapitel 3 analysiert wurden. Dort wurde gefolgert, dass

- Das Konzept der **Zirkularität** einen zentralen Baustein für die Reduktion der Flächenintensität der Bioökonomie bildet.
- **Effizienzsteigerungen** und Veränderungen des Nutzerverhaltens innerhalb bioökonomischer Handlungsfelder bis hin zur **Suffizienz** den Nutzungsdruck auf biogene Rohstoffe verringern können.

Vorschlag eines Kriteriums zur Substitutionsrelevanz:

Es wird ein Raster aufgestellt, in denen im Rahmen einer verbalen Argumentation für einzelne Aspekte **jeweils ein oder kein Entlastungspunkt** vergeben wird und anschließend die Summe der Punkte gebildet wird. Die können bei drei Aspekten maximal drei Entlastungspunkte sein. Die Aspekte lauten:

- Für die betrachtete Art der Biomassenutzung liegen **aktuell** keine erneuerbaren Alternativen im **technologisch** realisierbaren Maßstab vor.
- Für die betrachtete Art der Biomassenutzung liegen **aktuell** keine erneuerbaren Alternativen im **wirtschaftlich** realisierbaren Maßstab vor.
- Für die betrachtete Art der Biomassenutzung zeichnen sich auch **mittelfristig** (in jedem Fall bis 2045) keine erneuerbaren Alternativen im **technologisch** und **wirtschaftlich** realisierbaren Maßstab ab.

4.3.2.4 Themenkomplex Biodiversität & Ökosystemleistungen, Naturschutz sowie Landnutzung- und Landnutzungsänderung

Dieser Themenkomplex ist direkt verbunden mit den Vorgängen der Biomasseproduktion. Die Art der Biomassenutzung tritt hier weitgehend in den Hintergrund. Sie kann dann eine Rolle spielen, wenn eine Art der Biomassenutzung mit einer speziellen Art von Biomasse und damit auch deren Produktion verknüpft ist. Solche Beispiele können in der Praxis durchaus auftreten,

⁴⁶ Im Rahmen der RED III als RFNBO (erneuerbare Kraftstoffe nicht-biogenen Ursprungs) bezeichnet; weitere Bezeichnungen sind Power-to-Liquids (PtL) oder e-fuels.

grundsätzlich sind die Nutzungsmöglichkeiten einer jeden Art von Biomasse jedoch divers. Als Praxisbeispiel sei an dieser Stelle der Anbau von Energiegräsern (z. B. *Miscanthus*) genannt, welcher aktuell tatsächlich allein zu Energiezwecken genutzt wird. Allerdings könnten diese Pflanzen grundsätzlich auch zu anderen Zwecken genutzt werden, z. B. in Ligno-Zellulose-Bioraffinerien, die daraus auch Stoffströme für die stoffliche Nutzung herstellen können.

Wenngleich diesem Themenkomplex eine Schlüsselbedeutung bei der Bewertung von Tätigkeiten der Bioökonomie zukommt, ist er **nicht geeignet** für die Ableitung von **Kriterien für die Priorisierung der Nutzung**.

Seine Schlüsselfunktionen kommen diesem Komplex für folgenden Bewertungsaufgaben zu:

- ▶ Für die Formulierung fundamentaler Nachhaltigkeitskriterien zur Bewertung jeder Art von **Biomasseproduktion**.
- ▶ Für die Ableitung von **nachhaltigen Biomassepotenzialen**, also der Frage: wie viel Biomasse kann unter Berücksichtigung des Schutzes der Biodiversität und Ökosystemleistungen sowie dem Naturschutz durch Landnutzung sowie Landnutzungsänderung überhaupt genutzt werden?

Zum Aufgabenbereich „Bewertung der Biomasseproduktion“

Zu biodiversitäts- und landnutzungsbezogenen Kriterien für die Biomasseproduktion liegen verschiedene Ansatzpunkte vor, die für die Produktbewertung in Ökobilanz entwickelt wurden. Genannt seien:

- ▶ Der auf Naturferne (Hemerobie) Bezug nehmende Ansatz des *Flächenrucksacks von Gütern und Dienstleistungen* – eine Entwicklung eines UBA-Forschungsvorhabens (Fehrenbach et al. 2021b), das auf langjährige UBA-Arbeiten zurückgreift (Schmitz, Paulini 1999).
- ▶ Das auf dem Hemerobieansatz aufbauende *Biodiversity Value Increment BVI*, einer Entwicklung durch Forschungsarbeiten für das BfN (Lindner et al. 2020).
- ▶ Der Ansatz für globale Flächennutzungsintensität für Biodiversitätsfußabdrücke von Produkten (Chaudhary, Brooks 2018), der sich inzwischen vielfach Anwendung in Ökobilanzen findet.
- ▶ Das Tool LANCA® (Land Use Indicator Value Calculation), mit dem die Wirkungen von Prozessen auf verschiedene Ökosystemleistungen beschrieben werden können.⁴⁷

Außerdem wird derzeit im Rahmen des BMBF-Vorhabens SYMOBIO 2.0 zusätzlich zu den bestehenden Indikatoren ein Biodiversitäts-Fußabdruck entwickelt.

Der Themenkomplex ist hier sehr weitgreifend und kaum durch einen Indikator allein erfassbar. Es ist jedoch zu beachten, dass es in diesem Aufgabenbereich „nur“ um die Bewertung der nutzungsindifferenten Biomasseproduktion geht und damit keine Priorisierung der Nutzung möglich ist. Daher wird hier ein Ansatz, der die Thematik möglichst breit adressiert als angemessen erachtet. Als solcher wird hier das UBA-Konzept des *Flächenrucksacks* erachtet.

⁴⁷ <https://www.iabp.uni-stuttgart.de/gabi/forschungsthemen/lanca/>

Vorschlag eines Kriteriums zur Bewertung von naturrelevanten Landnutzungswirkungen durch Biomasseproduktion:

Der Flächenrucksack für Güter und Dienstleistungen bietet für die Fragestellung hier zwei Größen an:

- ▶ Ein Wert für die Flächenbelegung, der als Unterkriterium für die *Flächeneffizienz* angesetzt werden kann (dazu bietet sich die Einheit kg Trockenmassen pro Hektar und Jahr an)
- ▶ Eine Einstufung der Hemerobiestufe der belegten Fläche (Klassen II bis V für bewirtschaftete Wälder, Klassen III bis V für Grünland und IV bis VI für Ackerland).

Daten sind (Fehrenbach et al. 2021d) zu entnehmen.

Zum Aufgabenbereich „Ableitung von nachhaltigen Biomassepotenzialen“

Zu diesem Aufgabenbereich wurden im Rahmen von Arbeiten für die Nationale Biomassestrategie NABIS grundlegende Vorarbeiten geleistet. Dabei wurde das Potenzial aus Anbaubiomasse aus der Landwirtschaft und Forstwirtschaft unter Erfüllung einer Reihe von Kriterien abgeschätzt. Dabei wurden auch naturschutzbezogene Aspekte, bzw. solche des hier betrachteten Themenkomplexes einbezogen, die sich jedoch auch mit anderen Themen vermischen, wie z. B. beim *natürlichen Klimaschutz*. Konkret genannt seien:

- ▶ Für die Landwirtschaft:
 - **Wiedervernässung** von organischen Böden bzw. Moorböden; gilt vorderhand als eine Klimaschutzmaßnahme, die jedoch auch einen erheblichen Beitrag zu Naturschutz, für Biodiversität und Ökosystemleistungen bringen kann.
Für das nachhaltige Potenzial wird das Ziel einer Wiedervernässung von 85 % der bewirtschafteten organischen Böden angesetzt, d.h. dass die bisherige Nutzung auf 1,05 Mio. ha nicht mehr zur Verfügung steht.
 - Rückgang der **Versiegelungsdynamik**, was jedoch bedeutet, dass weiterhin Flächen v.a. der Landwirtschaft in Siedlungsraum umgewandelt werden; statt der aktuellen Versiegelungsrate von 55 ha pro Tag soll dies bis 2030 auf unter 30 ha pro Tag gesenkt werden.
Die dabei verloren gehende Landwirtschaftsfläche wird dabei ausschließlich der Ackerfläche abgezogen, da **Grünlanderhalt** vorausgesetzt wird.
 - Reduktion der **agrarischen Biomasseerträge** durch
 - Ausweitung des **Ökolandbaus** von derzeit ca. 11 % auf 30 % in 2030.
 - Verringerung des **Stickstoffüberschusses** auf 70 kg N / ha.
 - Gegenläufig dazu wird für die Szenarien der NABIS auch eine Erhöhung der Erträge durch Verbesserung bzw. Anpassung von Maßnahmen gemäß Trendangaben der FAO in Höhe von um 0,3 % p. a. (entspricht 10 % bis zum Jahr 2050) unterstellt.
- ▶ Für die Forstwirtschaft:
 - Absenkung der Holzentnahme zur vollständigen **Erfüllung der LULUCF-Ziele** des Klimaschutzgesetzes, die nach Erfüllung der Wiedervernässungsziele für organischen Böden noch erforderlich ist. Dies bedeutet verringerten Einschlag und weitere Optionen für natürlichen Klimaschutz was auch die Biodiversitätsziele unterstützt.

- Begrenzung der Entnahme auf Derbholz (>7 cm) und Umsetzung des FSC-Standards in den Bundeswäldern.

Neben diesen durch Klimaschutz- aber v. a. auch Biodiversitäts- und Naturschutzziele Eingrenzungen des nachhaltig verfügbaren Biomassepotenzials wird dies in den Arbeiten für die NABIS auch durch Kriterien für die Nahrungsmittelbereich ergänzt. Der dort verwendete Ansatz der **Flächensuffizienz** verbunden mit einer Abnahme des derzeitigen Fleischkonsums und einer Erhöhung des Anbaus von Proteinpflanzenanbau, führt zu einer deutlichen Reduktion des Flächenbedarfs für den Futtermittelanbau. Da Flächensuffizienz eine Netto-Null beim Import von Nahrungs- und Futtermitteln bedeutet, schränkt sich damit andererseits wiederum die im Inland verfügbare Fläche für nicht-Nahrungs-Biomasse ein. Weiteres dazu ist in Kapitel 4.3.3 erläutert.

4.3.2.5 Themenkomplex Gesundheit und Umwelt

Hier sind weitere Kriterien denkbar, die sich aus den Strategien und auch den planetaren Grenzen heraus formulieren lassen. Sie gehen wiederum teilweise mit der Biodiversitätsstrategie einher, wie z.B. das Ziel der Reduktion des Pestizideinsatzes um 50 % - was auch das Abkommen der CDB-COP 15 von Montreal 2022 bekräftigt hat. Aus dem Konzept der planetaren Grenzen sind außerdem noch zu nennen:

- ▶ Veränderung von biogeochemischen Kreisläufen (v. a. Stickstoff) – bereits für Biodiversität als relevant eingestuft und eher weniger für die Art der Nutzung als für die Biomasseproduktion von Relevanz.
- ▶ Überladung mit neuartigen Stoffen.
- ▶ Zunahme der Aerosolbelastung.
- ▶ Ozonabbau in der Stratosphäre.

Die beiden letzten Grenzen befinden sich nach (Richardson et al. 2023) im sicheren Handlungsraum, werden daher hier nicht als grundsätzlich vordringlich gesehen. Angesichts des Beitrags der Verbrennung von fester Biomasse zu Belastungen mit Feinstaub, kann dieses Kriterium jedoch von spezieller Bedeutung für die Bewertung in der Bioökonomie sein.

Die Überladung mit neuartigen Stoffen dagegen liegt klar über dem Unsicherheitsbereich, wobei hier für die genaue Bewertung noch hohe Unsicherheiten bestehen. Für den Bereich der (bio)technisch erzeugten Biomasse kann ein Kriterium auf Basis dieser planetaren Grenze relevant sein. Für eine sichere Bewertung bedarf es hier jedoch noch methodischer Entwicklungen. Ein eher qualitatives Kriterium kann hier jedoch formuliert werden.

Vorschlag eines Kriteriums zur Bewertung von gesundheitsbezogenen Umweltwirkungen

Drei Aspekte werden hier (qualitativ) bewertet:

- ▶ Trägt die Art der Biomasseproduktion und Nutzung in relevantem Maß zu Feinstaubbelastungen bei?
- ▶ Werden neuartige Stoffe außerhalb geschützter Produktionsumgebungen verwendet oder erzeugt? (z.B. Additive in Polymeren, hormonaktive Substanzen, Pestizidrückstände)

- Sind weitere als besonders umweltbelastende Effekte mit der entsprechenden Biomasseproduktionskette verbunden? (z.B. Gewässerbelastungen durch Abwässer aus industriellen Verarbeitungsprozessen)

Für Feinstaubbelastungen werden bis zu 2 Belastungspunkte vergeben, für neuartige Stoffe je nachdem 1 Punkt, und 1 Punkt ebenso für weitere als besonders umweltbelastende Effekte. Sind durch die Art der Nutzung auch explizit umweltentlastende Effekte verbunden, können auch bis zu 1 Entlastungspunkt angerechnet werden.

4.3.2.6 Ökonomische Nachhaltigkeit

Wirtschaftliche Aspekte werden gemäß dem sogenannten Drei-Säulen-Konzept als Bestandteil für die Bewertung einer Nachhaltigen Entwicklung verstanden. Die Bioökonomiestrategie der Bundesregierung (BMBF 2020) enthält zumindest zwei klar ökonomisch ausgerichtete strategische Ziele:

- Die Ressourcenbasis der Wirtschaft nachhaltig ausrichten
- Deutschland zum führenden Innovationsstandort der Bioökonomie ausbauen.

Auch die Bioökonomiestrategie der EU benennt als eines der Ziele die *Wettbewerbsfähigkeit und Arbeitsplätze* (European Commission 2018). Im EU Green Deal ist die *Entkopplung Wirtschaftswachstum von Ressourcennutzung* ein fundamentales Ziel.

Die Frage stellt sich somit auch hier, wie ein ökonomisches Kriterium für die hier vorliegenden Aufgabenstellung zu formulieren wäre. *Kosteneffizienz* wäre naheliegend, zumal es in Verbindung mit Ressourcenverbrauch bei höherer Wertschöpfung mit dem erwähnten Ziel des EU Green Deal korrespondieren würde. Gerade aber bei innovativen und dynamischen Produktionsprozessen sind jedoch Preise und Kosten schwierig mit belastbaren Daten zu belegen. Preise unterliegen jedoch oft starken Veränderungen und außerdem wirken Politiken durch verschiedene Incentivierungen bereits marktpreisbeeinflussend.

Einen wichtigen Aspekt kann allerdings die Frage der Investitionssicherheit bilden. Viele Bereiche der Bioökonomie sind mit hohen Investitionsvorleistungen verbunden. Ob sich die angestrebten Märkte jedoch in der erwarteten Weise realisieren lassen, ist mit großen Ungewissheiten verbunden. Eine operationale Frage ist dabei, ob dieses Kriterium mit „positiven“ oder „negativen“ Punkten bewertet wird? Dies kann nur im Kontext der Art der betrachteten Randbedingungen entschieden werden. So ist das Vorhandensein von stabilisierenden Faktoren grundsätzlich positiv zu werten. Fehlen solche bei bereits getätigten oder bevorstehenden Investitionen, d.h. es liegt ein hoher Bedarf zur Schaffung von Stabilität vor, ist dies nicht von vorne herein als negativ zu werten, sondern muss im Licht der Perspektive zum Bedarf dieser Produkte auch im Blick auf mittel- bis längerfristig nicht zur Verfügung stehenden erneuerbaren Alternativen bewertet werden.

Folgende Randbedingungen werden an dieser Stelle für eine verbale Abwägung in Betracht gezogen.

Vorschlag eines Kriteriums zur Bewertung der ökonomischen Nachhaltigkeit

Einschätzung der Stabilität der Rahmenbedingungen für die Investitionsentscheidung einer BÖ-Technologie anhand v.a. folgender Fragen:

- ▶ Liegt ein breites Fundament an politischen Fördermaßnahmen für diese Produktions- und Nutzungsweise vor?
- ▶ Wurden durch bisher bestehende politische Fördermaßnahmen Investitionen getätigt, die nicht weiter aufrecht erhalten werden können bei Abbau der Förderung?
- ▶ Besteht Perspektive auf eine ökonomische Zukunft für die Produktions- und Nutzungsweise bei mittelfristigem Abbau der Förderung?
- ▶ Kann die nötige Infrastruktur wie Produktionsanlagen auch in einer postfossilen Ökonomie weiter produktiv genutzt werden? (z.B. unabhängig von fossiler Infrastruktur betreibbar, langfristig konkurrenzfähig zu CCU/PtX-Prozessen, so ausgelegt, dass sie umgenutzt werden können)

Anhand einer verbalen Einschätzung werden zwischen 2 Entlastungspunkten und 0 Punkten vergeben.

4.3.2.7 Kohärenz mit Nachhaltigkeitszielen anderer Strategien

In Kapitel 4.1.1.1 wurden verschiedene mit der Bioökonomie verbundene Strategien und rechtliche Normen vorgestellt und in Tabelle 8 nach den für einen Nachhaltigkeitsbewertung relevanten Themenkomplexen systematisiert. Die sich hier stellende Frage lautet: Wie kompatibel ist eine bestimmte Biomassenutzung mit den Zielen der relevanten Strategien und rechtlichen Setzungen? Zu diesen zählen:

- ▶ Die Bioökonomiestrategien der EU und Deutschlands
- ▶ Die Biodiversitätsstrategie der EU und Deutschlands,
- ▶ Die Ziele des Bundes-Klimaschutzgesetzes,
- ▶ Die Ziele des Bodenschutzgesetz,
- ▶ Der „Circular Economy Action Plan“ der EU
- ▶ Sowie der EU-Green Deal.

In Tabelle 12 werden zu den Themenkomplexen aus diesen Strategien und Rechtssetzungen heraus Fragen formuliert, die in Form von Kriterien an die Art einer Biomassenutzung zu richten sind. Die hierin formulierten Kriterien wirken dabei wie eine Wiederholung der vorausgehend vorgestellten Kriterien. Dies liegt in gewisser Weise in der Natur der Sache, da diese gleichfalls entlang der sechs Themenkomplexe erarbeitet wurden. Die in Tabelle 12 formulierten Fragen eröffnen jedoch jeweils eine weitere Perspektive auf die Themen und decken sich in ihren Indikationen nicht direkt mit den vorausgehenden Kriterien. Dies trifft jedoch auf das letzte Kriterium – die ökonomische Nachhaltigkeit und die dazu formulierte Fragen – nicht zu. Da hier tatsächlich eine Dopplung mit dem vorangehend angesetzten Kriterium vorliegt, wird dieses Thema nicht nochmal in das hier definierte Kriterium zur Kohärenz einbezogen.

Tabelle 12: Zusammenstellung von Kriterien zur Prüfung der Kohärenz einer bestimmten Biomassenutzung mit übergreifenden Strategien und Rechtssetzungen

Themenkomplex	Kriterien: Inwieweit dient/entspricht die Biomassenutzung ...	Bezug zu Strategie oder und Rechtssetzung
Ressourcenschutz	• der Rohstoffwende • Der Verringerung von Abhängigkeit von nicht erneuerbaren, nicht nachhaltigen Rohstoffen • Kaskadenförmige Nutzung • Verbindliche Recyclingquote	• BÖR Handlungsfelder • EU und Nationale Bioökonomiestrategie • EU Circular economy
nachhaltige Landnutzung Schutz von Biodiversität & Ökosystemleistungen	• Dem Schutz des Naturkapitals, der Biodiversität und der Ökosystemleistungen • Dem Ziel der Unterschutzstellung von 10 % der landwirtschaftlichen Fläche	• EU-Biodiversitätsstrategie • EU Green Deal • BÖR Handlungsfelder • EU und Nationale Bioökonomiestrategie • Bundesbodenschutzstrategie
Klimaschutz	• einer klimaneutralen Wirtschaft • einer Klimaneutralität bis 2045 • Dem Ausbau natürlicher CO₂-Senken • Maßnahmen & Innovationen zur THG-Reduzierung • der Anpassung an den Klimawandel	• Bundesklimaschutzgesetz
Ernährungs- und Nahrungsmittelsicherheit	• Der Sicherung von Nahrungsmitteln und Ernährung	• EU Bioökonomiestrategie
Gesundheit und Umwelt	• Einer umweltgerechten Biomassenutzung/-produktion • Dem Ziel von 25 % ökologischer Landbau bis 2030 • Der Reduktion des Pestizideinsatzes um 50%	• EU-Biodiversitätsstrategie
Ökonomische Nachhaltigkeit	• Stabile Rahmenbedingungen für BÖ Innovationen • Der Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit Europas und Schaffung von Arbeitsplätzen	• BÖR Handlungsfelder • EU Bioökonomiestrategie • EU Green Deal

Zusammenstellung: ifeu

Für die Bewertung in Form einer verbalen Einschätzung wird dabei wie folgt vorgegangen:

Vorschlag eines Kriteriums zur Bewertung der Kohärenz mit Nachhaltigkeitszielen anderer Strategien

Ist davon auszugehen, dass die Art der Biomassenutzung die anderen Strategien und rechtlichen Setzungen – jeweils in Bezug auf die herausgestellten Themenkomplexe (ausgenommen die ökonomische Nachhaltigkeit) – in ihren Zielen

- ▶ unterstützt,
- ▶ sich indifferent verhält oder
- ▶ gegenläufig verhält?

Pro Themenkomplex werden je nach Einschätzung jeweils -0,5 Entlastungspunkte, Null Punkte oder +0,5 Belastungspunkte vergeben.

4.3.3 Betrachtung der Ernährungssicherheit

Wie bereits erwähnt lautet das oberste der fünf strategischen Ziele der Bioökonomie seitens der EU „Nahrungsmittel- und Ernährungssicherheit“. Das Prinzip **Food first** bildet damit bereits einen Priorisierungsrahmen für die Biomassenutzung. Die Frage lautet daher, wie kann dieses Prinzip innerhalb der zu erarbeitenden Ansatzpunkte für eine Priorisierung der verschiedenen Nutzungswege von Biomasse verankert werden?

Eine Möglichkeit besteht in einem Kontingent der Landnutzung für Nahrungsmittelproduktion. Konkret bedeutet dies, dass ein Teil der verfügbaren Landnutzungsfläche ausgeschlossen wird für non-food-Nutzungen. Die Frage ist, wie dieses Kontingent zu bestimmen wäre.

Ein Ansatz wäre ausgehend von einem heutigen mittleren (globalen) Konsum (inkl. tierischer Erzeugnisse) einen pro-Kopf-Bedarf abzuleiten. Dies würde einer Art Höchstwert entsprechen. Dieser Wert könnte angepasst werden durch die Annahme eines mittleres (globalen) Konsums anhand weitgehend pflanzlicher Proteinversorgung und einem hohem Anteil Ökolandbau. Es verbleibt dann jeweils ein restliches Landnutzungskontingent für non-food-Nutzungen.

Ansätze liefern auch:

- EAT Lancet (Willett et al. 2019)
- Klimateller (WWF 2012)

In den **Langfristszenarien** (LFS-3) wurde für die Bestimmung eines nachhaltigen Biomassepotenzial der **Ansatz der Flächensuffizienz** vorgeschlagen (Köppen, Rettenmaier 2023). Diese Ansätze wurden bereits in Kapitel 4.1.3 beschrieben. Für die Bestimmung des nachhaltigen Biomassepotenzials durch (Hennenberg et al. 2023b) wurde auf den Ansatz von (Köppen, Rettenmaier 2023) Bezug genommen.

Inwiefern eine Nahrungsmittelproduktion ohne nennenswerte Ackerflächennutzung und stattdessen unter Nutzung von Elektrizität langfristig eine Rolle spielen könnte, scheint derzeit unklar. Unter den Stichworten in-vitro-Fleisch (Vermehrung tierischer Zellen im Bioreaktor mit Energie und Nährlösungen) oder Molecular Agriculture (z.B. Mikrobielle Proteine aus CO₂, Stickstoff und Strom) wie auch Vertical Farming entstehen allerdings gerade erste große Industrieanlagen.

4.3.4 Mögliche Kriteriensätze für die Bewertung der Art Biomasse

Wenngleich hier die Frage, welche Art der Nutzung einer Biomasse zu priorisieren ist, im Vordergrund steht, ist auch die Frage, um welche Art von Biomasse es sich handelt, zu berücksichtigen. Gerade für die agrarische Biomasse führt die Abschätzung des nachhaltig verfügbaren Potenzials primär zu einer Anbaufläche in Mio. Hektar. Welche Art Biomasse auf dieser Fläche für den Nicht-Nahrungs-Bereich angebaut werden soll, ist jedoch separat zu entscheiden. (Köppen, Rettenmaier 2023) haben als entscheidendes Kriterium die Flächeneffizienz angewendet, d. h. mit welcher Art von Biomasse ist der höchste Ertrag in Form von Masse oder Energie auf der verbleibenden Fläche zu erreichen. Dies trifft für den Anbau von Kurzumtriebsplantagen (KUP) zu.

Als eine mögliche Alternative werden in der hier vorliegenden Arbeit die Kriterien auf folgende Liste hin ergänzt.

- ▶ Flächeneffizienz als Biomasseertrag pro Hektar
- ▶ Treibhausgasemission in kg CO₂eq pro Tonne (TM) Biomasse
- ▶ Biodiversitätskonflikte, als zusammengefasstes und qualitativ ausgewertetes Kriterium aus verschiedenen Aspekten wie:
 - Intensität des Eingriffs in die Natur durch die Anbauweise (Hemerobie),
 - Risiko der Landnutzungsänderung.
- ▶ Verwendbarkeit, ebenfalls zusammengefasst und qualitativ ausgewertet aus:
 - Einfache Verwendbarkeit (ohne aufwändige Verarbeitung auch für Zwecke jenseits einer reinen energetischen Nutzung verwendbar),
 - Vielfältige Verwendbarkeit für verschiedene Produktanwendungen.

Ergänzt werden könnte die Liste um Indikatoren, die Ökobilanzen oder auch in den Planetaren Grenzen enthalten sind und die maßgeblich für die Biomasseproduktion relevant sind wie: Eutrophierung bzw. biogeochemische Flüsse N und P, Versauerung sowie Wasserverfügbarkeit.

Für den Bereich der Forstbiomasse und des Abfall- und Reststoffen ist eine solche Bewertung nicht erforderlich. Bei Abfall- und Reststoffen stellt sich die Frage einer Wahl der Art nicht, da diese qua Definition unbeabsichtigt entstehen. Bei Forstbiomasse wäre z. B. die Frage, welche Baumarten sollten bevorzugt forstlich kultiviert werden, durchaus interessant. Sie würde jedoch zu tief in die Handlungsoptionen der sehr lokal gegebenen Randbedingungen einer nachhaltigen Forstwirtschaft eingreifen. Dies geht weit über den Zielrahmen dieses Vorhabens hinaus.

4.3.5 Vorschlag zur Operationalisierung der Kriterien

Die hier gewählte Vorgehensweise ist eine „klassische“ multi-kriterielle Bewertung. Der Vorteil liegt in der Breite an Aspekten, die dadurch berücksichtigt werden können. Die Problematik liegt darin, wie die verschiedenen Kriterien gegeneinander abgewogen werden können, sofern sie in unterschiedliche Ergebnisrichtungen zielen. Eine Aggregation unterschiedlicher Kriterien nach numerischen Rangfolgen zu einem Einzelwertergebnis („single score“) ist dabei besonders schwierig, da aus wissenschaftlicher Sicht keine Grundlage für solche numerischen Rangfolgen existiert. Aus diesem Grund wird auch in Ökobilanzen nach den Vorgaben der ISO 14044 eine Gewichtung ausgeschlossen.⁴⁸ Dies entspricht auch den Vorgaben des Umweltbundsamts für Ökobilanzen. Auf der anderen Seite existiert mit dem PEF (Product Environmental Footprint der (European Commission 2021)) ein europaweit offiziell anerkanntes Bewertungsinstrument nach Art der Ökobilanz, das eine Gewichtung der verschiedenen Wirkungskategorien vornimmt.

Doch weniger der PEF als vielmehr das Ziel einer möglichst pragmatischen Vorgehensweise zur Zusammenstellung der Ergebnisse bei vollständiger Transparenz ist die Motivation, für das Vorgehen hier die Kriterien anhand numerischer Größen zusammen zu führen.

Alternativ möglich ist auch eine qualitative auf argumentativer Grundlage durchzuführende Einschätzung. Diese bedarf bei gegenläufigen Ergebnissen in den Kriterien dennoch einer auf Werthaltungen beruhenden Endbewertung. Eine weitere Option, mit der eine Aggregation vermieden werden kann, wurde auch bereits in Kapitel 3 angesprochen: Quantifizierung nur der THG-Bilanz und die anderen Kriterien nur zur qualitativen Gegenprüfung. Will man damit im

⁴⁸ ISO 14044 Nr. 4.4.5: „Die Gewichtung, wie in 4.4.3.4 beschrieben, darf nicht in Ökobilanz-Studien angewendet werden, die für die Verwendung in zur Veröffentlichung vorgesehenen vergleichenden Aussagen bestimmt sind.“

Fälle von gegenläufigen Ergebnissen zu einer Gesamteinschätzung kommen, bedarf es jedoch ebenfalls Werthaltungen.⁴⁹

Für das Vorgehen wird daher eine Punktvergabe bei gleichzeitiger kritischer Hinterfragung der jeweiligen Beiträge zum Ergebnis empfohlen.

In den folgenden Abschnitten wird jeweils eingangs die Vorgehensweise bei der Punktwertvergabe beschrieben.

4.3.5.1 Operationalisierung der Kriterien für die Bewertung der Art Biomasse

Hier gilt es gemäß der Aufgabenstellung dieses Arbeitspakets anhand der Kriterien (Kapitel 4.3.4) die Frage zu beantworten, ob angesichts der limitiert zur Verfügung stehenden Fläche bestimmte Arten von Biomassen eher zu bevorzugen wären. Umgekehrt soll daraus zu erkennen sein, ob auf bestimmte Arten von Biomassen eher verzichtet werden soll.

Hierzu werden die vier Kriterien zusammengeführt zu jeweils einer vierstufigen Klassifizierung von „vorteilhaft“, über „eher vorteilhaft“ und „eher nachteilig“ bis „nachteilig“. Die qualitativen Kriterien (Biodiversitätskonflikte und Verwendbarkeit) werden jeweils ebenfalls in diese Klassen eingestuft, wobei für „vorteilhaft“ 3 Punkte vergeben werden, 2 Punkte für „eher vorteilhaft“, 1 Punkt für „eher nachteilig“ und null Punkte für „nachteilig“.

Die Kriterien **Flächeneffizienz** und **Treibhausgasemission** lassen sich quantifizieren und werden, damit sie sich in die gleiche Punkte-Logik einpassen lassen, umskaliert auf 3 Punkte für den höchsten Ertrag bzw. der niedrigsten Treibhausgasemission. Für Letztere bedarf es eine Anpassung, weil die Werteskala gegenläufig zu Emissionshöhe verläuft. Daher wird auf die Differenz des Emissionswerts jeder Feldfrucht vom insgesamt höchsten Ergebnis skaliert. Beispiel:

1. die betrachte Feldfrucht weist 100 kg CO₂Äq/t auf,
2. der höchste Wert unter den Feldfrüchten beträgt 400 kg CO₂Äq/t
3. die Skalierung für die betrachte Feldfrucht errechnet sich auf 0,75 ($= (400 - 100)/400$);
4. die Skalierung wird auf den Maximalwert 3 hochgesetzt, für die betrachte Feldfrucht ergibt sich: 2,25 ($= 0,75 \times 3$).

Dieses Vorgehen mit „umgekehrter Skalierung“ für die THG-Emissionen weist eine Problematik auf: Liegt der Höchstwert einer Feldfrucht weit über den Werten aller anderen Feldfrüchte, so rücken diese alle nahe bei einem 3-Punkte bis zusammen, da sie alle einen hohen Abstand zu diesem Höchstwert aufweisen. Solche Extremwerte mit besonders hohen spezifischen Emissionen werden somit als „Ausreißer“ betrachtet und nicht als Bezugswert genommen. Stattdessen wird der zweithöchste Wert für die (umgekehrte) Skalierung verwendet.

Die zwei Unterkriterien zur Beschreibung von **Biodiversitätskonflikten**, werden wie folgt operationalisiert:

- a) Für die **Hemerobie** werden die im Rahmen der UBA-Vorhabens Flächenrucksäcke für Güter und Dienstleistungen (Fehrenbach et al. 2021d) getroffenen Einstufungen von Agrarprodukten angesetzt. Diese verteilen sich über die vier Hemerobiestufen von III bis VI.
- b) Das **Risiko der Landnutzungsänderung** folgt dem Gedanken des Biomasserohstoffs mit hohem Risiko für indirekte Landnutzungsänderung nach der RED III. Konkret werden hier

⁴⁹ Ebenfalls eine Option für die Nachhaltigkeitsbewertung komplexer Systeme bietet die Integrierte Lebenszyklus-Nachhaltigkeitsanalyse (Integrated life cycle sustainability assessment, ILCSA) (Keller et al. 2015)

dazu feldfruchtbezogene Werte, die tatsächlich einer Landnutzung zuzuordnen sind, herangezogen.⁵⁰

Die zwei Unterkriterien zur Beschreibung von **Verwendbarkeit**, werden wie folgt operationalisiert:

- a) **Einfache Verwendbarkeit** setzt voraus, dass die agrarisch gewonnene Biomasse ohne weitere aufwendige Prozessschritte Verwendung finden kann. So müssen Rapskörner zwar erst gemahlen werden, um Öl und Ölkuchen zu erzeugen, diese können dann jedoch direkt verwendet werden. Holz aus Kurzumtriebsplantagen oder Miscanthus kann ohne aufwändige Weiterverarbeitung im Grunde lediglich zu Energiezwecken genutzt werden. Die Einstufung in eine der vier Klassen für die Punktvergabe muss transparent argumentativ begründet werden.
- b) **Vielfältige Verwendbarkeit** für verschiedene Produktanwendungen setzt voraus, dass die agrarisch gewonnene Biomasse ggf. unter Einbeziehung einer entsprechenden Verarbeitung zu vielfältigen (stofflichen) Zwecken eingesetzt werden kann. Auch hier erfolgt die Einstufung in eine der vier Klassen für die Punktvergabe mit transparent argumentativer Begründung.

4.3.5.2 Operationalisierung der Kriterien für die Priorisierung der Art Biomassenutzung

Wie aus den Erläuterungen zu Kriterien den Kapiteln unter 4.3.2 jeweils in den Boxen hervorgeht, werden für die betrachteten Arten der Biomassenutzung Wertpunkte (Entlastungs- und Belastungspunkte) vergeben und am Ende aufsummiert. Anhand dieses Punkteergebnisses gilt es gemäß der Aufgabenstellung dieses Arbeitspakets folgende Fragen zu beantworten:

- Welche Biomassenutzungen sind unter Umwelt- und Naturschutzaspekten als umweltgerecht zu priorisieren?
- Welche Nutzungen von Biomassen sind im Umkehrschluss nicht umweltgerecht zu gestalten und sollten deshalb eingeschränkt werden?

Während bei der Vergabe der Punkte bereits zweifellos subjektive Einschätzungen einfließen, ist dies bei der Festlegung der Methodik, wie diese Fragen anhand der Punktezahl zu beantworten sind, umso mehr der Fall. Eine „objektive“ rein an wissenschaftlichen Maßstäben ausgerichtete Vorgehensweise ist hier nicht möglich. Daher ist ein transparentes Verfahren besonders wichtig.

4.3.5.3 Mögliche Optionen

Grundsätzlich sind verschiedene Wege zu Antworten zu kommen, möglich. Folgende Möglichkeiten bieten sich an und werden abgewogen:

1. Definition einer Mindestpunktzahl, die erreicht werden muss, um als *umweltgerecht* eingestuft zu werden und das Prädikat der Priorisierung zu erreichen und einer Mindestpunktzahl, die beim Unterschreiten als *nicht umweltgerecht* eingestuft wird. Auch hier bestehen verschiedene Möglichkeiten wie z.B.:
 - a. ein rein binäres Ergebnis: entweder umweltgerecht oder nicht umweltgerecht – hierfür braucht es nur einen Mindestwert, oder
 - b. eine Unterscheidung in drei Klassen:
 - i) Klasse 1: zu priorisierende Nutzungsweise,
 - ii) Klasse 2: weder zu priorisieren noch einzuschränken,
 - iii) Klasse 3: einzuschränkende Nutzungsweise.

⁵⁰ Konzept der sogenannten attribuierten Landnutzungsänderung, attributional LUC, aLUC (siehe (Fehrenbach et al. 2021b))

Hierfür braucht es zwei Mindestwerte.

2. Einbeziehung von harten Ausschlusskriterien; dies wäre vorrangig für die Einschränkung anzusetzen und kann entweder allein für sich angewandt werden (alles was nicht ausgeschlossen wird, wäre dann zu priorisieren) oder in Kombination mit einem Punktesystem wie unter 1.)

4.3.5.4 Vorschlag einer Vorgehensweise

Für das Vorgehen hier wird die Option 1b eingesetzt, weil dies die einzelnen Ergebnisse weitest möglich differenzieren lässt. Die Definition von Ausschlusskriterien wird dagegen als kritisch erachtet, weil hier letztlich nur grobe und eindeutig identifizierbare Verstöße gegen Prinzipien der Nachhaltigkeit zu rechtfertigen wären. Das Prinzip der Priorisierung sollte sich grundsätzlich eher an positiven Effekten ausrichten.

Bleibt die Frage, wie die Zuordnung in die Klassen 1 bis 3, d.h. konkret die Schwellenwerte, festgelegt werden sollen. Die mögliche Bandbreite an Wertpunkte-Summen ist nicht fest definiert, da die quantitativen Ergebnisse für Ressourceneffizienz und Klimaschutz anhand von konkreten Lebenswegdaten errechnet werden. Mit vorausschauendem Blick auf die potenzielle Bandbreite in diesen beiden Kriterien zeichnet sich ein Bereich von 0 bis plus 6 für Ressourceneffizienz und von minus 8 bis plus 5 für Klimaschutz ab. Durch die vier weiteren Kriterien können sich jeweils weitere Bandbreiten zwischen minus 2 und plus 2 Wertpunkten hinzurechnen. Beim Kriterium „Kohärenz“ liegt die Bandbreite zwischen maximal minus 3 und plus 3 Wertpunkten.

Theoretisch wäre eine Gesamtbandbreite zwischen minus 15 und plus 20 Punkten möglich. In der Anwendung wird sich das stärker einengen. Das Prinzip folgt jedoch der Logik, dass Biomassenutzungen

1. mit eindeutigem Summenergebnis im „Negativen“ Bereich, d. h. mit überwiegenden Umweltentlastungspunkten in die Klasse 1, der zu priorisierenden Nutzungsweise,
2. mit einem Ergebnis um den „Nullbereich“ der Klasse 2, der weder zu priorisierenden noch einzuschränkenden Nutzungsweise
3. mit eindeutigem Summenergebnis im „Positiven“ Bereich, der Klasse 3, d.h. der einzuschränkende Nutzungsweise

einzuordnen sind.

4.4 Anwendung des Kriteriensatzes auf die Art der Biomasseströme

Die Frage, welche Art von Biomasse aufgrund von Umwelt- bzw. Nachhaltigkeitskriterien vorzugsweise produziert werden soll, wird hier nur in Anlehnung an die unter Kapitel 4.3.2 beschriebenen Kriterien behandelt, da die Nutzung erst im zweiten Schritt (Kapitel 4.5) betrachtet wird.

4.4.1 Waldholz

Inwieweit schlagen sich die Restriktionen für das Potenzial an Waldholz auf die Art des Holzes nieder? Diese Frage ergibt sich durch Waldumbau sowie durch Erhöhung der Anteile an Extensivierung und naturnaher Waldbewirtschaftung. Es ist somit das Angebot an Holz und dessen Art, was sich verändert – unabhängig von der Art und Höhe der Nachfrage. Allerdings hat die Art des Holzes deutlichen Einfluss auf die Nutzungsmöglichkeiten. So kann die aktuelle Dominanz an Nadelholz für die Sägeholzwirtschaft nicht eins zu eins mit Laubholz ersetzt werden, denn die Sägereibetriebe sind in ihrer Mehrzahl nicht auf Laubholz ausgelegt. Außerdem unterscheiden sich die Qualitäten der Laubhölzer in Bezug auf ihre Verwendbarkeit gegenüber des insbesondere von Sägereien bevorzugten Fichten- oder Kiefernholzes. So

erfordern z. B. tragende Balken für den Baubereich aus Buchenholz die Verarbeitung als Leimholz. Lösungen dafür bieten sich somit an, sind bisher jedoch nur vereinzelt umgesetzt.⁵¹

Auch die Anteile der Sortimente (Stammholz für Sägereien und Industrieholz für Papier/Zellstoff, Holzwerkstoffe und Energie) verändern sich mit der Umstellung auf Extensivierung und naturnahe Waldbewirtschaftung, da die Durchforstung verringert wird zur Erhöhung des Stammholzanteils.

Das dahinterstehende Ziel beschreibt bereits eine gewisse Vorrangsetzung für die stoffliche Nutzung in Bereichen wie z.B. der Bauwirtschaft. Die Anwendung von Priorisierungskriterien für die Nutzungsweise erfolgt hier jedoch erst im Kapitel 4.5. Bezüglich der Zusammensetzung des Potenzials an nutzbarem Waldholz wird das Ergebnis der Szenarien aus (Hennenberg et al. 2023b) angesetzt.

4.4.2 Agrarische Biomasse

Anders als bei Waldholz ist nach der Festlegung des nachhaltigen Potenzials (Kapitel 2.2.2) für agrarische Biomasse offen, um welche es sich hier konkret handeln würde, die auf den verfügbaren 1,5 Mio. ha erzeugt werden kann. Dabei ist nicht einmal vorentschieden, ob sich diese Fläche in Deutschland oder außerhalb befindet, da über das Prinzip der Flächensuffizienz bereits ein Netto-Null-Flächenimport gesichert ist.

Die Auswahl an Arten von Biomasse zur Beurteilung wurde bereits in Tabelle 10 zusammengestellt. Sie ist exemplarisch zu verstehen und deckt keinesfalls das gesamte Spektrum ab. Die Kriterien für die Bewertung von Biomassearten wurden in Kapitel 4.3.4 formuliert. In Tabelle 13 werden zu den agrarischen Biomassearten die Ergebnisse in den Kriterien zugeordnet. Es sei betont, dass diese Bewertung nur eine grobe Orientierung bietet. Die umweltbezogenen Aspekte der Biomasseproduktion sind weit komplexer und umfangreicher, als es sich anhand dieser vier Kriterien darstellen lässt. Außerdem basieren die klassenweise Punktevergabe bzw. die gleichrangige Gewichtung der Kriterien auf einer pragmatischen wie subjektiven Einschätzung. Wirklich vergleichen lassen sich im Grunde auch nur die Biomassen, die zu gleichartigen Produktnutzen führen, da eine Priorisierung zwischen Baumwolle für Kleidung und Raps für Nahrung oder Biokraftstoff keinen Sinn ergibt.

Dennoch lässt sich anhand dieser vier Aspekte – die die essenziellen Kriterien wiedergeben – ein gutes Gesamtbild für eine grobe Orientierung herausdestillieren (siehe hierzu auch Abbildung 49).

Dieses lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- ▶ Für viele Anbaufrüchte gleichen sich Vor- und Nachteile weitgehend aus, sodass trotz vieler Extrempplatzierungen in einzelnen Kriterien ein gemäßigtes Gesamtbild entsteht.
- ▶ Insgesamt eher nachteilige Bewertungen ergeben sich für Baumwolle und Soja, wo schlechte Flächeneffizienz, relativ hohe THG-Emissionen (bei Baumwolle sogar weit höher als alle übrigen Biomassen, sodass hier eine gesonderte besonders nachteilige Beurteilung gerechtfertigt wäre) plus Biodiversitätskonflikte. Letztere führen auch für Palmöl (trotz guter Flächeneffizienz für ein Ölpflanze) zur nachteiligen Gesamtwertung.
- ▶ Sonnenblume und Raps setzen sich nur leicht von dieser Schlussgruppe ab.

⁵¹ Siehe z.B. „Baubuche“: <https://www.pollmeier.com/de/baubuche/>

- Die Getreidepflanzen (Körnerfrucht) belegen das „höhere Mittelfeld“, in welches sich auch Zuckerrohr einordnet.
- Noch etwas vorteilhafter zeigen sich die Energiepflanzen Maisganzpflanze, Miscanthus und Kurzumtriebsplantagen, wobei sich die hohe Flächeneffizienz und die günstige THG-Bilanz hier v.a. niederschlagen; aber auch die potenziell vielfältige Nutzenanwendung jenseits von Energie liefert Pluspunkte.
- Das vorteilhafteste Ergebnis erzielt die Zuckerrübe aus den gleichen Gründen wie die vorangehende Gruppe bei nochmals etwas höherer Flächeneffizienz; setzt man voraus, dass der Zuckerrübenanbau quasi zu einem Zwischenfruchtanbau „verpflichtet“, würde sich diese gute Platzierung weiter untermauern.

Tabelle 13: Beurteilung verschiedener Biomasseströme anhand ausgewählter Kriterien

Stoffgruppe	Konkrete Arten	Flächeneffizienz		THG-Emission		Biodiversitätskonflikte		Verwendbarkeit		Gesamt
		t TM/ (ha * a)	Pkt.	kg CO ₂ Ä./ t TM	Pkt.	Intens.	LUC	Aufw.	Div.	
Öl-/Proteinpflanzen	• Raps	4,23	0,77	385	0,11	V	2	3	2	1,22
	• Sonnenbl.	2,96	0,54	400	0,00	V	2	3	2	1,13
	• Soja	3,00	0,54	290	0,83	VI	0	3	3	1,09
	• Palmöl	3,80	0,69	277	0,92	V	0	2	2	1,03
Stärkepflanzen	• Weizen	7,74	1,40	237	1,22	VI	2	3	3	1,66
	• Roggen	5,06	0,92	223	1,33	V	2	3	3	1,81
	• Mais	8,81	1,59	161	1,79	VI	2	3	3	1,85
Zuckerpflanzen	• Zuckerrübe	16,59	3,00	75,4	2,43	VI	2	3	3	2,36
	• Zuckerrohr	11,25	2,03	100	2,25	V	1	3	3	1,95
Faserpflanzen	• Baumwolle	0,80	0,14	2.500	3,00	VI	1	3	0	0,54
Energiepflanzen	• Mais	11,74	2,12	101	2,24	VI	2	3	2	1,97
	• Miscanthus	10,00	1,81	110	2,18	V	2	2	3	2,00
Kurzumtriebsplantagen	• Pappel/ Weiden	10,00	1,81	33	2,75	IV	2	2	3	2,02

Quelle: Berechnungen und Einschätzungen ifeu;

Erläuterungen: Erntegut in t TM umfasst alle direkt nutzbaren Produkte der Pflanze (z.B. bei Raps das Öl sowie der Presskuchen);

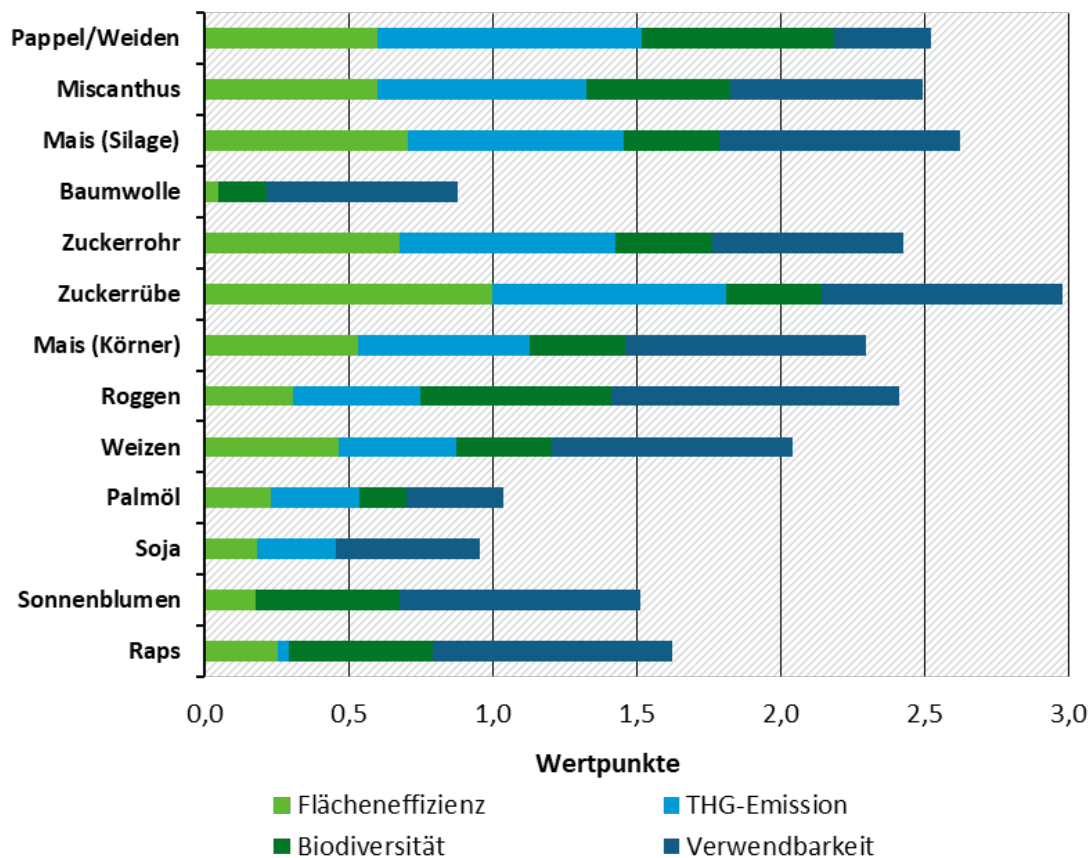
„Intens.“: Intensität des Eingriffs in die Natur durch die Anbauweise nach den auf Agrarflächen bezogenen Hemerobiestufen von III bis VI, wobei III grün; IV orange; V rot; VI dunkelrot; Methode nach (Fehrenbach et al. 2021b); Daten nach (Fehrenbach et al. 2021d)

„LUC“: Risiko der Landnutzungsänderung

„Aufw.“: Einfache Verwendbarkeit (ohne aufwändige Verarbeitung)

„Div.“: Vielfältige Verwendbarkeit für verschiedene Produktanwendungen

Abbildung 49: Darstellung der punkweisen Beurteilung verschiedener Biomasseströme anhand von vier Kriterien – je höher der Wert, desto vorteilhafter



Darstellung ifeu

4.4.3 Biogene Abfälle und Reststoffe

Wie in Kapitel 4.3.4 erwähnt, ist diese Art der Beurteilung von Biomasse für biogene Abfall- und Reststoffen nicht erforderlich, da diese qua Definition nicht gezielt erzeugt werden, sondern anfallen.

4.5 Anwendung von Priorisierungskriterien auf die Nutzung der Biomasse

4.5.1 Kriterien und Daten

4.5.1.1 Rohstoffeffizienz

Für dieses Kriterium wurde der Indikator des biotischen Kumulierten Rohstoffaufwands (KRA_{biotisch}) als Basisansatz ausgewählt, ergänzt durch einen Rohstofferhaltungs-Faktor. Daten dazu sind für eine Auswahl an relevanten Biomassennutzungen in Tabelle 35 zusammengestellt. Sie beziehen sich auf 1 kg C im Produkt – bei Energie das C im finalen Biobrennstoff. Außerdem wird der sekundäre Rohstoffaufwand als $KRA_{\text{bio-rest}}$ für die Nutzung von biogenen Abfällen und Reststoffen ausgewiesen. Er beinhaltet somit auch Reststoffe, die in den Fach-Termini unter „nicht verwerteter Entnahme“ fallen. Bei der Nutzung primärer Rohstoffe wie z. B. Weizenkorn für Ethanolproduktion wäre dies das Stroh. Da Stroh aber auch als Rohstoff genutzt werden kann, wird dies an dieser Stelle ebenfalls mit einem $KRA_{\text{bio-rest}}$ separat ausgewiesen.

Unter Einbeziehung des Rohstofferhaltungs-Faktors werden für den „eigentlichen“ KRA_{biotisch} aus primärer Biomasse und den $KRA_{\text{bio-rest}}$ jeweils der effektive $KRA_{\text{bio-eff}}$ angegeben. Im Folgenden werden die Ergebnisse zum einen für die Nutzungswege von Holz zusammengefasst, zum anderen für die agrarischen Rohstoffe. Die jeweiligen Reststoffe (Altholz, Stroh) werden zusammen mit den primären Rohstoffen dargestellt. Die Daten und einzelnen Ergebnisse finden sich im Anhang C in Tabelle 35.

Produkte aus Holz

In Abbildung 50 sind die Ergebnisse zum $KRA_{\text{bio-eff}}$ für die Produkte aus Holz dargestellt. Darin ist auch die Nutzung von Altholz und Altpapier einbezogen. Bei stofflichen Produkten aus Waldholz sind die Nebenströme (im Wald verbleibendes Restholz, Verschnitt und Reststoffe aus der Verarbeitung) mit Ausnahme der Nebenprodukte aus der Sägerei (Sägespäne und -mehl) in den $KRA_{\text{bio-rest}}$ eingerechnet. Diese orangen gekennzeichneten Balken in Abbildung 50 dienen zur Einordnung der Verhältnisse zwischen primärem Rohstoffaufwand ($KRA_{\text{bio-eff}}$) und den damit verbundenen Strömen, die anderweitig genutzt werden können. Sie werden nicht in die Gesamtbewertungssumme einbezogen und sind hier nur der Information halber dargestellt.

Werden Reststoffströme bei der Herstellung des Produkts selbst aufgebraucht (z. B. bei der Vergasung von Holz zur Produktion von Methanol), so fließt dies in den eigentlichen KRA_{biotisch} ein.

Im Ergebnis zeigen sich für die energetischen Nutzungsweisen von Waldholz Werte für $KRA_{\text{bio-eff}}$ von 2 kg pro kg C im Produkt (d.h. im Brennstoff). Dieser Faktor 2 ergibt sich aus dem durchschnittlichen C-Gehalt von Rohholz (50 %) und dadurch, dass dieses in Gänze in das Brennstoffprodukt ohne weitere Verarbeitungsverluste einfließt. Wird dagegen Methanol als Brenn- oder Kraftstoff aus Holz erzeugt, so erreicht der $KRA_{\text{bio-eff}}$ 6,9 kg pro kg Methanol-C. Grund dafür sind die hohen Umwandlungsverluste.⁵² Damit ragt Methanol als Produkt zur energetischen Nutzung weit aus der Bandbreite der anderen Produkte heraus. Stofflich genutztes Methanol erzielt als $KRA_{\text{bio-eff}}$ noch immer 4,5 kg pro kg Methanol-C, wobei mit einem Rohstofferhaltungsfaktor von 0,9 ein langer Ergalt des Materials angenommen wird. Der $KRA_{\text{bio-eff}}$ ist aufgrund der hohen Verluste über die Herstellungskette dennoch vergleichsweise hoch.

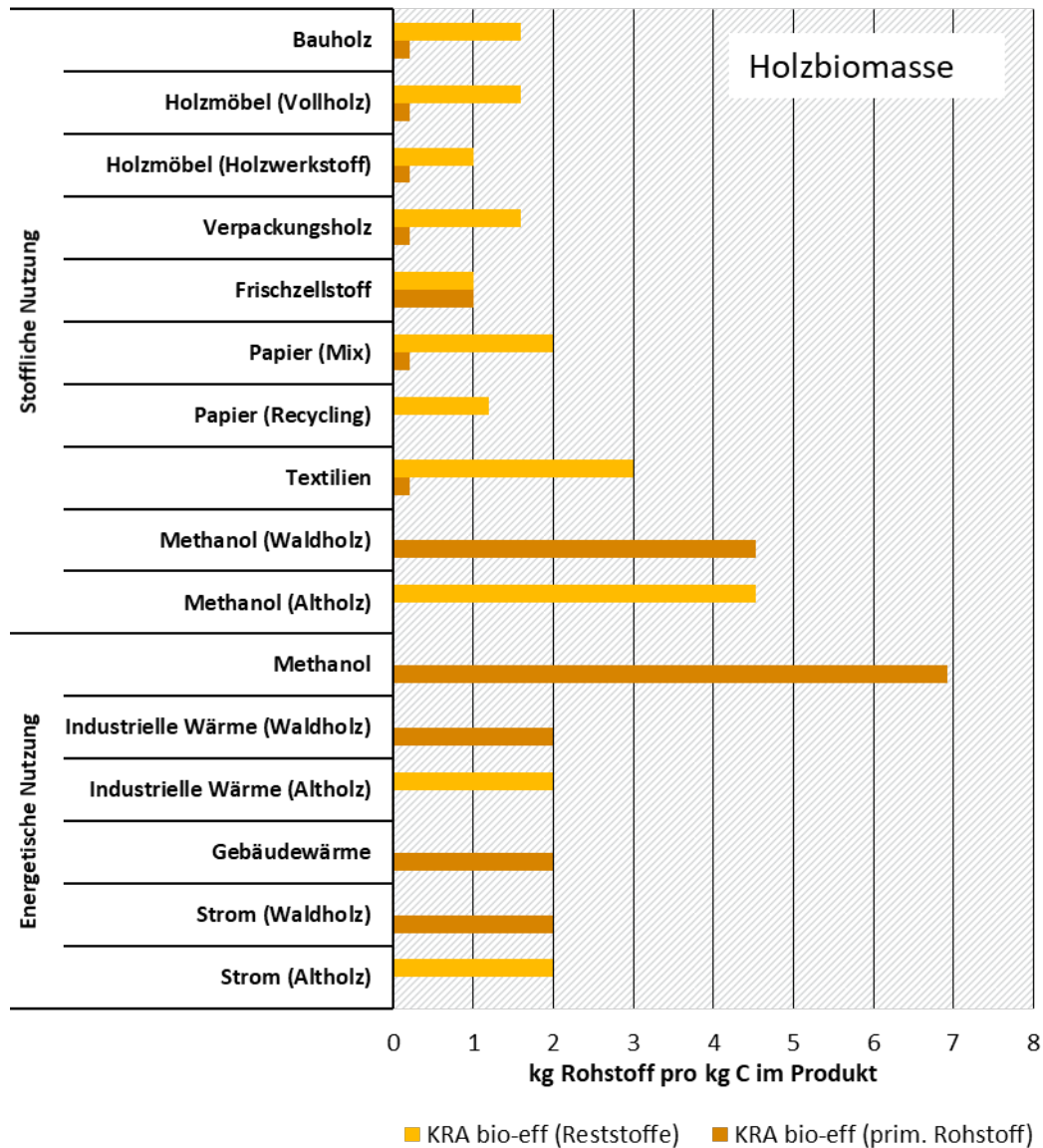
Die niedrigsten Werte werden durch direkte stoffliche Nutzung von Holz erzielt (Bauholz, Möbel, Verpackungsholz), aber auch durch Papier. Sie liegen bei 0,2 kg pro kg C in den Produkten, was durch die geringen Verluste über die Kette und den Rohstofferhaltungsfaktor von 0,9 bedingt ist. Dass bei der Verarbeitung Nebenerzeugnisse (Sägenebenprodukte) auftreten, die stofflich oder energetisch genutzt werden können, wird in den ergänzenden Balken zum $KRA_{\text{bio-rest}}$ abgebildet, der, wie oben erläutert, nicht in die Gesamtbewertung eingerechnet wird.

Die Sekundärrohstoffverbräuche für Produkte auf Reststoffbasis werden dagegen berücksichtigt, allerdings gilt es hier nicht die Primärprodukte mit den Sekundärprodukten zu vergleichen, sondern diese Produktkategorien jeweils für sich genommen. Ein Vergleich bietet sich hier für Methanol (stoffliche Nutzung) aus Altholz und direkte Altholzverbrennung an. Hierbei schlägt sich ebenfalls die verlustreiche Verarbeitung des Methanols nieder, sodass hier

⁵² Nach der WTT5-Studie (Prussi et al. 2020) liegt der energetische Umwandlungswirkungsgrad bei 0,511 MJ Methanol pro MJ Holz (trocken);, dabei sind die Heizwerte von 19 MJ/kg Holz trocken, 15 MJ/kg Holz im Handel (mit 15% Wassergehalt) und 19,9 MJ /kg Methanol einzubeziehen, wie auch der C-Gehalt von 0,375 kg C /kg Methanol.

eine stoffliche Nutzung nicht im Vorteil gegenüber der energetische ist – was den $KRA_{\text{bio-eff}}$ betrifft.

Abbildung 50: Effizienz der Nutzung von Produkten aus (Wald)Holz anhand des effektiven KRA_{biotisch} – für primäre Rohstoffe sowie Reststoffe, bzw. Sekundärrohstoffe unter Berücksichtigung von Rohstofferhaltungs-Faktoren (Wo nicht anders vermerkt ist Waldholz der eingesetzte Rohstoff)



Quelle: Berechnungen und Darstellung: ifeu

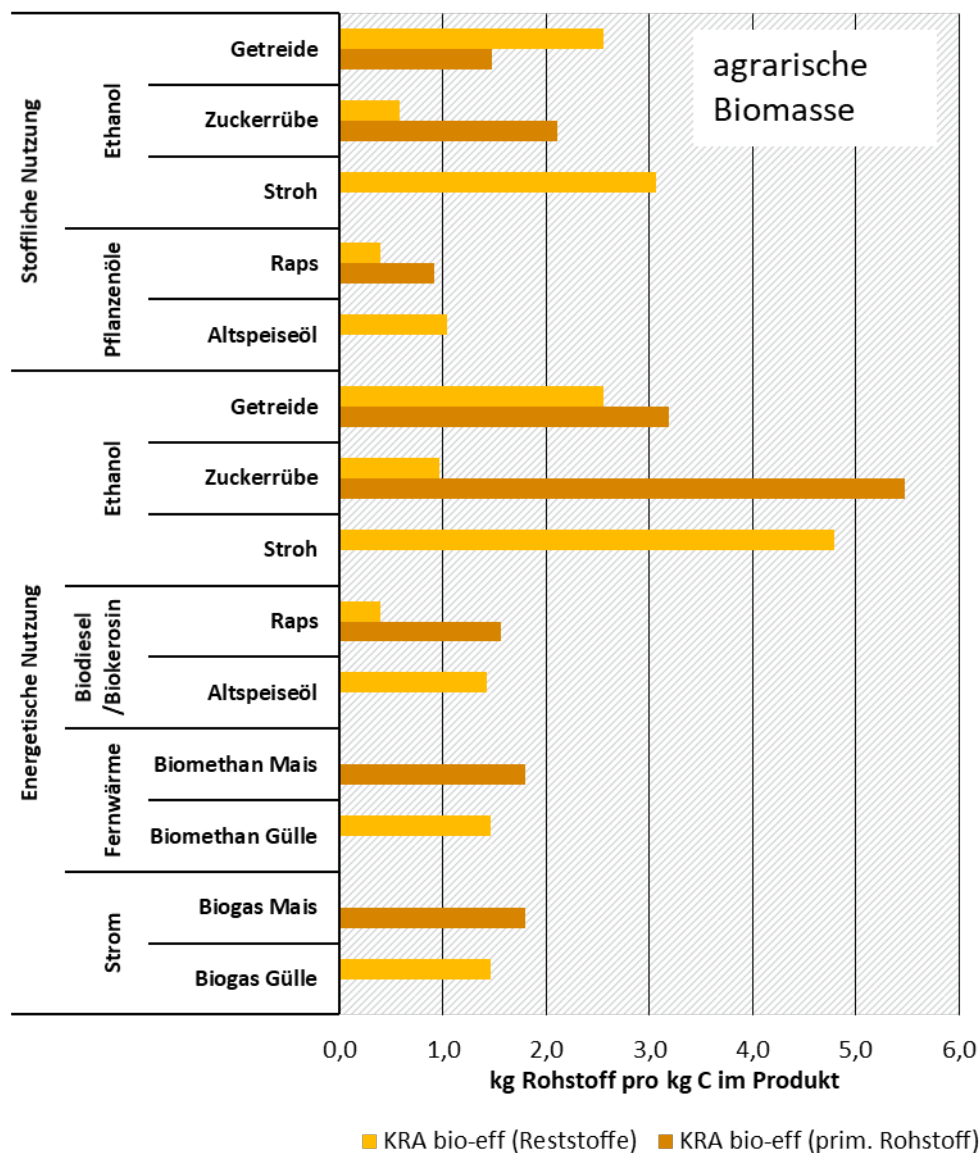
Produkte aus agrarischer Produktion

In Abbildung 51 sind die Ergebnisse zum $KRA_{\text{bio-eff}}$ für agrarische Produkte dargestellt. Auch hier gilt es gleiche Rohstoffvorketten für unterschiedliche Nutzungen zu vergleichen. So liegt der Wert der stofflichen Nutzung von Getreidethanol bei 1,5 kg/kg C, dessen energetische Nutzung bei 3,2. Auch für Zuckerrüben-Ethanol hat die stoffliche Nutzung als Basischemikalie eine nur halb so großen effektiven Rohstoffaufwand wie die energetische Nutzung. Bei Rapsöl liegt das

Verhältnis mit 0,91 zu 1,56 etwas enger, doch auch hier ist der Vorteil der stofflichen Nutzung eindeutig.

Die energetische Nutzung von Biomethan oder Biogas aus nachwachsenden Rohstoffen wie Mais beansprucht einen $KRA_{bio-eff}$ von 1,8 kg/kg C. Der nur zur Rückführung auf den Acker geeignete Gärrest und das durch Vergärung gebildete CO_2 führen hier zu einem gegenüber dem Ethanol-Pfad als Biokraftstoff höheren Rohstoffbedarf, da bei Ethanol das Nebenprodukt als Futtermittel eingesetzt werden kann.

Abbildung 51: Effizienz der Nutzung von agrarischen Produkten anhand des effektiven $KRA_{biotisch}$ – für primäre Rohstoffe sowie Reststoffe, bzw. Sekundärrohstoffe unter Berücksichtigung von Rohstofferhaltungs-Faktoren



Quelle: Berechnungen und Darstellung: ifeu

4.5.1.2 Klimaschutz

Die Methodik für dieses Kriterium ist in Kapitel 4.3.2.2 beschrieben. Die Betrachtungsgrenze beinhaltet die Herstellungskette, den temporären Speicher des Kohlenstoffs in den Produkten sowie die Substitutionswirkung.

Die Daten und einzelnen Ergebnisse finden sich im Anhang D in Tabelle 36Tabelle 35.

Produkte aus Holz

In Abbildung 52 sind die Ergebnisse zum Klimaschutz für die Produkte aus Holz auf Daten für den aktuellen Zeitraum (Status quo) dargestellt. In Abbildung 53 die Ergebnisse mit Prognose auf das Jahr 2045. Dabei werden jeweils folgende Komponenten der Gesamtergebnisse abgebildet:

1. Die THG-Emissionen aus der Herstellungskette vom Anbau bis zur Nutzung (dunkelgrüner Balken),
2. die CO₂-Emission, die am Ende der Nutzung nach Berücksichtigung eines temporären Speichers angerechnet werden, nach (Helin et al. 2016), (hellgrüner Balken),
3. die durch Substitution eines alternativen nicht biobasierten Produkts eingesparten THG-Emissionen (mittelblauer Balken mit Minus-Vorzeichen),
4. die analog zum temporären Speicher in einem biobasierten Produkt (Nr. 2) anzurechnenden CO₂-Emissionen für das alternative Produkts (hellblauer Balken, ebenfalls mit Minus-Vorzeichen).⁵³
5. Die saldierte „Netto“-Summe aus allem (orangener Balken).

Dieser Darstellungslogik unterliegen auch die nachfolgenden Diagramme bis einschließlich Abbildung 55.

Wesentliche Erkenntnisse:

Die stofflichen Nutzungen von **Holz** für den **Status quo** (Abbildung 52) weisen häufig einen in der Summe negativen Wert auf, d.h. sie führen unter Saldierung der Emissionen und Substitutionen zu einer Einsparung. Ausgeprägt ist diese bei Bauholz, Verpackungsholz und Textilien, wobei jeweils die Annahmen für die Substitution entscheidend sind.

Bei Bauholz ist dies insgesamt solide, da hier als Alternativstoffe insbesondere für Balkenkonstruktionen Beton und Stahl als die üblichen Stoffe vergleichsweise unstrittig sind.

Für Verpackungsholz wurde angenommen, dass die Alternative kunststoffbasiert ist. Dies führt zu einem sehr vorteilhaften Ergebnis für dies Nutzung. Anders als bei Bauholz ist hier die Substitutionsannahme eher fiktiv, da die Nutzung von Holz (Paletten) in der Praxis hier nahezu ohne Alternativen erfolgt.

Textilien weisen ebenfalls einen hohen Nettoeinsparwert auf, da hier die spezifischen Emissionen pro Einheit jeweils sehr hoch sind.

Bei Möbel zeigt sich auch für die Vollholzvariante ein vorteilhaftes Bild. Möbel aus Holzwerkstoffen dagegen tragen durch die Produktion (inklusive der Materialeinsätze für Harze

⁵³ Dieser Emissionsbeitrag ist erforderlich, weil die THG-Emission unter Nr. 3 zwar die direkten (fossilen) CO₂-Emissionen bei energetischer Nutzung enthält, für eine stoffliche Nutzung eines alternativen fossilen Produkts aber die Endmission nach Nutzung nicht enthält. Für einen konsistenten Vergleich mit dem biobasierten Produkt ist hierbei auch die temporäre Verzögerung der Emission in gleicher Weise zu berücksichtigen.

und Bindemittel) eine höhere Last. Eine Substitutionsrechnung gegenüber teils Kunststoff-, teils Metallmöbel führt hier zu einer knappen Netto-Emission.

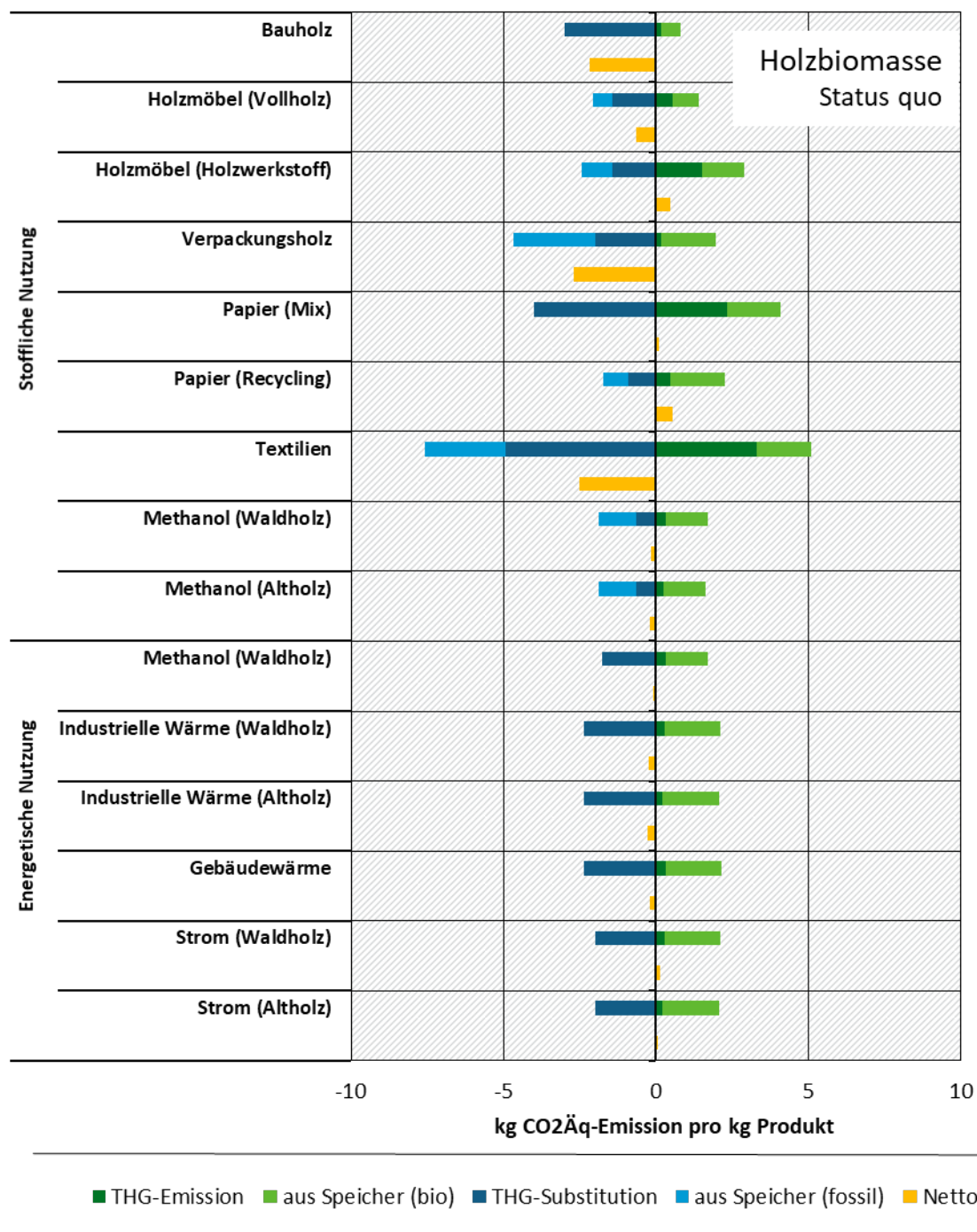
Die Bewertung für Papierprodukte muss als sehr unsicher bezeichnet werden. Für den Papiermix wurde als Substitutprodukt ein elektronisches Medium angenommen. Die Ökobilanzbilanzdaten für den Vergleich von papierbasierte Printerzeugnisse und elektronische Alternativen (E-Reader etc.) sind jedoch bislang mit erheblichen Unsicherheiten verbunden, bzw. die Randbedingungen eröffnen eine sehr weite Bandbreite an Ergebnisse.⁵⁴

Die energetischen Nutzungen erzielen in der Mehrzahl Netto-Ergebnisse im sehr knappen „minus“-Bereich, d.h. mit leichten Einsparungen. Dies trifft insbesondere für Wärmenutzung ein, für die eine Substitution von Erdgas angesetzt wird. Bei Strom wird der Mix angesetzt, wodurch der Netto-Wert etwa bei Null liegt. Setzt man eine Substitution von ausschließlich fossilen Brennstoffen für den Strom an (z. B. den Komparator von 183 g CO₂Äq pro MJ Holzbrennstoff, so liegen die Ergebnisse im Bereich von Bauholz und Textilien.

Die Ergebnisse für die prospektiven Nutzungen von **Holz** für das Jahr **2045** (Abbildung 53) sind mit gleicher Skala abgebildet, wodurch erkennbar wird, dass sich die Belastungen und v.a. die Einsparungen deutlich verringern. Da jedoch mit der Nutzung von Holz weiterhin Emissionen von CO₂ verbunden sind, verlagern sich die Ergebnisse für die meisten Nutzungsarten weg von Netto-Einsparungen, mehr zu Netto-Emissionen. Dies ist besonders auffällig für die energetische Nutzung, da hier die Alternativen in der Zukunft emissionsfrei sein werden. Die Nutzung als Bauholz wird jedoch auch unter Zugrundelegung von Prognosedaten für Beton und Stahl auch in 2045 zu einer Nettoeinsparung führen. Dies zeigt sich auch für Verpackungsholz und Textilien, für deren Substitute (synthetische Materialien auf CO₂-Basis) auch in 2045 noch zu einem gewissen Maße Emissionen anzunehmen sind. Hier bestehen jedoch große Datenunsicherheiten.

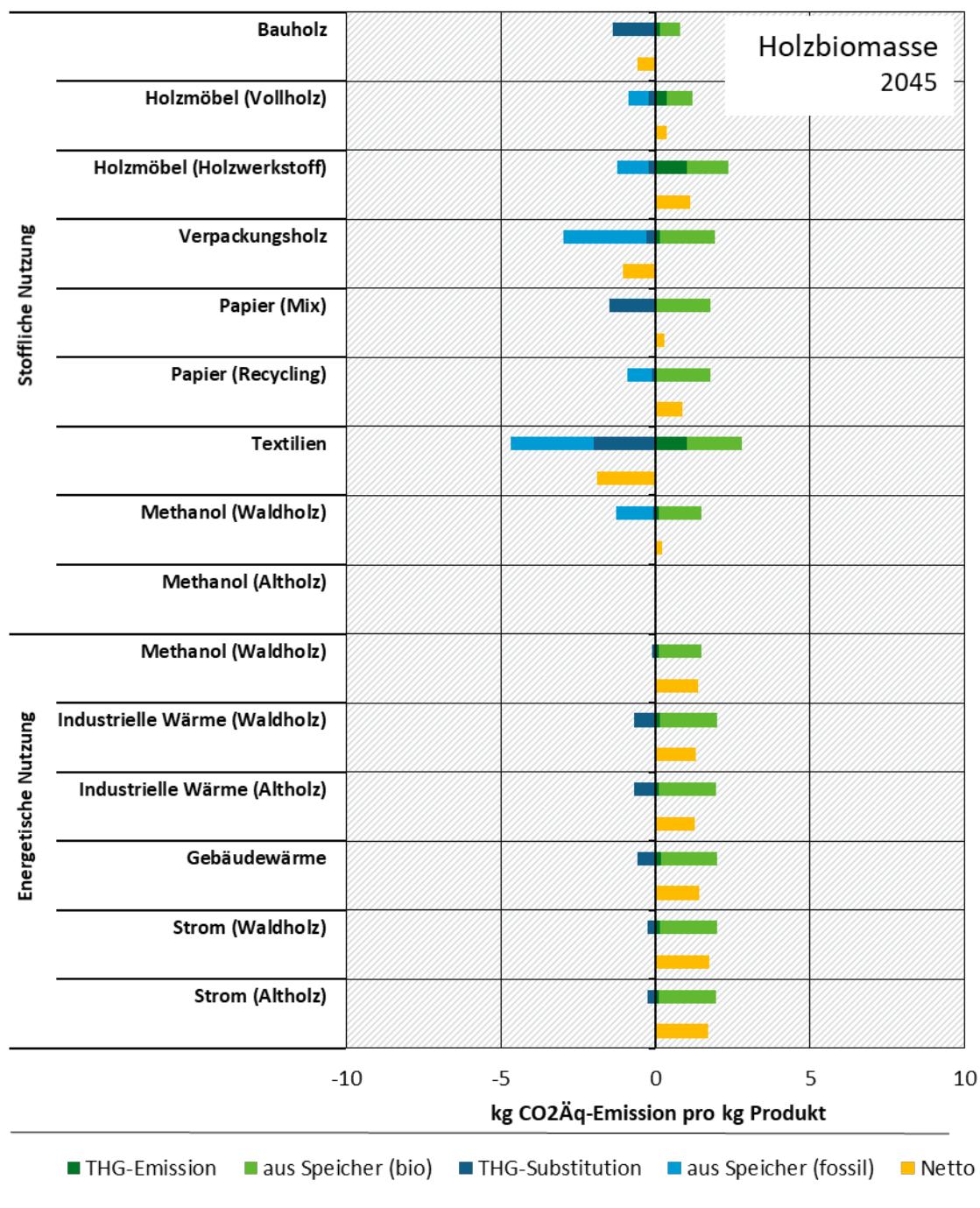
⁵⁴ Siehe hierzu auch die Methodik zur Bestimmung der Umweltwirkungen digitaler Dienstleistungen (Gröger et al. 2024)

Abbildung 52: Klimarelevanz der Nutzung von Produkten aus (Wald)Holz, für den Status quo unter Berücksichtigung von temporärer C-Speicherwirkung und Substitutionsleistung (Wo nicht anders vermerkt ist Waldholz der eingesetzte Rohstoff)



Quelle: Berechnungen und Darstellung: ifeu

Abbildung 53: Klimarelevanz der Nutzung von Produkten aus (Wald)Holz, für das Jahr 2045 unter Berücksichtigung von temporärer C-Speicherwirkung und Substitutionsleistung (Wo nicht anders vermerkt ist Waldholz der eingesetzte Rohstoff)



Quelle: Berechnungen und Darstellung: ifeu

Produkte aus agrarischer Biomasse

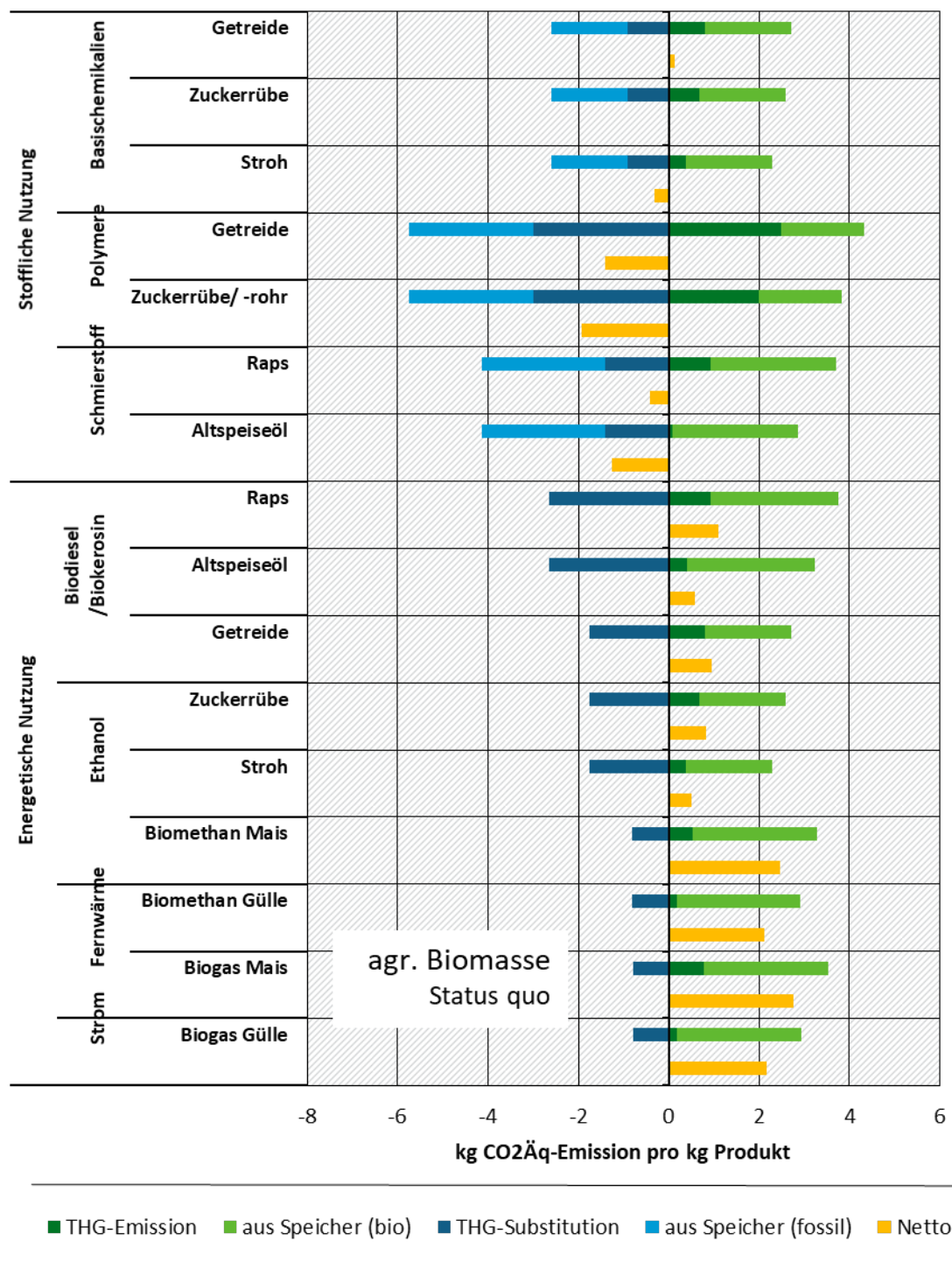
In Abbildung 54 sind die Ergebnisse zum Klimaschutz für die Produkte aus agrarischer Biomasse auf Daten für den aktuellen Zeitraum (Status quo) dargestellt. In Abbildung 55 die Ergebnisse mit Prognose auf das Jahr 2045.

Wesentliche Erkenntnisse:

Auch hier zeichnen sich im Gesamtbild Vorteile für die stofflichen Nutzungen ab. Im Status quo zeichnen sich für die Polymere und Schmierstoffe Netto-Einsparungen ab – auch für die hier der Vollständigkeit halber aufgeführten Baumwolltextilien, für deren Rohstoff es als solch keine energetische Alternative zu vergleichen gilt.⁵⁵

⁵⁵ Die Nutzung von Öl als Baumwollsaaten wäre hier nur als Koppelprodukt zu sehen; seine Bewertung im vorliegenden Fall würde angesichts seines Detailaspekts den Rahmen der Studie überschreiten.

Abbildung 54: Klimarelevanz der Nutzung von agrarischen Produkten, für den Status quo unter Berücksichtigung von temporärer C-Speicherwirkung und Substitutionsleistung (Wo nicht anders vermerkt ist Waldholz der eingesetzte Rohstoff)

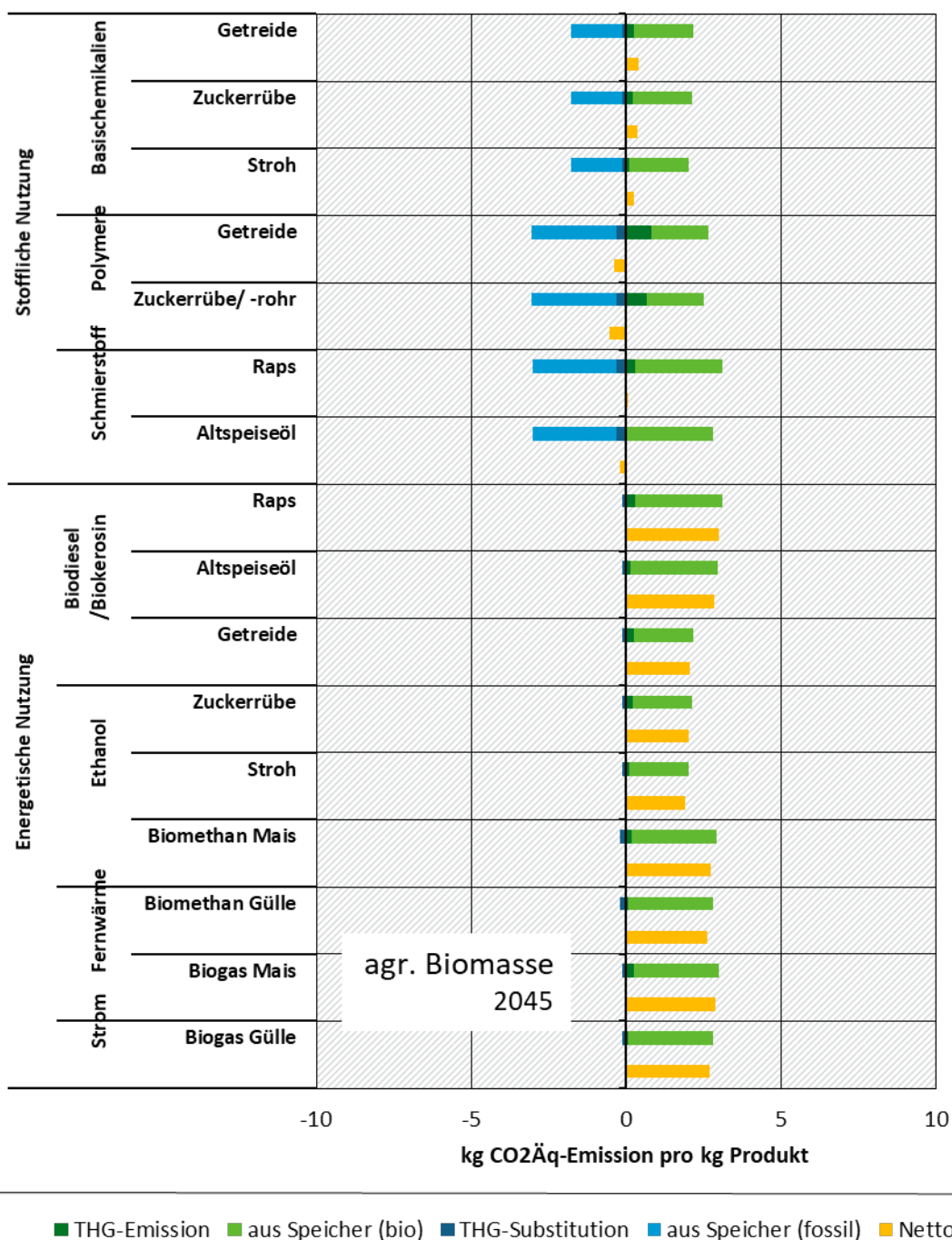


Quelle: Berechnungen und Darstellung: ifeu

Auch für die agrarischen Biomassen verringern sich die Netto-Einspareffekte bzw. verschlechtern sich die Netto-Emissionsbilanzen für das Jahr 2045 aus den gleichen Gründen wie für Holzbiomasse. Die stofflichen Nutzungen verbleiben dabei tendenziell im Bereich der

Netto-Null oder wie im Fall der Polymere leicht im Bereich einer Einsparung. Die energetischen Optionen führen dagegen klar zu Netto-Emissionen.

Abbildung 55: Klimarelevanz der Nutzung von agrarischen Produkten, für das Jahr 2045 unter Berücksichtigung von temporärer C-Speicherwirkung und Substitutionsleistung (Wo nicht anders vermerkt ist Waldholz der eingesetzte Rohstoff)



Quelle: Berechnungen und Darstellung: ifeu

4.5.1.3 Substitutionsrelevanz

Während in der THG-Bilanz die Substitutionseffekte einberechnet werden, stellt sich in diesem Kriterium die Frage, zu welchem Grad das Biomasse-Produkt eine ersetzbare Rolle zur Defossilisierung spielt. Dazu wurde in Kapitel 4.3.2.3 ein Vorschlag zur Operationalisierung vorgelegt, wonach für folgende Abfragen jeweils Punkte vergeben werden:

- ▶ Für die betrachtete Art der Biomassenutzung liegen **aktuell** keine erneuerbaren Alternativen im **technologisch** realisierbaren Maßstab vor.
- ▶ Für die betrachtete Art der Biomassenutzung liegen **aktuell** keine erneuerbaren Alternativen im **wirtschaftlich** realisierbaren Maßstab vor.
- ▶ Für die betrachtete Art der Biomassenutzung zeichnen sich auch **mittelfristig** (in jedem Fall bis 2045) keine erneuerbaren Alternativen im **technologisch** und **wirtschaftlich** realisierbaren Maßstab ab.

In Tabelle 14 werden die betrachteten Biomassenutzungsoptionen nach diesen Abfragen beurteilt.

Die Gesamtpunktzahl mit -3 Entlastungspunkten werden durch **Bauholz** erzielt, da hier weder aktuell noch zukünftig erneuerbare Alternativen nach technologischen oder wirtschaftlichen Kriterien verfügbar sind. Zwar werden die maßgeblichen Alternativen zu Bauholz – Beton und Stahl – durch Klimaschutzstrategische Maßnahmen wie CCS (Carbon capture and storage)⁵⁶ oder grüner Wasserstoff zukünftig mit verringerten THG-Emissionen verbunden sein, dennoch sind diese Alternativen nicht als erneuerbar zu bezeichnen, da die Rohstoffe nicht erneuerbar sind.

Auch Vollholzmöbel sind nur schwerlich durch erneuerbare Alternativen zu ersetzen. Hier sind jedoch mittelfristig Optionen erkennbar, die jedoch auch auf Holz bzw. Biomasse beruhen.⁵⁷ Dies gilt in der Tendenz etwas mehr für Möbel aus Holzwerkstoffe, die wie Zellstoff, Papier und Textilien auf insgesamt 2 Entlastungspunkte kommen. Substitutionsmöglichkeiten bestehen hier mittel- oder längerfristig durch strombasierte oder elektronische Alternativen. Diese bestehen teilweise schon eher für Basischemikalien, Biokunststoffe und Schmierstoffe, die mit jeweils 1,5 Entlastungspunkten bewertet werden. Diese Punktzahl erreicht auch Biokerosin, welches unter den Biokraftstoffen daher deutlich am besten abschneidet. Industrielle Wärme (d. h. Hochtemperaturwärme) wird mit -1 gegenüber Gebäude- und Fernwärme (-0,5) nochmals etwas höher bewertet, da hier auch nach technologischen Kriterien aktuell nur teilweise Alternativen bestehen.

⁵⁶ Kohlenstoffabscheidung und -speicherung

⁵⁷ z. B. ARBOFORM®: auch als „Flüssiges Holz“ bezeichnet, ein biobasierter Werkstoff auf Basis von Lignin, der für verschiedenste Produkt einsetzbar wäre. <https://www.tecnaro.de/arboblend-arbofill-arboform/>

Tabelle 14: Bewertung der Substitutionsrelevanz für verschiedene Arten der Biomassenutzung

Produkt	Rohstoff	aktuell keine erneuerbare Alternativen nach technol. Kriterien	aktuell keine erneuerbare Alternativen nach wirtsch. Kriterien	Mittelfristig keine erneuerb. Alternativen (techn., wirtsch.)	Summe
Bauholz	WH	-1	-1	-1	-3
Holzmöbel (Vollholz)	WH	-1	-1	-0,5	-2,5
Holzmöbel (Holzwerkstoff)	WH, IRH	-1	-1	0	-2
Verpackungsholz	WH	-0,5	-0,5	0	-1
Frischzellstoff	WH, IRH	-1	-1	0	-2
Papier (Mix)	WH, IRH, AP	-1	-1	0	-2
Papier (Recycling)	AP	-1	-1	0	-2
Textilien	BW, WH	-1	-1	0	-2
Basischemikalien (MetOH)	WH, AH	-0,5	-1	0	-1,5
Basischemikalien (EtOH)	G, ZR, St	-0,5	-1	0	-1,5
Biokunststoffe	G, ZR	-0,5	-1	0	-1,5
Schmierstoffe	RÖ, ASÖ	-0,5	-1	0	-1,5
Biodiesel	RÖ, ASÖ	0	0	0	0
Biokerosin	RÖ, ASÖ, St	-0,5	-1	0	-1,5
Ethanol	G, ZR, St	0	0	0	0
Methanol	WH	0	0	0	0
Industrielle Wärme	WH, AH	-0,5	-0,5	0	-1
Gebäudewärme	WH	0	-0,5	0	-0,5
Fernwärme	BMM, BMG	0	-0,5	0	-0,5
Strom	WH, AH, BMM, BMG	0	0	0	0

Erläuterung zu den Punktwerten: je Einzelabfrage werden jeweils zwischen 0 und -1 Entlastungspunkte (daher negatives Vorzeichen) vergeben;

0 Punkte für keine Erfüllung“, -0,5 Punkte für teilweise Erfüllung, -1 Punkt für gute Erfüllung.

Erläuterung zu Abkürzungen: WH: Waldholz, IRR: Industrierestholz, AH: Altholz, AP: Altpapier, BW: Baumwolle, G: Getreide, ZR: Zuckerrübe/-rohr, St: Stroh, RÖ: Rapsöl, ASÖ: Altspeiseöl, BMM: Biomethan aus Mais, BMG: Biomethan aus Gülle

4.5.1.4 Gesundheitsbezogene Umweltwirkungen

Für dieses Kriterium werden die folgenden drei verschiedenen Aspekte qualitativ eingeschätzt und über Punktergabe in die Gesamtbewertung eingebracht.

- ▶ Feinstaubbelastungen: hier werden v.a. drei Quellen in Betracht gezogen:
 - landwirtschaftliche Aktivität, da mit der Stickstoffdüngung Ammoniakemissionen verbunden sind, die über Sekundärbildung ganz wesentlich zur Feinstaubbelastung beitragen; hierfür werden 2 Belastungspunkte (positives Vorzeichen) vergeben.
 - Praxis im Gülle-Management, die zur Reduktion von Feinstaubbildung führen; dazu ist das Vergären von Gülle zu zählen, wofür 1 Entlastungspunkt (negatives Vorzeichen) vergeben wird.⁵⁸
 - Verbrennen biogener Festbrennstoffe (v. a. Holz), wobei unterschieden wird zwischen kleineren dezentralen Anlagen (v. a. Wärme) mit 2 Belastungspunkten und größeren Anlagen mit entsprechender Filterleistung (v. a. Kraftwerke) mit 1 Belastungspunkt.
- ▶ Neuartige Stoffe: hier wird in Betracht gezogen:
 - Wenn neuartige Agenzien für den Aufschluss von Biomasse (insbesondere bei Ligno-Zellulose) benötigt werden, wofür 1 Belastungspunkt vergeben wird.
- ▶ Weitere Potenziale beziehen sich v.a. auf relevante gesundheitsschädigende Potenziale in der Prozesskette, wie:
 - Belastungen für Gewässer durch industrielle Prozesse wie in der Zellstoff-/Papierindustrie sowie der Textilindustrie. (jeweils 1 Belastungspunkt).

In Tabelle 15 ist die Punktevergabe der Nutzungsoptionen zusammengestellt. Danach liegt das höchste Ergebnis nach Belastungspunkten bei Textilien auf Basis Baumwolle – für den Anbau zwei Punkte, für die Gewässerbelastung der industriellen Produktion ein weiterer Punkt vergeben wird. Holzbasierte Textilien haben durch den Wegfall des hoch belastenden Baumwollanbaus zunächst zwei Punkte weniger, führen aber als innovatives Verfahren neuartige Stoffe mit sich und im Übrigen verbleiben grundsätzliche Umweltkonflikte der Textilproduktion unabhängig vom Rohstoff.

Zwei Belastungspunkte weisen außerdem alle weiteren auf Agrarerzeugnissen basierenden Produkte auf (Basischemikalien, Biokunststoffe, Schmierstoffe, Biokraftstoffe aus Anbaubiomasse wie Pflanzenöl, Getreide, Zuckerpflanzen) sowie Gebäudewärme auf Basis Holz (Feinstaub), sowie Fernwärme und Strom über Biogas aus Mais (Anbau).

Mit einem Belastungspunkt insgesamt werden Zellstoff und Papier (v.a. wegen Abwasser), Chemikalien, Ethanol, Methanol auf Basis von Stroh, Holz oder anderen Reststoffen bewertet. Ebenso industrielle Wärme und Strom auf Basis von Holz (verringerte Feinstaubemission). Auch für Möbel aus Holzwerkstoffen wird ein Punkt vergeben aufgrund der Zusatzstoffe, die in diese Produkte eingesetzt werden müssen.⁵⁹

⁵⁸ Von einer Bewertung der potenziellen Incentivierung der Tierhaltung durch positive Wertung der Güllevergärung wird hier abgesehen.

⁵⁹ Siehe auch <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/produkte/bauprodukte/studien-zur-messung-bewertung-von-schadstoffen/emissionsverhalten-von-holz-holzwerkstoffen#emissionen-aus-holz-und-holzwerkstoffen>

Null Punkte werden für die wenig verarbeiteten Produkte aus Vollholz (Bauholz, Möbel, Verpackungsholz) vergeben, ebenso wie für Basischemikalien, Biokunststoffe, Schmierstoffe, Biokraftstoffe aus Abfällen und Reststoffen. Mit minus eins werden Strom und Wärme auf Basis von Gülle bewertet, da hier gegenüber dem Verzicht auf Güllevergärung ein erheblicher Umweltvorteil entsteht.

Tabelle 15: Bewertung gesundheitsbezogener Umweltwirkungen

Produkt	Rohstoff	Feinstaub	Neuartige Stoffe	weitere Potenziale	Summe
Bauholz	WH				0
Holzmöbel (Vollholz)	WH				0
Holzmöbel (Holzwerkstoff)	WH, IRH			1	1
Verpackungsholz	WH				0
Frischzellstoff	WH, IRH			1	1
Papier (Mix)	WH, IRH, AP			1	1
Papier (Recycling)	AP			1	1
Textilien	WH		1	1	2
Basischemikalien (MetOH)	WH, AH				0
Basischemikalien (EtOH)	G, ZR	2			2
	St		1		1
Biokunststoffe	G, ZR	2			2
Schmierstoffe	RÖ	2			2
	ASÖ				0
Biodiesel	RÖ	2			2
	ASÖ				0
Biokerosin	RÖ	2			2
	ASÖ				0
	St				
Ethanol	G, ZR	2			2
	St	0	1		1
Methanol	WH	0	1		1
Industrielle Wärme	WH, AH	1			1
Gebäudewärme	WH	2			2
Fernwärme	BMM	2			2
	BMG	-1			-1
Strom	WH, AH	1			1

Produkt	Rohstoff	Feinstaub	Neuartige Stoffe	weitere Potenziale	Summe
	BMM	2			2
	BMG	-1			-1

Erläuterung zu den Punktwerten: für Feinstaub werden zwischen -1 und +2 Punkte vergeben, für die beiden anderen Aspekte entweder 0 oder 1 Punkt;

Erläuterung zu Abkürzungen: WH: Waldholz, IRR: Industrierestholz, AH: Altholz, AP: Altpapier, BW: Baumwolle, G: Getreide, ZR: Zuckerrübe/-rohr, St: Stroh, RÖ: Rapsöl, ASÖ: Altspeiseöl, BMM: Biomethan aus Mais, BMG: Biomethan aus Gülle

4.5.1.5 Ökonomische Nachhaltigkeit

Als Kriterium hierfür wurde die Frage formuliert: Wie die Stabilität der Rahmenbedingungen für die Investitionsentscheidung einzuschätzen? Dies kann angesichts der Komplexität gerade bei der Einschätzung der Rahmenbedingungen selbst nur in grober Weise erfolgen. Wie in Kapitel 4.3.2.6 beschrieben, werden bei der Beantwortung folgender Fragen anhand einer verbalen Einschätzung zwischen 2 Entlastungspunkten und 0 Punkten vergeben:

- Liegt ein breites Fundament an politischen Fördermaßnahmen für diese Produktions- und Nutzungsweise vor?
- Wurden durch bisher bestehende politische Fördermaßnahmen Investitionen getätigt, die nicht weiter aufrecht erhalten werden können bei Abbau der Förderung?
- Besteht Perspektive auf eine ökonomische Zukunft für die Produktions- und Nutzungsweise bei mittelfristigem Abbau der Förderung?
- Kann die nötige Infrastruktur wie Produktionsanlagen auch in einer postfossilen Ökonomie unabhängig von fossiler Infrastruktur weiter produktiv und langfristig konkurrenzfähig zu z.B. CCU/PtX-Prozessen genutzt werden?

Tabelle 16 gibt die Wertungen zusammen mit den entsprechenden Argumenten wieder.

Die beste Bewertung mit zwei Entlastungspunkten erzielt dabei die Nutzung von Biomethan aus Gülle zu Fernwärmezwecken mit der Begründung, dass für erneuerbare Fernwärme eine aussichtsreiche Perspektive besteht, dass Ausbaupotenziale vorliegen dieser Ausbau aus allgemeinen Gründen des Umwelt- und Klimaschutzes gesichert voran getrieben werden muss.

Eineinhalb Entlastungspunkte werden Ethanol und Biokerosin aus Stroh zugerechnet, da auch hier eine Perspektive auf eine ökonomische Zukunft besteht und der Rohstoff grundsätzlich verfügbar ist. Trotz der Quotenanforderungen durch die RED III sowie der die ReFuelEU Aviation⁶⁰ sind bisherige Investitionen jedoch nicht bestandssicher, wie u. a. die Stilllegung des Ethanolwerks in Podari, Rumänien zuletzt zeigte. Vor diesem Hintergrund ist einzuräumen, dass die Bewertung hier ggf. um einen halben Entlastungspunkt verringert wird.

Mit einem Entlastungspunkt werden bewertet: Bauholz, holzbasierten Textilien, Basischemikalien aus Stroh (wegen fehlender rechtlicher Förderung wie bei RED III entsprechend geringer bewertet als Biokraftstoffe), industrielle Wärme auf Basis Holz, sowie Strom auf Basis Gülle.

⁶⁰ Regulation (EU) 2023/2405 on ensuring a level playing field for sustainable air transport; <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32023R2405>

Null Punkte erhalten alle Produkte, deren Markt stabil ist und für die keine hohen Ausbaupotenziale vorliegen. Dazu zählen: Holzmöbel, Verpackungsholz, alle Zellstoff- und Papierprodukte, Textilien (Baumwolle). Ebenfalls null Punkte erhalten Produkte, in die mangels Förderung, aus rein strategischen Überlegungen der Unternehmen investiert wird. Das wären: Basischemikalien, Biokunststoffe, Schmierstoffe.

Null Punkte gelten auch, wenn, wie bei den konventionellen Biokraftstoffen und solchen auf Basis von Altfetten⁶¹, die Förderung in der Vergangenheit lag und über die RED III aufgrund der Deckelung für die Quotenanrechnung kein weiterer Ausbau erfolgen wird. Gleiches lässt sich für Strom auf Basis von Biogas aus Mais begründen. Hier bestehen weder eine Perspektive noch Ausbaupotenziale.

Tabelle 16: Bewertung der ökonomischen Nachhaltigkeit von Biomassenutzungen

Produkt	Rohstoff	Punkte	Begründung
Bauholz	WH	-1	mit der Holz-Charta liegt ein breites Fundament an Förderung, Investitionen sehr von spezif. Nachfrage nach Holzbau abhängig, Perspektive positiv, hohes theoretisches Potenzial.
Holzmöbel	WH	0	Markt stabil, keine hohen Ausbaupotenziale
Verpackungsholz	WH	0	Markt stabil, keine hohen Ausbaupotenziale
Frischzellstoff, Papier (Mix) und Papier (Recycling)	WH, IRR, AP	0	Markt stabil, keine hohen Ausbaupotenziale
Textilien (Holz)	WH, IRR	-1	Zwar wenige Marktführer, dafür großes Potenzial gegen Baumwolle und fossile Fasern mit geringer Perspektive auf konkurrierende Alternativen
Basischemikalien (Methanol, Ethanol u.a.)	WH, AH, G, ZR	0	keine Förderung, Investitionen aus rein strategischen Überlegungen der Unternehmen
	St	-1	keine Förderung, Investitionen aus rein strategischen Überlegungen der Unternehmen Perspektive auf eine ökonomische Zukunft besteht
Biokunststoffe	G, ZR	0	keine Förderung, Investitionen aus rein strategischen Überlegungen der Unternehmen
Schmierstoffe	RÖ, ASÖ	0	keine Förderung, Investitionen aus rein strategischen Überlegungen der Unternehmen
Biodiesel	RÖ	0	Förderung in der Vergangenheit; RED III mit Deckelung – kein weiterer Ausbau
	ASÖ	0	Förderung über RED III weitgehend ausgeschöpft; RED III mit Deckelung – kein weiterer Ausbau
Biokerosin	RÖ	0	RED III mit Deckelung – kein weiterer Ausbau
	ASÖ	0	RED III mit Deckelung – kein weiterer Ausbau
	St	-1,5	Perspektive auf eine ökonomische Zukunft besteht, bisherige Investitionen jedoch nicht bestandssicher

⁶¹ Altspeiseöl (engl. Used cooking oil, UCO) und Tierfette, nach RED III definiert in Anhang IX Teil B.

Produkt	Rohstoff	Punkte	Begründung
Ethanol	G, ZR	0	Förderung über RED III weitgehend ausgeschöpft; RED III mit Deckelung – kein weiterer Ausbau
	St	-1,5	Perspektive auf eine ökonomische Zukunft besteht, bisherige Investitionen jedoch nicht bestandssicher
Methanol	WH	-0,5	Perspektive auf eine ökonomische Zukunft besteht (Rohstoff jedoch begrenzt), bisherige Investitionen jedoch nicht bestandssicher
Industr. Wärme	WH, AH	-1	Perspektive auf eine ökonomische Zukunft besteht (Rohstoff jedoch begrenzt)
Gebäudewärme	WH	0	Markt stabil, keine hohen Ausbaupotenziale (gilt nur für Pellets)
Fernwärme	BMM	0	Perspektive für Fernwärme, aber keine Ausbaupotenziale für Rohstoff
	BMG	-2	Perspektive für Fernwärme, Ausbaupotenziale für Rohstoff und Bedarf zur Sicherung des Ausbaus
Strom	WH, AH	0	Markt stabil, keine hohen Ausbaupotenziale (gilt nur für Altholz)
	BMM	0	Keine Perspektive für Strom und keine Ausbaupotenziale für Rohstoff
	BMG	-1	Keine Perspektive für Strom aber Ausbaupotenziale für Rohstoff und Bedarf zur Sicherung des Ausbaus

Erläuterung zu den Punktwerten: Es werden zwischen 2 Entlastungspunkte und 0 Punkten vergeben, je nach Argumenten für die im Text genannten Fragestellungen.;

Erläuterung: WH: Waldholz, IRR: Industrierestholz, AH: Altholz, AP: Altpapier, BW: Baumwolle, G: Getreide, ZR: Zuckerrübe/-rohr, St: Stroh, RÖ: Rapsöl, ASÖ: Altspeiseöl, BMM: Biomethan aus Mais, BMG: Biomethan aus Gülle

4.5.1.6 Kohärenz mit Nachhaltigkeitszielen anderer Strategien

In Kapitel 4.3.2.7 wurde die Vorgehensweise für dieses Kriterium beschrieben. Hierin geht es darum, die in den ausgewählten relevanten Strategien und rechtlichen Setzungen formulierten Zielerwartungen im Rahmen der sechs zentralen Themenkomplexe als Fragen an die betrachteten Arten an Biomassenutzungen zu formulieren (siehe hierzu Tabelle 12), verdichtet auf die fünf Komplexe:

- ▶ Ressourcenschutz
- ▶ nachhaltige Landnutzung (inklusive Biodiversität und Ökosystemleistungen)
- ▶ Klimaschutz
- ▶ Ernährungs- und Nahrungsmittelsicherheit
- ▶ Gesundheit und Umwelt

In gewisser Weise doppelt sich mit diesen Themenkomplexen nochmals die Anwendung der vorangehenden Kriterien. Die Fragen hier formulieren sich jedoch aus den Zielen der Strategien und Rechtsetzungen heraus und bringen somit nochmals einen zusätzlichen Blickwinkel in die Wertung.

Pro Themenkomplex werden je nach Einschätzung jeweils -0,5 Entlastungspunkte, Null Punkte oder +0,5 Belastungspunkte vergeben. Tabelle 17 gibt die Wertungen zusammen wieder.

Mit insgesamt -1 Punkte bilden Bauholz, Vollholzmöbel, Verpackungsholz und Recyclingpapier die Gruppe der bestbewerteten Produkte. Sie alle punkten bei Ressourcen- und Klimaschutz und verhalten sich bezüglich der anderen Nachhaltigkeitsstrategien neutral.

Textilien aus Holz, Basischemikalien aus Stroh, Schmierstoffe aus Altfetten, Fernwärme und Strom aus Biogas mit Gülle sind in die Gruppe mit -0,5 Punkten einzureihen, aus direkter Kohärenz entweder mit Ressourcen- oder Klimaschutz.

Ein insgesamt neutrales Ergebnis erzielen Holzmöbel (Holzwerkstoff), Papier (Mix), Biodiesel und Biokerosin aus Altfetten, Ethanol aus Stroh, Methanol aus Holz, Industrielle Wärme und Gebäudewärme aus Holz.

Mit 0,5 Punkten konfiguriert Frischzellstoff mit dem Ressourcenschutz. Bereits 1,5 Punkte werden addiert für Basischemikalien auf Basis von Getreide oder Zuckerpflanzen.

In allen fünf Nachhaltigkeitszielen bzw. Strategien erhalten folgende Produkte je 0,5 Belastungspunkte: Textilien aus Baumwolle, Biodiesel und Biokerosin aus Rapsöl, Ethanol als Biokraftstoff aus Getreide oder Zuckerpflanzen sowie Strom und Fernwärme mit Biogas aus Mais.

Tabelle 17: Bewertung der Kohärenz mit Nachhaltigkeitszielen anderer Strategien durch Biomassenutzungen

Produkt	Rohstoff	Ressourcen	Landnutzung Biodiversität	Klimaschutz	Ernährungs- und Nahrungsmittel- sicherheit	Gesundheit und Umwelt	Summe
Bauholz	WH	-0,5	0	-0,5	0	0	-1
Holzmöbel (Vollholz)	WH	-0,5	0	-0,5	0	0	-1
Holzmöbel (Holzwerkstoff)	WH, IRH	0	0	0	0	0	0
Verpackungsholz	WH	-0,5	0	-0,5	0	0	-1
Frischzellstoff	WH, IRH	0,5	0	0	0	0	0,5
Papier (Mix)	WH, IRH, AP	0	0	0	0	0	0
Papier (Recycling)	AP	-0,5	0	-0,5	0	0	-1
Textilien	WH	-0,5	0	0	0	0	-0,5
Basischemikalien (MetOH)	WH, AH	-0,5	0	0	0	0	-0,5
Basischemikalien (EtOH)	G, ZR	0	0,5	0	0,5	0,5	1,5
	St	-0,5	0	0	0	0	-0,5
Biokunststoffe	G, ZR	0	0,5	0,5	0,5	0,5	2
Schmierstoffe	RÖ	0	0,5	0,5	0,5	0,5	2
	ASÖ	-0,5	0	0	0	0	-0,5

Produkt	Rohstoff	Ressourcen	Landnutzung Biodiversität	Klimaschutz	Ernährungs- und Nahrungsmittel- sicherheit	Gesundheit und Umwelt	Summe
Biodiesel	RÖ	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	2,5
	ASÖ	0	0	0	0	0	0
Biokerosin	RÖ	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	2,5
	ASÖ	0	0	0	0	0	0
	St	0	0	0	0	0	0
Ethanol	G, ZR	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	2,5
	St	0	0	0	0	0	0
Methanol	WH	0	0	0	0	0	0
Industrielle Wärme	WH, AH	0	0	0	0	0	0
Gebäudewärme	WH	0	0	0	0	0	0
Fernwärme	BMM	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	2,5
	BMG	0	0	-0,5	0	0	-0,5
	WH, AH	0	0	0,5	0	0	0,5
Strom	BMM	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	2,5
	BMG	0	0	-0,5	0	0	-0,5

Erläuterung zu den Punktwerten: je Einzelabfrage werden jeweils -0,5 (das jeweilige Thema der Strategie konkret adressiert), über 0 (das Thema allgemein adressiert) bis +0,5 Punkte (das Thema nicht adressiert) vergeben;

Erläuterung zu Abkürzungen: WH: Waldholz, IRR: Industrierestholz, AH: Altholz, AP: Altpapier, BW: Baumwolle, G: Getreide, ZR: Zuckerrübe/-rohr, St: Stroh, RÖ: Rapsöl, ASÖ: Altspeiseöl, BMM: Biomethan aus Mais, BMG: Biomethan aus Gülle

4.5.2 Auswertung für Waldholz

Im Folgenden werden die Ergebnisse nach Rohstoffgruppen zusammengefasst dargestellt und ausgewertet. Auf diese Weise lässt sich im Rahmen einer Rohstoffart – wie hier Waldholz – eine Priorisierung für die jeweiligen Produkte ableiten. Hierzu werden wie in Tabelle 18 und Abbildung 56 die Punktergebnisse aller Kriterien für die Nutzungsoptionen von Waldholz zusammengeführt. In Tabelle 18 ist auch der KRA_{bio-rest} aufgeführt, der jedoch nicht in die Summe eingerechnet wird. Für Klimaschutz gehen dagegen sowohl die Ergebnisse für den Status quo wie auch perspektivisch für 2045 in die Summe ein. Wichtig dabei: negative Werte kommen von Entlastungspunkten, positive Werte durch Belastungspunkte zustande. Je höher ein negativer Betrag ausfällt, desto vorteilhafter ist das Produkt zu werten, d. h. der Rohstoff sollte bevorzugt für diese Produkte eingesetzt werden.

Die Auswertung lässt grob drei Gruppen erkennen:

1. Die Produkte mit klarem Überhang an Entlastungspunkten sind
 - a. Bauholz,

- b. Verpackungsholz,
 - c. holzbasierte Textilien und
 - d. Vollholzmöbel.
2. Ein leichter Überhang an Belastungspunkten ist erkennbar für
- a. Möbel aus Holzwerkstoffen
 - b. Basischemikalien (wie Methanol) und
 - c. Industrielle Wärme
3. Die Produkte mit klarem Überhang an Belastungspunkten sind
- a. Frischzellstoff
 - b. Gebäudewärme
 - c. Strom
 - d. Biokraftstoff Methanol

Diese Gruppen entsprechen den in Kapitel 4.3.5.4 beschriebenen Priorisierungsklassen. Danach ist der Rohstoff Waldholz prioritär dem Bedarf an den Produkten Bauholz, Verpackungsholz, holzbasierten Textilien und Vollholzmöbeln zur Verfügung zu stellen.

Verbleibende Rohstoffpotenziale können für den Bedarf an Möbeln aus Holzwerkstoffen, die Herstellung von Basischemikalien sowie industrieller Wärme bereitgestellt werden. Sollten weitere Potenziale zur Verfügung stehen, können auch die Produkte der dritten Priorisierungsklasse bedient werden.

Tabelle 18: Gesamtbewertung der Nutzungsoptionen von Waldholz

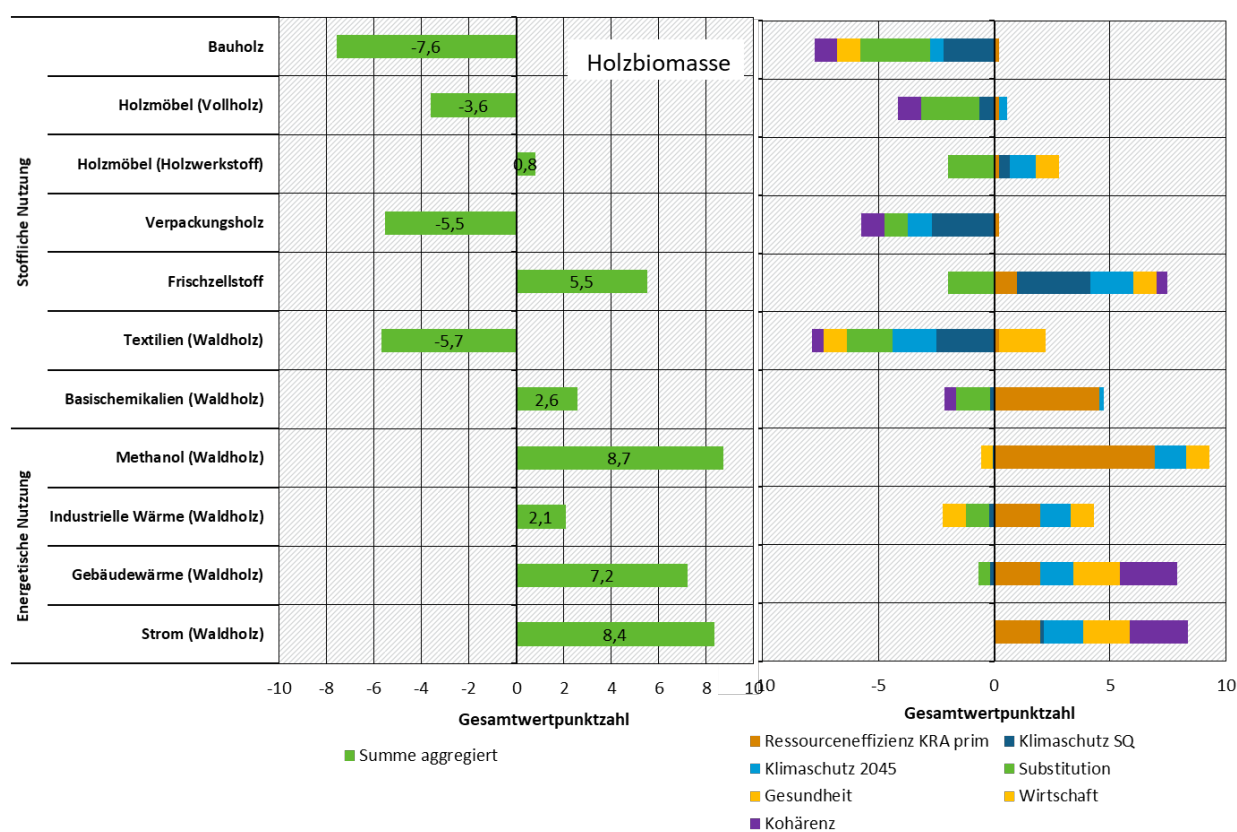
Produkt	Ressourcen- effizienz		Klimaschutz		Substitution	Gesundheit	Wirtschaft	Ökonomie	Kohärenz	Summe
	KRA prim	(KRA rest) ^{a)}	SQ	2045						
Bauholz	0,2	0,8	-2,2	-0,6	-3	0	-1	-1	-1	-7,6
Möbel (Vollholz)	0,2	0,8	-0,7	0,4	-2,5	0	0	0	-1	-3,6
Möbel (Holzwerkstoff)	0,2	1,0	0,5	1,1	-1	0	0	0	0	0,8
Verpackungsholz	0,2	0,8	-2,7	-1,0	-1	0	0	0	-1	-5,5
Frischzellstoff,	1,0	1,0	3,2	1,8	-2	1	0	0,5	0,5	5,5
Papier (Mix) ^{b)}	0,2	2,0	0,1	0,3	-2	1	0	0	0	-0,4
Textilien	0,2	3,0	-2,5	-1,9	-2	2	-1	-1	-0,5	-5,7
Basischemikalien, Methanol	1,1	2,1	-0,2	0,2	-1,5	0	0	0	-0,5	2,6
Biokraftstoff Methanol	5,3	2,1	-0,1	1,4	0	1	-0,5	-0,5	0	8,7
Industrielle Wärme	2,0	0,2	-0,2	1,3	-1	1	-1	-1	0	2,1
Gebäudewärme	2,0	0,2	-0,2	1,4	-0,5	2	0	0	3	7,2

	Ressourcen- effizienz		Klimaschutz		Substitution	Gesundheit	Wirtschaft	Ökonomie	Kohärenz	Summe
Strom	2,0	0,2	0,1	1,7	0	2	0	0	3	8,4

Erläuterung: Negative Werte bedeuten Entlastung, positive Belastung; je höher ein negativer Betrag ausfällt, desto vorteilhafter ist das Produkt zu werten und umgekehrt, je höher ein positiver Wert ausfällt, desto nachteilhafter ist das Produkt.

- KRA_{bio-rest} wird nur der Information halber aufgeführt und ist nicht in die Summe eingerechnet, denn dieser Rohstoffanteil steht noch der Nutzung zur Verfügung.
- Beinhaltet auch Altpapier als Rohstoff, daher hier nur der Information halber, wird aber auch Gründen der Vergleichbarkeit hier nicht mitbewertet.

Abbildung 56: Gesamtbewertung der Nutzungsoptionen von Waldholz (linkes Diagramm aggregiert, rechtes Diagramm differenziert)



Quelle: Berechnungen und Darstellung: ifeu

4.5.3 Auswertung für agrarische Biomasse

Mit der gleichen Vorgehensweise wie vorausgehend für Waldholz werden hier die Ergebnisse für agrarische Produkte zusammengestellt und ausgewertet. In Tabelle 19 und Abbildung 57 werden die Punktergebnisse aller Kriterien für die Nutzungsoptionen von agrarischer Biomasse zusammengeführt.

Anders als in den Punktergebnissen für Waldholz liegen hier in den Summen keine „negativen“ Werte vor, was ein Indiz dafür ist, dass die Nutzung forstlicher Biomasse vom Grundsatz mit

weniger Belastung verbunden ist, als agrarische Biomasse. Insgesamt zeichnen hier recht deutlich zwei Gruppen ab:

1. Die Produkte in einer Bandbreite an Belastungspunkten zwischen 2,1 und 4,0, das sind alle Optionen zur stofflichen Nutzung wie:
 - a. Biokunststoffe aus Zuckerrübe
 - b. Biokunststoffe aus Getreide
 - c. Basischemikalien aus Zuckerrübe
 - d. Schmierstoffe aus Rapsöl und
 - e. Basischemikalien aus Getreide.
2. Die Produkte in einer Bandbreite an Belastungspunkten zwischen 8,5 und 12,8, das sind alle Optionen zur energetischen Nutzung wie:
 - a. Fernwärme über Biogas mit Mais
 - b. Biokerosin aus Rapsöl
 - c. Biodiesel aus Rapsöl
 - d. Ethanol aus Getreide
 - e. Strom über Biogas mit Mais
 - f. Ethanol aus Zuckerrübe

Entscheidende Beiträge für die Ergebnisse kommen vor allem aus den Kriterien Rohstoffeffizienz und Klimaschutz, teilweise auch aus dem Kriterium Substitutionsleistung. Kaum differenzierend wirkt sich „Kohärenz“ und noch weniger „Gesundheit“ aus, da hier die Herkunft aus dem Anbau für alle Rohstoffe mehr oder weniger gleich ist.

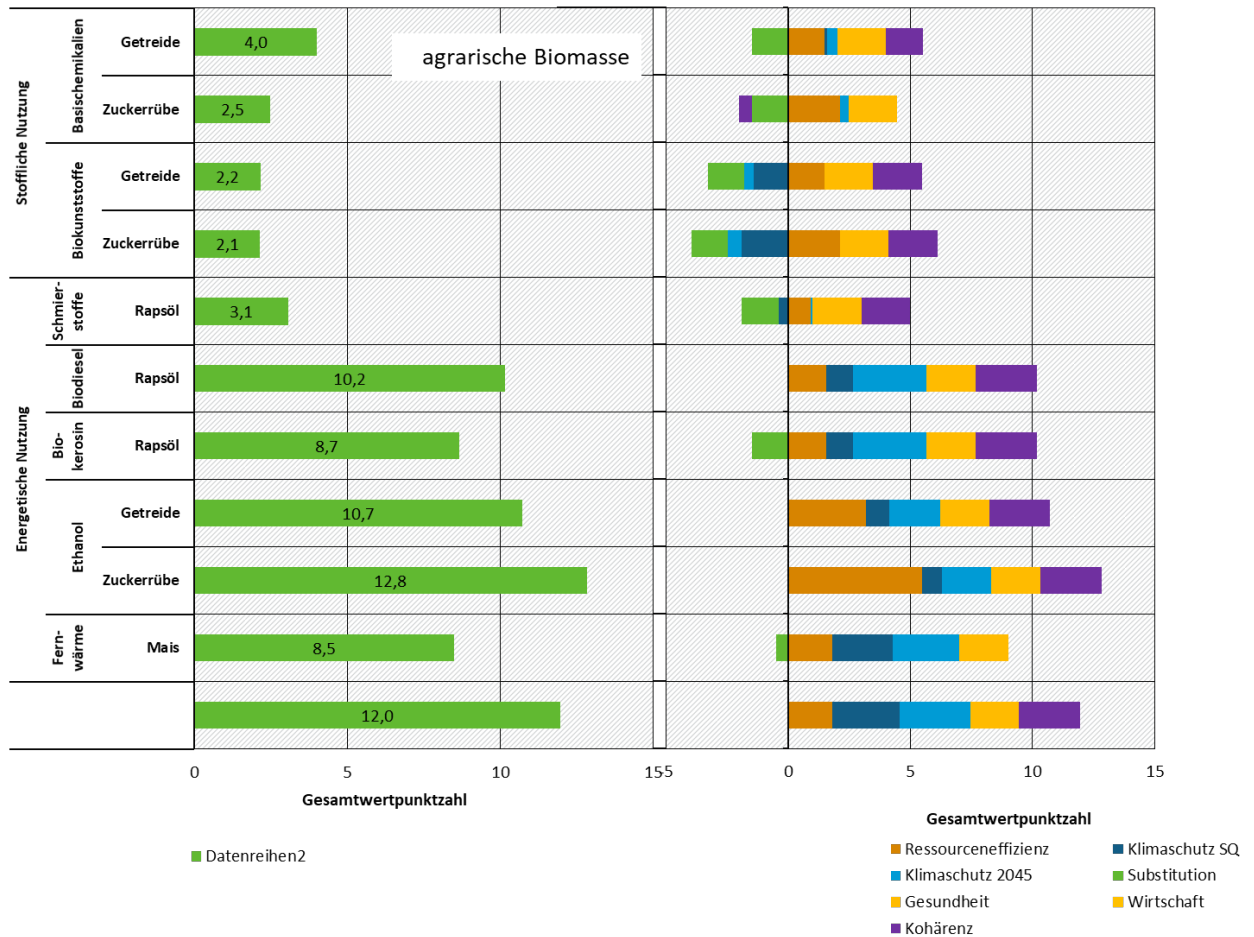
Tabelle 19: Gesamtbewertung der Nutzungsoptionen von primärer agrarischer Biomasse

Produkt	Rohstoff	Ressourcen-effizienz		Klimaschutz		Substitution	Gesundheit	Ökonomie	Kohärenz	Summe
		KRA prim	(KRA rest) ^{a)}	SQ	2045					
Basischemikalien	Getreide	1,5	2,6	0,1	0,4	-1,5	2	0	1,5	4,0
	Zuckerrübe/-rohr	2,1	1,0	0,0	0,4	-1,5	2	0	-0,5	2,5
Biokunststoffe	Getreide	1,5	2,6	-1,4	-0,4	-1,5	2	0	2	2,2
	Zuckerrübe/-rohr	2,1	1,0	-1,9	-0,6	-1,5	2	0	2	2,1
Schmierstoffe	Raps	0,9	0,6	-0,4	0,1	-1,5	2	0	2	3,1
Biodiesel	Raps	1,6	0,4	1,1	3,1	0	2	0	3	10,3
Biokerosin	Raps	1,6	0,4	1,1	3,1	-1,5	2	0	3	8,8
Ethanol	Getreide	3,2	2,6	1,0	2,1	0	2	0	3	10,7
	Zuckerrübe/-rohr	5,5	1,0	0,8	2,0	0	2	0	3	12,8
Fernwärme	Biomethan Mais	2,7	0,0	1,6	1,8	-0,5	2	0	0	8,5
Strom	Biomethan Mais	2,7	0,0	1,8	2,0	0	2	0	3	12,0

Erläuterung: Positive Werte bedeuten Belastung; je niedriger ein Betrag ausfällt, desto vorteilhafter ist das Produkt zu werten.

- a) $KRA_{bio-rest}$ wird nur der Information halber aufgeführt und ist nicht in die Summe eingerechnet, denn dieser Rohstoffanteil steht noch der Nutzung zur Verfügung.

Abbildung 57: Gesamtbewertung der Nutzungsoptionen von primärer agrarischer Biomasse (linkes Diagramm aggregiert, rechtes Diagramm differenziert)



Quelle: Berechnungen und Darstellung: ifeu

4.5.4 Auswertung für biogene Abfälle und Reststoffe

Nach der gleichen Methodik lassen sich die Produkte aus biogenen Abfällen und Reststoffen grob in drei Gruppen unterteilen (wie auch aus Tabelle 20 und Abbildung 58 erkennbar):

- Die Produkte mit einem Überhang an Entlastungspunkten, worunter sich allein:
 - Schmierstoffe aus Altspeiseöl oder Tierfett finden
- Die Produkte in einer Bandbreite zwischen 0,6 und 3,8 Belastungspunkten, wie:
 - Recyclingpapier, wofür jedoch keine relevante Alternative zur Diskussion steht, daher hier quasi alleinstehend,
 - Basischemikalien auf Basis von Stroh
 - Basischemikalien auf Basis von Altholz
 - Industrielle Wärme auf Basis von Altholz
 - Fernwärme auf Basis von Biogas aus Gülle

- f. Biokerosin auf Basis von Altspeiseöl oder Tierfett
 - g. Strom auf Basis von Biogas aus Gülle
3. Die Produkte mit Werten oberhalb von 5 Belastungspunkten, wie:
- a. Biodiesel auf Basis von Altspeiseöl oder Tierfett
 - b. Biokerosin auf Basis von Stroh.
 - c. Strom auf Basis von Altholz
 - d. Bioethanol auf Basis von Stroh

Bei dieser Auswertung ist jedoch zu beachten, dass die Rohstoffbasis sehr unterschiedlich ist. Anders als bei Waldholz oder Agrarprodukten, die gezielt für unterschiedliche Produkte eingesetzt werden können, sind die Abfälle und Reststoffe stärker auf bestimmte Produktpfade gerichtet. Eine Priorisierung wäre auf Basis der vorliegenden Ergebnisse daher folgendermaßen zu setzen:

- Altholz: erste Priorität: Basischemikalien und industrielle Wärme; zweite Priorität: Strom
- Stroh: erste Priorität: Basischemikalien, zweite Priorität: Biokerosin und Bioethanol
- Altspeiseöl oder Tierfett: erste Priorität: Schmierstoffe, zweite Priorität: Biokerosin und zuletzt: Biodiesel
- Biogas aus Gülle: Fernwärme und Strom ohne wesentliche Priorisierung

Tabelle 20: Gesamtbewertung der Nutzungsoptionen von biogenen Abfall- und Reststoffen

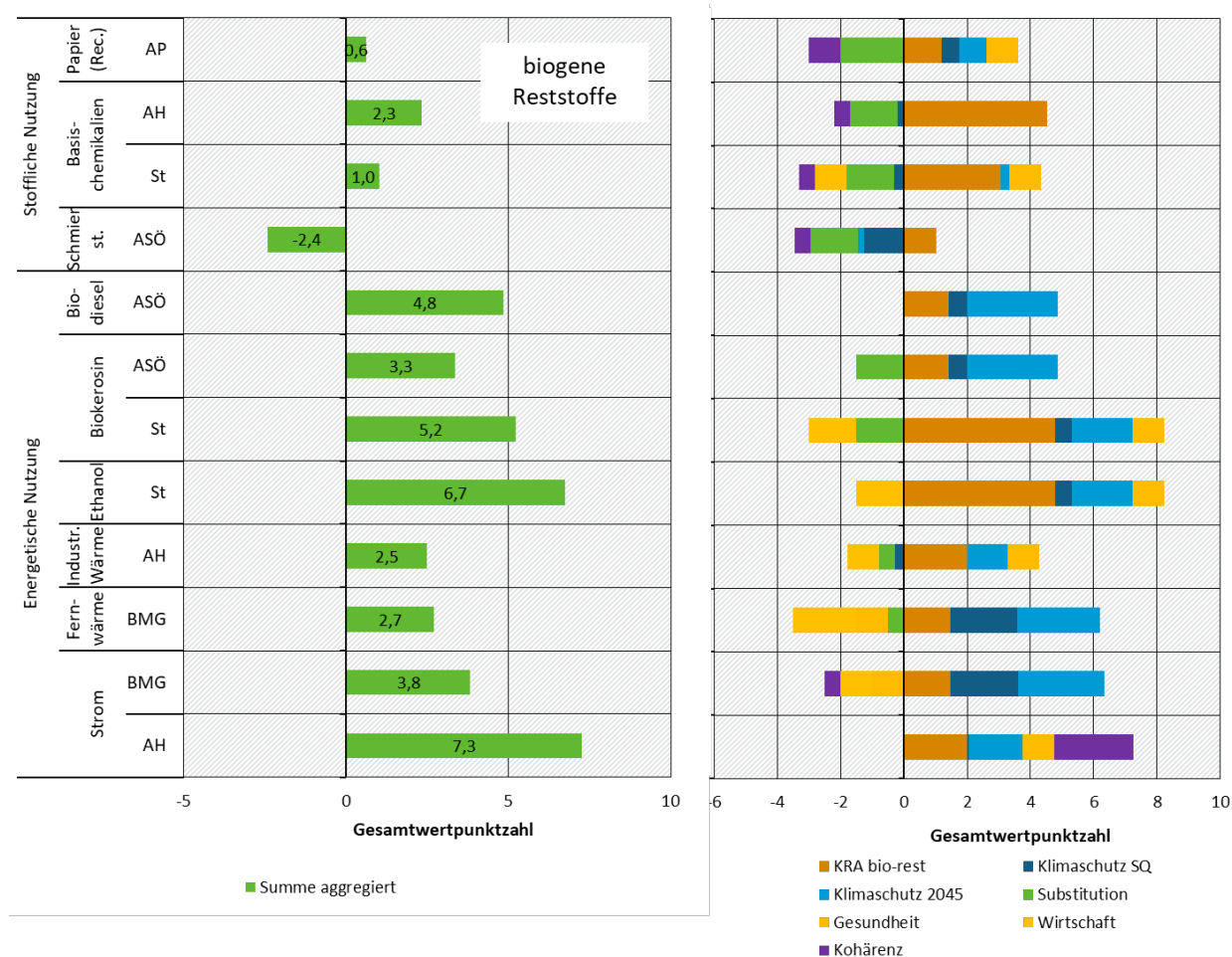
Produkt	Rohstoff	Ressourcen-effizienz		Klimaschutz		Substitution	Gesundheit	Ökonomie	Kohärenz	Summe
		KRA prim	KRA rest	SQ	2045					
Papier (Recycling)	Altpapier	0,0	2,2	0,5	0,9	-2	1	0	-1	0,6
Basischemikalien	Altholz	0,0	0,0	-0,2	0,0	-1,5	0	0	-0,5	2,3
	Stroh	0,0	3,1	-0,3	0,3	-1,5	1	-1	-0,5	1,0
Schmierstoffe	Altspeiseöl	0,0	1,0	-1,3	-0,2	-1,5	0	0	-0,5	-2,4
Biodiesel	Altspeiseöl	0,0	1,4	0,6	3,0	0	0	0	0	5,0
Biokerosin	Altspeiseöl	0,0	1,4	0,6	3,0	-1,5	0	0	0	3,5
	Stroh	0,0	4,8	0,5	1,9	-1,5	1	-1,5	0	5,2
Ethanol	Stroh	0,0	4,8	0,5	1,9	0	1	-1,5	0	6,7
Industrielle Wärme	Altholz	0,0	2,0	-0,3	1,3	-0,5	1	-1,0	0	2,5
Fernwärme	Biomethan, Gülle	0,0	2,2	1,2	1,7	-0,5	-1	-2	0	2,7
Strom	Altholz	0,0	2,0	0,1	1,7	0	1	0	3	7,3

Produkt	Rohstoff	Ressourcen-effizienz		Klimaschutz		Substitution	Gesundheit	Ökonomie	Kohärenz	Summe
	Biomethan, Gülle	0,0	2,2	1,2	1,8	0	-1	-1	-1	3,8

Erläuterung: Negative Werte bedeuten Entlastung, positive Belastung; je höher ein negativer Betrag ausfällt, desto vorteilhafter ist das Produkt zu werten und umgekehrt, je höher ein positiver Wert ausfällt, desto nachteilhafter ist das Produkt.

a) $KRA_{bio-prim}$ ist hier per Definition bei Null, daher wird hier der $KRA_{bio-rest}$ angerechnet.

Abbildung 58: Gesamtbewertung der Nutzungsoptionen von biogenen Abfall- und Reststoffen (linkes Diagramm aggregiert, rechtes Diagramm differenziert)



Quelle: Berechnungen und Darstellung: ifeu

5 Erstellung eines Gesamtnutzungskonzepts

Ziel dieses Kapitels ist es, die verfügbaren Biomassepotenziale (siehe Kapitel 2.2) anhand der im vorausgehenden Kapitel erarbeiteten Ansatzpunkte zur Priorisierung von Biomasseströmen und Biomassenutzungen in Form einer „ökologischen Merit-Order“ den entsprechenden Bedarfen an Biomasse in den einzelnen Produktbereichen zuzurechnen.

Zu Beginn wird daher dieser Bedarf ermittelt, der im Anschluss „schichtweise“ durch die verfügbaren Biomassen nach Priorisierungshierarchie abgedeckt werden.

Dies erfolgt schrittweise zunächst für die Abfall- und Reststoffe, da diese als solche zur Verfügung stehen und nicht eigens erzeugt werden müssen. Die folgende Schicht wird anhand von Waldholz zugerechnet, da dessen Nutzung, wie die Analysen in Kapitel 4.5.2 und 4.5.3 zeigen, gegenüber agrarischer Anbaubiomasse mit weniger Belastung gemäß den Kriterien verbunden ist. Somit bleibt am Ende ein „Auffüllen“ der Bedarfe für den Nicht-Nahrungsmittelbereich mit der Anbaubiomasse, die auf 1,5 Mio. ha erzeugt werden kann (siehe Kapitel 2.2.2).

5.1 Bedarf an Biomasse

Der tatsächliche Bedarf an Biomasse durch einzelne Sektoren und Produktionszweige ist keine objektiv technisch begründbare Größe. Zunächst kann als Ausgangspunkt die aktuelle Nutzung der Biomasse dienen. Wie eine weitere Entwicklung Richtung 2030 und 2045 aussehen wird, ist abhängig von den Strategien der Wirtschaftszweige und Unternehmen, wie auch von der Rechtslage. Diese kann direkt auf den Biomassebedarf wirken (z.B. die Mindestquoten für fortschrittliche Biokraftstoffe nach RED III) oder indirekt durch THG-Minderungsverpflichtungen (z.B. Flottengrenzwerte für Pkw) oder marktwirtschaftliche Instrumente wie den Emissionshandel (ETS oder BEHG). Vor diesem Hintergrund kann der Biomassebedarf für die hier vorliegende Arbeit nur in grober Weise abgeschätzt werden.

5.1.1 Status Quo der Biomassenutzung

In Tabelle 21 sind die agrarischen Biomassen zusammengefasst, die aktuell in Deutschland erzeugt und konsumiert werden. In den Angaben von Futtermitteln bis Energiepflanzen sind zusätzlich zu den in Deutschland produzierten Mengen auch die importierten Mengen enthalten. Daraus wird auch die Gesamtsumme errechnet. In der rechten Spalte sind die Mengen aufgeführt, die davon netto exportiert werden. Die Gesamtaufstellung mit Nahrungs- und Futtermitteln dient lediglich der Information zur agrarischen Gesamtbiomasseproduktion und -nutzung. Der künftige Bedarf für die Ernährung wurde nach (Hennenberg et al. 2023b) auf Basis der BEPASO-Szenarien (Musonda et al. 2020) bzw. Langfristszenarien (Köppen, Rettenmaier 2023) anhand nachhaltiger Kriterien dahingehend berechnet, dass für den Nicht-Nahrungsbereich die oben genannten 1,5 Mio. ha zur Verfügung stehen. Der aktuelle Flächenbedarf für die in Deutschland konsumierte Biomasse zur stofflichen und energetischen Nutzung liegt bei ca. 4 Mio. ha, wie Abbildung 59 zeigt. Nach der FNR bemisst sich ausschließlich in Deutschland liegende Anbaufläche für nachwachsender Rohstoffe auf knapp 2,5 Mio. ha. Hierin sind die „importierten“ Flächen nicht enthalten und dennoch liegt auch dieser Wert weit über den 1,5 Mio. ha.

Tabelle 22 gibt die Mengen an stofflich oder energetisch genutzter forstlicher Biomasse wieder. An Primärholz (inkl. Sägenebenprodukte) wurden danach 84,7 Mio m³ jährlich entnommen, wovon etwa die Hälfte als Stammholz in Sägereien ging zur Erzeugung von 24,6 Mio m³

Schnittholz. 12 Mio m³ gingen in die Holzwerkstoffindustrie, 8,4 Mio m³ in die Papier- und Zellstoffindustrie und 39,8 Mio m³ wurden schlussendlich energetisch genutzt.

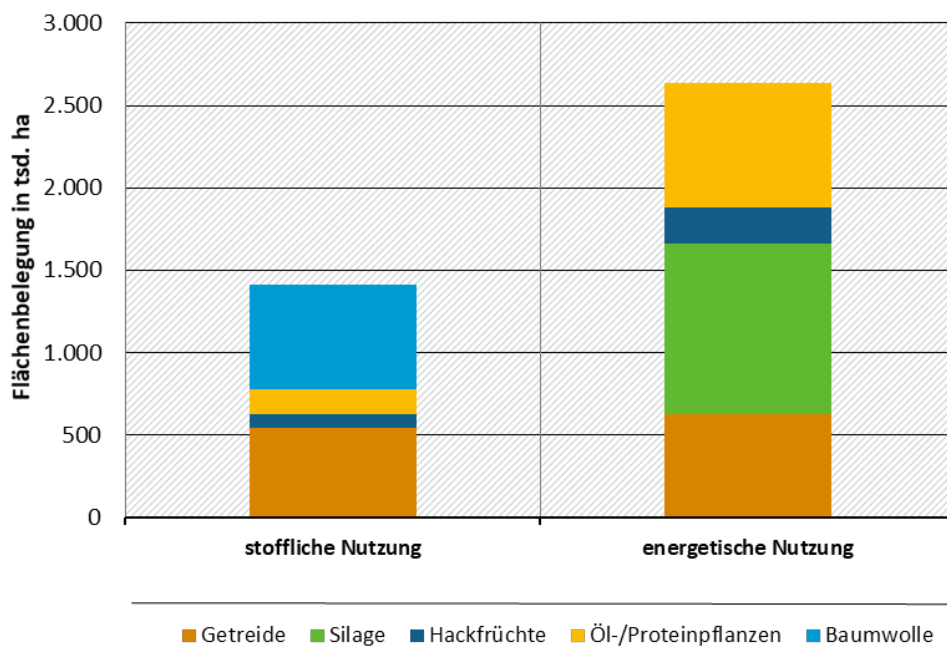
Tabelle 21: Zusammenfassung der in Deutschland erzeugten und genutzten agrarischen Biomasse (Status quo)

	Gesamt	Futter- mittel	Nahrungs- mittel	Stoffliche Nutzung	Energie- pflanzen	Netto- export
In Tausend Tonnen (Frischmasse) pro Jahr						
Gesamt	214.629	118.145	38.609	5.698	45.552	6.625
Körnergetreide	39.806	20.913	9.254 ^{a)}	3.202	4.587	1.849
Silage	99.026	64.167	0	0	34.859	0
Hackfrüchte	22.375	1.936	10.420	1.496	3.748	4.776
Öl-/Proteinpflanzen	8.416	4.323	1.215	520	2.357	
Gemüse/Obst/sonst.	18.200		17.720 ^{b)}	480 ^{c)}		
Grünland ^{d)}	26.806		26.806			
Fleisch	5.417		6.515			1.098

Quelle: Zusammenstellung, Mittelwertbildungen ifeu auf Basis von Destatis; Angaben in Originalsubstanz (außer Grünland); (<https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Feldfruechte-Gruenland/Tabellen/ackerland-hauptnutzungsarten-kulturarten.html?view=main%5BPrint%5D#fussnote-A-123084> und BMEL (<https://www.bmel-statistik.de/ernaehrung-fischerei/versorgungsbilanzen/>).

- a) Inklusive importiertem Reis
- b) Große Anteile hiervon sind importierte Südfrüchte, Schalenfrüchte, Kaffee und Kakao
- c) Hierbei handelt es sich ausschließlich um Baumwolle
- d) Grünland hier als Trockenmasse angegeben, mit angenommener Feuchte von 82 % errechnet sich daraus 148.000 t Frischmasse

Abbildung 59: Flächenbelegung für die in Deutschland produzierte und konsumierte Biomasse für die stoffliche und energetische Nutzung



Darstellung und Berechnungen des ifeu auf Basis der die in der Fußnote zu Tabelle 21 aufgeführten Quellen.

Tabelle 22: Zusammenfassung der in Deutschland stofflich oder energetisch genutzten forstlichen Biomasse (Status quo)

	Gesamt	Schnitt-holz	Holzwerk-stoffe	Zellstoff-industrie	Energie
In Tausend Kubikmeter pro Jahr					
Primärholz (inkl. Säge Nebenprodukte)	84.700	24.558	11.958	8.413	39.770
Davon Nadelholz	49.716	22.966	8.797	6.110	11.844
Davon Laubholz	32.684	1.592	3.162	2.304	25.627
Recyclingmaterial (Altholz, Altpapier)	19.696		2.278	3.918	13.500
Summe inkl. Recyclingmat.	104.396	24.558	14.236	12.332	53.270
Davon Bauholz		66%	20%		
Davon Möbelholz		8%	40%		
Davon Verpackungsholz		29%	40%		

Quelle: Holzmarktbericht (BMEL 2020), z.T. ergänzt mit Daten übergeben durch Prof. Dr. U. Mantau (Pfeiffer et al. 2023); sowie Annahmen und Berechnungen des ifeu

5.1.2 Bedarf an stofflicher Nutzung

Wie Tabelle 21 zeigt liegt der wesentliche Bedarf an agrarischer Biomasse zur stofflichen Nutzung auf Seiten von Getreide und Textilfasern. Bei Getreide zielt dies v. a. auf technische Anwendungen von z. B. Stärke. In den Daten sind jedoch auch Verwendungen im Genussmittelbereich enthalten wie z. B. Braugetreide. Der Bedarf für diesen Bereich, der aktuell etwa 0,54 Mio. benötigt, wird daher auch künftig bestehen.

Bei **Textilfasern** aus Baumwolle ist schon seit längerem ein Rückgang zu beobachten, allerdings nicht bei Textilfasern selbst, die zunehmend durch synthetische Fasern verdrängt werden, die etwa 75 % der Weltproduktion einnehmen (Textil+Mode 2023). Hierfür werden somit andere biobasierte (z. B. holzbasierte) oder auf Wasserstoff und CO₂ basierende Quellen (PtGLS) benötigt. Der Bedarf an Textilien in Deutschland liegt nach (Forbrig et al. 2020) bei 1,78 Mio. t Textilien. Nur ein sehr kleiner Teil wird aus Zellulosefaser oder anderen Naturfasern wie Wolle hergestellt. Ebenfalls nur ein kleiner Anteil der in Deutschland konsumierten Textilien wird in Deutschland hergestellt. Die Frage, wie hoch der Bedarf an holzbasierten Fasern liegen kann, ist somit schwer zu beantworten. Hier wird angenommen, dass 25 % des Verbrauchs (das entspricht etwa dem Baumwollanteil am Markt) substituiert werden könnten.

Im Bereich der **Schmierstoffe** und **Wasch- und Reinigungsmittel (WRM)** werden bereits gewisse Mengen an Pflanzenölen eingesetzt. Ein großer Teil davon sind dabei importierte Öle und Fette (Palmöl, Palmkernöl, Kokosöl etc.). Nach dem Statistikdatenmodell der FNR zu *Anbau und Verwendung Nachwachsender Rohstoffe in Deutschland* (FNR 2024) liegen die biobasierten Marktanteile bei Schmierstoffen mit unter 0,05 Mio. t bei knapp 5 % und könnten jedoch bis zu 0,9 Mio. t erhöht werden (Fehrenbach et al. 2019b). Bei den WRM sind nach (Wiegmann et al. 2019) die biobasierten Bedarfe mit aktuell unter 0,4 Mio. t weitgehend ausgeschöpft. Diese Menge plus das Bedarfspotenzial bei den Schmierstoffen ergäbe einen Pflanzenölbedarf bei etwa dem 2,5fachen des aktuellen Verbrauchs im stofflichen Bereich.

Insgesamt werden nach (FNR 2024) aktuell an agrarischen Rohstoffen für den stofflichen Nutzungsbereich 0,95 Mio. t Fette und Öle, 1,24 Mio. t Stärke und Zucker und 0,64 Mio. t Protein und sonstiges verwendet. Diese Bedarfe plus eines Ausbaupotenzials bei Bioschmierstoffen um 0,78 Mio. t werden für die Zukunft fortgeschrieben.

Was den weiteren stofflichen Bedarf von Waldholz betrifft, so ist hier durch Initiativen zu mehr Holzeinsatz im **Baubereich** eher von einem Bedarfsanstieg zu rechnen. In den Szenarien nach (Hennenberg et al. 2023b) wie auch dem BEPASO-Szenario Bioökonomiewende (Musonda et al. 2020) wird der Bedarf an Schnittholz für die Zukunft konstant gehalten. Ähnliches gilt auch die **Holzwerkstoffindustrie**. Der **Zellstoff- und Papierbereich** wird eher als rückläufig betrachtet. Der Bereich der graphischen und Zeitungspapiere nimmt aufgrund der Digitalisierung deutlich ab, wobei jedoch Verpackungspapier durch den steigenden Online-Versand deutlich zunehmen. Auch sind Recyclingpotenziale hier schon sehr weit ausgeschöpft. Somit ist auch hier von einem weitgehend konstanten Bedarf in die Zukunft auszugehen.

In den aktuellen Statistiken schlägt sich eine Nachfrage aus dem Bereich der **chemischen Industrie** – neben den oben genannten und in Nutzung befindlichen Mengen an Fetten/Ölen, Stärke, Zucker und Proteine – bisher kaum nieder. Der Anteil der biobasierten Kunststoffe am weltweiten Kunststoffmarkt lagen im Jahr 2022 mit ca. 4 Mio. t. bei etwa 1 %.⁶² In Deutschland werden ca. 20 Mio. t biobasierter Kunststoff hergestellt.⁶³ Nach (VCI, VDI 2023) sieht die chemische Industrie für Deutschland in verschiedenen Szenarien einen Biomassebedarf

⁶² <https://biowerkstoffe.fnr.de/biokunststoffe/marktsituation>

⁶³ <https://plasticseurope.org/de/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2023/>

zwischen 2,7 und 26,6 Mio. t_{TM} bis ins Jahr 2045. Das entspricht einer Bandbreite zwischen etwa der Hälfte und dem Fünffachen der aktuellen agrarischen stofflichen Biomassenutzung – bzw. im Maximalfall der Hälfte der aktuellen energetischen Biomassenutzung. Legt man Holzbiomasse zu Grunde, so wären die 26,6 Mio. t deutlich mehr als die 40 m³ Energieholz. Für die Betrachtung hier wird ein mittlerer Ansatz gewählt, d.h. als Bedarf wird die Hälfte des Maximalszenarios angenommen, 13 Mio. t_{TM} Biomasse.

5.1.3 Bedarf an energetischer Nutzung

Dieser Bedarf ist nochmals schwieriger einzuschätzen, da im energetischen Bereich insgesamt mehr erneuerbare nicht-biogene Alternativen zur Verfügung stehen. Im Vordergrund stehen dabei erneuerbarer Strom, aber auch Wasserstoff und Derivate. Dennoch wird von der Industrie gerade auch Biomethan zum Füllen von Lücken angeführt. So wird dies z.B. durch die Stahlindustrie als Flexibilitätslösung auf dem Weg bis zur vollständigen Produktion durch grünen Strom und Wasserstoff gesehen.

Szenarien einer Studie von Agora-Energiewende von (Prognos et al. 2021) gehen von einem **industriellen Bioenergiebedarf** von bis zu 118 PJ in 2030 aus. Gerechnet als Biomethan aus Mais, entspräche dies knapp 1 Mio. ha Maisanbau mit ca. 40 Mio. t Silagemais. In Form von Waldholz wären das 6,2 Mio. t_{TM} oder ca. 12 Mio. m³. Das entspricht einem Drittel des derzeitigen Energieholzes.

Der Bedarf an **Biokraftstoffen** hängt u.a. von der Umsetzung der RED III ab. Verpflichtend ist die derzeitige Quote von 2,6 % für fortschrittliche Biokraftstoffe. Die konventionellen Biokraftstoffe sind dagegen gedeckelt. Wie die Umsetzung der RED III konkret erfolgen wird, ist noch offen. Die oben genannte Quote würde etwa 65 PJ fortschrittliche Biokraftstoffe bedeuten, für die 8 bis 9 Mio. t Biomasse benötigen würde – in diesem Fall verbindlich biogene Abfälle oder Reststoffe.

Bei Flugtreibstoffen setzt die ReFuelEU Aviation die Quote mit u. a. 6 % Sustainable Aviation Fuel (SAF) in 2030. Für Deutschland wären dies etwa 30 PJ und damit etwa 4 Mio. t Biomasse.

Nach (Prognos et al. 2021) wird für Jahr 2030 ein auf Bioenergie (inklusive Abfallbiomasse) basierender Bedarf an **Fernwärme** in Höhe von 24 TWh prognostiziert, der bis 2045 auf 15 TWh zurückgehen soll. Ausgehend von den 24 TWh bedeutet dies entweder 0,75 Mio. ha Mais für Biogas bzw. 30 Mio. t Silagemais oder 4,7 Mio. t_{TM} Holz. Um diese Fernwärme mit Biogas aus Gülle zu decken, bräuchte es 230 Mio. t Gülle.

Zur Deckung des Bedarfs an **erneuerbarem Strom** prognostizieren (Prognos et al. 2021) für das Jahr 2030 eine Nettostromerzeugung 38 TWh aus Biomasse und 18 TWh für 2045. Der für 38 TWh notwendige Biomassebedarf errechnet sich auf rund 150 Mio. t Silagemais oder 900 Mio. t Gülle oder 21 Mio. t_{TM} Holz.

5.2 Nutzungskonzept für biogene Abfall- und Reststoffe

Gemäß Kapitel 2.2.3 lag im Jahr 2020 das technische Potenzial bei ca. 95 bis 100 Mio. t_{TM} an biogenen Abfall- und Reststoffe – ohne Waldrestholz und Rinde, jedoch mit Sägenebenprodukten (SNP).

In Tabelle 23 werden die verfügbaren Potenziale der biogenen Abfall- und Reststoffe zunächst den Optionen der jeweiligen ersten Priorisierungsklasse zugeführt. So werden z.B. 8,0 Mio. t Holz (SNP), 6,9 Mio. t Altholz und 6,9 Mio. t Stroh der Produktion von Basischemikalien zugewiesen. Deren Bedarf an Biomasse liegt jedoch nur bei 13 Mio. t – es verbleibt somit eine Verfügbarkeit dieser Reststoffbiomasse in Höhe von 8,8 Mio. t (nach ursprünglicher Proportion

über die drei Reststoffarten verteilt) erhalten. Diese werden dann der zweiten Priorisierungsklasse zugerechnet, z.B. Holz (SNP) und Altholz der Industriewärme, für die ein Bedarf von 6,2 Mio. t Biomasse besteht. Die verbliebene SNP-Holz und Altholzmenge gehen in dieser Nutzung vollständig auf. Verbleibender Bedarf an Industriewärme (2,5 Mio. t_{TM}) und die 3. Priorisierungsklasse muss daher aus der nächsten Biomassegruppe – dem Waldholz – gedeckt werden muss.

Die Restbedarfe sind in Tabelle 24 zusammengestellt. Wird der Restbedarf für Strom durch Holz gedeckt, sind 21 Mio. t_{TM} notwendig. Wird dieser Bedarf (energetisch sind es 128 PJ Strom) durch Biogas aus Mais gedeckt, so sind 73,4 Mio. t Silagemais erforderlich.

Tabelle 23: Aufteilung des verfügbaren Potenzials an biogenen Abfall- und Reststoffe auf die priorisierten Nutzungen unter Angabe derer Bedarfe und der verbleibenden Verfügbarkeiten (Alle Angaben in Mio. t_{TM})

	Holz (SNP)	Altholz	Stroh	Mist, Gülle	Altspeise- öle/-fette
Verfügbarkeit	8,0	6,9	6,9	15,0	0,13
Priorität 1	Basischemikalien			Fernwärme	Schmierstoff
Bedarf	13			230	0,9
Verbleib. Verfügbarkeit	3,7	2,6	2,6	0	0
Priorität 2	Industrielle Wärme		Biokerosin	Strom	Biokerosin
Bedarf	6,2		4		4
Verbleib. Verfügbarkeit	0	0	0	0	0
Priorität 3	Strom	Strom	Bioethanol	-	Biodiesel
Bedarf	21	-	4		4

Nicht in Tabelle 23 enthalten sind 53,3 Mio. t Siedlungsabfälle, Klärschlämme, industrielle Reststoffe und sonstige Abfälle. Diese Stoffströme sind sehr vielfältig und beinhalten viele spezifische Nutzungswege wie Recycling bei Altpapier oder weiteren Siedlungsabfällen, Kompostierung bei Bioabfall, landwirtschaftliche Verwertung bei Klärschlamm usw. Zur Vereinfachung dieser hier nicht in allen Details abbildbaren Vielfalt wird davon ausgegangen, dass 50 % dieser Materialien einer entsprechenden spezifischen Verwertung zugeführt werden (wie z. B. das Recycling von Altpapier), für die in dieser Studie keine alternative Priorisierung betrachtet wird. Für 50 % wird eine Verbrennung mit Strom- und Wärmeerzeugung angenommen, wie sie für Resthausabfall, den überwiegenden Anteil an Klärschlamm sowie zahlreiche industrielle Abfälle erfolgt.

Tabelle 24: Verbleibender Bedarf an Biomasse nach dem Aufbrauchen der biogenen Abfall- und Reststoffe

	Masse in Mio. t _{TM}	Energiegehalt in PJ
Schmierstoffe	0,8	
Biokerosin ^{a)}	1,4	10,8

	Masse in Mio. t _{TM}	Energiegehalt in PJ
Biodiesel ^{b)}	4	32,5
Bioethanol ^{b)}	4	32,5
Industrielle Wärme	2,5	48,1
Fernwärme	215 ^{c)}	80,8
auf Basis von Holz	4,3 ^{d)}	
auf Basis von Mais-Biogas	24,4 ^{d)}	
Strom		128
auf Basis von Holz	21	
auf Basis von Mais-Biogas	150	

a) Als Sustainable Aviation Fuel (SAF) gemäß ReFuelEU Aviation

b) als fortschrittlicher Biokraftstoff nach RED III Annex IX Teil A

c) Dieser Wert bezieht sich auf die Masse an Gülle und Mist, die nach Ausschöpfung des technischen Potenzials zusätzlich nötig wären, um den Gesamtbedarf an Fernwärme zu decken.

d) Diese Werte leiten sich restlichen Energiebedarf (80,8 PJ) ab und beschreiben die Biomassemenge, die hierfür benötigt werden aus Holz oder aus Mais-Biogas

5.3 Nutzungskonzept für Waldholz

Gemäß Kapitel 2.2.1 verringert sich das nachhaltig verfügbare Potenzial an Waldholz, welches in den letzten Jahren teilweise deutlich über 70 Mio. m³ betrug, bis 2030 auf maximal 65 bis 70 Mio. m³ und bis 2045 auf 56 Mio. m³ (Hennenberg et al. 2023b). Ausgehend von den Holzmenen zum Status quo (siehe Tabelle 22), werden im Folgenden die verfügbaren Mengen auf 67,5 Mio. m³ skaliert, was dem Jahr 2030 entspricht, das Jahr, auf welches bereits im vorangehenden Kapitel zu Abfall- und Reststoffen Bezug genommen wurde. Der Bedarf an Produkten der ersten Priorisierungsklasse wird dabei gegenüber dem Status quo konstant gehalten. Mit einem pauschalen Umrechnungsfaktor von 0,5 t_{TM} pro m³ errechnet sich daraus eine Verfügbarkeit von 33,75 Mio. t_{TM}.

Von diesem Betrag sind die bereits in Kapitel 5.2 unter Reststoffen aufgeteilten Sägenebenprodukte (SNP) abzuziehen. Somit bleiben verfügbar 25,8 Mio. t_{TM}.

Zu decken sind zuerst die Bedarfe der Holz-Produkte der ersten Prioritätsklasse. Das sind:

- Bauholz mit 16,2 Mio. m³ bzw. 8,10 Mio. t_{TM}.
- Verpackungsholz mit 1,96 Mio. m³ bzw. 0,98 Mio. t_{TM}
- holzbasierende Textilien mit 2,23 Mio. m³ bzw. 1,11 Mio. t_{TM}
- Vollholzmöbel mit 7,12 Mio. m³ bzw. 3,56 Mio. t_{TM}

In der zweiten Prioritätsklasse sind Basischemikalien bereits durch Altholz und SNP (siehe Kapitel 5.2) gedeckt. Es verbleibt ein Teil, um die industrielle Wärme (2,53 Mio. t_{TM}) und das Holz für die Möbel aus Holzwerkstoffen (5,98 Mio. t_{TM}) abzudecken. Wie in Tabelle 25 aufgestellt, werden die Schnittholzprodukte mit ihrem Gesamtbedarf von 12,65 Mio. t_{TM} sicher abgedeckt, eine verbleibende Verfügbarkeit darüberhinaus wird nicht benötigt, sodass das übrige Waldholz als Industrieholz zunächst die notwendigen 1,11 Mio. t_{TM} für priorisierten holzbasierten Textilien bedienen kann. Die verbleibenden 13,1 Mio. t_{TM} den Bedarf für

Holzwerkstoff-Möbel sowie den Restbedarf der industriellen Wärme decken. Für die 3. Priorität bleiben dann noch 4,59 Mio. t_{TM}, wodurch der Bedarf des Frischzellstoffs gedeckt werden kann und noch ein kleiner Anteil der Gebäudewärme.

Die verbleibenden Bedarfe nach vollständiger Verteilung des Waldholzes ist in Tabelle 26 aufgeführt.

Tabelle 25: Aufteilung des verfügbaren Potenzials an Waldholzbiomasse auf die priorisierten Nutzungen unter Angabe derer Bedarfe und der verbleibenden Verfügbarkeiten (Alle Angaben in Mio. t_{TM})

	Schnittholz			Industrieholz			
Verfügbarkeit	25,8						
Priorität 1	Bauholz	Möbelholz	Verpackungsholz	Holzbasierte Textilien			
Bedarf	8,1	3,56	0,98	1,11			
Verbleibende Verfügbarkeit	0	0	0	13,1			
Priorität 2				Möbel (Holzwerkstoff)		Industrielle Wärme	
Bedarf				5,98		2,53	
Verbleibende Verfügbarkeit				4,59			
Priorität 3				Frischzellst.	Gebäudewärme	Strom	Biokraftstoff
Bedarf				4,21	4,23	21,0	8,0

Tabelle 26: Verbleibender Bedarf an Biomasse nach dem Aufbrauchen der Waldholzbiomasse

	Masse in Mio. t _{TM}	Energiegehalt in PJ
Biokraftstoffe ^{a)}	8	65,0
Gebäudewärme	3,87	73,5
Strom		128
auf Basis von Holz	21	
auf Basis von Mais-Biogas	150	

a) als fortschrittlicher Biokraftstoff nach RED III Annex IX Teil A

b) Diese Werte leiten sich restlichen Biomasse-Strombedarf (128 PJ) ab und beschreiben die Biomassemenge, die hierfür benötigt werden aus Holz oder aus Mais-Biogas

5.4 Nutzungskonzept für agrarische Biomasse

Als Verfügbarkeit gelten hier die 1,5 Mio. ha Anbaufläche für den Nicht-Nahrungsbereich. Durch die vorangehenden Priorisierungen bei der Nutzung von Abfall-/Reststoffen und Waldholz werden bereits alle Produkte der ersten Priorisierungsklasse der agrarischen Biomasse abgedeckt. In die zweite Priorisierungsklasse fallen die stofflichen Produkte aus nachwachsender Agrarbiomasse. Nachdem für einen Teil der Schmierstoffe die

Altspeiseöl/fette bereits aufgebraucht werden, verbleiben Bedarfe für folgende Produkte, für die agrarische Rohstoffe und damit Anteile der Anbaufläche benötigt werden:

- | | |
|---------------------------------|---------------------------|
| a. Pflanzenöl (Raps) | 1,60 Mio. t _{TM} |
| b. Technische Stärke und Zucker | 1,24 Mio. t _{TM} |
| c. Proteine und sonstiges | 0,64 Mio. t _{TM} |

Für diese Produkt werden insgesamt 0,67 Mio. ha Anbaufläche benötigt. Für die Mengen zukünftiger Biokunststoffe und Basischemikalien dienen – wie oben erwähnt - Abfall-/Reststoffen und Waldholz als Rohstoffbasis.

Aus der zweiten Priorisierungsklasse sind außerdem ist der Bedarf für Biokerosin mit 1,43 Mio. t_{TM} abzudecken. Bedarf besteht weiterhin für die in Tabelle 24 und Tabelle 26 aufgeführten Produkte, wie:

- | | |
|--|--------------------------|
| d. Fernwärme: | 4,3 Mio. t _{TM} |
| e. Gebäudewärme | 3,9 Mio. t _{TM} |
| f. Biodiesel/Bioethanol: ⁶⁴ | 8,0 Mio. t _{TM} |
| g. Strom | 21 Mio. t _{TM} |

Diese Produkte können auf der Basis holziger Biomasse erzeugt werden, im Falle agrarischer Biomasse somit über den Anbau von Kurzumtriebsplantagen (KUP) oder Agroforst.

Abzüglich der Anbaufläche für Agrarprodukten zur stofflichen Nutzung von 0,67 Mio. ha verbleiben von den 1,5 Mio. ha noch 0,83 Mio. ha für KUP. Bei einem mittleren jährlichen Ertrag von 12 t_{TM} pro Hektar, können darauf 9,9 Mio. t_{TM} erzeugt werden.

Der restliche Bedarf für die oben angeführten Produkte liegt bei 37 Mio. t_{TM} – dem nahezu Vierfachen und somit bei weitem nicht ausreichend. Nach Abzug des Restbedarfs für Biokerosin verbleiben 8,5 Mio. t_{TM}, die vorzugsweise der Fernwärme (4,3 Mio. t_{TM}) und der Gebäudewärme (3,9 Mio. t_{TM}) zuzuweisen wären. Bis auf einen kleinen Restbetrag von 0,3 Mio. t_{TM} wäre das KUP-Holz und damit auch die gesamte Biomasse bzw. die dafür zur Verfügung stehende Anbaufläche aufgebraucht. Der weiter bestehende Bedarf für Biokraftstoff und Biomassestrom kann höchstens zu einem Bruchteil gedeckt werden.

Damit wird deutlich, dass Biomasse bei weitem nicht in dem Umfang vorliegen wird, um den gesamten Bedarf – jedenfalls nicht der im Rahmen dieser Arbeit abgeschätzte Biomassebedarf – abzudecken. Dabei wurden hier mit klarem Schwerpunkt auf effiziente Systeme wie Agrarholz (anstelle von Mais oder anderen Feldfrüchten) und zurückhaltende Prognosen für den Bedarf (Quelle: Agora Energiewende (Prognos et al. 2021)) angesetzt.

Für die oben angeführten Produkte bis einschließlich d. und e. reicht die Verfügbarkeit noch aus. Für Strom und holzbasierte Biokraftstoffe nicht mehr.

5.5 Zusammenfassung des Nutzungskonzepts

Das zuvor abgeleitete Gesamtnutzungskonzept dient als ein möglicher Ansatzpunkt für die in der Nationalen Bioökonomiestrategie (NBÖ) formulierten Forderung, wonach „die Biomasseströme und ihre Nutzungsarten bewertet und priorisiert werden“ sollen (BMBF 2020). Die Vorgehensweise ist dabei exemplarisch und soll eine Orientierung geben. Sie ist keinesfalls zu verstehen als Planvorlage für eine eins-zu-eins Umsetzung, soll aber zeigen, auf welcher Basis

⁶⁴ als Biokraftstoff nach RED III Anhang IX Teil A

eine Priorisierung von Nutzungsströmen erfolgen kann und wie sich die Mengen nach Verfügbarkeit und Bedarf verhalten. Andere Kriensetzungen oder andere Gewichtungen von Kriterien, als in Kapitel 4 entwickelt, können auch zu anderen Priorisierungen führen. Es sei aber darauf hingewiesen, dass mit der vorliegenden Auswahl auf wesentliche Rahmengesetze und Strategien Bezug genommen ist.

Im Ergebnis zeigt sich, dass mit der verfügbaren Biomasse weite Bereiche an Bedarfen abgedeckt werden können, jedoch nicht der gesamte Bedarf über alle Sektoren. Die Höhe der Bedarfe ist dabei keine zwingende Zielgröße, vielmehr ist sie teilweise aus Szenarien für eine klimaneutrale Zukunft abgeleitet (siehe insbesondere (Prognos et al. 2021)). Bei Biokraftstoffen wird der *Bedarf* anhand der rechtlich verbindlichen Quoten (gesetzt durch RED III und ReFuelEU Aviation) gesetzt. Gedeckelte Optionen für die Erfüllung von Quotenzielen⁶⁵ werden nicht als Bedarf betrachtet, da sie optional sind. Die Bedarfe für die stoffliche Biomassenutzung beziehen sich auf nicht rechtliche Vorgaben. Hier wird auf Einschätzungen von Seiten der entsprechenden Sektoren abgestellt und gleichsam konservativ vorgegangen. So wird im Bereich Bauholzbedarf lediglich ein Erhalt des Status quo angesetzt und keine Erhöhung aufgrund einer ggf. steigenden Holzbauquote angenommen. In gleicher Weise wird für die Papier-/Zellstoffindustrie und Holzwerkstoffindustrie vorgegangen. In der chemischen Industrie (Basischemikalien, Polymere) sind die bisherigen Rohstoffanteile an Biomasse sehr gering. Der Sektor sucht jedoch wie andere Bereiche auch nach Optionen zur Transformation weg von fossilen Rohstoffen. Ein massiver Hochlauf an Biomasse ist hier u.a. aus technischen Gründen jedoch nicht zu erwarten. Aus den brancheneigenen Min-Max-Szenarien (VCI, VDI 2023) wird hier ein mittlerer Bedarf abgeleitet, der immerhin dem Zweieinhalbfachen der aktuellen agrarischen stofflichen Biomassenutzung entspricht. Weitere Bedarfe werden gesehen in der Textil- und der Schmierstoffbranche (bzw. Oleochemie).

Die Ableitung des Gesamtnutzungskonzepts folgt hier dem Prinzip:

- Prioritäre Bedarfe werden zunächst durch die *nachhaltigsten* Rohstoffverfügbarkeiten gedeckt (das sind die biogenen Abfälle und Reststoffe), da diese auf jeden Fall auf die eine oder andere Art zu nutzen sind.
- Für die damit nicht abgedeckten Bedarfe werden als nächstes Waldholzpotenziale bereitgestellt, da die Produktion forstlicher Biomasse grundsätzlich mit geringeren Umweltbelastungen verbunden ist als agrarische Biomasse.
- Für die verbleibenden Bedarfe wird schlussendlich die agrarische Biomasse herangezogen, die – soweit stofflich geeignet – per Kurzumtriebsplantagen ebenfalls aus Holz besteht, da hierdurch der höchste Biomassertrag möglich ist.

Wie die Zuordnung über alle Rohstoffe und Produkte gemäß Priorisierung erfolgt, ist in Abbildung 60 zusammengestellt. Darin werden die Verfügbarkeit der Rohstoffe und deren Zuordnung zu Produkten nach Priorisierungsschritten (links). In Abbildung 61 sind die Bedarfe der Produkte und deren Abnahme nach Zuordnung von Rohstoffen (rechts) dargestellt.

Diese Vorgehensweise beachtet allerdings nicht, dass der als nachhaltig priorisierte Rohstoff (z. B. Altholz) auch der technisch am besten geeignete Rohstoff für das zugewiesene priorisierte Produkt (z. B. Basischemikalien) darstellt. Und umgekehrt sollten gering priorisierte Produkte nicht dadurch profitieren, dass sie u.U. den vergleichsweise am wenigsten nachhaltigen, aber technisch vorzüglicheren Rohstoff (z. B. KUP-Holz) zugewiesen bekommen.

⁶⁵ Nach RED III Artikel 26 (1) sind das die Biokraftstoffe aus Nahrungs- und Futtermittelpflanzen, nach RED III Artikel 27 (1) c) iv) sind das gebrauchte Speiseöle und Tierfette

In diesem Sinne ist die hier getroffene *Zuordnung* nicht als ein explizites Junktim zwischen Rohstoff und Produkt zu sehen. Sie dient vielmehr als Systematik, um zu zeigen, ob und wieweit Verfügbarkeit und Bedarf übereinstimmen.

Wie Abbildung 61 zu entnehmen, reicht die Rohstoffverfügbarkeit nicht für den Gesamtbedarf aus. Am Ende verbleibt ein ungedeckter Bedarf an Biomasse für den Stromsektor – folgt man dem durchaus restriktiven Bedarfsanalyse der Agora Energiewende-Studie (Prognos et al. 2021) und fortschrittliche Biokraftstoffe (die Mindestquote nach RED III für den Straßenverkehr – der Bedarf an Biokerosin als SAF⁶⁶ nach der RefueLEU Aviation ist dabei abgedeckt). Insgesamt sei an dieser Stelle nochmal betont, dass der Biomassebedarf für alle Sektoren in der vorliegenden Arbeit sehr restriktiv behandelt wurde.

Zusammenfassend lässt sich daher sagen, dass die mit restriktiven Nachhaltigkeitsaspekten ermittelte Verfügbarkeit der Biomasserohstoffe nicht den ebenfalls restriktiv definierten Bedarf abdecken kann.

⁶⁶ SAF: Sustainable Aviation Fuel

Abbildung 60: Verfügbarkeit der Rohstoffe und deren Zuordnung zu Produkten nach Priorisierungsschritten

	Rohstoff	Verfügbarkeit	Produkte 1. Priorität	verbleibende Verfügbarkeit	Produkte 2. Priorität	verbleibende Verfügbarkeit	Produkte 3. Priorität	verbleibende Verfügbarkeit
Reststoffe	Holz (SNP)	8,0	Basischemikalien, Polymere	3,7	Industrielle Wärme	0		0
	Altholz	6,9	Basischemikalien, Polymere	2,6	Industrielle Wärme	0		0
	Stroh	6,9	Basischemikalien, Polymere	2,6	Biokerosin	0		0
	Mist, Gülle	15,0	Fernwärme	0		0		0
	Altspeiseöle/fette	0,1	Schmierstoff	0		0		0
Waldholz	Schnittholz	12,3	Bau-, Möbel- Verpackungsholz	0		0		0
	sonstiges Holz	17,5	Textilien	16,4	Möbel (HWI), Industr. Wärme	7,8	Frischzellstoff, Gebäudewärme, Strom, Biokraftstoff	0
Agrarische Biomasse	Rapsöl	18,0		18,0	Schmierstoff		Biokerosin, Biodiesel	
	Stärke-/Zuckerpflanzen KUP-Holz		alles abgedeckt		Stärke, Zucker Fern-, Gebäudewärme, Strom, Biokraftstoff	0	Strom, Biokraftstoff	0

Darstellung: ifeu

Abbildung 61: Bedarfe der Produkte und deren Abnahme nach Zuordnung von Rohstoffen.

Produkte	aus Rohstoffen			aus Rohstoffen		aus Rohstoffen		ungedeckter Bedarf
	Bedarf	1. Priorität		verbleibender Bedarf	2. Priorität	verbleibender Bedarf	3. Priorität	
Stoffliche Nutzung	Bauholz	8,1	Schnittholz	0		0		0
	Möbelholz	1,0	Schnittholz	0		0		0
	Möbel (HWI)	6,0		6,0	sonstiges Holz	0		0
	Verpackungsholz	3,6	Schnittholz	0		0		0
	Textilien	1,1	sonstiges Holz	0		0		0
	Frischzellstoff	4,2		4,2		4,2	sonstiges Holz	0
	Schmierstoff, WRM	1,6	Altspeiseöle/fette	1,5	Rapsöl	0		0
	Stärke/Zucker	1,9		1,9	Getreide, Zuckerrübe	0		
	Basischem., Polyme	13	Holz (SNP), Altholz, s	0		0		0
Energet. Nutzung	Biokerosin	4,0		4,0	Stroh	0		0
	sonst. Biokraftstoff	8,0		8,0		8,0	KUP	7,5
	Industriewärme	6,2	Holz (SNP), Altholz, s	2,5	sonstiges Holz	0		0
	Fernwärme	4,5	Mist, Gülle	4,3		4,3	KUP	0
	Gebäudewärme	4,3		4,3	sonstiges Holz	3,9	KUP	0
	Strom	21,0		21,0		21,0	KUP	21,0

Darstellung: ifeu

6 Vorschläge zu Maßnahmen und Instrumenten zur Gestaltung der notwendigen Rahmenbedingungen

6.1 Grundsätzliche Erkenntnis aus den vorliegenden Analysen

Aus den umfangreichen Analysen dieses Forschungsvorhabens lassen sich in Bezug auf Maßnahmen und Instrumenten zur Gestaltung der notwendigen Rahmenbedingungen für die Bioökonomie zunächst zwei Grundvoraussetzungen herausstellen. Diese bilden in gewisser Weise die zentrale Leitlinie:

1. Die Nutzung von Fläche bzw. Land ist die zentrale Grundlage für die Biomasseproduktion, denn selbst bei effizienter Nutzung von Sekundärströmen stellt die primäre Biomasse aus Agrar- und Forstflächen immer den höheren Anteil der genutzten Biomasse. Die Begrenztheit der Fläche bleibt somit auch die Grenze der Bioökonomie.
2. Auch wenn manche Biomassenutzungen mittelfristig durch nicht-biogene Alternativen ersetzt werden können, bleiben Nutzungen, für die solche Alternativen auch längerfristig nicht zur Verfügung stehen werden. Die Lebensmittelproduktion ist hier zu nennen. Die Sicherstellung der ausreichenden und gesunden Ernährung ist daher notwendige Grundvoraussetzung bioökonomischer Entwicklungen.

Die **Knappheit der Produktionsflächen**, auf denen die Nahrungsmittelproduktion grundsätzlich immer Vorrang haben sollte, ist damit die Bedingung für die Konkurrenz um Biomasse durch alle weiteren Nutzungen im nicht-Ernährungsbereich. Und diese Nutzungskonkurrenz zielt sowohl auf die primäre Biomasse wie auch auf die sekundäre. Die Potenziale der Letzteren gilt es zwar effektiv zu nutzen und bisher nicht genutzte zu erschließen, doch bleiben sie in ihrem Potenzial stets an die „Urproduktion“ geknüpft. Eine priorisierte Nutzung der biogenen Reststoffe und Abfälle bedeutet daher, den Fokus auf Effizienz bei der Biomassenutzung zu setzen.

Die Strategie der **Suffizienz** setzt dabei an der primären Biomasse an. Sie erweitert den Rahmen der Priorisierung erheblich, im Zweifel auf alle irgendwie, d.h. auch in indirekter Weise in Verbindung mit Biomassenutzung bestehenden Wirtschafts- und Lebensbereiche, wie z. B. Biodiversitäts- und Naturschutz, Verkehrs- und Siedlungsflächen oder auch Klimaanpassung. Eine Betrachtung der Flächenkonkurrenz sollte sich daher nicht nur innerhalb der Bioökonomie bewegen, da auch Sektoren außerhalb der Bioökonomie um diese Flächen konkurrieren. Und die Abwägung, welche Priorisierungen hier zu treffen wären und welche Nutzungen ggf. reduziert werden können.

Die vorliegende Arbeit kann diesen weiten Rahmen nicht abdecken. Der eigentliche Rahmen der Bioökonomie ist bereits weit und komplex genug.

6.2 Rückschlüsse aus den Maßnahmenempfehlungen des BÖR

Wie in Kapitel 3 ausgearbeitet, finden sich bereits in den Empfehlungen des Bioökonomierats für einen Umsetzungsplan der Bioökonomiestrategie wesentliche Handlungsansätze. Daran anknüpfend wurden mögliche Maßnahmen den Handlungsfeldern der Bioökonomie folgend hergeleitet und anhand einer Fehlstellenanalyse ergänzt.

Auch die oben genannten Grundvoraussetzungen der Begrenztheit der biogenen Ressourcen und der Ernährungssicherheit stehen dort im Vordergrund. Dabei wird als ein notwendiges

Element der Bioökonomiestrategie die Analyse und Abwägung von biogenen Nutzungspfaden gegenüber nicht-biogenen Nutzungspfaden herausgestellt.

Für die Ableitung von Maßnahmen und Instrumenten zur Gestaltung der Bioökonomie sind nach den Vorarbeiten des BÖR folgende notwendige Rahmensetzungen erforderlich:

- ▶ Die effiziente Nutzung und weitere Erschließung von biogenen Abfall- und Reststoffen ist ein wesentlicher Baustein zur Reduktion des Bedarfs an primärer Biomasse und damit zur Reduktion der Flächenintensität der Bioökonomie. Dahinter steht das Konzept der Zirkularität wie auch das der Kaskadennutzung.
Der Politikrahmen muss in der Weise weiterentwickelt werden, dass er Zirkularität ermöglicht und fördert. Konkret könnten dies z.B. Regelungen sein, die für eine verbesserte Sortierung von Altholz sorgen.
- ▶ Eine Biomassenutzung sollte nur im Rahmen nachhaltiger Biomassepotenziale erfolgen. Die Überprüfung dieser Potenziale sollte in regelmäßigen Abständen erfolgen.⁶⁷
- ▶ Eine Analyse von Potenzialen sollte sektorübergreifend angelegt sein und Ziele anderer Strategien berücksichtigen. Dies gilt insbesondere für die geplante Nationale Biomassestrategie (NABIS), das Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz (ANK), die Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie, die Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt, die Nationale Moorschutzstrategie und das Bundes-Klimaschutzgesetz.
- ▶ Effizienzsteigerungen und Veränderungen des Nutzerverhaltens innerhalb bioökonomischer Handlungsfelder bis hin zur Suffizienz können ebenfalls den Nutzungsdruck auf biogene Rohstoffe sowie die Flächenkonkurrenz verringern.
- ▶ Der Flächenverbrauch für Siedlungs- und Verkehrsfläche sollte möglichst klein gehalten werden, um den Druck auf die Flächenkonkurrenz von dieser Seite nicht zu erhöhen. Hier sind Suffizienzstrategien auch in Sektoren außerhalb der Bioökonomie (wie Wohnen und Mobilität) wichtig.

Biomassenutzungen, für die es keine Alternative gibt, sollten Vorrang haben.

- ▶ Vorrang für die Produktion pflanzlicher Nahrung, um die inländische Nachfrage zu decken und Vorrang für die Produktion pflanzlicher Nahrung für den Export, wenn dort Engpässe bestehen.
- ▶ Vorrang für die Produktion von Tierfutter, um die inländische Nachfrage nach Tierprodukten zu decken. Dieser Umfang sollte an Empfehlungen für eine gesunde Ernährung gemäß DGE⁶⁸ ausgerichtet sein.
- ▶ Vorrang einer stofflichen oder energetischen Biomassenutzung, die nur schwer oder nicht durch Alternativen ersetzt werden und die gegenüber nicht-biogenen Vergleichssystemen positiv zu bewerten ist. In Bereichen, in vorteilhafte Alternativen verfügbar sind, sollten diese genutzt werden (z.B. Solarenergie statt Bioenergie). Hier ist auch zu prüfen, ob eine stoffliche Nutzung gegenüber einer energetischen Nutzung von Vorteil ist.

⁶⁷ Beispiel: Im Szenario Klimaneutrales Deutschland 2045 (Prognos et al. 2021) wurde ein Bioenergiepotenzial von 322 TWh in 2050 angenommen. Neuere Analysen im Szenario T45 der „Langfristszenarien“ (<https://langfristszenarien.de>) nehmen nur noch 250 TWh im Jahr 2050 an.

⁶⁸ Siehe z.B. <https://www.dge.de/>

6.3 Rückschlüsse aus den Bewertungen der Umweltwirkungen der Biomassenutzung

Wie in Kapitel 2.3 ausgearbeitet, ist die Produktion von Biomasse in verschiedener Weise mit Umweltwirkungen verbunden. Die Analyse fokussiert dabei auf die Inanspruchnahme von Flächen mit Bezug auch auf den Naturwert und Risiken für die Biodiversität, auf den Klimawandel, die Emissionen von Feinstaub, sowie die Frage von Stickstoffüberschüssen und die Wasserbilanz. Die wesentlichen Schlussfolgerungen werden wie folgt zusammengefasst:

- ▶ Landwirtschaftsflächen und Wirtschaftswald machen über 80 % der Fläche Deutschlands aus. Die **Flächennutzung** besteht somit im Wesentlichen aus der Produktion oder Bewirtschaftung von Biomasse. Umgekehrt prägt keine andere menschliche Aktivität den Zustand der Natur und der Landschaft wie die Biomasseproduktion. Veränderungen in Bezug auf Quantität des Biomassekonsums und Intensität der Biomasseproduktion haben daher Schlüsselbedeutung bei der Entwicklung zu naturnäheren Ökosystemen.
- ▶ Die Rolle der Biomasseproduktion und -nutzung für den **Klimaschutz** ist ebenfalls erheblich: Die Bilanzierungen in Kapitel 2.3 weisen der Produktion der in Deutschland konsumierten Biomasse eine Emission von 130 Mio. t CO₂-Äq. zu. Das entspricht 20 % des für Deutschland berichteten Treibhausgasinventars in 2023.⁶⁹ Dem kann gegenbilanziert, was durch die Erzeugung und Nutzung von Biomasse an THG-Emissionen als erspart anzusehen ist: fossile oder mineralische Produkte (Energieträger, Baumaterialien u.v.a) mit einer Emission von insgesamt 73 Mio. t CO₂-Äq. Diese Emission ergäbe sich, wenn man auf die Produktion von stofflichen und energetischen Biomasseprodukten verzichten würde und alles auf fossiler oder mineralischer Basis erzeugen müsste (Substitutionswirkung).

Mit den Zukunftsszenarien (BEPASO (Banse et al. 2020), Langfristszenarien LFS 3 (Köppen, Rettenmaier 2023), Klimaschutzinstrumente-Szenario 2030 - KIS 2030 (Repenning et al. 2023)) verringert sich die Emissionslast deutlich. Dies liegt vor allem an der Reduktion der Tierproduktion, aber auch einer Reduktion der Flächeninanspruchnahme für agrarische Nicht-Ernährungs-Biomasse sowie einer verringerten Entnahme von Holz aus dem Wald (Erhöhung der Senke). Gleichzeitig wird auch das Potenzial zur Substitutionswirkung deutlich geringer, da in einer fortschreitend dekarbonisierten Wirtschaft Biomasse nicht mehr notwendigerweise einen Ersatz von fossilen Rohstoffen bedeutet, sondern mit anderen erneuerbaren Quellen konkurriert.

- ▶ Die Rolle der Biomasse wird sich in Zukunft somit stärker auf Bereiche fokussieren müssen, wo sie gezielt sinnvoll und effizient eingesetzt werden kann, wo sie Bedarfslücken schließen kann, die nicht so schnell, zielgerichtet oder vollständig von erneuerbaren Alternativen versorgt werden können. Ihre Rolle als Lieferant eines Beitrags zum Klimaschutz wird (nicht zuletzt angesichts der tatsächlichen, wenig optimalen Bilanzlage) in den Hintergrund treten.
- ▶ Dadurch werden auch weitere negativen Umweltwirkungen der breiten Biomasseproduktion reduziert werden können: Risiken für Biodiversität, Feinstaubbelastung Eutrophierung, und Stickstoffüberschüsse, um nur die Aspekte zu nennen, die in dieser Studie adressiert werden.

⁶⁹ Aufgrund der unterschiedlichen Berechnungsmethoden ist ein direkter Vergleich von (Lebensweg)Bilanz der Produkte und Inventare der Sektoren (z.B. der Landwirtschaft mit 52 Mio. t CO₂-Äq im Sektor) nicht sinnvoll, aber es zeigt sich, dass Biomasse deutlich mehr Klimarelevanz hat, als z.B. im Inventar für Landwirtschaft berechnet wird.

6.4 Rückschlüsse aus der Anwendung von Priorisierungskriterien für die Biomassenutzung

In Kapitel 4 wurde die begrenzt verfügbare Biomasse für den Nicht-Ernährungsbereich einer Methode zur Priorisierung unterzogen, auf deren Ergebnis in Kapitel 5 ein Gesamtnutzungskonzept erstellt wurde. Die Kriterien für die Priorisierung beziehen sich auf Themenkomplexe aus verschiedenen politischen Strategien mit Bezug zu Nachhaltigkeit (Bioökonomie, Biodiversität, Klima-, Ressourcen-, Bodenschutz) wie auch auf das Konzept der Planetaren Grenzen.

Die Anwendung erfolgte für agrarische und forstliche Biomasse sowie biogene Abfall- und Reststoffe separat, weil diese Materialgruppen bezüglich ihrer Erzeugung nicht in Konkurrenz stehen. Im Ergebnis zeigt sich für alle Gruppen recht eindeutig, dass die stofflichen Nutzungspfade – und zwar solche, die möglichst geringe Verarbeitung benötigen, um ein hohes Maß an Nutzen zu erreichen – weit überwiegend am vorteilhaftesten bewertet werden. Dies zeigt sich besonders am Beispiel Bauholz, welches lediglich mechanische Bearbeitung (und dies ohne nennenswert Verluste, da die entstehenden Beiprodukte vollständig genutzt werden) benötigt, jedoch Alternativprodukte ersetzt, die mit sehr hohen Umweltlasten verbunden sind (wie z. B. Stahl und mineralische Baustoffe).

Stoffliche Nutzungen, die mit hohen Verlustraten an Biomasse verbunden sind (z. B. eine chemisch-thermische Umwandlung von Lignozellulose zu Chemierohstoffen wie Methanol), werden dagegen weniger günstig bewertet. Noch ungünstiger ist es allerdings, diese dann nur energetisch zu nutzen (z.B. als Biokraftstoff).

In dem Gesamtnutzungskonzept wurde den Nutzungen nach Priorisierungsklassen gemäß ihren Bedarfen Zugriff auf die verfügbaren Biomassen zugewiesen. Dabei wurde hier nicht auf stofflich-technische Vorzüge Rücksicht genommen, sondern den den zu priorisierenden Nutzungen zunächst die nachhaltigste und am sichersten verfügbare Biomasse zugeteilt. Diese Vorgehensweise war notwendig, die Verfügbarkeit der Biomasse anhand der Bedarfe schichtweise abzuarbeiten. Im Falle einer tatsächlichen Umsetzung einer solchen Priorisierung sollten die zu bevorzugenden Nutzungen selbstverständlich die Freiheit haben, aus der verfügbaren Biomasse die technisch sinnvollen Rohstoffe bzw. Sortimente zu wählen.

Deutlich wurde jedoch, dass die Verfügbarkeit nicht ausreicht, um den gesamten Bedarf der verschiedenen Sektoren abzudecken. Ausgehend von ca. 85 Mio. t_{TM} nachhaltig verfügbarer Biomasse⁷⁰ steht für ein Restbedarf von knapp 29 Mio. t_{TM} keine Biomasse zur Verfügung. Im Gesamtnutzungskonzept verbleibt dieses Defizit bei den fortschrittlichen Biokraftstoffen und dem Strom.

Der Bedarf bei den Biokraftstoffen ist im Übrigen durch die Mindestquote nach RED III bestimmt. Die Erfüllung dieser Quote an sich ist in dieser Studie jedoch kein Kriterium für die Priorisierung. Angesichts der *rechtlichen Priorisierung* durch die RED III wird nach der bestehenden Rechtslage der Zugriff auf die Biomasse anders darstellen, als in dem hier skizzierten Gesamtnutzungskonzept. Damit wird deutlich, dass es tatsächlich Maßnahmen und Instrumente bedarf, wenn die Biomasse vorzugsweise in Nutzungen gelangen soll, die nach fachlichen Kriterien auch zu priorisieren sind.

⁷⁰ Die agrarische Biomasse wurde hierbei in Form von Agrarholz (Kurzumtriebsplantagen) gerechnet

6.5 Empfehlungen zu Instrumenten

Bereits in Kapitel 3 und insbesondere 3.6 wurden Maßnahmen den Handlungsfeldern der Bioökonomie und Hinweise zu Instrumenten vorgestellt. Die daran anschließenden Vertiefungen zu Priorisierung unterstreichen vielfach die getroffenen Empfehlungen. Folgende Schlüsse und Empfehlungen lassen sich hier nochmals herausstellen.

- ▶ Wie gezeigt wurde, lassen sich nicht alle Bedarfe an Biomasse – selbst, wenn diese wie hier in zurückhaltender Weise aufgestellt werden – decken. Voraussetzung für diese Feststellung ist, dass die verfügbare Biomasse anhand von Nachhaltigkeitsrestriktionen quantifiziert ist und damit auch das Limit bekannt ist. Für die vorliegende Arbeit liegen Vorarbeiten zur Verfügbarkeit als belastbare Quellen vor.⁷¹ Die Entwicklungen sind jedoch dynamisch, Randbedingungen zur Verfügbarkeit von Biomasse können sich in wenigen Jahren ändern. Die Kenntnisse zur Verfügbarkeit müssen regelmäßig fortgeschrieben werden. Ein grundlegendes Instrument wäre damit eine Institutionalisierung der Bestimmung der Biomasseverfügbarkeit.
- ▶ Die vorliegende Arbeit enthält einen Vorschlag, nach welchen Kriterien eine Priorisierung begründet werden kann. Auch wenn diese Kriterien bereits auf politischen Strategien Bezug nehmen, stellt so eine Auswahl und insbesondere deren Operationalisierung immer nur eine Möglichkeit unter vielen Optionen dar. Da die Konsequenzen der Priorisierung jedoch erhebliche Eingriffe in die Bewirtschaftung von Stoffströmen bedeutet, bedarf es einer breiteren Diskussion, um auch breite Akzeptanz zu erzielen.
- ▶ Der bestehende Rechtsrahmen zur Beurteilung von nachhaltiger Bewirtschaftung von Biomasse wurde in Kapitel 3.4.2 skizziert. Dabei wurden Politikinstrumente genannt, die Maßnahmen im Rahmen von Förderinstrumenten und regulativen oder informationellen Maßnahmen fördern. Eine zentrale Bedeutung im Kontext einer Priorisierung ist dabei der **RED III** mit der Verpflichtung zur *Kaskadennutzung von Biomasse* beizumessen.⁷² Deren Leitgedanke beinhaltet per se eine Priorisierung, nämlich die Nutzung von Biomasse für in energetische Verwertung erst nach einer stofflichen Nutzung.
- ▶ Allerdings deckt das Kaskadenprinzip die Priorisierung, wie sie sich im Rahmen dieser Arbeit darstellen sollte, nicht vollständig ab. Das zeigt der Fall der **fortschrittlichen Biokraftstoffe**, die zwar auf Abfall- und Reststoffe zurückgreifen (also dem Kaskadenprinzip folgen), für die aber nach der vorgenommenen Priorisierung nicht ausreichend Rohstoff verfügbar ist. Auf der anderen Seite stellt die RED III gerade für die fortschrittlichen Biokraftstoffe verbindliche Mindestquoten auf, was auf den Biomasse-Rohstoffmarkt erhebliche Lenkungswirkungen hat.

Die Umsetzung des EU-Rechts hier ist unumgänglich, jedoch muss die deutliche Lenkung Richtung Biokraftstoffe bei der nächsten Erneuerung der RED überdacht werden. Was immer für Fördermaßnahmen und Instrumente mit Zielrichtung eines Vorrangs stofflicher Nutzungen konzipiert würden, die bestehende Regelung der RED III wird vermutlich den stärkeren Anreiz Richtung Biokraftstoffnutzung setzen.

⁷¹ BEPASO (Banse et al. 2023), Langfristszenarien (Köppen, Rettenmaier 2023), KIS-2030 (Repenning et al. 2023)

⁷² Nach Artikel 3 Absatz 3 sind die Mitgliedstaaten verpflichtet zu „... Maßnahmen, damit Energie aus Biomasse auf eine Weise erzeugt wird, bei der übermäßige verzerrende Wirkungen auf den Biomasse-Rohstoffmarkt sowie eine nachteilige Auswirkung auf die biologische Vielfalt, die Umwelt und das Klima minimiert werden. Im Hinblick darauf berücksichtigen sie die Abfallhierarchie gemäß ...“ Abfallrahmen-Richtlinie „... und stellen sicher, dass das Prinzip der Kaskadennutzung von Biomasse Anwendung findet, wobei Förderregelungen einen Schwerpunkt bilden und nationale Besonderheiten angemessen zu berücksichtigen sind.“

Grundsätzlich ist hier die wirkungsvollste Maßnahme zur Senkung des Drucks auf Biomassenutzung für Biokraftstoffe die verstärkte Förderung und der Ausbau der Elektromobilität.

- ▶ Mit höherer oder zumindest gleich hoher Priorität wie fortschrittliche Biokraftstoffe wurde in dieser Arbeit **Wärme** (insbesondere Industriewärme, aber auch Fernwärme) eingestuft. Instrumente und Maßnahmen zur Lenkung von fester Biomasse in die Wärmenutzung werden sehr ausführlich von (Köppen et al. 2024) behandelt. Tatsächlich geht hier die Empfehlung vor allem dahin, die durch das **Gebäudeenergiegesetz** (GEG) bedingte erhöhte Nachfrage von Holzzentralheizungen in Gebäuden der beiden niedrigsten Effizienzklassen einzusetzen und den Verbrauch fester Biomasse in Einzelraumfeuerungen durch Anpassungen der 1. BImSchV deutlich zu reduzieren. Entsprechende Anpassung im GEG wären dazu erforderlich.
Auch hier schafft nur die Senkung des Energieverbrauchs primär die Voraussetzung, um den Druck auf die knappe Verfügbarkeit von Biomasse zu dämpfen.⁷³ Die Grundlast im Fernwärmenetz sollte möglichst durch industrielle Abwärme gedeckt, Biomasse nur zur Deckung von Bedarfsspitzen eingesetzt werden.
- ▶ Dann würde auch mehr Biomasse für die **Industriewärme** zur Verfügung stehen. Für diese bedarf es außerdem noch einer gezielten Entwicklungsförderung eines Biomasseeinsatzes für z.B. Eisen- und Stahlwerke wie auch der Kalk- und Zementindustrie.
- ▶ Allem voran gehen sollten jegliche Maßnahmen und Instrumente zur Förderung der **stofflichen Nutzung**, wobei folgende Bereiche besonderen Vorrang zukommen soll:
 - Die Verfügbarkeit von **Holz** für den **Bausektor** muss auch unter reduziertem Einschlag von Waldholz sichergestellt. Bestehende Initiativen zur Förderung des Holzbaus sollten daher gestärkt werden, wie z.B. die Charta für Holz 2.0.⁷⁴ Insbesondere muss die Wertschöpfung bei der Verwendung von Laubholz erhöht werden. Ein Instrumentenmix zur Förderung wurde durch Evaluation der Charta durch das Thünen-Institut erstellt (Purkus et al. 2019).
 - Der Einsatz von Biomasse als Rohstoff in der **chemischen Industrie** stößt noch auf zahlreiche Hindernisse. Der materielle und technische Aufwand ist vergleichsweise hoch⁷⁵ und außerdem kann der stoffliche Bedarf dieser Industrie mit Biomasse allein nicht gedeckt werden. Dennoch ist nach den Priorisierungskriterien der Biomasseeinsatz hier immer noch vorteilhafter als für den Kraftstoff- und Energiebereich. Regulative Maßnahmen oder Instrumente bzw. Vorlagen dazu, die dem entgegenwirken sind dagegen kaum implementiert. Entweder zielen solche auf Biomasse im Allgemeinen (GAP, Bundeswaldgesetz, EU-Biodiversitätsstrategie und Bundesprogramm Biologische Vielfalt u.a.) oder sie adressieren speziell die energetische Nutzung (RED III, EEG, REPowerEU-Plan, der EU-ETS).
 - Regulatorische Ansatzpunkte, die über die Senke (d.h. auch die technische Senke) auf die stoffliche Nutzung angewandt werden könnten, wären

⁷³ Konkret: weitere Umsetzung von Gebäudedämmung, Flächenheizungen, erneuerbare Fernwärme auf Nicht-Biomassebasis, Förderung weiterer kohlenstofffreien Wärmequellen wie Solarthermie, Geothermie, Wärmepumpe.

⁷⁴ <https://www.bmel.de/DE/themen/wald/holz/charta-holz.html>

⁷⁵ Wie auch die Verlustraten und die schlechte Rohstoffeffizienz in dieser Studie zeigen.

- Das Bundes-Klimaschutzgesetz, welches in §3b die Bundesregierung „ermächtigt, die Ziele für technische Senken ... durch Rechtsverordnung, die nicht der Zustimmung des Bundesrates bedarf, festzulegen.“
- Die Langfriststrategie Negativemissionen zum Umgang mit unvermeidbaren Restemissionen (LNe) (BMWK 2014), die dazu auch die stoffliche Biomassenutzung zählt
- Der Entwurf der EU-Kommission zur Carbon Removal Certification Framework (CRCF-Verordnung), dabei handelt sich um einen freiwilligen Zertifizierungsrahmen, der EU-weite Standards setzen soll. Empfehlungen, wie in diesem Rahmen Anreize geschaffen werden können für stoffliche Biomassenutzung finden sich auch bei (Fallasch et al. 2024)
- Maßnahmen und Instrumente speziell zur Förderung der stofflichen Nutzung von Biomasse liegen bislang u.a. auch deswegen nicht vor, weil hier direkte Eingriffe der Politik das Risiko von Marktverzerrung mit sich führen. Dies problematisiert auch die Studie von (Material Economics 2021), betont aber gleichzeitig die unfaire Ausgangslage. Danach wird durch die einseitige Förderung der energetischen Nutzung die stoffliche Nutzung direkt benachteiligt. Auch jene Studie führt an, dass die „Kohlenstoffsенke“ durch langlebige Materialien aus Biomasse ein zentrales Kriterium für deren Förderung sein sollte.

Eine Problematik, stoffliche Nutzung unter dem Stichwort von Speicher und negativen Emissionen zu fördern, liegt jedoch darin, dass der Speicher hier zeitlich begrenzt ist und im Zweifel, je nach Produkt so kurz andauert. Schließlich geht mit der stofflichen Nutzung keine zusätzliche Kohlenstoff-Entnahme statt. Diese erfolgte bereits bei der Bildung der Biomasse während des Pflanzenwachstums. Bei einer Förderung im Rahmen solcher Instrumente darf keine Doppelzählung von negativen Emissionen resultieren.

7 Quellenverzeichnis

Adams, V. M.; Asamoah, E. F.; Maina, J. M.; Niu, S.; Panoutsou, C.; Wang, Z.; Wang, B.; Yuan, X.; You, S.; Sik Ok, Y.; Niinemets, Ü. (2022): Priorities for biomass. DOI: doi.org/10.1016/j.oneear.2021.12.018
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590332221007363> (06072022).

Agora Think Tanks (2024): Klimaneutrales Deutschland. Von der Zielsetzung zur Umsetzung. S. 86.
https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2023/2023-30_DE_KNDE_Update/A-EW_344_Klimaneutrales_Deutschland_WEB.pdf.

Asselin, A.; Rabaud, S.; Catalan, C.; Leveque, B.; L'Haridon, J.; Martz, P.; Neveux, G. (2020): Product Biodiversity Footprint – A novel approach to compare the impact of products on biodiversity combining Life Cycle Assessment and Ecology. DOI: doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119262
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652619341320> (27012022).

Banse, M.; Kilian, D.; Weimar, H.; Iost, S.; Morland, C.; Glasenapp, S.; Jochen, D.; Schweinle, J.; Brödner, R.; Cyffka, K.-F.; Majer, S.; Richter, S.; Schindler, H. (2023): Bausteine für eine Biomassestrategie: Biomassepotenziale und Erwartungen an ihre künftige Nutzung (BIOSTRAT). DBFZ, Leipzig. S. 113.
https://www.thuenen.de/media/ti/Newsroom/Aktuelles/2025/Nationale_Biomassestrategie/Abschlussbericht_BIOSTRAT.pdf.

Banse, M.; Zander, K.; Babayan, T.; Bringezu, S.; Dammer, L.; Egenolf, V.; Göpel, J.; Haufe, H.; Hempel, C.; Hüffner, R.; Millinger, M.; Morland, C.; Musonda, F.; Paranen, A.; Piotrowski, S.; Schaldach, R.; Schier, F.; Schüngel, J.; Sturm, V.; Szarka, N.; Thrän, D.; Weimar, H.; Wilde, A.; Will, S. (2020): Eine biobasierte Zukunft in Deutschland - Szenarien und gesellschaftliche Herausforderungen. Thünen-Institut.
<https://www.thuenen.de/media/institute/ma/Downloads/BEPASO-Broschuere.pdf> (06072022).

Beck-O'Brien, M.; Bringezu, S.; Banse, M.; Barrelet, J.; Bezama, A.; Bösch, M.; Brüning, S.; Bührlen, B.; Cabezas, A.; Cyffka, K.-F.; Dzene, I.; Gordillo Vera, F.; Helander, H.; Henke, J.; Hennenberg, K.; Hinz, R.; Iost, S.; Jordan, M.; Kilian, D.; Köppen, S.; Kynast, E.; Lutz, C.; Pereira, S.; Pfeiffer, M.; Phuntsho; Pozo Infuentes, P.; Reiss, T.; Reuschel, S.; Richter, S.; Schaldach, R.; Scheffler, M.; Schomberg, A.; Schüngel, A.; Schweinle, J.; Thrän, D.; Wang, M.; Weimar, H.; Wiegmann, K.; Wijesingha, J.; Wilske, B.; Wydra, S.; Zeug, W.; Zinke, C.; Meyer, C.; Fehrenbach, H. (2024): Monitoring the German Bioeconomy. DOI: doi.org/10.17170/kobra-2024111510679
<https://kobra.uni-kassel.de/handle/123456789/201810225701>.

Best, A.; Gerdes, H.; Velten, E. K.; Kiresiewa, Z.; Schock, M.; de la Vega, R.; Felthöfer, C.; Fehrenbach, H.; Bürck, S.; Köppen, S.; Zeug, W. (2025): Weiterentwicklung des „Monitoringsystem Bioökonomie“ unter besonderer Berücksichtigung von Aspekten des vorsorgenden Umweltschutzes. Umweltbundesamt. S. 342. DOI: [10.60810/OPENUMWELT-7534](https://openumwelt.de/handle/123456789/10441) <https://openumwelt.de/handle/123456789/10441> (13102025).

Bioökonomierat (2022a): Bioökonomie: Gemeinsam eine nachhaltige Zukunft gestalten. Bioökonomierat.
<https://www.bioekonomierat.de/media/pdf/arbeitspapiere/bioekonomierat-broschuere-zukunft.pdf?m=1646295555> (06072022).

Bioökonomierat (2022b): Bioökonomie zwischen Ernährungs- und Energiekrise. Bioökonomierat.
https://www.bioekonomierat.de/media/pdf/stellungnahmen/Stellungnahme_des_BOER_zur_Ernaehrungs_Energiekrise.pdf?m=1662392320& (22092022).

Bioökonomierat (2022c): Biogas- und Bioraffinerie-Technologien – Agrarperspektive. *Hintergrundpapier*, Bioökonomierat. S. 12. <https://www.bioekonomierat.de/media/pdf/hintergrundpapiere/boer-hintergrundpapier-agrar-biogas-bioraffinerien.pdf?m=1693293121&>.

Bioökonomierat (2022d): Agri-Photovoltaik (Agri-PV). *Hintergrundpapier*, Bioökonomierat. S. 10.
<https://www.bioekonomierat.de/media/pdf/hintergrundpapiere/boer-hintergrundpapier-agri-pv.pdf?m=1693293846&>.

Bioökonomierat (2022e): Agroforst- und mehrjährige Kulturpflanzensysteme. *Hintergrundpapier*, Bioökonomierat. S. 10. <https://www.bioekonomierat.de/media/pdf/hintergrundpapiere/boer-hintergrundpapier-agroforst-und-mehrjaehrige-kulturpflanzensysteme.pdf?m=1700501028&>.

Bioökonomierat (2022f): Industrielle Bioraffinerien. *Hintergrundpapier*, Bioökonomierat. S. 11. <https://www.bioekonomierat.de/media/pdf/hintergrundpapiere/boer-hintergrundpapier-industrielle-bioraffinerien.pdf?m=1693295807&>.

Bioökonomierat (2023a): Bioökonomie nachhaltig umsetzen! Erste Handlungsempfehlungen des Bioökonomierats zur Umsetzung der Nationalen Bioökonomiestrategie. https://www.bioekonomierat.de/media/pdf/arbeitspapiere/2023-06-07_boer_erste_Handlungsempfehlungen_Biooekonomie_nachhaltig_umsetzen_Langfassung.pdf?m=1702479108& (24122024).

Bioökonomierat (2023b): Rahmensetzung zur Ressourcenschonung. *Hintergrundpapier*, Bioökonomierat. S. 7. <https://www.bioekonomierat.de/media/pdf/hintergrundpapiere/2023/boer-hintergrundpapier-ressourcenschonung.pdf?m=1707920853&>.

Blume, H.-P.; Sukopp, H. (1976): Ökologische Bedeutung anthropogener Bodenveränderungen. Schriftenreihe für Vegetationskunde der Bundesanstalt für Vegetationskunde, Naturschutz und Landschaftspflege, Bonn-Bad Godesberg.

BMBF (2020): Nationale Bioökonomiestrategie. Bundesministerium für Bildung und Forschung. https://biooekonomie.de/sites/default/files/files/2020-06/bmbf_nationale_biooekonomiestrategie_langfassung_deutsch.pdf (11112021).

BMEL (2015): Ergebnisse der Waldzustandserhebung 2015. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Berlin. https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/ErgebnisseWaldzustandserhebung2015.pdf?jsessionid=BE5F02C29E95F1945DD5D2BFF8782833.internet2842?__blob=publicationFile&v=4 (20122020).

BMEL (2016): Ergebnisse der Bundeswaldinventur 2012. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Berlin. https://www.bundeswaldinventur.de/fileadmin/SITE_MASTER/content/Downloads/BMEL_BWI_Bericht_Ergebnisse_2012_RZ02_web-4.pdf (20122020).

BMEL (2020): Holzmarktbericht 2020. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/holzmarktbericht_2020.pdf?jsessionid=A70C2077FE5DABB000187DAED356A112.live852?__blob=publicationFile&v=3 (04112021).

BMEL (2021): Bodennutzung und pflanzliche Erzeugung. In: *Landwirtschaft. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL)*, <https://www.bmel-statistik.de/landwirtschaft/ernte-und-qualitaet/bodennutzung/> (abgerufen am 07.04.2021).

BMJV (2017): Gesetz zur Erhaltung des Waldes und zur Förderung der Forstwirtschaft (Bundeswaldgesetz). Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (BMJV), <https://www.gesetze-im-internet.de/bwaldg/BJNR010370975.html> (abgerufen am 06.04.2021).

BMUKN (2024): Nationale Strategie zur Biologischen Vielfalt 2030 - Beschluss des Bundeskabinetts vom 18. Dezember 2024. https://www.bundesumweltministerium.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/nbs_2030_strategie_bf.pdf.

BMWK (2014): Langfriststrategie Negativemissionen zum Umgang mit unvermeidbaren Restemissionen (LNe) - Eckpunkte. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/240226-eckpunkte-negativemissionen.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (04112024).

Böttcher, H.; Hennenberg, K.; Hünecke, K.; Fehrenbach, H.; Rettenmaier, N.; Bischoff, M.; Reise, J. (2020a): Naturschutz und fortschrittliche Biokraftstoffe. Bundesamt für Naturschutz. <https://www.bfn.de/fileadmin/BfN/service/Dokumente/skripten/Skript580.pdf> (28102021).

Böttcher, H.; Hennenberg, K.; Scheffler, M.; Wolff, F.; Gsell, M.; Hansen, A.; Meyer-Aurich, A.; Grundmann, P.; Vedel, D. (2020b): Nexus Ressourceneffizienz und Landnutzung – Ansätze zur mehrdimensionalen umweltpolitischen Bewertung der Ressourceneffizienz bei der Biomassebereitstellung. UBA Texte Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-03-04_texte_45-2020_nexus-ressourceneffizienz-landnutzung.pdf.

Bringezu, S.; Banse, M.; Ahmann, L.; Bezama, A.; Billig, E.; Bischof, R.; Blanke, C.; Brosowski, A.; Brüning, S.; Borchers, M.; Budzinski, M.; Cyffka, K.-F.; Distelkamp, M.; Egenolf, V.; Flaute, M.; Geng, N.; Gieseke, L.; Graß, R.; Hennenberg, K.; Hering, T.; Iost, S.; Jochem, D.; Krause, T.; Lutz, C.; Machmüller, A.; Mahro, B.; Majer, S.; Mantau, U.; Meisel, K.; Moesenfechtel, U.; Noke, A.; Raussen, T.; Richter, F.; Schaldach, R.; Schweinle, J.; Thrän, D.; Uglik, M.; Weimar, H.; Wimmer, F.; Wydra, S.; Zeug, W. (2020): Pilotbericht zum Monitoring der deutschen Bioökonomie. S. 116. DOI: 10.17170/kobra-202005131255 <https://kobra.uni-kassel.de/bitstreams/d2a2f4e4-3592-40c7-a531-0878088e4465/download> (09102025).

Bringezu, S.; Distelkamp, M.; Lutz, C.; Wimmer, F.; Schaldach, R.; Hennenberg, K. J.; Böttcher, H.; Egenolf, V. (2021): Environmental and socioeconomic footprints of the German bioeconomy. <https://www.nature.com/articles/s41893-021-00725-3> (20012022).

Bringezu, S.; Kaiser, S.; Turnau, S.; Mostert, C. (2019): Bestimmung des Materialfußabdrucks mit ökobilanziellen Methoden und Softwarelösungen. DOI: doi.org/10.17170/kobra-202003241101.

Brosowski, A.; Adler, P.; Erdmann, G.; Stinner, W.; Thrän, D.; Mantau, U.; Blanke, C.; Mahro, B.; Hering, T.; Reinholdt, G. (2015): Biomassepotenziale von Rest und Abfallstoffen: Status quo in Deutschland. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. https://mediathek.fnr.de/downloadable/download/sample/sample_id/1251/ (09062020).

Bundesregierung (2020): Nationale Bioökonomiestrategie. Bundesministerium für Bildung und Forschung, Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. <https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/Nationale-Biooekonomiestrategie-Zusammenfassung.pdf> (06072022).

Bundesregierung (2021): Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie Weiterentwicklung. Bundesregierung. <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/998006/1873516/3d3b15cd92d0261e7a0bcdc8f43b7839/2021-03-10-dns-2021-finale-langfassung-nicht-barrierefrei-data.pdf?download=1> (22082022).

Bunsen, J.; Berger, D. M.; Finkbeiner, D. M. (2022): Konzeptionelle Weiterentwicklung des Wasserfußabdrucks. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/konzeptionelle-weiterentwicklung-des> (02112022).

Calicioglu, Ö.; Bogdanski, A. (2021): Linking the bioeconomy to the 2030 sustainable development agenda: Can SDG indicators be used to monitor progress towards a sustainable bioeconomy? DOI: doi.org/10.1016/j.nbt.2020.10.010 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1871678420301886> (20012022).

Campos, V. A.; Freitas, H.; Dallabrida, P. (2022): DIE SPUR DER ZERSTÖRUNG DURCH SOJA IM BRASILIANISCHEN CERRADO. https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Projektinformation/Naturschutz/Soja/Gemeinsamer_Bericht_Zerst%C3%B6rung_durch_Soja.pdf.

Carus, M.; Raschka, A.; Fehrenbach, H.; Rettenmaier, N.; Dammer, L.; Köppen, S.; Thöne, M.; Dobroschke, S.; Diekmann, Hermann, A.; Hennenberg, K.; Essel, R.; Piotrowski; Detzel, A.; Keller, H.; Kauertz, B.; Gärtner, S.; Reinhardt, J. (2014): Ökologische Innovationspolitik – Mehr Ressourceneffizienz und Klimaschutz durch

- nachhaltige stoffliche Nutzungen von Biomasse. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/oekologische-innovationspolitik-mehr> (06072022).
- Chatalova, L. (2022): Suffizienz in der Bioökonomie: Zwischen Option und Notwendigkeit. Otto-Von-Guericke-University, Library, Magdeburg, Germany. DOI: 10.24352/UB.OVGU-2022-006
<https://journals.ub.ovgu.de/index.php/NFL/article/view/2052> (09102025).
- Chaudhary, A.; Brooks, T. M. (2018): Land use intensity-specific global characterization factors to assess product biodiversity footprints. DOI: doi/10.1021/acs.est.7b05570
<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.7b05570> (06032023).
- Churkina, G.; Organschi, A.; Reyer, C. P. O.; Ruff, A.; Vinke, K.; Liu, Z.; Reck, B. K.; Graedel, T. E.; Schellnhuber, H. J. (2020): Buildings as a global carbon sink. In: *Nature Sustainability*. Bd. 3, Nr. 4, S. 269–276. DOI: 10.1038/s41893-019-0462-4.
- DBFZ (o.J.): DBFZ Ressourcendatenbank. <https://datalab.dbfz.de/resdb/potentials?lang=de> (09102025).
- Destatis (2020): Umweltökonomische Gesamtrechnungen - Methode der Berechnungen zur globalen Umweltinanspruchnahme durch Produktion, Konsum und Importe. Statistisches Bundesamt (Destatis). S. 124.
https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/ueberblick/Publikationen/Downloads/ugr-globale-umweltinanspruchnahme-methode-5851102209004.pdf?__blob=publicationFile.
- Detzel, A.; Kauertz, B.; Grahl, D. B.; Heinisch, J. (2016): Prüfung und Aktualisierung der Ökobilanzen für Getränkeverpackungen. ifeu - Institut für Energie - und Umweltforschung Heidelberg GmbH, INTEGRAHL Industrielle Ökologie, Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung, Dessau-Roßlau. S. 492.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_19_2016_pruefung_und_aktualisierung_der_oekobilanzen_fuer_gertaenkeverpackungen_0.pdf.
- DGE (2017): Vollwertig essen und trinken nach den 10 Regeln der DGE. Deutsche Gesellschaft für Ernährung e. V. <https://www.dge.de/ernaehrungspraxis/vollwertige-ernaehrung/10-regeln-der-dge/> (11102022).
- Die Papierindustrie (2023): Statistische Kurzinformation Zellstoff- und Papierindustrie in Deutschland - September 2023. https://www.papierindustrie.de/fileadmin/0002-PAPIERINDUSTRIE/07_Dateien/1_Statistik/2023/09_2023_Statistische_Kurzinformation_D.pdf (28102023).
- Die Papierindustrie (o.J.): Papier und Wasser. <https://www.papierfakten.de/papierfakten/papier-und-wasser> (08082023).
- Dittrich, M.; Liebich, A.; Vogt, R.; Münter, D.; Wingenbach, C.; Ludmann, S.; Rosenthal, M.; Fröhlich, D. T.; Petri, F.; Ewers, B.; Doppelmayr, A.; Limberger, S.; Müller, J.; Loibl, A.; Marscheider-Weidemann, F.; Rostek, L.; Brauer, C.; Schoer, K. (2025): REFINE (Umwelt): Betrachtung von Rohstoffaufwendungen und Umweltwirkungen für die Energiewende in einem ressourcenschonenden und treibhausgasneutralen Deutschland. Teilbericht Umweltwirkungen. *Texte*, S. 262.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/128_2025_texte.pdf.
- Dmuchowski, W.; Baczewska-Dąbrowska, A. H.; Gworek, B. (2024): The role of temperate agroforestry in mitigating climate change: A review. In: *Forest Policy and Economics*. Bd. 159, S. 103136. DOI: 10.1016/j.forpol.2023.103136.
- Econ-BioSC (2016): Biomass flows and technological innovation in the bioeconomy: A global scenario analysis. <https://www.biosc.de/econbiosc> (21072022).
- Eppler, U.; Fritsche, U. W.; Ribak, S. (2021): Zukunftsfähige Bioökonomie. NABU.
https://iinas.org/app/downloads_from_old_page/bio/IINAS_2021_BOe_Nachhaltig_NABU.pdf (06072022).

EU Kommission (o.J.): EU Bioeconomy Monitoring System dashboards. In: *Knowledge for policy*. https://knowledge4policy.ec.europa.eu/visualisation/eu-bioeconomy-monitoring-system-dashboards_en (10102025).

European Commission (2018): A sustainable Bioeconomy for Europe: Strengthening the connection between economy, society and the environment. European Commission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52018DC0673&from=EN> (26102022).

European Commission (2021): Commission recommendation on the use of the Environmental Footprint methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organisations. European Commission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021H2279> (16052023).

Fallasch, F.; Böttcher, D. H.; Schneider, D. L.; Herrmann, H.; Jörß, W.; Siemons, A.; Reija, M. F. (2024): The EU Carbon Removal Certification Framework: Options for using certified removal units and funding mitigation activities. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/44_2024_cc_the_eu_carbon_removal_certification_framework.pdf.

FAO (2006): Food Security. *Policy Brief 2*, Rome. https://www.fao.org/fileadmin/templates/faoitally/documents/pdf/pdf_Food_Security_Cocept_Note.pdf (11102024).

FAO (2016): Global forest resources assessment 2015: How are the world's forests changing? Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/3/a-i4793e.pdf> (20122020).

FAO - GBEP (2011): The Global Bioenergy Partnership Sustainability Indicators for Bioenergy. Rome. <https://www.fao.org/3/cc7026en/cc7026en.pdf>.

Fehrenbach, H. (2000): Operationalisierung der Wirkungskategorie Naturraumbeanspruchung unter besonderer Berücksichtigung landwirtschaftlich genutzter Flächen. ifeu - Institut für Energie - und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Heidelberg. S. 24. <https://www.ifeu.de/landwirtschaft/pdf/IFEU%20Naturraum-Bewertung%20LW%20Arbeitspapier%202000.pdf>.

Fehrenbach, H.; Bischoff, M.; Böttcher, H.; Reise, J.; Hennenberg, K. J. (2022): The missing limb: Including impacts of biomass extraction on forest carbon stocks in greenhouse gas balances of wood use. In: *Forests*. Bd. 13, Nr. 3. DOI: 10.3390/f13030365 <https://www.mdpi.com/1999-4907/13/3/365> (01062022).

Fehrenbach, H.; Bürck, S. (2022): CO₂-Opportunitätskosten von Biokraftstoffen in Deutschland. ifeu - Institut für Energie - und Umweltforschung Heidelberg GmbH. <https://www.ifeu.de/service/nachrichtenarchiv/neue-studie-des-ifeu-im-auftrag-der-duh-biokraftstoffe-aus-anbaubiomasse-noch-viel-schlechter-als-ihr-bereits-ramponierter-ruf/> (10052022).

Fehrenbach, H.; Bürck, S.; Köppen, S.; Bischoff, M. (2021a): Literaturstudie zur Vorbereitung der Aktualisierung des UBA-Biomassepositionspapiers (Nr. 127447). noch unveröffentlicht.

Fehrenbach, H.; Busch, M.; Bürck, S.; Bischoff, M.; Theis, S.; Reinhardt, J.; Blömer, J.; Grahl, B. (2021b): Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen. Ermittlung und Verifizierung von Datenquellen und Datengrundlagen für die Berechnung der Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen für Ökobilanzen – Teilbericht I: METHODEN–. Umweltbundesamt.

Fehrenbach, H.; Busch, M.; Bürck, S.; Bischoff, M.; Theis, S.; Reinhardt, J.; Blömer, J.; Grahl, B. (2021c): Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen. Ermittlung und Verifizierung von Datenquellen und Datengrundlagen für die Berechnung der Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen für Ökobilanzen – Teilbericht II: FALLBEISPIELE–. Umweltbundesamt.

<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/flaechenrucksaecke-von-guetern-dienstleistungen-0> (21122021).

Fehrenbach, H.; Busch, M.; Bürck, S.; Bischoff, M.; Theis, S.; Reinhardt, J.; Blömer, J.; Grahl, B. (2021d): Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen. Ermittlung und Verifizierung von Datenquellen und Datengrundlagen für die Berechnung der Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen für Ökobilanzen – Teilbericht III: DATEN –. Umweltbundesamt.

Fehrenbach, H.; Giegrich, J.; Köppen, S.; Wern, B.; Pertagnol, J.; Baur, F.; Hünecke, K.; Dehoust, G.; Bulach, W.; Wiegmann, K. (2019a): BioRest: Verfügbarkeit und Nutzungsoptionen biogener Abfall- und Reststoffe im Energiesystem (Strom-, Wärme- und Verkehrssektor). Umweltbundesamt.

<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/biorest-verfuegbarkeit-nutzungsoptionen-biogener> (09062020).

Fehrenbach, H.; Grahl, B.; Giegrich, J.; Busch, M. (2015): Hemeroby as an impact category indicator for the integration of land use into life cycle (impact) assessment. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment*. Bd. 20, Nr. 11, S. 1511–1527. DOI: 10.1007/s11367-015-0955-y.

Fehrenbach, H.; Köppen, S.; Kauertz, B.; Detzel, A.; Wellenreuther, F.; Breitmayer, E.; Essel, R.; Carus, M.; Biengen, K.; von Geibler, J. (2017a): Biomassekaskaden – Mehr Ressourceneffizienz durch stoffliche Kaskadennutzung von Biomasse – von der Theorie zur Praxis. Umweltbundesamt.

<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/biomassekaskaden-mehr-ressourceneffizienz-durch> (03062022).

Fehrenbach, H.; Köppen, S.; Kauertz, B.; Wellenreuther, F.; Baur, F.; Wern, B.; Breitmayer, E. (2017b): Biomassekaskaden Mehr Ressourceneffizienz durch Kaskadennutzung von Biomasse – von der Theorie zur Praxis. Anlage Gesamtökologische Betrachtung ausgewählter Biomassekaskaden. Umweltbundesamt.

<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/biomassekaskaden-mehr-ressourceneffizienz-durch> (09062020).

Fehrenbach, H.; Köppen, S.; Markwardt, S.; Vogt, R. (2016): Aktualisierung der Eingangsdaten und Emissionsbilanzen wesentlicher biogener Energienutzungspfade (BioEm). TEXTE Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_09_2016_aktualisierung_der_eingangsdaten_und_emissionsbilanzen_wesentlicher_biogener_energienutzungspfade_1.pdf (29122020).

Fehrenbach, H.; Zeitz, C.; Köppen, S.; Detzel, A.; Kauertz, B.; Wiegmann, K.; Hennenberg, K. J.; Moch, K. (2019b): Implementierung von Nachhaltigkeitskriterien für die stoffliche Nutzung von Biomasse im Rahmen des Blauen Engel (Teil 3). Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/implementierung-von-nachhaltigkeitskriterien-fuer-1> (17042021).

Fischer, C.; Grieshammer, R. (2013): Mehr als nur weniger Suffizienz: Begriff, Begründung und Potenzial. Öko-Institut Working Paper S. 23. <https://www.oeko.de/oekodoc/1836/2013-505-de.pdf>.

FNR (2024): ANBAU UND VERWENDUNG NACHWACHSENDER ROHSTOFFE IN DEUTSCHLAND. <https://fnr.de/fileadmin/Statistik/2024.xlsx>.

Forbrig, S.; Fischer, T.; Heinz, B. (2020): Bedarf, Konsum, Wiederverwendung und Verwertung von Bekleidung und Textilien in Deutschland. FTR - BVSE. https://www.bvse.de/dateien2020/1-Bilder/03-Themen_Ereignisse/06-Textil/2020/studie2020/bvse%20Alttextilstudie%202020.pdf (21102024).

Forsell, N. (2016): Study on impacts on resource efficiency of future EU demand for bioenergy. European Commission. DOI: 10.2779/968246

https://ec.europa.eu/environment/enveco/resource_efficiency/pdf/studies/KH-02-16-505-EN-N%20-%20final%20report.pdf (21012022).

- Fritsche, U.; Brunori, G.; Chiaramonti, D.; Galanakis, C. M.; Hellweg, S.; Matthews, R.; Panoutsou, C. (2020): Future transitions for the Bioeconomy towards Sustainable Development and a Climate-Neutral Economy. European Commission. DOI: 10.2760/667966
https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC121212/fritsche_et_al_%282020%29_d2_synthesis_report_final_1.pdf (06072022).
- Fuß, R. (2023): Ammoniak-Emissionen aus der Landwirtschaft. In: *Thünen: Ammoniak-Emissionen aus der Landwirtschaft*. <https://www.thuenen.de/de/themenfelder/klima-und-luft/emissionsinventare-buchhaltung-fuer-den-klimaschutz/ammoniak-emissionen-aus-der-landwirtschaft> (06082023).
- Geres, R.; Kohn, A.; Lenz, S.; Ausfelder, F.; Bazzanella, A.; Möller, A. (2020): ROADMAP CHEMIE 2050 - Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland. FutureCamp Climate GmbH. <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/2019-10-09-studie-roadmap-chemie-2050-treibhausgasneutralitaet.pdf>.
- Gerhardt, P. (2020): Wälder unter Druck - Warum die Bioökonomie unsere Biosphäre bedroht. kritische Agrarbericht. <https://denkhausbremen.de/en/forests-under-pressure-why-the-bioeconomy-threatens-our-ecosystems/> (06072022).
- Giegrich, J.; Liebich, A.; Lauwigi, C.; Reinhardt, J. (2012): Indikatoren / Kennzahlen für den Rohstoffverbrauch im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4237.pdf>.
- Giegrich, J.; Sturm, K. (1996): Operationalisierung der Wirkungskategorie Naturraumbeanspruchung. ifeu - Institut für Energie - und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Heidelberg.
- Goh, C. S. (2017): Monitoring the bio-economy: Assessing local and global biomass flows, land-use change, carbon impacts and future land resources. Universität Utrecht. <http://dspace.library.uu.nl/handle/1874/350036> (20012022).
- Grassi, G.; Fiorese, G.; Pilli, R.; Jonsson, K.; Blujdea, V.; Korosuo, A.; Vizzarri, M. (2021): Brief on the role of the forest-based bioeconomy in mitigating climate change through carbon storage and material substitution. European Commission. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC124374> (27012022).
- Gröger, J.; Behrens, F.; Liu, R.; Buhnke, D. (2024): Ökobilanz digitaler Dienstleistungen. Öko-Institut e.V. <https://www.oeko.de/publikation/oekobilanz-digitaler-dienstleistungen/> (17102024).
- Hafner, A.; Rüter, S.; Ebert, S.; Schäfer, S.; König, H.; Cristofaro, L.; Diederichs, S.; Kleinhenz, M.; Krechel, M. (2017): Treibhausgasbilanzierung von Holzgebäuden – Umsetzung neuer Anforderungen an Ökobilanzen und Ermittlung empirischer Substitutionsfaktoren (THG-Holzbau). https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiUj7XI_PvpAhXG16QKHXMMCuWQFjAAegQIAhAB&url=https%3A%2F%2Fliteratur.thuenen.de%2Fdigbib_extern%2Fdn058600.pdf&usq=AOvVaw24B2LDPCyY1C9S49ErCJqr (09062020).
- Hartmann (2019): persönliche Mitteilung durch Dr. Wilfried Hartmann am 24.9.2019. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL), Darmstadt.
- Heimann, T. (2019): Bioeconomy and SDGs: Does the Bioeconomy Support the Achievement of the SDGs? In: *Earth's Future*. DOI: doi.org/10.1029/2018EF001014
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2018EF001014> (27012022).
- Helin, T.; Salminen, H.; Hynynen, J.; Soimakallio, S.; Huuskonen, S.; Pingoud, K. (2016): Global warming potentials of stemwood used for energy and materials in Southern Finland: differentiation of impacts based on type of harvest and product lifetime. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/gcbb.12244> (24112022).
- Hennenberg, K.; Böttcher, H. (2023): Biomasse und Klimaschutz. Öko-Institut e.V. https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Biomasse-und-Klimaschutz_BMWK.pdf (08042023).

Hennenberg, K.; Böttcher, H.; Braungardt, S.; Köhler, B.; Reise, J.; Köppen, S.; Bischoff, M.; Fehrenbach, H.; Pehnt, M.; Werle, M.; Mantau, U. (2022): Aktuelle Nutzung und Förderung der Holzenergie - Teilbericht zu den Projekten BioSINK und BioWISE. Umweltbundesamt.

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/cc_12-2022_aktuelle_nutzung_und_foerderung_der_holzenergie.pdf (28032022).

Hennenberg, K.; Bürck, S.; Fehrenbach, H.; Pfeiffer, M.; Köppen, S. (2023a): Trägt die Energienutzung von Waldholz zum Klimaschutz bei? Bd. AFZ-Der Wald, Nr. 3/2023. https://www.digitalmagazin.de/marken/afz-derwald/haupttheft/2023-3/holzenergie/031_traegt-die-energienutzung-von-waldholz-zum-klimaschutz-bei (21022023).

Hennenberg, K.; Köppen, S.; Banse, M.; Böttcher, H.; Brödner, R.; Cyffka, K.-F.; Fehrenbach, H.; Jordan, M.; Kilian, D.; Morland, C.; Pfeiffer, M.; Reise, J.; Schweinle, J.; Schindler, H.; Weimar, H.; Richter, S.; Iost, S. (2023b): Hintergrundinformationen zum Status Quo der Land- und Forstwirtschaft in Deutschland und zukünftigen Biomassepotenzial für die Erarbeitung der NABIS. Öko-Institut e.V.; ifeu -Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH; Thünen-Institut für Marktanalyse; Thünen-Institut für Waldwirtschaft; DBFZ; UFZ, Darmstadt, Berlin, Braunschweig, Hamburg, Heidelberg, Leipzig. S. 49.

https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/Publikationen/Ressourcen/NABIS/Hintergrundinformationen_NABIS_Oeko_ifeu_TI_DBFZ_UFZ_2024_02_05_Final_V2_Lit.pdf.

Hennenberg, K.; Pfeiffer, M.; Benndorf, A.; Böttcher, H.; Reise, J.; Mantau, U.; Köppen, S.; Fehrenbach, H.; Bürck, S. (2024): Auswirkungen der energetischen Nutzung forstlicher Biomasse in Deutschland auf deutsche und internationale LULUCF-Senken (BioSINK). ifeu; INFRO; Öko-Institut e.V., Darmstadt; Berlin; Heidelberg; Dessau-Roßlau. S. 84. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/cc_33-2024_biosink.pdf.

Heyen, D. A.; Fischer, C.; Barth, R.; Brunn, C.; Grieshammer, R.; Keimeyer, F.; Wolff, F. (2013): Mehr als nur weniger Suffizienz: Notwendigkeit und Optionen politischer Gestaltung. Öko-Institut Working Paper S. 23. https://www.researchgate.net/profile/Dirk-Heyen/publication/318763305_Mehr_als_nur_weniger_Suffizienz_Notwendigkeit_und Optionen_politischer_Gestaltung/links/597cc809458515687b377cf9/Mehr-als-nur-weniger-Suffizienz-Notwendigkeit-und-Optionen-politischer-Gestaltung.pdf.

Hoff, H.; Johnson, F. X.; Allen, B.; Biber-Freudenberger, L.; Förster, J. J. (2018): Sustainable bio-resource pathways towards a fossil-free world. the European bioeconomy in a global development context. Stockholm Environment Institute, Institute for European Environmental Policy, ZEF, PIK.

<https://ieep.eu/uploads/articles/attachments/8b23e752-50e6-4c7c-a7e3-71a8bfa0a806/Think%202030%20Bioeconomy.pdf?v=63710015964> (06072022).

Hünig, C.; Benzler, A. (2017): Das Monitoring der Landwirtschaftsflächen mit hohem Naturwert in Deutschland. BfN-Skripten Bundesamt für Naturschutz, Bonn-Bad Godesberg.

IPCC (2019): 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Chapter 12: Harvested Wood Products. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/4_Volume4/19R_V4_Ch12_HarvestedWoodProducts.pdf (14062024).

Jalas, J. (1955): Hemerobe und hemerochrome Pflanzenarten: Ein terminologischer Reformversuch. https://www.researchgate.net/publication/285437106_Hemerobe_und_hemerochrome_Pflanzenarten_Ein_terminologischer_Reformversuch.

Jetzke, T.; Richter, S.; Keppner, B.; Domröse, L.; Wunder, S.; Ferrari, A. (2019): Die Zukunft im Blick: Fleisch der Zukunft – Trendbericht zur Abschätzung der Umweltwirkungen von pflanzlichen Fleischersatzprodukten, essbaren Insekten und In-vitro-Fleisch. Umweltbundesamt.

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-06-25_trendanalyse_fleisch-der-zukunft_web_bf.pdf.

- Jochem, D.; Weimar, H.; Dieter, M. (2022): Holzeinschlag steigt im Jahr 2021 auf 84,2 Mio. m³. In: *Holzzentralblatt*. Forst- und Holzwirtschaft Bd. 41. https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn065561.pdf (19122022).
- Keller, H.; Rettenmaier, N.; Reinhardt, G. A. (2015): Integrated life cycle sustainability assessment – A practical approach applied to biorefineries. In: *Applied Energy*. Bd. 154, S. 1072–1081. DOI: [10.1016/j.apenergy.2015.01.095](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.095).
- Kilsedar, C.; Girardi, J.; Gerlach, H.; Mubareka, S. (2021): Implementation of the EU bioeconomy monitoring system dashboards - Status and technical description as of December 2021. European Commission. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/691217> (16052023).
- KlimaTeller (2024): KlimaTeller-Broschuere. NAHaft e.V: <https://www.klimateller.de/fileadmin/KlimaTeller/KlimaTeller-Broschuere.pdf> (12102024).
- Klöppfer, W.; Renner, I. (1995): Methodik der Wirkungsbilanz von Produkt-Ökobilanzen unter Berücksichtigung nicht oder nur schwer quantifizierbarer Umwelt-Kategorie. In: *Methodik der produktbezogenen Ökobilanzen - Wirkungsbilanz und Bewertung*; Umweltbundesamt. UBA-Texte Berlin.
- Köppen, S.; Fehrenbach, H.; Bürck, S. (2022): The GBEP Sustainable Bioenergy Indicators and Sustainable Bioeconomy Indicators - Similarities, Differences and Perspectives for Convergence. ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH, Heidelberg. <https://www.fao.org/3/cc7557en/cc7557en.pdf>.
- Köppen, S.; Rettenmaier, N. (2023): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3 - Rahmendaten zu Biomassepotenzialen und den Emissionen aus dem Landwirtschafts- und dem LULUCF-Sektor. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung; Consentec GmbH; ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH; Technische Universität Berlin, Heidelberg; Berlin. S. 28. https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFS-3_T45_Bericht_Biomassepotenziale_20230724_o.Ae_.pdf.
- Köppen, S.; Stange, H.; Blömer, S.; Ortner, S.; Weiß, U.; Werle, M.; Beermann, Y.; Pehnt, M.; Hennenberg, K.; Köhler, B.; Braungardt, S. (2024): Wirkmechanismen von Regelungen und Förderinstrumenten des Bundes und der Länder auf den Einsatz fester Biomasse in der Wärmeerzeugung. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/48_2024_texte_wirkmechanismen.pdf (04112024).
- Kowarik, I. (2004): Natürlichkeit, Naturnähe und Hemerobie als Bewertungskriterien. In: *Handbuch Naturschutz und Landschaftspflege*. ecomed Verlag, Landsberg. S. 1–18. DOI: [10.1002/9783527678525.hbuw2006004](https://doi.org/10.1002/9783527678525.hbuw2006004) https://www.researchgate.net/publication/300823627_Natuerlichkeit_Naturnahe_und_Hemerobie_als_Bewertungskriterien.
- Lanzerath, D.; Schurr, U.; Pinsdorf, C.; Stake, M. (2022): Bioeconomy and Sustainability: Perspectives from Natural and Social Sciences, Economics and Ethics. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-87402-5#affiliations> (12072022).
- Liebich, A.; Müller, J.; Münter, D.; Wingenbach, C. (2023): LCAs - Prospektive Ökobilanzen auf Basis der ecoinvent Datenbank. ifeu paper Heidelberg.
- Lindner, J. P.; Fehrenbach, H.; Winter, L.; Bischoff, M.; Bloemer, J.; Knüppfer, E. (2020): Biodiversität in Ökobilanzen. Weiterentwicklung und vergleichende Studien. Bonn-Bad Godesberg.
- Linser, S.; Lier, M. (2020): The Contribution of Sustainable Development Goals and Forest-Related Indicators to National Bioeconomy Progress Monitoring. DOI: doi.org/10.3390/su12072898 <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/7/2898> (20012022).
- Lutter, S.; Greimel, J.; Giljum, S.; Dittrich, M.; Limberger, S.; Ewers, B.; Schoer, K. (2022): Die Nutzung natürlicher Ressourcen - Ressourcenbericht 2022.

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/fb_die_nutzung_natuerlicher_ressourcen_2022_0.pdf.

Material Economics (2021): EU Biomass use in a net-zero economy. A course correction for EU biomass. SITRA, VINNOVA, Energy Transitions Commission. <https://www.sitra.fi/app/uploads/2021/06/material-economics-eu-biomass-use-in-a-net-zero-economy.pdf> (06072022).

Meyer, S.; Wesche, K.; Krause, B.; Leuschner, C. (2013): Dramatic losses of specialist arable plants in Central Germany since the 1950s/60s – a cross-regional analysis. In: *Diversity and Distributions*. Bd. 19, Nr. 9, S. 1175–1187. DOI: <https://doi.org/10.1111/ddi.12102>.

Mishra, R. K.; Jaya Prasanna Kumar, D.; Sankannavar, R.; Binnal, P.; Mohanty, K. (2024): Hydro-deoxygenation of pyrolytic oil derived from pyrolysis of lignocellulosic biomass: A review. In: *Fuel*. Bd. 360, S. 130473. DOI: [10.1016/j.fuel.2023.130473](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130473).

Möller, M.; López, V.; Prieß, R.; Schleicher, T.; Hünecke, K.; Hennenberg, K.; Wolff, F.; Kiresiewa, Z.; Hasenheit, M.; Schröder, P.; Gesang, D. B. (2020): Nachhaltige Ressourcennutzung – Anforderungen an eine nachhaltige Bioökonomie aus der Agenda 2030/SDG-Umsetzung. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020_10_20_texte_181_20_biooekonomie.pdf (11112021).

Mostert, C.; Bringezu, S. (2019): Measuring Product Material Footprint as New Life Cycle Impact Assessment Method: Indicators and Abiotic Characterization Factors. In: *Resources*. Multidisciplinary Digital Publishing Institute. Bd. 8, Nr. 2, S. 61. DOI: [10.3390/resources8020061](https://doi.org/10.3390/resources8020061).

Musonda, F.; Millinger, M.; Manske, D.; Thrän, D. (2020): BEPASO – Bioökonomie 2050: Potenziale, Zielkonflikte, Lösungsstrategien. Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH UFZ. https://www.ufz.de/export/data/2/245339_BMBF_Fkz031B0232E.pdf (11012023).

O'Brien, M.; Schütz, H.; Bringezu, S. (2015): The land footprint of the EU bioeconomy: Monitoring tools, gaps and needs. In: *Land Use Policy*. Bd. 47, S. 235–246. DOI: [10.1016/j.landusepol.2015.04.012](https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.04.012).

Osterburg, B.; Claudia Heidecke; Andreas Bolte; Julian Braun; Matthias Dieter; Karsten Dunger; Peter Elsasser; Richard Fischer; Heinz Flessa; Roland Fuß; Anna Jacobs; Frank Offermann; Joachim Rock; Claus Rösemann; Sebastian Rüter; Thomas Schmidt; Jobst-Michael Schröder; Jörg Schweinle; Bärbel Tiemeyer; Holger Weimar; Johannes Welling; Thomas de Witte (2019): Folgenabschätzung für Maßnahmenoptionen im Bereich Landwirtschaft und landwirtschaftliche Landnutzung, Forstwirtschaft und Holznutzung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050. Thünen-Institut. https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn061835.pdf (25032021).

Perbandt, D.; Vogelpohl, T.; Beer, K.; Töller, A. E.; Böcher, M. (2021): Zielkonflikte der Bioökonomie. DOI: doi.org/10.1007/978-3-658-35093-2 <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-35093-2> (12072022).

Petschow, U. (2011): Bioökonomie - Können neue Technologien die Energieversorgung und die Welternährung sichern? NABU. https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/gentechnik/tagungsergebnisse/nabu-bio_konomie.pdf (21072022).

Pfeiffer, M.; Hennenberg, K.; Boettcher, H.; Reise, J.; Mantau, U. (2023): Referenzszenario der Holzverwendung und der Waldentwicklung im UBA-Projekt BioSINK. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/WP-Referenzszenario-BioSINK.pdf>.

Prognos; Öko-Institut; Wuppertal-Institut (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Prognos; Öko-Institut; Wuppertal-Institut. https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_04_KNDE45/A-EW_209_KNDE2045_Zusammenfassung_DE_WEB.pdf (11112021).

Prussi, M.; Yugo, M.; de Prada, L.; Padella, M.; Edwards, R.; Lonza, L. (2020): JEC Well-to-Tank report v5. European Commission. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC119036> (09052022).

Purkus, A.; Lüdtke, J.; Becher, G. (2019): Evaluation der Charta für Holz 2.0: Methodische Grundlagen und Evaluationskonzept. Johann Heinrich von Thünen-Institut, DE. [https://doi.org/10.3220/REP1552650032000\(04112024\)](https://doi.org/10.3220/REP1552650032000(04112024)).

Reißmann, D.; Fehrenbach, H. (2019): Wirkungsabschätzung von Flächenbelegungen in Ökobilanzen: Arbeitsstand einer Methodenentwicklung. In: G. MEINEL: / U. SCHUMACHER: / M. BEHNISCH: / T. KRÜGER: *Flächenmonitoring XI. Flächenmanagement, Bodenversiegelung, Stadtgrün*. IÖR Schriften Rhombos-Verlag, Berlin. S. 287–296. [https://slub.qucosa.de/api/qucosa%3A72351/attachment/ATT-0/\(26082021\)](https://slub.qucosa.de/api/qucosa%3A72351/attachment/ATT-0/(26082021)).

Repenning, J.; Harthan, R.; Blanck, R.; Böttcher, H.; Braungardt, S.; Bürger, V.; Cook, V.; Emele, L.; Göckeler, K.; Görz, W. K.; Hacker, F.; Hennenberg, K.; Jörß, W.; Kasten, P.; Kreye, K.; Ludig, S.; Matthes, F. Chr.; Moosmann, L.; Nissen, C.; Reise, J.; Scheffler, M.; Schumacher, K.; Wiegmann, K.; Zerrahn, A.; Brugger, H.; Fleiter, T.; Mandel, T.; Rehfeldt, M.; Rohde, C.; Schlomann, B.; Deurer, J.; Steinbach, J. (2023): Klimaschutzinstrumente-Szenario 2030 (KIS-2030) zur Erreichung der Klimaschutz-ziele 2030. Teilbericht im Rahmen des Projektes „THG-Projektionen: Politiksznarien für den Klimaschutz X“. Forschungskennzahl 3720 41 501 0. Umweltbundesamt.

Repenning, J.; Schumacher, K.; Bergmann, T.; Blanck, R.; Böttcher, H.; Bürger, V.; Cludius, J.; Emele, L.; Jörß, W.; Hennenberg, K.; Hermann, H.; Loreck, C.; Ludig, S.; Matthes, F.; Nissen, C.; Scheffler, M.; Wiegmann, K.; Zell-Ziegler, C.; Fleiter, T.; Sievers, L.; Pfaff, M.; Thamling, N.; Hartwig, J.; Welter, S.; Lösch, O.; Wirz, A. (2019): Folgenabschätzung zu den ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Folgewirkungen der Sektorziele für 2030 des Klimaschutzplans 2050 der Bundesregierung - Endbericht. S. 373. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Folgenabschaetzung-Klimaschutzplan-2050-Endbericht.pdf>.

Richardson, K.; Steffen, W.; Lucht, W.; Bendtsen, J.; Cornell, S. E.; Donges, J. F.; Drüke, M.; Fetzer, I.; Bala, G.; von Bloh, W.; Feulner, G.; Fiedler, S.; Gerten, D.; Gleeson, T.; Hofmann, M.; Huiskamp, W.; Kummu, M.; Mohan, C.; Nogués-Bravo, D.; Petri, S.; Porkka, M.; Rahmstorf, S.; Schaphoff, S.; Thonicke, K.; Tobian, A.; Virkki, V.; Wang-Erlandsson, L.; Weber, L.; Rockström, J. (2023): Earth beyond six of nine planetary boundaries. In: *Science Advances*. American Association for the Advancement of Science. Bd. 9, Nr. 37, S. eadh2458. DOI: [10.1126/sciadv.adh2458](https://doi.org/10.1126/sciadv.adh2458).

Rupp, J. (2020): Wie nachhaltig ist Bioökonomie wirklich? Institut für ökologische Wirtschaftsforschung. [https://www.ioew.de/en/publication/wie_nachhaltig_ist_die_biooekonomie_wirklich\(06072022\)](https://www.ioew.de/en/publication/wie_nachhaltig_ist_die_biooekonomie_wirklich(06072022)).

Schäfer, A. C.; Boeing, H.; Conrad, J.; Watzl, B. (2024): Wissenschaftliche Grundlagen der lebensmittelbezogenen Ernährungsempfehlungen für Deutschland. In: *Ernährungs Umschau*. Bd. 71, Nr. 3, S. 158–166. DOI: [10.4455/eu.2024.009](https://doi.org/10.4455/eu.2024.009).

Scheffler, M.; Wiegmann, K. (2022): Gesundes Essen fürs Klima - Auswirkungen der Planetary Health Diet auf den Landwirtschaftssektor. Greenpeace. [https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Planetary_Health_Diet_Landwirtschaft.pdf\(03012023\)](https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Planetary_Health_Diet_Landwirtschaft.pdf(03012023)).

Schmitz, S.; Paulini, I. (1999): Bewertung in Ökobilanzen: Methode des Umweltbundesamtes zur Normierung von Wirkungsindikatoren, Ordnung (Rangbildung) von Wirkungskategorien und zur Auswertung nach ISO 14042 und 14043. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3619.pdf>.

Schomberg, A. C.; Bringezu, S.; Flörke, M. (2021): Extended life cycle assessment reveals the spatially-explicit water scarcity footprint of a lithium-ion battery storage. In: *Communications Earth & Environment*. Nature Publishing Group. Bd. 2, Nr. 1, S. 1–10. DOI: [10.1038/s43247-020-00080-9](https://doi.org/10.1038/s43247-020-00080-9).

Soimakallio, S.; Böttcher, H.; Niemi, J.; Mosley, F.; Turunen, S.; Hennenberg, K.; Reise, J.; Fehrenbach, H. (2022a): Closing an Open Balance: the Impact of Increased Roundwood Harvest on Forest Carbon. DOI: [doi/10.1111/gcbb.12981](https://doi.org/10.1111/gcbb.12981) [https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcbb.12981\(02082023\)](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcbb.12981(02082023)).

Soimakallio, S.; Fehrenbach, H.; Sironen, S.; Myllyviita, T.; Abdalla, N.; Seppälä, J. (2022b): Fossil carbon emission substitution and carbon storage effects of wood-based products.

<https://helda.helsinki.fi/handle/10138/342930> (27052022).

Sukopp, H. (1972): Wandel von Flora und Vegetation in Mitteleuropa unter dem Einfluß des Menschen.

Textil+Mode (2023): Die deutsche Textil- und Modeindustrie in Zahlen 2023. Gesamtverband der deutschen Textil- und Modeindustrie e.V. https://www.textil-bekleidung.de/fileadmin/user_upload/RS-Wirtschaft/Anlagen_2021/2023_zahlen_gross_web.pdf (21102024).

Thrän, D.; Arendt, O.; Ponitka, J.; Braun, J.; Rettenmaier, N. (2015): Meilensteine 2030 - Elemente und Meilensteine für die Entwicklung einer tragfähigen und nachhaltigen Bioenergiestrategie.

https://www.energetische-biomassenutzung.de/fileadmin/Steckbriefe/dokumente/03KB065_Endbericht_MS2030_final.pdf (27012022).

Tiemeyer, B.; Freibauer, A.; Borraz, E. A.; Augustin, J.; Bechtold, M.; Beetz, S.; Beyer, C.; Ebli, M.; Eickenscheidt, T.; Fiedler, S.; Förster, C.; Gensior, A.; Giebels, M.; Glatzel, S.; Heinichen, J.; Hoffmann, M.; Höper, H.; Jurasinski, G.; Laggner, A.; Leiber-Sauheitl, K.; Peichl-Brak, M.; Drösler, M. (2020): A new methodology for organic soils in national greenhouse gas inventories: Data synthesis, derivation and application. In: *Ecological Indicators*. Bd. 109, S. 105838. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.105838.

UBA (2012): Glossar zum Ressourcenschutz.

<https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4242.pdf>.

UBA (2023a): Germany. 2023 National Inventory Report (NIR). | UNFCCC. <https://unfccc.int/documents/627785> (08082023).

UBA (2023b): Projektionsbericht 2023 für Deutschland.

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/39_2023_cc_projektionsbericht_2023.pdf.

UBA (2023c): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2022: Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2020. Climate change 24/2022.

VCI, VDI (2023): Chemistry4Climate - Wie die Transformation der Chemie gelingen kann.

<https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/broschueren-und-faltblaetter/final-c4c-broschure-langfassung.pdf> (20102024).

VDI (2018): Ressourceneffizienz - Bewertung des Rohstoffaufwands - Resource efficiency - Evaluation of raw material demand. <https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-4800-blatt-2-ressourceneffizienz-bewertung-des-rohstoffaufwands> (03042024).

Verkerk, P. J.; Cardellini, G.; Van Meijl, H.; Pyka, A. (2021): Future transitions for the bioeconomy towards sustainable development and a climate-neutral economy. Publications Office of the European Union.

<https://data.europa.eu/doi/10.2760/097710> (20012022).

Weimar, H. (2023): Die Bioökonomie und die Nachhaltigkeitsziele der Vereinten Nationen. Thünen-Institut.

<https://www.thuenen.de/de/fachinstitute/waldwirtschaft/projekte-liste/die-biooekonomie-und-die-nachhaltigkeitsziele-der-vereinten-nationen-biosdg> (01052022).

Welle, D. T.; Sturm, K.; Bohr, Y. (2018): Alternativer Waldzustandsbericht: Eine Waldökosystemtypen-basierte Analyse des Waldzustandes in Deutschland anhand naturschutzfachlicher Kriterien. Naturwald Akademie, Lübeck. S. 263. https://naturwald-akademie.org/wp-content/uploads/2020/06/Alternativer-Waldzustandsbericht_Stand_24_04_2018_1.pdf (29122020).

WGBU (2020): Landwende im Anthropozän: Von der Konkurrenz zur Integration: Zusammenfassung.

Wissenschaftlicher Beirat d. Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, Berlin.

https://www.wbgu.de/fileadmin/user_upload/wbgu/publikationen/hauptgutachten/hg2020/pdf/WBGU_HG2020_ZF.pdf.

Wiegmann, K.; Hünecke, K.; Moch, K.; Hennenberg, K. J.; Fehrenbach, H. (2019): Implementierung von Nachhaltigkeitskriterien für die stoffliche Nutzung von Biomasse im Rahmen des Blauen Engel - Teil 4: PROSA - Biobasierte Wasch- und Reinigungsmittel. *Texte*,

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-08-19_texte_90-2019_be_biomassenutzung_wrm.pdf.

Wiegmann, K.; Scheffler, M.; Schneider, C.; Lakner, S.; Sommer, P.; Meyer-Jürshof, M. (2022): Klimaschutz in der GAP 2023-2027. *Texte* S. 94.

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/103_2023_texte_klimaschutz_in_der_gap.pdf.

Willett, W.; Rockström, J.; Loken, B.; Springmann, M.; Lang, T.; Vermeulen, S.; Garnett, T.; Tilman, D.; DeClerck, F.; Wood, A.; Jonell, M.; Clark, M.; Gordon, L. J.; Fanzo, J.; Hawkes, C.; Zurayk, R.; Rivera, J. A.; De Vries, W.; Majele Sibanda, L.; Afshin, A.; Chaudhary, A.; Herrero, M.; Agustina, R.; Branca, F.; Lartey, A.; Fan, S.; Crona, B.; Fox, E.; Bignet, V.; Troell, M.; Lindahl, T.; Singh, S.; Cornell, S. E.; Srinath Reddy, K.; Narain, S.; Nishtar, S.; Murray, C. J. L. (2019): Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. In: *The Lancet*. Bd. 393, Nr. 10170, S. 447–492. DOI: 10.1016/S0140-6736(18)31788-4.

Wilting, H. C.; Schipper, A. M.; Bakkenes, M.; Meijer, J. R.; Huijbregts, M. A. J. (2017): Quantifying biodiversity losses due to human consumption: a global-scale footprint analysis. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b05296> (27012022).

Wirth, H. (2022): Area Potentials for (Integrated) PV in Germany. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE.

Wirth, H. (2025): Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Fraunhofer ISE. S. 97.

www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf.

Wolf, T.; Untergutsch, A.; Wensing, C.; Mittelbach, H.; Lu-Pagenkopf, F.; Kellenberger, D.; Kubowitz, P. (2020): Potenziale von Bauen mit Holz - Erweiterung der Datengrundlage zur Verfügbarkeit von Holz als Baustoff zum Einsatz im Holzbau sowie vergleichende Ökobilanzierung von Häusern in Massiv- und Holzbauweise. *Texte*, S. 248.

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2020_10_29_texte_192_2020_potenziale_von_bauen_mit_holz_aktualisiert.pdf.

WWF (2012): Klimawandel auf dem Teller. https://www.wwf.de/static/content/e-learning/data/studie_klimawandel_auf_dem_teller.pdf (27032024).

Anhang

A Detailinformationen zur Einordnung der vom BÖR vorgeschlagenen Maßnahmen.

Tabelle 27: Allgemeine Einordnung der Bewertbarkeit der vom BÖR vorgeschlagenen Maßnahmen. Kursive Schrift zeigt die bewertbaren Maßnahmen an.

Maßnahme	Einordnung	Kommentar zur Bewertung
Maßnahmen zur Entschärfung der Ernährungs Krise		
Die Einfuhrbedingungen von ukrainischen Getreidelieferungen in die Europäische Union (EU) erleichtern	Handlungsansatz	Bewertung nicht möglich, da Ausgestaltung unklar, Wirkungen schwer abschätzbar
<i>Den Fokus auf Ernährungssicherung legen, Agrarprodukte nicht mehr für die Erzeugung von Energie einsetzen</i>	<i>Handlungsansatz</i>	<i>Bewertung möglich, z.B. auf Basis aktueller Produktionsstatistiken</i>
<i>Tierbestände zeitlich befristet reduzieren und Futtermittel umlenken</i>	<i>Handlungsansatz</i>	<i>Bewertung möglich, z.B. auf Basis aktueller Produktionsstatistiken</i>
<i>Den Fleischkonsum durch steuerliche Anreize und Investitionen in neue Verfahren senken</i>	<i>Instrument</i>	<i>Bewertung möglich wenn auch eher qualitativ</i>
<i>Möglichkeiten der nationalen Umsetzung der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) besser nutzen, um die landwirtschaftliche Produktivität nachhaltig zu erhöhen</i>	<i>Instrument</i>	<i>Bewertung möglich wenn auch eher qualitativ</i>
Die landwirtschaftlichen Produktionssysteme weltweit resilienter gestalten	Handlungsansatz	Bewertung nicht möglich
Die nationale Ernährungssouveränität durch internationale Vereinbarungen sichern	Handlungsansatz	Bewertung nicht möglich
Netto-Null-Flächenverbrauch durch intelligente Steuerungsansätze erreichen	Handlungsansatz, versch. Instrumente	Bewertung nicht möglich
Die Kreislaufwirtschaft in der Landwirtschaft stärken	Handlungsansatz	Bewertung nicht möglich
Neue Geschäftsmodelle zur Etablierung alternativer Produktionsmethoden fördern	Handlungsansatz	Bewertung nicht möglich
Verhaltensänderungen bei Lebensstilen herbeiführen	Handlungsansatz	Bewertung nicht möglich
Maßnahmen zur Entschärfung der Ernährungs Krise		
Den Verbrauch fossil erzeugter Energien deutlich senken	Handlungsansatz	Bewertung nicht möglich
Die Steuerung für Bioenergieträger anpassen	Instrument	Bewertung nicht möglich

Maßnahme	Einordnung	Kommentar zur Bewertung
<i>Den Energieverbrauch im Verkehr anpassen</i>	<i>Instrument</i>	<i>Bewertung möglich auf Basis von Statistiken, teilweise bereits vorliegende Bewertungen (Tempolimit)</i>
Die Markteinführung von Bioraffinerien unterstützen	Handlungsansatz	Bewertung nicht möglich
Eine Kohlenstoffstrategie entwickeln	Handlungsansatz	Bewertung nicht möglich
Die Lenkungswirkung durch CO ₂ -Preise nutzen	Handlungsansatz	Bewertung ggf. über andere Vorhaben bereits erfolgt
Den Übergang von fossilen zu erneuerbaren Energieträgern ebnen	Handlungsansatz	Bewertung nicht möglich
Kreislaufwirtschaft und Kaskaden-Nutzung energieintensiver Rohstoffe stärken	Handlungsansatz	Bewertung ggf. über andere Vorhaben bereits erfolgt
Verhaltensänderungen bei Lebensstilen herbeiführen	Handlungsansatz	Bewertung nicht möglich

Tabelle 28: Allgemeine Einordnung der Bewertbarkeit der vom BÖR vorgeschlagenen Handlungsempfehlungen nach Themen (Bioökonomierat 2023a).

	Maßnahme	Einordnung	Kommentar zur Bewertung
	Dialog und Partizipation		
#1	Dokumentation, Auswertung und Synthese von Erfahrungen mit Dialog- und Partizipationsprozessen in der Bioökonomie und vergleichbaren Prozessen fördern	Maßnahme	Bewertung nicht möglich
#2	Erfahrungsaustausch und Kooperation unter regionalen Initiativen institutionalisieren	Maßnahme	Bewertung nicht möglich
#3	Ressourcen für die Beteiligung zivilgesellschaftlicher Organisationen sowie anderer Akteure mit begrenzten Eigenmitteln in Dialog- und Partizipationsprozessen bereitstellen	Maßnahme	Bewertung nicht möglich
	Ansätze für eine stärkere Politikkohärenz und Politikintegration		
#4	Aufbau einer Datenbank, in der die in Deutschland vorhandene technische Infrastruktur von Hochschulen und außeruniversitären Forschungseinrichtungen erfasst und in regelmäßigen Abständen aktualisiert werden	Maßnahme	Bewertung nicht möglich
#5	Etablierung von Maßnahmen, mit denen eine stärkere Zusammenarbeit der außeruniversitären Forschungseinrichtungen mit den Universitäten	Maßnahme	Bewertung nicht möglich

	Maßnahme	Einordnung	Kommentar zur Bewertung
	und der Wirtschaft unter gemeinsamer Nutzung der vorhandenen Infrastruktur forciert werden kann		
#6	Beteiligungsplattform zur Ermittlung von Praxistauglichkeit von Gesetzen und Verordnungen mit Bioökonomie-Bezug schaffen, unter Berücksichtigung praktischer Erfahrungen aus Wirtschaft und Zivilgesellschaft	Maßnahme	Bewertung nicht möglich
#7	Strukturen zur Vernetzung ländlicher, kommunaler und regionaler Bioökonomieinitiativen schaffen sowie deren stärkere Berücksichtigung in den Bund-Länder-Strukturen und der Förderpolitik gewährleisten	Handlungsansatz	Bewertung nicht möglich
#8	Fortschritt des Umsetzungsplans in zweijährigem Rhythmus gemeinsam mit den Länderbeiräten, Clusterinitiativen und regionalen Netzwerken aus verschiedenen Ländern würdigen und diskutieren	Maßnahme	Bewertung nicht möglich
#9	Einsetzen für Anpassung von klassischen Ausbildungsberufen mit Bioökonomiebezug	Handlungsansatz	Bewertung nicht möglich
#10	Bioökonomie unter dem Leitmarkt „Klima- und Ressourcenschutz, Energie und Umwelt“ positionieren	Handlungsansatz	Bewertung nicht möglich
#11	<i>Bioökonomie mit einem eigenständigen Förderprogramm in den Wachstumsfonds der Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) zu integrieren und im DeepTech & Climate Fonds (DTCF) verankern</i>	<i>Instrument</i>	<i>Bewertung nicht möglich, ggf. Bewertung möglich, wenn Daten zu Größe und Förderbedingungen vorliegen</i>
	Innovationsbeförderung		
#12	Etablierung schlagkräftiger Science-to-Business-Plattformen oder -Zentren als Nucleus von Innovations-Regionen oder -Räumen	Instrument	Bewertung nicht möglich
#13	Professionalisierung des universitären Gründungsgeschehens und entsprechender Beteiligungsmodelle	Handlungsansatz	Bewertung nicht möglich
#14	Förderung technologiegetriebener, sozialer und institutioneller Innovationen insbesondere disruptiver Innovationen mit hohem Impact für eine nachhaltige Transformation	Handlungsansatz	Bewertung nicht möglich
#15	Wissensbasierte Bewertungssystematiken und Festlegung vergleichbarer Bilanzierungsrahmen	Handlungsansatz	Bewertung nicht möglich
#16	Etablierung neuer Instrumente zur Bewertung der ESG-Kriterien (Environmental, Social, Governance)	Handlungsansatz	Bewertung nicht möglich

	Maßnahme	Einordnung	Kommentar zur Bewertung
#17	Einführung eines vereinfachten Systems von steuerlichen Begünstigungen für KMU für den Einsatz „biobasierter Clean Technologies“	Instrument	Bewertung nicht möglich
#18	Harmonisierung von Mindestanforderungen und Qualitätsansprüche an biobasierte Lösungen auf EU-Ebene	Handlungsansatz	Bewertung nicht möglich
	Kohlenstoffbilanzierung		
#19	Beauftragung einer Studie, in der die nationale und internationale Datenlage früherer Betrachtungen und Detailstudien für eine Kohlenstoffbilanzierung systematisch erfasst werden	Maßnahme	Bewertung nicht möglich
#20	Derzeitigen Fokus (Speicherung und stoffliche Nutzung von CO ₂) der nationalen CMS um weitere Kohlenstoffquellen (u. a. Biomasse, Abfall- und Restströme) erweitern	Handlungsansatz	Bewertung nicht möglich
	Diversifizierung der Landbewirtschaftung: Agroforst- und mehrjährige Kulturpflanzensysteme		
#21	Landwirten und Landwirtinnen durch ordnungspolitische Anpassungen Freiräume und Flexibilität einräumen	Handlungsansatz	Bewertung nicht möglich
#22	<i>Regionale Leuchtturm- und Modellprojekte sowie Demonstrationsvorhaben als geschützte Innovationszonen zur schnelleren Umsetzung von Agroforst- und mehrjährigen Kulturpflanzensystemen in die Praxis etablieren</i>	<i>Instrument</i>	<i>Bewertung nicht möglich, ggf. Bewertung einzelner Projekte möglich, wenn entsprechende Daten vorliegen</i>
#23	Neuausrichtung der Forschungspolitik für Agroforst- und mehrjährige Kulturpflanzensysteme auf einen systemischen, transdisziplinären Forschungsansatz und deutlich längere Projektlaufzeiten	Handlungsansatz	Bewertung nicht möglich
#24	Entwicklung von Entscheidungshilfen zur Optimierung von Agroforst- und mehrjährigen Kulturpflanzensystemen, Weiterentwicklung von Mechanisierungstechnologien und ökologische Begleitforschung	Instrument	Bewertung nicht möglich
#25	Transdisziplinäre Forschung zur Entwicklung eines Mess- und Bewertungssystems für Ökosystemleistungen sowie deren finanzieller Honorierung	Handlungsansatz	Bewertung nicht möglich
#26	Neuausrichtung der land- und forstwirtschaftlichen Bildung	Handlungsansatz	Bewertung nicht möglich
	Diversifizierung der Landbewirtschaftung: Agri-Photovoltaik		
#27	Ausbau von PV-Anlagen prioritär außerhalb der Agrarlandschaft	Handlungsansatz	Bewertung nicht möglich

	Maßnahme	Einordnung	Kommentar zur Bewertung
#28	Bei Einsatz von Agri-PV flächeneffiziente Lösungen verbindlich bevorzugen	Handlungsansatz	Bewertung nicht möglich, ggf. Bewertung von bestehenden Regelungen zum flächeneffizienten Einsatz von Agri-PV (z.B.: 85% des Ertrags muss erhalten werden)
#29	Entwicklung und Anpassung der Normung und Standardisierung als marktstrategisches Instrument und zur Beschleunigung der Marktentwicklung im Kontext der Energiewende	Instrument	Bewertung nicht möglich
#30	Forschungsförderung zur nachhaltigen Umsetzung von Agri-PV	Handlungsansatz	Bewertung nicht möglich
#31	Erhöhung der Akzeptanz von Agri-PV durch Dialog und Kommunikation in der Gesellschaft	Handlungsansatz	Bewertung nicht möglich
	Alternative Proteinquellen		
#32	Etablierung standardisierter Evaluationsparameter und -verfahren für die Nachhaltigkeit von Lebensmittelprodukten und Produktionsprozessen unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeitskriterien wie THG-Emission, Wasserverbrauch, Landnutzung und Biodiversität auf Produktebene	Handlungsansatz	Bewertung nicht möglich
#33	Förderung des Konsums nachhaltiger pflanzlicher Proteine und alternativer Proteinquellen durch Instrumente der Prozesspolitik wie durch die Anpassung des Mehrwertsteuer-Satzes oder die Einbindung in den Emissionszertifikatehandel	Instrument	Bewertung mit komplexen Ökonomiemodellen ggf. möglich
#34	Einsatz innerhalb der EU für die Umgestaltung von Zulassungsverfahren für neuartige Lebensmittel (z. B. alternative Proteine)	Handlungsansatz	Bewertung nicht möglich
#35	Aufbau von Innovationssystemen durch das Aufsetzen von Hubs zur Zusammenführung von Stakeholdern, Organisationen, Nutzerinnen und Nutzern sowie andere relevante Personengruppen in neuen agilen und partizipativen Formaten	Instrument	Bewertung nicht möglich
#36	Schaffung von förderpolitischen Rahmenbedingungen auf Bundesebene für die Entwicklung und großmaßstäbliche Etablierung unterschiedlicher technologieoffener Produktionsplattformen mit einem Fokus auf pflanzliche, mikrobielle und zellfreie Systeme	Instrument	Bewertung nicht möglich
#37	Wissensbasierte Information von Konsumentinnen und Konsumenten über die Nachhaltigkeit von Lebensmitteln und	Handlungsansatz	Bewertung nicht möglich

	Maßnahme	Einordnung	Kommentar zur Bewertung
	Herstellungsprozessen, um eine inhaltlich fundierte Konsumententscheidung zu ermöglichen		
	Inwertsetzung von Stoffströmen in Bioraffinerien und Biogasanlagen		
#38	Rohstoffbasis von Biogasanlagen muss nachhaltig transformiert werden und weniger abhängig von einjährigen und in Monokultur angebauten Energiepflanzen, wie Energiemais werden	Handlungsansatz	Bewertung nicht möglich, ggf. Bewertung der Auswirkungen auf Methanertrag von Biogasanlagen
#39	Wertschöpfung von Biogasanlagen soll im Sinne der Bioökonomie optimiert werden	Handlungsansatz	Bewertung nicht möglich
#40	Es sollten vermehrt Anlagen zur Nährstoffrückgewinnung und zur Produktion mineralischer Dünger, beispielsweise Struvit (Phosphor-Dünger) oder Ammoniumsulfat (Stickstoff-Dünger), aus organischen Reststoffen der Tier- und Biogasproduktion sowie vor allem aus Gülle und Biogasgärresten installiert werden	Handlungsansatz	Bewertung nicht möglich
#41	Förderung der Forschung zur Erweiterung der Rohstoffbasis für den Einsatz in regionalen und kommunalen Bioraffinerien	Handlungsansatz	Bewertung nicht möglich
#42	Forschungsintensität in Unternehmen und Forschungseinrichtungen ausbauen	Handlungsansatz	Bewertung nicht möglich
#43	Förderung von Pilot- und Demonstrationsanlagen von Bioraffinerien sind im Sinne geschützter Räume	Instrument	Bewertung nicht möglich, ggf. Bewertung einzelner Projekte möglich, wenn entsprechende Daten vorliegen
#44	Sofortprogramm zum Ausbau der Bioraffinerie-Technologien	Instrument	Bewertung nicht möglich
#45	Standortfaktoren für Bioraffinerien verbessern	Instrument	Bewertung nicht möglich
#46	CO ₂ -Preis für die Markteinführung biobasierter Produkte wirksam gestalten	Instrument	Bewertung nicht möglich
#47	Nachweis der Nachhaltigkeit von Bioraffinerien und Biogasanlagen durch klare Regeln für die Ökobilanzierung	Handlungsansatz	Bewertung nicht möglich
#48	Leitmärkte schaffen für eine nachhaltige Vermarktung von Produkten aus Bioraffinerien	Handlungsansatz	Bewertung nicht möglich
#49	Anpassungen in der Abfallverordnung und im EEG sowie Ausrichtung der Biomassestrategie an der Implementierung von Bioraffinerien und die Erweiterung von Biogasanlagen	Handlungsansatz	Bewertung nicht möglich
	Holz/Lignozellulose		

	Maßnahme	Einordnung	Kommentar zur Bewertung
#50	Langfristiges und kontinuierliches Monitoring zu den Ökosystemleistungen und der Biodiversität (einschließlich der Bodenbiodiversität) der Wälder, den nachhaltig verfügbaren Holzmengen und ihrer Verwendung mit Schaffung einheitlicher Beurteilungsgrößen	Handlungsansatz	Bewertung nicht möglich
#51	<i>Die Verwendung von Holz in langfristig nutzbaren und klimaeffizienten Konstruktionen gezielt fördern.</i>	<i>Instrument</i>	<i>Bewertung potenzieller Wirkung eines Instruments auf den Wald und die THG-Bilanz</i>
#52	Staatlichen Regelungen für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft insbesondere in den Bereichen Abfall und Altholz erneuern	Instrument	Bewertung nicht möglich
#53	<i>Priorisierung in der Holznutzung: stofflich vor energetisch</i>	<i>Handlungsansatz</i>	<i>Bewertung möglich, wenn Informationen zur konkreten Ausgestaltung und zu Instrumenten vorliegen.</i>
#54	Umweltfolgen des Verbrauchs von Holz untersuchen und abgeschätzten, Ergebnisse an zentralem Ort verfügbar machen	Handlungsansatz	Bewertung nicht möglich
#55	<i>Anpassung von Anreizstrukturen und Förderinstrumenten um langlebige Produkte, Wiederverwendung und Nutzungskaskaden zu fördern</i>	<i>Handlungsansatz</i>	<i>Bewertung möglich, wenn Informationen zur konkreten Ausgestaltung und zu Instrumenten vorliegen.</i>
#56	Setzung von Richtwerten für nachhaltige, die planetaren Grenzen berücksichtigende Verbräuche von Holz aus Wäldern	Handlungsansatz	Bewertung nicht möglich
#57	Förderung des Wissenstransfers zwischen Akteuren, Forschung und Ausbildung	Handlungsansatz	Bewertung nicht möglich

Quelle: eigene Darstellung.

Tabelle 29: Detaillierte Ergebnisse der Bewertung von bewertbaren Maßnahmen der Stellungnahmen des BÖR

N. o.	Titel Maßnahme	Biomassepotenzial	Biomassequalität	Zeitliche Entwicklung des Potenzials	Kosten	Flächenbelegung und Risiken der Flächenkonkurrenz	Gefahr von Verdrängungseffekten der Produktion	Andere ökonomische Wirkungen, z.B. Synergien/Konflikte mit Zielen der landlichen Entwicklungspolitik	Synergien und Konflikte mit anderen Umweltzielen				Mögliche Politikmaßnahmen für die Begleitung der Umsetzung	Wichtige Voraussetzungen für die Realisierung von Potenzialen/Szenarioannahmen	Möglicher Politikrahmen für die Umsetzung	Mögliche Politikmaßnahmen für die Begleitung der Umsetzung
									► Ressourcenschutz	► Klimaschutz	► Wasserschutz	► Biodiversitätsschutz				
1	Den Fokus auf Ernährungssicherung legen, Agrarprodukte nicht mehr für die Erzeugung von Energie einsetzen	entspricht der für Energiezwecke angebauten Biomasse: 2019 ca. 800 Tha, davon 2/3 Raps, 1/3 sonstige Getreide; 1 Mio. ha Mais für Biogas; insgs. 1,8 Mio. ha (FNR 2020)	hoch, da überwiegend produktive Ackerstandorte	kurzfristig, da sofort umsetzbar, auf 12 Monate begrenzt	mittel, z.B. durch flankierende Politiken, z.B. EU-Initiative zu Ausgleichsmechanismen für Produktionsausfälle der Bioenergieerzeuger	gering, verringert generell Flächenkonkurrenz	mittel, muss durch Politiken flankiert werden um nicht erhöhte Importe zu verursachen	gering, da Produktionssysteme bestehen bleiben	gering, Anbauflächen bleiben gleich, wie auch Produktionsbedingungen, z.B. Düngemiteleinsatz etc.	gering, da Emissionen durch Anbauformen ggf. gleich bleiben	gering, da Anbauformen ggf. gleich bleiben	gering, da Anbauformen ggf. gleich bleiben	Bioenergiebranche	Schnelle Umsetzung	offen	Flankierende Politiken zur Verringerung der Nachfrage nach Bioenergie um nicht erhöhte Importe zu verursachen
2	Tierbestände zeitlich befristet reduzieren und Futtermittel umlenken	Nicht quantifizierbar da unklar wie Wirkung auf Biomassepotenziale sein wird	hoch, da überwiegend produktive Ackerstandorte	kurzfristig, da sofort umsetzbar, als kurzfristig geplant	mittel, z.B. durch flankierende Politiken, z.B. Ausgleich für Produktionsausfälle der Landwirte	gering, verringert generell Flächenkonkurrenz	mittel, muss durch Politiken flankiert werden um nicht erhöhte Importe zu verursachen	negativ, es muss eine Umstellung bei Landwirten stattfinden, Frage ob dies zeitlich befristet sinnvoll ist	gering, Anbauflächen bleiben gleich, wie auch Produktionsbedingungen, z.B. Düngemiteleinsatz etc.	positiv, wenn THG-Emissionen aus LW langfristig sinken	positiv, wenn Nitratbelastung langfristig verringert werden kann	gering, da Anbauformen ggf. gleich bleiben	Verbraucher:innen, Landwirte in der Fleisch- und Milchproduktion	Tierbestände gehen bereits stark zurück durch hohe Preise, Frage was an zusätzlichen Maßnahmen wirken kann	Abstockungsprämie, (Öko-Institut et al. 2019)	Flankierende Politiken zur Verringerung der Nachfrage nach Fleisch und Molkereiprodukten um nicht erhöhte Importe zu verursachen
3	Den Fleischkonsum durch steuerliche Anreize und Investitionen in neue Verfahren senken	Nicht quantifizierbar da unklar wie Wirkung auf Biomassepotenziale sein wird	unbekannt, größere Flächenverfügbarkeit in DE und im Ausland	mittelfristig	mittel, z.B. durch flankierende Politiken, z.B. Ausgleich für Produktionsausfälle der Landwirte	gering, verringert generell Flächenkonkurrenz	mittel, muss durch Politiken flankiert werden um nicht erhöhte Exporte zu verursachen	negativ, es muss eine Umstellung bei Landwirten stattfinden	positiv, wenn Input für Produktion von Futtermitteln sinkt	positiv, wenn THG-Emissionen aus LW sinken	positiv, wenn Nitratbelastung verringert werden kann	positiv, wenn freiwerdende Flächen entsprechend zum Biodiversitätsschutz genutzt werden	Verbraucher:innen, Landwirte in der Fleisch- und Milchproduktion	Flankierende Maßnahmen um nicht erhöhte Exporte zu verursachen	Mehrwertsteueranpassung	Flankierende Politiken zur Vermeidung, dass Produkte exportiert werden
4	Möglichkeiten der nationalen Umsetzung der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) besser nutzen, um die landwirtschaftliche Produktivität nachhaltig zu erhöhen	Nicht quantifizierbar da unklar wie Wirkung auf Biomassepotenziale sein wird	unbekannt	mittelfristig	gering, da Verlagerung durch Fördermittel	gering, verringert generell Flächenkonkurrenz	mittel, muss durch Politiken flankiert werden um nicht erhöhte Importe zu verursachen	gering, da es lediglich eine Umschichtung bestehender Förderungen bedeutet	positiv, wenn Input für Produktion von Futtermitteln sinkt	positiv, wenn Flächen zum Senkenausbau genutzt werden	positiv, wenn Stickstoffbelastung verringert werden kann	positiv, wenn freiwerdende Flächen entsprechend zum Biodiversitätsschutz genutzt werden	Landwirte	Nationale Ausgestaltung der GAP	GAP ermöglicht Umsetzung auf nationaler Ebene (Öko-Institut 2022)	
5	Den Energieverbrauch im Verkehr anpassen	Verringerter jährlicher Verbrauch von 800 Mio. L Kraftstoff	hoch, da überwiegend produktive Ackerstandorte	kurzfristig, da sofort umsetzbar, auf 12 Monate begrenzt	mittel, z.B. durch flankierende Politiken, z.B. EU-Initiative zu Ausgleichsmechanismen für Produktionsausfälle der Bioenergieerzeuger	gering, verringert generell Flächenkonkurrenz	mittel, muss durch Politiken flankiert werden um nicht erhöhte Importe zu verursachen	gering, da Produktionssysteme bestehen bleiben	gering, Anbauflächen bleiben gleich, wie auch Produktionsbedingungen, z.B. Düngemiteleinsatz etc.	positiv, wenn insgesamt Energieverbrauch sinkt	gering, da Anbauformen ggf. gleich bleiben	gering, da Anbauformen ggf. gleich bleiben	Bioenergiebranche	Schnelle Umsetzung	offen	Flankierende Politiken zur Verringerung der Nachfrage nach Bioenergie um nicht erhöhte Importe zu verursachen

N o.	Titel Maßnahme	Biomassepotenzial	Biomassequalität	Zeitliche Entwicklung des Potenzials	Kosten	Flächenbelegung und Risiken der Flächenkonkurrenz	Gefahr von Verdrängungseffekten der Produktion	Andere ökonomische Wirkungen, z.B. Synergien/Konflikte mit Zielen der ländlichen Entwicklungspolitik	Synergien und Konflikte mit anderen Umweltzielen				Mögliche Politikmaßnahmen für die Begleitung der Umsetzung	Wichtige Voraussetzungen für die Realisierung von Potenzialen/Szenarioannahmen	Möglicher Politikrahmen für die Umsetzung	Mögliche Politikmaßnahmen für die Begleitung der Umsetzung
									► Biodiversitätsschutz	► Wasserschutz	► Klimaschutz	► Ressourcenschutz				
6	Regionale Leuchtturm- und Modellprojekte sowie Demonstrationsvorhaben als geschützte Innovationszonen zur schnelleren Umsetzung von Agroforst- und mehrjährigen Kulturpflanzensystemen in die Praxis etablieren	Nicht quantifizierbar da unklar wie Wirkung auf Biomassepotenziale sein wird	hoch, da überwiegend produktive Ackerstandorte	mittelfristig	unbekannt	unbekannt	unbekannt	unbekannt	unbekannt	unbekannt	unbekannt	unbekannt	Landwirte, Wissenschaft und Forschung	-	-	-
7	Bei Einsatz von Agri-PV flächeneffiziente Lösungen verbindlich bevorzugen	Nicht quantifizierbar da unklar wie Wirkung auf Biomassepotenziale sein wird	unbekannt	mittelfristig	unbekannt	gering, erhöht die Flächeneffizienz	gering, erhöht die Flächeneffizienz	positiv, da PV Zusatznutzen hat, wie Schutz vor Witterung, Ernteverluste werden durch Erlöse für Strom ausgeglichen, Betriebseinnahmen werden diversifiziert	neutral, abhängig von konkreter Umsetzung	positiv	neutral, abhängig von konkreter Umsetzung	neutral, abhängig von konkreter Umsetzung	Landwirte, regionale Bevölkerung	Steuerung der Installation von PV, z.B. regionale Höchstgrenzen; Regelungen zu Flächeneffizienz, z.B. 85% des Ertrags muss erhalten werden	-	-
8	Förderung des Konsums nachhaltiger pflanzlicher Proteine und alternativer Proteinquellen durch Instrumente der Prozesspolitik wie durch die Anpassung des Mehrwertsteuersatzes oder die Einbindung in den Emissionszertifikat Handel	Potenzial steigt, da weniger Fläche für Futtermittel (weniger Fläche pro kcal) benötigt wird	unbekannt	kurzfristig	mittel, abhängig von begleitenden Politiken, wie z.B.: stärker reduzierter Mehrwertsteuersatz auf pflanzliche Produkte, Ausgleichszahlungen für Abstockung	gering, verringert generell Flächenkonkurrenz	gering, verringert generell Flächenkonkurrenz	positiv, wenn Kosten für Verbraucher:innen sinken	positiv	positiv	positiv, reduzierte Stickstofffracht	positiv, reduzierte Stickstofffracht	Verbraucher:innen, Landwirte, Verarbeitungsbetriebe	-	-	reduzierter Mehrwertsteuersatz auf pflanzliche Produkte, Ausgleichszahlungen für Abstockung
9	Rohstoffbasis von Biogasanlagen muss nachhaltig transformiert werden und weniger abhängig von einjährigen und in Monokultur angebauten Energiepflanzen, wie Energiemaïs werden	Potenzial verringert sich durch weniger hohe Erträge alternativer Substrate	unbekannt	mittelfristig	mittel, abhängig von begleitenden Politiken, wie z.B. Förderungen	mittel, hängt davon ab welche Alternativsubstanz zur Anwendung kommen	mittel, hängt davon ab welche Alternativsubstanz zur Anwendung kommen	neutral, da Produktionssysteme generell bestehen bleiben	positiv	positiv in Bezug auf landwirtschaftliche Produktion	positiv	positiv	Landwirte, regionale Bevölkerung	-	EEG	Regelungen für Anlagen außerhalb des EEG, Nachfrage nach Biomethan aus dem Verkehrssektor
10	Die Verwendung von Holz in langfristig nutzbaren und klimaeffizienten	Potenzial für Altholz sinkt durch längere	unbekannt	mittelfristig	gering	gering, verringert generell	gering, fördert Ressourceneffizienz und verringert	positiv, wenn Wertschöpfung von Holzprodukten	positiv	positiv	neutral	neutral	Waldbesitzende, Bauwirtschaft, Architekten	-	Bauvorschriften, Baufinanzierungsinstrumente	Förderung der Nutzung von Laubholz

N. o.	Titel Maßnahme	Biomassepotenzial	Biomassequalität	Zeitliche Entwicklung des Potenzials	Kosten	Flächenbelegung und Risiken der Flächenkonkurrenz	Gefahr von Verdrängungseffekten der Produktion	Andere ökonomische Wirkungen, z.B. Synergien/Konflikte mit Zielen der ländlichen Entwicklungspolitik	Synergien und Konflikte mit anderen Umweltzielen				Mögliche Politikmaßnahmen für die Begleitung der Umsetzung	Wichtige Voraussetzungen für die Realisierung von Potenzialen/Szenarioannahmen	Möglicher Politikrahmen für die Umsetzung	Mögliche Politikmaßnahmen für die Begleitung der Umsetzung
									► Biodiversitätsschutz	► Wasserschutz	► Klimaschutz	► Ressourcenschutz				
	Konstruktionen gezielt fördern.	Nutzung von Produkten				Flächenkonkurrenz	Nachfrage nach frischer Biomasse	gesteigert werden kann								
11	Priorisierung in der Holznutzung: stofflich vor energetisch	Verschiebung des Potenzials von energetisch zu stofflich, Herausforderung verschiedener Qualitäten	unbekannt	kurzfristig	mittel	gering, verringert generell Flächenkonkurrenz	mittel, muss durch Politiken flankiert werden um nicht erhöhte Importe zu verursachen	neutral, wenn Wertschöpfung von Holzprodukten gesteigert werden kann um Verlagerung zu kompensieren	positiv	positiv	neutral	neutral	Waldbesitzende, Bioenergiebranche	-	Angleich des Mehrwertsteuersatzes für Energieholz	Reduktion der Nachfrage nach Energieholz durch Förderung von Wärmepumpen u.a. alternativen Wärmequellen
12	Anpassung von Anreizstrukturen und Förderinstrumenten um langlebige Produkte, Wiederverwendung und Nutzungskaskaden zu fördern	Potenzial für Altholz sinkt durch längere Nutzung von Produkten	unbekannt	mittelfristig	gering	gering, verringert generell Flächenkonkurrenz	gering, fördert Ressourceneffizienz und verringert Nachfrage nach frischer Biomasse	positiv, wenn Wertschöpfung von Holzprodukten gesteigert werden kann	positiv	positiv	neutral	neutral	Industrie, Handel, Verbraucher:innen	-	-	Förderung der Nutzung von Laubholz

	keine Angabe/unbekannt
	Risiken/Kosten/Konflikte gering, kurzfristig, positive Wirkungen
	Risiken/Kosten/Konflikte mittel, mittelfristig, neutrale Wirkungen
	Risiken/Kosten/Konflikte hoch, langfristig, negative Wirkungen

Quelle: eigene Darstellung.

B Daten zum Biomasseaufkommen

B.1 Agrarische Biomasse

Tabelle 30: Aufstellung zur Produktion (Anbau) von agrarischer Biomasse in Deutschland, (Status quo)

		Flächenbelegung in Deutschland (Tsd. Hektar pro Jahr)	Fläche Ökolandbau (Tsd. Hektar pro Jahr)	Erträge Gesamt (Tsd. Tonnen pro Jahr)
Getreide	Weizen	2.918	165	22.073
	Roggen	619	64	3.324
	Gerste	1.596	42	10.796
	Triticale	331	24	1.958
	Körnermais	436	22	4.107
	Hafer	165	54	755
	sonst. Körnergetreide	10	9	31
Silage/Futter	Silagemais	2.183	k.A.	91.844
	Ackergras	312	1	1.983
	Leguminosen- ganzpflanzen	338	k.A.	2.399
	sonstige Ganzpflanzen	124	k.A.	2.800
Hackfrucht	Kartoffeln	266	11	11.237
	Zuckerrübe	391	5	29.588
	sonst. Hackfrüchte	147	0	
Ölsaaten und Leguminosen	Raps	1.011	3	3.767
	Sonnenblume	51	7	161
	sonst. Ölsaaten	18	4	
	Hülsenfrüchte (ohne Soja)	227	67	535
	Soja	25	k.A.	112
Sonstiges	Gemüse auf Ackerland	144	18	k.A.
	Saatgutgewinnung u.a.	116	k.A.	k.A.
	Brache	366	19	
	Freiland	125	k.A.	3.573

		Flächenbelegung in Deutschland (Tsd. Hektar pro Jahr)	Fläche Ökolandbau (Tsd. Hektar pro Jahr)	Erträge Gesamt (Tsd. Tonnen pro Jahr)
	Gemüse Gewächshaus	1	k.A.	194
Zwischenfrüchte ^{a)}	Sommer-gründüngung	391	k.A.	1.955
	Winter-gündüngung	1.336	k.A.	6.680
	Sommer-Futtermgewinnung	45	k.A.	224
	Winter-Futtermgewinnung	157	k.A.	785
	Sommer - Biogas	13	k.A.	63
	Winter - Biogas	33	k.A.	164
Obst-/Weinbau	Baumobst	47	k.A.	1.207
	Strauchbeeren	9	k.A.	43
	Erdbeeren	15	k.A.	133
	Wein	103,4	k.A.	k.A.
Dauergrünland	Wiesen	1.973	828	11.871
	Weiden	2.520	(in Wiesen enthalten)	14.254
	ertragsames Dauergrünland	227	k.A.	k.A.

a) Flächenangaben für Zwischenfrüchte sind nicht in die Gesamtsumme der Fläche einzurechnen

Quellen: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Feldfruechte-Gruenland/Tabellen/ackerland-hauptnutzungsarten-kulturarten.html?view=main%5BPrint%5D#fussnote-A-123084>

Tabelle 31: Verwendung der in Deutschland erzeugten agrarischen Biomasse (Status quo)

		Nahrungs- mittel	Futter- mittel	Stoffliche Nutzung	Energie- pflanzen
Getreide	Weizen	7.402	6.609	1.146	1.733
	Roggen	574	2.175	87	410
	Gerste	19	5.104	1.539	644
	Triticale	0	1.569	74	317
	Körnermais	364	5.084	357	560
	Hafer	499	369	0	40
	sonst. Körnergetreide	16	2		
Silage/Futter	Silagemais		58.780		33.064
	Ackergras		1.487		496
	Leguminosen- ganzpflanzen		1.799		600
	sonstige Ganzpflanzen		2.100		700
Hackfrucht	Kartoffeln	720	224	1.233	
	Zuckerrübe				2.013
	Zucker	4.700		263	
	Schnitzel		1.712		
Ölsaaten und Leguminosen	Raps	1770	1.063		1.384
	Sonnenblume				
	sonst. Ölsaaten				
	Hülsenfrüchte (ohne Soja)	64	471		
	Soja	22	90		
Zwischenfrüchte	Sommer- Futtergewinnung		224		
	Winter- Futtergewinnung		785		
	Sommer - Biogas				63
	Winter - Biogas				164
Obst/Gemüse	Gemüsebau	3.767			
	Erdbeeren	133			

		Nahrungs- mittel	Futter- mittel	Stoffliche Nutzung	Energie- pflanzen
	Baumobst	1.207			
	Strauchbeeren				
Dauergrünland	Wiesen		11.871		
	Weiden		14.254		

Quelle: <https://www.bmel-statistik.de/ernaehrung-fischerei/versorgungsbilanzen/getreide>

sowie weitere Versorgungsbilanzen auf: <https://www.bmel-statistik.de/ernaehrung-fischerei/versorgungsbilanzen/>

Tabelle 32: Importe von und Exporte nach Deutschland von agrarischen Biomassen (Status quo)

		Import	Export	Import minus Export Saldo
Getreide	Weizen	6.723	9.258	-2.535
	Roggen	523	478	45
	Gerste	1.798	3.964	-2.166
	Triticale	358	120	238
	Körnermais	3.450	1.132	2.318
	Hafer	582	347	235
	sonst. Körnergetreide	162	147	15
	Reis	380		-380
Hackfrucht	Kartoffeln	2.500	6.000	-3.500
	Zuckerrübe	0	0	0
	Zucker	388	1.664	-1.276
Ölsaaten und	Rapssaat	5.627	98	5.529
Leguminosen	Rapssöl	380	1.090	-710
	Rapsschrot	3224	3775	551
	Sonnenblumenkerne	319		319
	Sonnenblumenöl	469		469
	Sonnenblumenschrot	344		344
	Sojabohnen	3.375		3.375
	Sojaöl	134		134
	Sojaschrot	581		581
	Palmöl-/Palmkernöl	1.106		717
	Palmkernschrot	177		177
	Kokosöl	235		235
	Sonstige Öle	1.039		1.039
Sonstiges	Gemüse	4.500		-4.500
	Erdbeeren	1.102		-1.102
	Zitrusfrüchte	1.320		-1.320
	andere Südfrüchte	1.933		-1.933
	Wein(trauben)	675		-675
	Trocken- und Schalenfrüchte	766		-766

		Import	Export	Import minus Export Saldo
	Kakao	770		-770
	Kaffee	1.260		-1.260
	Tee	50,3		-50,3
	Baumwolle	480		-480

Quelle: BLE: https://www.bzl-datenzentrum.de/fileadmin/SITE_MASTER/content/Downloads/Oele/2023BerichtOele.pdf
<https://www.bmel-statistik.de/fileadmin/daten/SJT-6020200-0000.xlsx>

B.2 Forstliche Biomasse

Tabelle 33: Datengrundlage für die Aufstellung zur Produktion von forstlicher Biomasse

in Tsd. m ³	Pilotbericht Bioökonomie	Einschlags- rückrechnung (ERR)	nach Daten von Mantau	Verwendete Werte	
	(Bringezu et al. 2020)	(Jochem et al. 2022)	(anteilig auf ERR umgerechnet)	tsd. m ³	tsd. t lutro
Rohholzentnahme	69000	82.400		82.400	62.189
Davon Nadelholz		64.500		64.500	48.679
Davon Laubholz		17.900		17.900	13.509
Rohholzimport	9.400	6.300		6.300	4.755
Rohholzexport	2500	11.500		11.500	8.679
Stammholz in Sägereien	36.000	41.400		41.400	31.245
Davon Nadelholz			38.717	38.717	29.220
Davon Laubholz			2.683	2.683	2.025
Davon Schnittholz	23.200		24.558	24.558	18.534
Davon Sägenebenprodukte	12.830		16.842	16.842	12.711
Davon in PPK	3000		2.446	2.813	2.123
Davon in HWI	4000		3.789	4.358	3.289
Davon energetisch	5000		8.408	9.670	7.298
Sonstiges (Derb)Holz	40.600	37.000		37.000	27.925
Davon Nadelholz				22.983	17.346
Davon Laubholz				14.017	10.579
Davon in PPK	6000	5.600		5.600	4.226
Davon in HWI	13600	5.600		5.600	4.226
Davon energetisch	21.000	23.800		23.800	17.962
Waldrestholz (Nicht-Derbholz)		4.000		4.000	3.124
Rinde			4.300	4.300	3.358
Davon stofflich			2.000	2.000	1.509
Davon energetisch			2.300	2.300	1.736

Tabelle 34: Übersicht der Biomassepotenziale aus Forsten - Status quo und Entwicklung zum Jahr 2045 hin

in Tsd. m ³	SZENARIO 2045	
	tsd. m ³	tsd. t lutro
Rohholzentnahme	58.500	44.151
Davon Nadelholz	34.242	25.843
Davon Laubholz	24.258	18.308
<i>Rohholzimport</i>	-	-
<i>Rohholzexport</i>	-	-
Stammholz in Sägereien	41.400	31.245
Davon Nadelholz	30.973	23.376
Davon Laubholz	10.427	7.869
Davon Schnittholz	24.558	18.534
Davon Sägenebenprodukte	16.842	12.711
Davon in PPK	2.813	2.123
Davon in HWI	4.358	3.289
Davon energetisch	9.670	7.298
Sonstiges (Derb)Holz	17.100	12.906
Davon Nadelholz	3.269	2.467
Davon Laubholz	13.831	10.439
Davon in PPK	5.600	4.226
Davon in HWI	7.600	5.736
Davon energetisch	631	477
Waldrestholz (Nicht-Derbholz)		
Rinde		
Davon stofflich		
Davon energetisch		

Quelle: Annahmen und Berechnungen des ifeu

C Daten und Ergebnisse zur Rohstoffeffizienz KRA

Tabelle 35: Daten zu KRA_{biotisch} sowie Rohstofferhaltungs-Faktoren für eine Auswahl an Produkten aus Biomasse

Produkt	Rohstoff	KRA _{biotisch} kg Rohstoff/ kg C im Produkt	KRA _{bio-rest} kg Rohstoff/ kg C im Produkt	Rohstoff- erhaltungs- Faktor	KRA _{bio-eff} kg Rohstoff/ kg C im Produkt
Bauholz	Waldholz	2	1,6	0,9	0,2
Holzmöbel (Vollholz)	Waldholz	2	1,6	0,9	0,2
Holzmöbel (Holzwerkstoff)	Wald- und Industriestholz	2	1	0,9	0,2
Verpackungsholz	Waldholz	2	1,6	0,9	0,2
Papier (Mix)	Wald- /Industriest- holz, Altpapier	2	2	0,9	0,2
Papier (Recycling)	Altpapier	0	3	0,9	0,0
Textilien	Baumwolle	8	0	0,9	6,2
	Waldholz	2	3	0,9	0,2
Basischemikalien					
Methanol	Waldholz	6,92	0,00	0,9	4,52
	Altholz	0,00	6,92	0,9	0,00
Ethanol	Getreide	3,19	2,56	0,9	1,47
	Zuckerrübe	3,83	0,58	0,9	2,11
	Stroh	0	4,79	0,9	0,00
Polymere					
Biokunststoffe	Getreide	4,17	4	0,9	2,37
	Zuckerrübe/ Zuckerrohr	5,00	0,9	0,9	3,20
Schmierstoffe					
	Rapsöl	1,56	0,39	0,5	0,91
	Altspeiseöl	0	1,69	0,5	0
Kraftstoffe					
Biodiesel					
	Raps	1,56	0,39	0	1,6
	Altspeiseöl	0	1,43	0	0
Biokerosin					

Produkt	Rohstoff	KRA ^{biotisch} kg Rohstoff/ kg C im Produkt	KRA ^{bio-rest} kg Rohstoff/ kg C im Produkt	Rohstoff- erhaltungs- Faktor	KRA ^{bio-eff} kg Rohstoff/ kg C im Produkt
	Raps				
	Altspeiseöl	0	0	0	0
Ethanol					
	Getreide	3,19	2,56	0	3,19
	Zuckerrübe	5,48	0,96	0	5,48
	Stroh	0	4,79	0	0,00
Methanol	Waldholz	6,92	0,00	0	6,92
Industrielle Wärme					
	Waldholz	2	0	0	2
	Altholz	0	2	0	0
Gebäudewärme					
dezentral	Waldholz	2	0	0	2
		0	0	0	0
Fernwärme	Biomethan Mais	1,8	0	0	1,8
	Biomethan Gülle	0	1,5	0	0,0
Strom					
	Waldholz	2	0	0	2
	Altholz	0	2	0	0
	Biogas Mais	1,79	0	0	1,8
	Biogas Gülle	0	1,47	0	0,0

D Daten und Ergebnisse zum Klimaschutz

Tabelle 36: Daten zu THG-Emissionen der Herstellung und Nutzung von Produkten aus Biomasse sowie Referenzwerte zum einen auf fossiler oder mineralischer Basis für den Status quo.

Biomasse-Produkt		THG-Emission SQ kg CO ₂ -Äq/kg Produkt	Referenz- produkte	THG-Emission SQ kg CO ₂ -Äq/kg Referenz- produkt	CO ₂ Emission aus biobasierte m Produkt kg CO ₂ -Äq/kg Produkt	CO ₂ Emission aus fossilem Referenz- Produkt kg CO ₂ -Äq/kg Referenz- produkt
Bauholz	Waldholz	0,179	Beton 1, Stahl 2	3,00	0,64	
Holzmöbel (Vollholz)	Waldholz	0,538	Kunststoff, Metall	1,41	0,86	0,65
Holzmöbel (Holzwerkstoff)	Wald- und Industriesth olz	1,538	Kunststoff, Metall	1,41	1,38	1,03
Verpackungsh olz	Waldholz	0,197	Kunststoff	2	1,78	2,67
Papier (Mix)	Wald- /Industriest -holz, Altpapier	2,328	e-reader	4	1,78	
Papier (Recycling)	Altpapier	0,491	Kunststoff	0,9	1,78	0,83
Textilien	Baumwolle	4,05	Polyester	4,93	1,78	2,67
	Waldholz	3,33	Polyester	4,93	1,78	2,67
Basischemikali en				0	0,00	
Methanol	Waldholz	0,324	Ethylen/Propyl en	0,66	1,38	1,20
	Altholz	0,274	Ethylen/Propyl en	0,66	1,38	1,20
Ethanol	Getreide	0,810	Ethylen/Propyl en	0,91	1,91	1,67
	Zuckerrübe	0,675	Ethylen/ Propylen	0,91	1,91	1,67
	Stroh	0,370	Ethylen/ Propylen	0,91	1,91	1,67
Polymere				0	0,00	

Biomasse-Produkt		THG-Emission SQ kg CO ₂ Äq/kg Produkt	Referenz- produkte	THG-Emission SQ kg CO ₂ Äq/kg Referenz- produkt	CO ₂ Emission aus biobasierte m Produkt kg CO ₂ Äq/kg Produkt	CO ₂ Emission aus fossilem Referenz Produkt kg CO ₂ Äq/kg Referenz- produkt
Biokunststoffe	Getreide	2,50	Polyolefin	3	1,83	2,75
	Zuckerrübe / Zuckerrohr	2,00	Polyolefin	3	1,83	2,75
Schmierstoffe				0	0,00	
	Rapsöl	0,93	Basisöl	1,4	2,80	2,72
	Altspeiseöl	0,074	Basisöl	1,4	2,80	2,72
Kraftstoffe				0		
Biodiesel				0		
	Raps	0,925	Diesel	2,65	2,82	
	Altspeiseöl	0,411	Diesel	2,65	2,82	
Biokerosin					0,00	
	Raps	1,11	Kerosin	3,16	2,82	
	Altspeiseöl	0,444	kerosin	3,16	2,82	
Ethanol					0,00	
	Getreide	0,810	Benzin	1,76	1,91	
	Zuckerrübe	0,675	Benzin	1,76	1,91	
	Stroh	0,370	Benzin	1,76	1,91	
Methanol	Waldholz	0,324	Benzin	1,76	1,38	
Industrielle Wärme					0,00	
	Waldholz	0,294	Erdgas	2,35	1,83	
	Altholz	0,235	Erdgas	2,35	1,83	
Gebäude- wärme				0	0,00	
dezentral	Waldholz	0,335	Wärmemix	2,35	1,83	
				0	1,83	
Fernwärme	Biomethan Mais	0,528	Wärmemix	0,80	2,75	

Biomasse- Produkt		THG- Emission SQ kg CO ₂ Äq/kg Produkt	Referenz- produkte	THG- Emission SQ kg CO ₂ Äq/kg Referenz- produkt	CO ₂ Emission aus biobasierte m Produkt kg CO ₂ Äq/kg Produkt	CO ₂ Emission aus fossilem Referenz Produkt kg CO ₂ Äq/kg Referenz- produkt
	Biomethan Gülle	0,172		0,80	2,75	
Strom					0,00	
	Waldholz	0,29	Strommix	2,00	1,83	
	Altholz	0,24	Strommix	2,00	1,83	
	Biogas Mais	0,784	Strommix	0,78	2,75	
	Biogas Gülle	0,19	Strommix	0,78	2,75	

E Der Hemerobieansatz zur Bewertung von Flächen bezüglich ihrer ökologischen Wertigkeit

Nachfolgende Passagen sind im Wesentlichen dem Bericht zum UBA-Forschungsprojekt „Flächenrucksäcke für Güter und Dienstleistungen“ entnommen (Fehrenbach et al. 2021b).

E.1 Grundprinzipien des Hemerobieansatzes

Hemerobie als Maß zur Bewertung von Flächeninanspruchnahme in Ökobilanzen wurde erstmals von (Klopffer, Renner 1995) empfohlen. Sie nahmen dabei Bezug auf das von (Sukopp 1972) entwickelte System zur Einordnung von Lebensräumen und Vegetationstypen mit einer ordinalen Skala von ahemerob (keine anthropogenen Einflüsse) bis metahemerob (Biozönose vollständig vernichtet). Der darauf aufbauende Ansatz von (Giegrich, Sturm 1996) für Waldflächen wurde von (Schmitz, Paulini 1999) für die Wirkungskategorie Naturraumbeanspruchung in die sogenannte UBA-Bewertungsmethode aufgenommen. Seither wurde das Konzept stetig weiterentwickelt (Fehrenbach et al. 2015).

Das **Schutzgut** ist mit der von (Kowarik 2004) vorgelegten Definition des Hemerobiegrads definiert als: ***Die Selbstregulationsfähigkeit von Ökosystemen auf der Grundlage des aktuellen Standortpotenzials.***

Auf der Ebene der **Sachbilanz** werden die Flächendaten (temporäre Flächenbelegung und Flächennutzungsänderung) einer Hemerobieklasse zugeordnet. Die vergleichsweise grobe Einteilung in sieben Klassen ermöglicht im Übrigen eine Zuordnung zu üblicherweise verwendeten Typologien der Landnutzung. Ein Flächentyp wie z.B. artenreiches Extensivgrünland kann beispielsweise recht zielsicher der Klasse III zugeteilt werden, jedoch nicht **einem** Wert auf einer gleitenden kardinalen Skala (z.B. 3,24). Die Reduktion der Komplexität auf einen einzigen, auf einer kardinalen Skala messbaren, Qualitätsparameter für Fläche, kann nicht auf der Ebene der Sachbilanz erfolgen. Sie ist erst auf der Ebene der **Wirkungsabschätzung** möglich (siehe unten).

Die Zuordnung von Flächen zu Hemerobieklassen erfolgt anhand einer Systematik von Kriterien und Messgrößen in einem Punktwerteverfahren. Um der Vielfältigkeit der Flächenzustände gerecht zu werden, muss das Kriterien-System flächenbezogene Informationen möglichst breit abfragen, allerdings in der Datenerhebung praktikabel bleiben. In Ökobilanzen wird i.d.R. nicht eine einzelne konkrete Fläche untersucht, sondern ein generisches Datum für z. B. das Produkt ein Kilogramm (kg) Weizenmehl benötigt (Reißmann, Fehrenbach 2019).

Tabelle 37 zeigt die Verortung der grundlegenden Flächennutzungsarten Wald/Forst, Grünland, Ackerland sowie verschiedene Siedlungsflächen mit ihren Bandbreiten in den Hemerobieklassen. Die höchste Kategorie (Hemerobieklasse I, unbeeinflusstes Ökosystem, z. B. Primärwald) spielt für die konkrete Anwendung in Ökobilanzen in Bezug auf die temporäre Flächenbelegung keine Rolle. Die Nutzung ist hier per Definition ausgeschlossen. Solche Flächen können jedoch durch Flächennutzungsänderung betroffen sein (Fehrenbach et al. 2015).

Im Vordergrund stehen die Flächen, auf denen produziert wird (z. B. forstlich genutzter Wald, Agrarland, Rohstoffabbauflächen), oder die anderweitig innerhalb der Systemgrenze genutzt werden (z.B. Deponie, Siedlungen). Diese Flächen werden gemäß Kriterien und Messgröße je nach Ergebnis des Punktwerteverfahrens in die Hemerobieklassen II bis VII einsortiert (Reißmann, Fehrenbach 2019). Über welche Klassen sich die einzelnen Flächennutzungsarten, wie in Tabelle 37 dargestellt, verteilen, begründet sich auf den Originalarbeiten zu Hemerobieklassensystemen von (Jalas 1955), (Sukopp 1972), (Blume, Sukopp 1976), (Kowarik

2004) sowie den bereits ökobilanzorientierten Einteilungen von (Klöppfer, Renner 1995) und (Giegrich, Sturm 1996).

Siedlungsflächen sind, so sie versiegelt oder überbaut sind, generell in Klasse VII eingeteilt. Zu den Siedlungsflächen zählen auch Rohstoffabbauflächen und Brachen. Letztere sind vom Grundsatz her mit Agrarflächen vergleichbar, da es sich entweder um (vorübergehend) stillgelegte Ackerflächen handelt oder solchen ähneln. Für diese Art Brachflächen ist daher auch eine Einteilung in die Klassen IV bis VI vorgesehen. Industrielle Brachflächen können auch Bebauungen oder Versiegelungen aufweisen, für die Klasse VII gilt.

Rohstoffabbauflächen sind zumeist mit vollständiger Devastierung und schwerwiegender Beeinträchtigung von Ökosystemen verbunden. Sie finden sich daher überwiegend in Klasse VII.

Tabelle 37: Das Klassensystem der Hemerobieklassen mit indikativen Zuordnungen der Bandbreiten verschiedener Flächennutzungsarten

Hemerobie- klasse	Wald/Forstwirtschaft	Landwirtschaft	Siedlungsflächen
I natürlich	Urwald, keine Nutzung		
II			
III	Mehr bis weniger naturnah	Grünland, extensiv, artenreich bis intensiv	
IV	bewirtschaftete Wälder, Forste.		
V		Ackerland, extensiv, bis intensiv	Brachen
VI	Holzplantagen		Abbauflächen
VII			Versiegelung

Gestrichelte Grenzlinien zeigen Extremfälle, im Positiven (Rohstoffabbauflächen mit hohem Naturwertpotenzial) wie Negativen (Holzplantagen mit dauerhafter Schädigung der Selbstregulationsfähigkeit von Ökosystemen wie z.B. Eukalyptusplantagen).

Quelle: Eigene Darstellung 2021, ifeu, erweitert nach (Fehrenbach et al. 2015)

E.2 Anwendung des Hemerobieansatzes auf Wald und Forstflächen

Die Begriffe Forst und bewirtschafteter Wald oder Wirtschaftswald werden hier gemäß den **Definitionen** der (FAO 2016) sowie im Bundeswaldgesetz (BMJV 2017) synonym verwendet. Sie schließen auch sogenannte Plantagenwälder als gepflanzte, intensiv bewirtschaftete Wälder, die hauptsächlich aus einer oder zwei einheimischen oder nicht-einheimischen Baumarten von gleichem Alter bestehen und hauptsächlich für produktive Zwecke angelegt sind, ein. Kurzumtriebsplantagen, d.h. Umtriebszeiten von nicht länger als 20 Jahren, werden jedoch gemäß BWaldG zu den landwirtschaftlichen Flächen gerechnet.

Der **bisher verwendete Ansatz** zur Einstufung von Wäldern in verschiedene Hemerobieklassen wurde von (Giegrich, Sturm 1996) vorgelegt. Er baut auf dem Leitbild einer *Waldbewirtschaftung auf, das die dynamischen Veränderungen als Grundeigenschaft aller lebenden Systeme auf den Ebenen von Arten, Biozönosen und Ökosystemen erhält* beziehungsweise gewährleistet. Ziel ist dabei eine von menschlichem Einfluss weitgehend ungestörte, kontinuierliche Entwicklung des Waldbodens und der Waldvegetation. Mit der Erfüllung dieses Leitbilds ist die höchste Stufe (Hemerobiekategorie II) für einen bewirtschafteten Wald erreicht. Der Kriterienkatalog setzt dabei auf die relative Naturnähe (1) des Bodens, (2) der Waldgesellschaft und (3) der Entwicklungsbedingungen. Die drei Kriterien werden mit insgesamt 20 Messgrößen (Indikatoren) operationalisiert. Die Messgrößen unterscheiden sich in solche, die den Ist-Zustand (Status quo) des Waldes und solche, die das aktive Handeln des Forstbetriebs bewerten.

Insgesamt ist der Katalog an Kriterien und Messgrößen von (Giegrich, Sturm 1996) gut zur Bestimmung der Hemerobie einzelner Forstbetriebe geeignet. Die Problematik liegt darin, dass kaum Daten zur Gesamtwalddituation vorliegen. Bisherige Einschätzungen erfolgten daher immer auf grober Experteneinschätzung, z. B. (Fehrenbach et al. 2016).

Mit der dritten Bundeswaldinventur (BWI-3) (BMEL 2015) liegen nunmehr umfangreiche Daten zum Wald in Deutschland vor. Diese Daten sind jedoch nicht kompatibel mit den Messgrößen von (Giegrich, Sturm 1996). Mit ihrem *alternativen Waldzustandsindex (WZI)* haben (Welle et al. 2018) ein Bewertungssystem entwickelt, welches explizit anhand verfügbarer Daten der BWI-3 die Naturnähe des Waldes in Deutschland bewertet. Nach eingehender Prüfung sind die Autorinnen und Autoren dieses Berichts zum Ergebnis gekommen, dass sowohl (Giegrich, Sturm 1996) als auch (Welle et al. 2018) den Grad des Kultureinflusses auf Waldökosysteme, unter Berücksichtigung anthropogener Einflüsse, adressieren, die einer Selbstregulation des betrachteten Ökosystemausschnittes auf der Grundlage des aktuellen Standortpotenzials entgegenstehen. Somit adressieren beide Methoden Hemerobie. Um zu ermöglichen, generische Daten zur Hemerobie des Waldes in Deutschland erstellen zu können, werden die beiden Methoden daher zusammengeführt: Die primären Basisdaten werden nach den Kriterien (Welle et al. 2018) eingepflegt, die Umrechnung der Daten erfolgt in das Schema nach (Giegrich, Sturm 1996).

Abbildung 62 zeigt die Zuordnung der Bewertungsergebnisse zu den Hemerobieklassen nach den Werteinstufungen durch die Berechnungen des WZI.

Abbildung 62: Zusammenführung der Zuordnung einer Hemerobieklasse nach (Fehrenbach et al. 2015) und des Klassifikationsschemas des WZI

Hemerobie-klasse	Kurzbeschreibung für Landnutzungstyp „Wald-/Forstwirtschaft“		
I	Keine Eingriffe. Nicht relevant im Kontext Produktion von Wirtschaftsgütern.		
II	Naturnaher Wald. Sehr geringe, naturnahe Durchforstung; sehr geringe Eingriffsstärke; sehr große Nebennutzen.	sehr gut – gut	
III	Standorttypischer Wald. Mäßige Durchforstung; geringe Eingriffsstärke; große Nebennutzen.	mäßig	
IV	Mäßig standorttypischer Wald. Intensive Durchforstung; erhebliche Eingriffsstärke; geringe Nebennutzen.	schlecht	
V	Gering standorttypischer Wald. Ertragsoptimierte Eingriffe; intensive Bewirtschaftung mit sehr hoher Eingriffsstärke; sehr geringe Nebennutzen.	Sehr schlecht	
VI	Ertragsoptimierung ohne Wahrung der Standortgerechtigkeit. Maximale Eingriffsstärke, keine Nebennutzen.	Keine Korrelation zu WZI, da kein Wald aber Holzerzeugung	
VII	Nicht relevant im Kontext Wald-/Forstwirtschaft		

Quelle: (Welle et al. 2018), ergänzt durch ifeu/INTEGRAHL

E.3 Anwendung des Hemerobieansatzes auf Landwirtschaftsflächen

Landwirtschaftsflächen werden differenziert in Ackerland und Grünlandflächen. Es gibt eine Vielzahl an Methoden zur naturschutzfachlichen Bewertung von landwirtschaftlich genutzten Flächen mit Fokus auf die Naturnähe.

Der bisherige Hemerobie-Ansatz nach (Fehrenbach 2000) beruht auf Methoden zur Bestimmung der Schwere von Eingriffen in den Naturhaushalt. Im Gegensatz zu Waldökosystemen kann bei landwirtschaftlich genutzten Flächen diese Schwere anhand einer Differenz zum natürlichen Zustand ohne menschlichen Eingriff nicht abgebildet werden, da Landwirtschaft aus Prinzip mit solchen Eingriffen verbunden ist. Das von (Fehrenbach 2000) definierte Leitbild für landwirtschaftlich genutzte Flächen bezieht sich daher auf ein Agrarökosystem mit ausgeprägtem Struktur- und Artenreichtum. Landwirtschaftliche Eingriffe in die Natur sind auf ein Minimum beschränkt und finden nur statt, um wirtschaftlich nachhaltige Produktivität zu gewährleisten. Dieses Leitbild korrespondiert sehr stark mit dem Konzept des High Nature Value Farmlands (HNV farmlands). Dieser Indikator setzt jedoch sehr anspruchsvolle Schwellen, sodass der Großteil der Landwirtschaftsflächen (89 %, inklusive fast der gesamten Ackerfläche) nicht weiter differenziert wird (Hünig, Benzler 2017). Der HNV-Indikator ist für die Aufgabenstellung dieses Projekts also nicht geeignet, da für die ökobilanzielle Bewertung von Agrarprodukten eine höhere Granularität, gerade im ackerbaulichen Bereich, erforderlich ist.

Der Hemerobie-Ansatz nach (Fehrenbach 2000) bedarf aus folgenden Gründen einer Weiterentwicklung:

3. Das ursprüngliche Konzept an Kriterien basiert auf fachlichen Quellen der 1990er-Jahre, eine umfassende Revision auf den aktuellen Stand der Wissenschaft ist somit geboten.
4. Wie bei Waldflächen ist auch hier die Bereitstellung von generischen Basisdaten für die Anwendung des Hemerobie-Ansatzes eine Schlüsselaufgabe. Die Definition und Operationalisierung der einzelnen Messgrößen steht somit auch vor der Anforderung, auf allgemein verfügbare Daten zurückgreifen zu können und nicht allein auf Experteneinschätzungen angewiesen zu sein.
Dazu werden die Messgrößen im Einklang mit dem ursprünglichen Konzept:

- a. dem Stand der Wissenschaft gemäß aktualisiert,
 - b. auf verfügbare Datenquellen für verschiedene agrarische Erzeugnisse hin ausgerichtet,
 - c. durchgängig auf quantifizierbare Einheiten umformuliert (bis dato wiesen die Wertstufen der Messgrößen partiell nur deskriptive oder qualitative Wertbereiche auf)
5. Das ursprüngliche Konzept war zu sehr auf Ackerflächen ausgerichtet, die Bewertung von Grünland war bislang nicht ausreichend entwickelt; es wird daher ein eigenständiger Kriterien-Messgrößen-Katalog für Grünland vorgelegt.
 6. Der bisherige Fokus der Messgrößen lag stark auf der Anwendung im deutschen oder mitteleuropäischen Raum. Es bedarf daher auch der Prüfung der Anwendbarkeit auf internationaler Ebene.

Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse der Aktualisierung des Hemerobie-Konzepts nach (Fehrenbach 2000) beschrieben, differenziert nach Ackerland und Grünland.

E.3.1 Ackerland

Der aktualisierte Ansatz besteht, wie bei (Fehrenbach 2000), aus den vier Kriterien Diversität der Ackerbegleitflora, Strukturdiversität, Bodenschutz und Stoffeinträge und jeweils zwei bis vier Indikatoren bzw. Messgrößen pro Kriterium. Eine Modifizierung wird für einzelne Messgrößen inklusive der Definition der fünf Wertstufen vorgenommen. Grundlage hierfür ist eine umfassende Aufarbeitung von diesbezüglichen, neueren fachlichen Grundlagen.

Zum Beispiel erfolgt bei der Messgröße *sporadische Ackerbegleitflora* eine Anpassung der Wertstufen an Daten aus (Meyer et al. 2013) (maximale Segetalartenzahl auf 100 m² beträgt ca. 45 Arten anstatt der über 150 Arten pro Hektar bei (Fehrenbach 2000)). Tabelle 38 gibt einen Überblick über die Bestandteile des aktuellen Bewertungssystems für Ackerland. Zur besseren Veranschaulichung wurde hier auf die Darstellung der Wertstufen für die Messgrößen verzichtet. Sie werden im Bericht ausführlich beschrieben.

Mit der Anwendung dieser Kriterien und Messgrößen wird die Zuweisung eines Agrarprodukts in eine Wertstufe der jeweiligen Messgröße ermöglicht. Die Gesamtheit aller Einstufungen pro Messgröße erlaubt letztendlich die Ermittlung der Hemerobiekategorie des entsprechenden Agrarproduktes. Die Anwendung setzt das Vorhandensein entsprechender Daten voraus. Diese können entweder spezifischer oder generischer Art sein. Für die Anwendung innerhalb des Bewertungssystems sind generische Daten erforderlich, folglich müssen eigene Vorgehensweisen etabliert werden, um vom spezifischen Fall zum generischen kommen zu können. Weitergehend müssen Zuordnungsvorschriften entwickelt werden, welche bei der Schließung von Datenlücken zum Tragen kommen.

Tabelle 38: Kriterien und Messgrößen des Bewertungssystems für Ackerland

Kriterium	Messgröße (aktualisiert)
1. Diversität der Ackerbegleitflora	1. Artenanzahl der Ackerbegleitflora
	2. Existenz seltener Arten
2. Strukturdiversität	3. Strukturelemente in der Flur
	4. Schlaggröße
	5. Diversität in der Landschaft
3. Bodenschutz	6a. Intensität der Bodenbearbeitung
	6b. Bodenverdichtung durch Landmaschineneinsatz (gemessen am Dieserverbrauch)
	7. Bodenbedeckung (gemessen am C-Faktor ⁷⁶ (Bedeckungs- und Bearbeitungsfaktor))
	8. Agrodiversität
4. Stoffeinträge	9. Art der Düngung
	10. Intensität der Düngung
	11a. Einsatz von Insektiziden
	11b. Maßnahmen für den Pflanzenschutz (excl. Insektizide)

Quelle: Eigene Darstellung 2021, ifeu, Weiterentwicklung von (Fehrenbach 2000); dabei wurden die Messgrößen 6 und 11 weiter ausdifferenziert in 6a, 6b und 11a, 11b.

E.3.2 Grünland

Das Bewertungssystem für Grünland ähnelt in weiten Zügen dem des Ackerlandes. Definitorische Anpassungen waren erforderlich, ebenso galt es, Messgrößen, die für Grünland nichtzutreffend sind, aus dem Bewertungssystem zu nehmen. Des Weiteren wurden Messgrößen hinzugefügt, welche nach speziell für Grünland gültigen Charakteristika fragen. Beispielsweise wurde der Bodenschutz als Teil der Bewirtschaftung angesehen, der jedoch nach Schnitthäufigkeit und Beweidungsintensität differenziert wird. Weitergehend wurden Vorschläge von (Hartmann 2019), der eine andere Art der Einstufung von Grünland (Schnitt- sowie Weidenutzung) nach Hemerobieklasse darlegte, in das Bewertungssystem aufgenommen. So wird bei der neuen Messgröße 8 die Schnitthäufigkeit/Beweidung in Anlehnung an (Hartmann 2019) eine jeweils eigene Ausgestaltung der Wertstufen für Wiesen und für Weiden vorgenommen.

⁷⁶ Bodenbedeckungsfaktor