Hintergrundinformationen zum Status Quo der Land- und Forstwirtschaft in Deutschland und zukünftigen Biomassepotenzial für die Erarbeitung der NABIS

Kurzbericht

Klaus Hennenberg[1], Susanne Köppen[2], Martin Banse[3], Hannes Böttcher[1], Romy Brödner[5], Karl-Friedrich Cyffka[5], Horst Fehrenbach[2], Susanne Iost[4], Matthias Jordan[6], David Kilian[3], Christian Morland[4], Mirjam Pfeiffer[1], Judith Reise[1], Sören Richter[5], Jörg Schweinle[4], Harry Schindler[5], Holger Weimar[4]

[1] Öko-Institut e.V. (Darmstadt, Berlin); [2] ifeu (Heidelberg, Berlin); [3] Thünen-Institut für Marktanalyse (Braunschweig); [4]Thünen-Institut für Waldwirtschaft (Hamburg); [5] DBFZ (Leipzig); [6] UFZ (Leipzig)

Darmstadt, Berlin, Braunschweig, Hamburg, Heidelberg, Leipzig, 6. Dezember 2023

ifeu Im Weiher 10 D - 69121 Heidelberg Telefon +49 (0)6 221. 47 67 - 0 Telefax +49 (0)6 221. 47 67 - 19 E-Mail ifeu@ifeu.de www.ifeu.de

Auftraggeber: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) und Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL)

In Kooperation mit:
Öko-Institut e.V., Rheinstraße 95, 64295 Darmstadt
Thünen-Institut für Marktanalyse, Bundesallee 63, 38116 Braunschweig
Thünen-Institut für Waldwirtschaft, Leuschnerstraße 91, 21031 Hamburg
Deutsches Biomasseforschungszentrum (DBFZ), Torgauer Str. 116, 04347 Leipzig
Helmholz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ), Permoserstraße 15, 04318 Leipzig

IMPRESSUM

Autoren: Klaus Hennenberg, Susanne Köppen, Martin Banse, Hannes Böttcher, Romy Brödner, Karl-Friedrich Cyffka, Horst Fehrenbach, Susanne Iost, Matthias Jordan, David Kilian, Christian Morland, Mirjam Pfeiffer, Judith Reise, Sören Richter, Jörg Schweinle, Harry Schindler, Holger Weimar

Herausgeber: ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH
Im Weiher 10, D-69121 Heidelberg

Erscheinungsjahr: 2023

Bildquellen: Titelblatt, Klaus Hennenberg

49 Seiten

Inhalt

1 Einleitung 4

2 Status Quo der land- und forstwirtschaftlichen Biomasse in Deutschland 5

2.1 Flächennutzung in Deutschland 5

2.1.1 Forstwirtschaftliche Flächen 7

2.1.2 Landwirtschaftliche Flächen 8

2.1.3 Belegung landwirtschaftlich genutzter Flächen durch PV-Freiflächenanlagen und Windenergie 12

2.2 Biomasseaufkommen und seine Verwendung in Deutschland 14

2.2.1 Holzrohstoffe 14

2.2.2 Landwirtschaftliche Rohstoffe 19

2.2.3 Biogene Abfälle und Reststoffe 20

3 Szenarien zum zukünftigen Biomasseangebot und dessen Nutzung 22

3.1 Beschreibung der Szenarien 24

3.1.1 BEPASO „Bioökonomie-Wende“ 24

3.1.2 LFS 3 und KIS 2030 24

3.1.2.1 Anbaubiomasse aus der Landwirtschaft 24

3.1.2.2 Waldholz 26

3.1.2.3 Ermittlung der Reststoffpotenziale 26

3.1.2.4 Nutzungsansprüche und Anpassung zur Erhöhung der stofflichen Nutzung 27

3.2 Modellierte und abgeleitete Biomassepotenziale 30

3.3 Analysen zur optimalen Verwendung der zur energetischen Nutzung verfügbaren Biomassepotenziale 33

4 Zusammenfassung 35

5 Literaturverzeichnis 38

6 Anhang 43

6.1 Narrative und Szenarienannahmen in LFS 3 43

6.2 Narrative und Szenarienannahmen in KIS 2030 46

1 Einleitung

Der flächendeckende Ersatz fossiler Rohstoffe und Energieträger durch erneuerbare Alternativen ist nach Auffassung der Bundesregierung eine dringliche Aufgabe, die bis 2045 für die Erzeugung von Energie vollständig und für die stoffliche Nutzung von Biomasse in immer stärkerem Maße erfolgen soll. Dazu wird auch die Nutzung von Biomasse als ein Baustein beitragen. Entsprechend hat die Bundesregierung im Koalitionsvertrag vereinbart, eine Nationale Biomassestrategie (NABIS) zu entwickeln. Ein Eckpunktepapier, das unter gemeinsamer Federführung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) sowie des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) erstellt und am 06.10.2022 veröffentlicht wurde, bildet die Grundlage für die Strategieerarbeitung. Mit der NABIS sollen die Rahmenbedingungen für eine nachhaltige Biomasseerzeugung und -nutzung geschaffen werden, die sich konsequent an Klima-, Biodiversitäts- und weiteren Umweltzielen sowie den Dekarbonisierungserfordernissen der Nutzungssektoren orientiert (BMWK, BMEL und BMUV 2022).

Der vorliegende Bericht fasst wesentliche Daten, Ergebnisse und Überlegungen zum nachhaltigen Biomassepotenzial und zukünftigen Nutzungserwartungen kompakt zusammen, mit deren Analyse die Autor*innen dieses Berichts als Grundlage für die Erarbeitung der NABIS von BMEL und BMUV beauftragt wurden. Der Bericht soll der interessierten Öffentlichkeit als Hintergrunddokument zur NABIS dienen und den Status Quo der Biomasseerzeugung und -nutzung sowie zukünftige mögliche Nutzungstrends und -optionen zusammenfassend erläutern.

Als Ausgangspunkt für die Potenzialanalyse wurde zunächst eine Status-Quo-Analyse durchgeführt, in der aktuelle Zahlen und Daten zur Flächennutzung und Biomasseverfügbarkeit zusammengestellt wurden (siehe Kapitel 2). In einem zweiten Schritt wurden auf Grundlage von drei verschiedenen Zielszenarien (siehe Kapitel 3.1) modellgestützte Ergebnisse der künftig erwartbaren Biomassepotenziale und -nutzungsentwicklungen zusammengestellt. Diese Zielszenarien berücksichtigen Ziele der Ernährungssicherheit, der agrarökologischen Transformation und des Klima- und Biodiversitätsschutzes. Es wurden erwartete Nutzungstrends oder Nachfrageentwicklungen berücksichtigt und Biomassepotenziale für eine stoffliche und energetische Nutzung ausgewiesen (siehe Kapitel 3.2). Schließlich wurden Ergebnisse einer modellgestützten Analyse zum optimalen Einsatz der ermittelten energetischen Biomassepotenzialen dargestellt (siehe Kapitel 3.3).

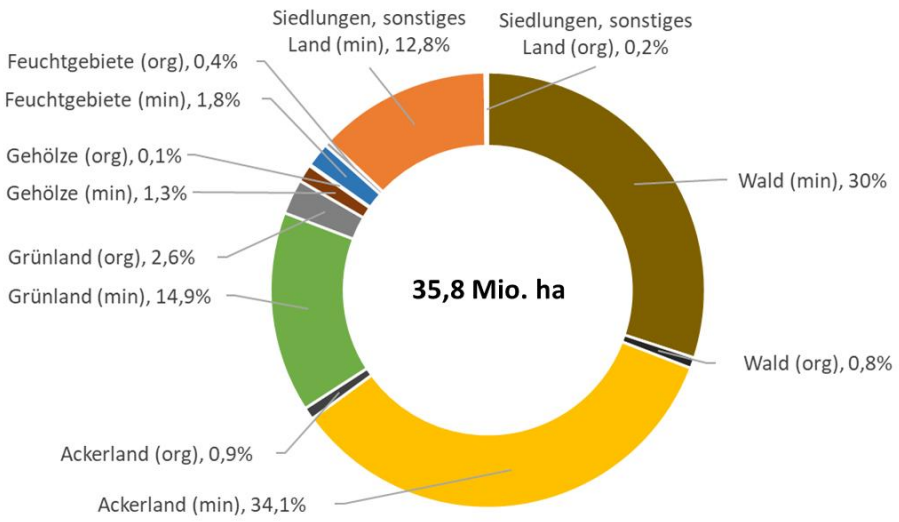
2 Status Quo der land- und forstwirtschaftlichen Biomasse in Deutschland

2.1 Flächennutzung in Deutschland

Die Landesfläche in Deutschland beträgt 35,8 Mio. ha (Abbildung 1). Die landwirtschaftlich genutzte Fläche nimmt mit 52,5 % der Landesfläche den größten Anteil ein. Dabei entfallen 35% auf Ackerland und 17,5 % auf Grünland. Die Waldfläche von 30,8 % ist in Deutschland nach dem Ackerland der zweit größte Flächentyp. Zum Vergleich: 40 % der Fläche der EU sind von Wald bedeckt. Mit 13 % nimmt in Deutschland die Siedlungsfläche ebenfalls einen großen Flächenanteil in Anspruch. Hierzu zählen Siedlungs- und Verkehrsflächen inklusive Begleitgrün. Auf Feuchtgebiete entfallen 2,2 % der Landesfläche. Hierzu zählen Gewässer (1,8 %), terrestrische Feuchtgebiete (0,4 %) und sehr kleine Anteile Torfabbauflächen (>0,05 %). Gehölze mit 1,4 % der Fläche umfassen Hecken, Heide und weitere Gehölzstrukturen (Abbildung 1).

Aus klimapolitischer Sicht sind die so genannten organischen Böden hervorzuheben. Diese Moorfolgeböden mit einem hohen Gehalt an Bodenkohlenstoff emittieren bei einer trockenen Nutzung hohe Mengen an Treibhausgasen. Dies spielt insbesondere im Grünland und im Ackerland eine wichtige Rolle (Abbildung 1 und Details in Kapitel 2.1.2).

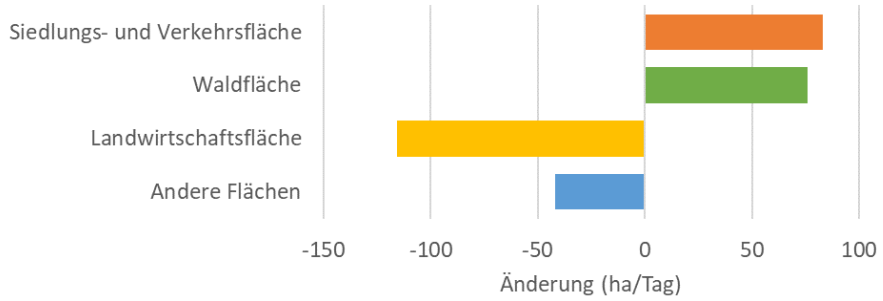
Abbildung 1: Flächennutzung in Deutschland im Jahr 2021



Quelle: CRF-Tabellen zu (UBA 2023). min = mineralische Böden, org = organische Böden (Moorfolgeböden mit einem hohen Anteil an Bodenkohlenstoff.

Die Flächenkulisse in Deutschland ist nicht statisch. Regelmäßig werden Flächen durch Nutzungsänderungen zu anderen Flächentypen umgewandelt. In den letzten 20 Jahren nahm die Siedlungsfläche im Mittel mit 83 ha pro Tag und die Waldfläche im Mittel um 76 ha pro Tag zu. Diese Entwicklung verlief vor allem zu Lasten landwirtschaftlicher Flächen, die mit 116 ha pro Tag in den letzten zwanzig Jahren deutlich abgenommen hat (Abbildung 2).

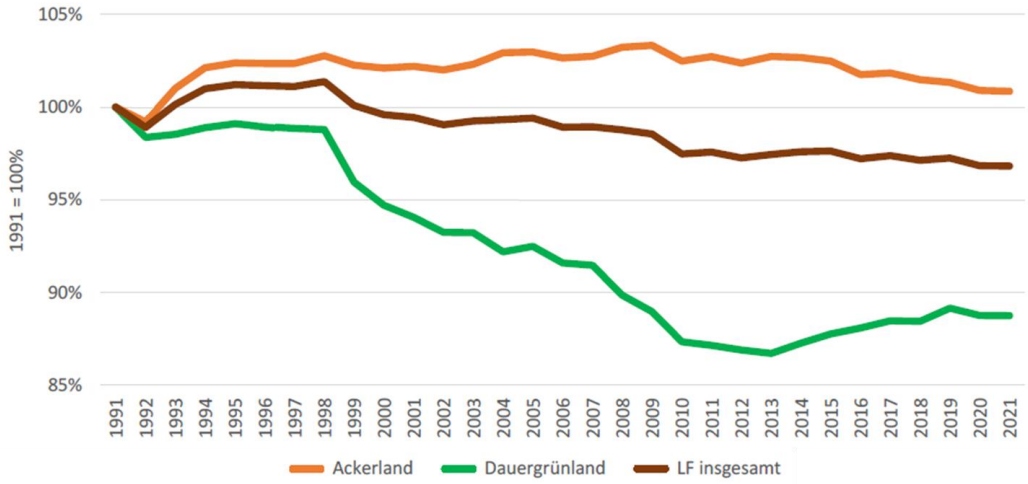
Abbildung 2: Mittlere Flächenänderung in den Jahren 2000-2021



Quelle: Statistisches Bundesamt (Destatis). Zusammenstellung in Osterburg et al. (2023, S. 5 ff.).

Die Abnahme der landwirtschaftlichen Fläche ist bis zum Jahr 2013 vor allem auf die Umwandlung von Grünland zurückzuführen (Abbildung 3). Erst mit der Durchsetzung der Regelungen zum Grünlanderhalt in der GAP konnte dieser Trend gestoppt und eine leichte Zunahme der Grünlandfläche erreicht werden. Da aber weiterhin vor allem Siedlungsfläche in nennenswertem Umfang neu angelegt wurden, nahm seit 2015 stattdessen die Ackerfläche ab (Abbildung 3).

Abbildung 3: Veränderung der landwirtschaftlichen Flächennutzung in Deutschland in Relation zum Jahr 1991



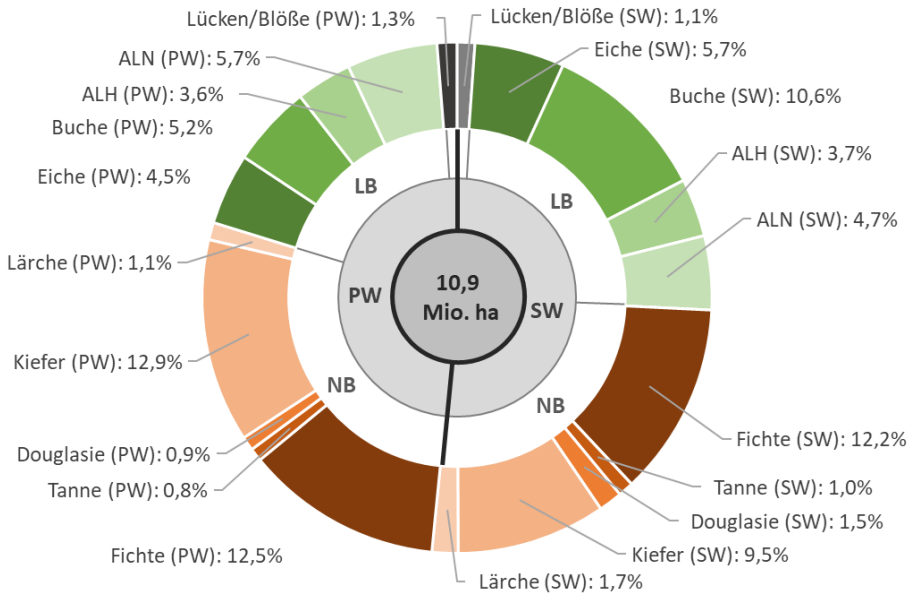
Quelle: Statistisches Bundesamt (Destatis). Zusammenstellung in Osterburg et al. (2023, S. 8 f.).

2.1.1 Forstwirtschaftliche Flächen

Mit 10,9 Mio. ha bedeckt der Wald in Deutschland gut 30 % der Landesfläche. Der Wald spielt eine wichtige Rolle für zahlreiche Ökosystemfunktionen wie Kohlenstoffspeicherung, Wasserrückhalt und Grundwasserbildung, Erhalt der Biodiversität und Luftreinheit. Aus ökonomischer und sozialer Sicht stellt der Wald Holz für mannigfaltige Nutzungen bereit, schafft Arbeitsplätze und Wertschöpfung und ist ein wichtiger Erholungsraum für die Bevölkerung.

Die Waldfläche in Deutschland befindet sich zu 52 % im Besitz des Bundes und der Länder sowie von Körperschaften und zu 48 % in privater Hand (Abbildung 4). Nadelbaumbestände nehmen im Staats- und Körperschaftswald (SW) ca. 50% der Fläche ein und im Privatwald (PW) 58%. Die dominanten Baumarten sind Fichte und Kiefer. Laubbaumbestände (SW = 48 %, PW = 40 %) werden von den Baumarten Buche und Eiche dominiert, es finden sich aber auch deutliche Anteile weiterer Laubbaumarten (Abbildung 4).

Abbildung 4: Waldfläche nach Baumartengruppen und Eigentumsarten in Deutschland im Jahr 2017



Quelle: Baumartengruppen nach Treibhausgasinventur 2017, Blößen nach Bundeswaldinventur 2012.[1] Dargestellt sind die rechnerischen Reinbestände je Baumartengruppe. ALH = andere Laubbäume hoher Lebensdauer, ALN = andere Laubbäume niedriger Lebensdauer, LB = Laubbäume, NB = Nadelbäume, PW = Privatwald, SW = Staatswald (Bund, Land) und Körperschaftswald.

Laut Bundeswaldinventur[1] besteht auf 8,6 % der Waldfläche eine Nutzungseinschränkung[2]. Auf 2,6 % der Waldfläche ist die Nutzung zu 2/3 des üblichen Aufkommens und auf 1,9 % der Waldfläche zu 1/3 des üblichen Aufkommens eingeschränkt. Auf weiteren 4,1 % der Waldfläche ist eine Nutzung nicht zulässig oder nicht zu erwarten. Gründe für eine Nutzungseinschränkung liegen vor allem in Geländeeigenschaften. Schutzgebietsflächen mit einer Nutzungseinschränkung machen etwa 1,3 % bis 1,9 % der Waldfläche aus (Reise et al. 2017).

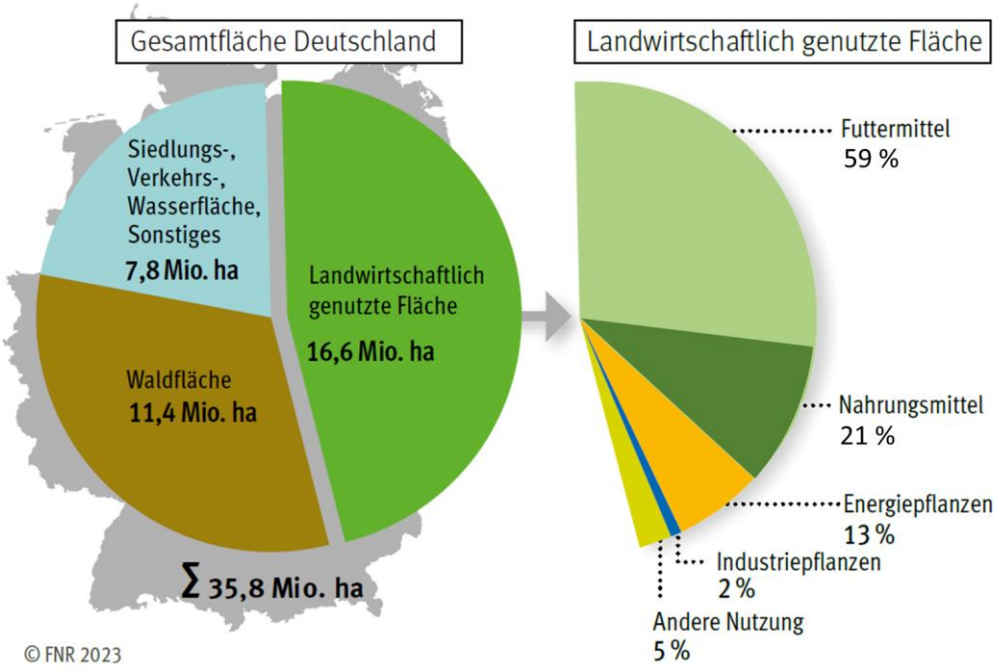
[1] https://bwi.info

[2] Nutzungseinschränkungen werden in der Bundeswaldinventur anteilig zum standörtlich erwartbarem Holzaufkommen abgeschätzt (übliches Aufkommen).

2.1.2 Landwirtschaftliche Flächen

Mit 16,6 Mio. ha ist die Landwirtschaft der größte Flächennutzer in Deutschland (Abbildung 5). Davon entfallen 66 % auf Ackerland und 33 % auf Grünland. Mit dieser Fläche wird ein Großteil der Nahrungsmittelproduktion in Deutschland sichergestellt. So werden auf 21 % (ca. 3,5 Mio. ha) der landwirtschaftlichen Fläche pflanzliche Nahrungsmittel wie Getreide, Kartoffeln oder Zuckerrüben angebaut. Auf einem deutlich größeren Anteil der landwirtschaftlichen Fläche von 59% (ca. 10 Mio. ha) werden Futtermittel für die Tierhaltung produziert. Energiepflanzen nahmen mit 13 % eine Fläche von ca. 2,3 Mio. ha ein und Industriepflanzen wurden auf knapp 0,3 Mio. ha (2 %) kultiviert (siehe Details in Abbildung 6 und Abbildung 7).

Abbildung 5: Flächennutzung in Deutschland und Nutzung Landwirtschaftlicher Flächen im Jahr 2021



Quelle: FNR (2023, S. 16) mit Ergänzung zu Nahrungs- und Futtermittel aus BLE (2023, S. 90).

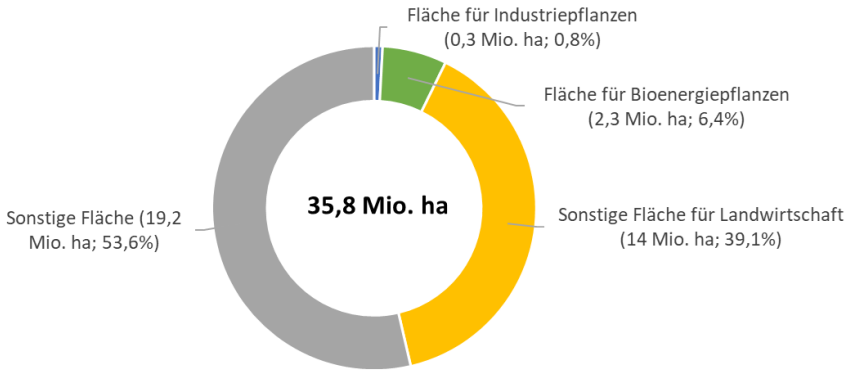
Nutzungsstruktur der Ackerflächen

Auf den Ackerflächen wird zu 50 % Getreide wie Weizen, Körnermais, Roggen, Gerste und Hafer angebaut. Mit ca. 20 % ist Silomais eine weitere wichtige Kultur. Winterraps nimmt ca. 7 % der Ackerfläche ein. Die Flächenbelegung hat sich seit dem Jahr 2000er derart verändert, dass die Getreidefläche vor allem zu Gunsten der Fläche an Silomais zurückgegangen ist (siehe Details in Osterburg et al. 2023, S. 3 ff.).

Die Bedeutung des ökologischen Landbaus in Deutschland ist seit Anfang der 1990er Jahre stetig gewachsen. Ende des Jahres 2021 haben insgesamt 36.307 Betriebe rund 1,8 Mio. ha ökologisch bewirtschaftet. Der Anteil der ökologisch bewirtschafteten Fläche an der gesamten landwirtschaftlich genutzten Fläche liegt bei knapp 11 %, der Anteil an allen Betrieben bei 14 % (Zusammenstellung in Osterburg et al. 2023, S. 17 ff.).

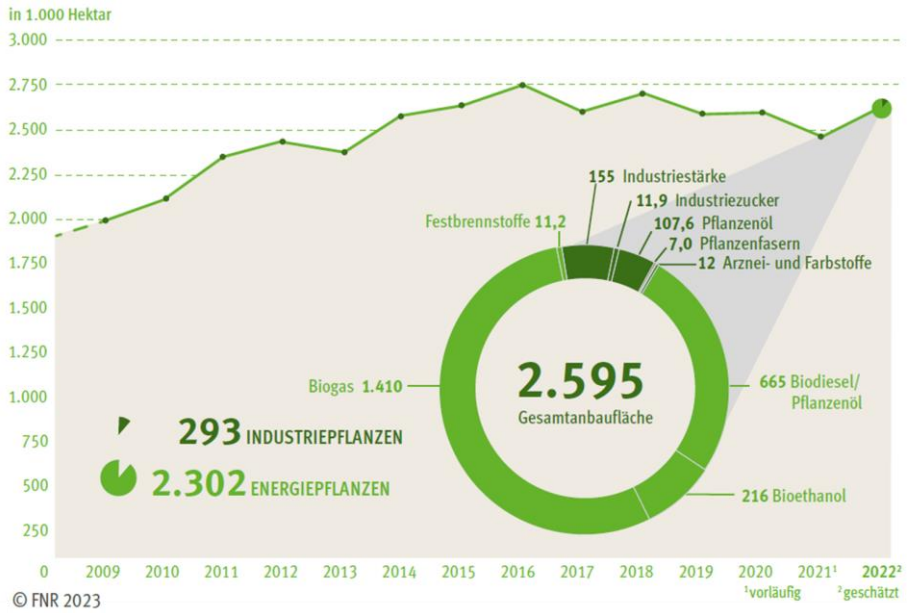
In Deutschland werden angebaute nachwachsende Rohstoffe vor allem für die Energieerzeugung genutzt. Im Mittel der letzten fünf Jahre (2018-2022) wurden durch nachwachsende Rohstoffe Flächen für die folgenden Verwendungen belegt (Abbildung 6 bis Abbildung 8): Pflanzen für Biogas 1.500.000 ha, Rapsöl für Biodiesel bzw. Pflanzenöle 570.000 ha, Pflanzen für Bioethanol 220.000 ha, Pflanzen für Festbrennstoffe 11.000 ha und Pflanzen zur industriellen Verwendung (Industriepflanzen) 280.000 ha. Die Summe der Flächenbelegung durch Energiepflanzen lag bei ca. 2.600.000 ha. In der Zeitreihe für den Anbau nachwachsender Rohstoffe sind vor allem Schwankungen bei Biogassubstraten und Raps für Biodiesel und Pflanzenölen zu sehen (Abbildung 8). Industriepflanzen werden für die Produkte von Industriestärke auf 155.000 ha und für die Produktion von Pflanzenölen auf 107.600 ha angebaut (Abbildung 7). Pflanzen für Festbrennstoffe nahmen mit 11.200 ha im Jahr 2022 nur einen kleinen Flächenanteil ein (Abbildung 8).

Abbildung 6: Anteile landwirtschaftlicher nachwachsender Rohstoffe an der Gesamtfläche Deutschlands als Mittelwert der Jahre 2018-2022



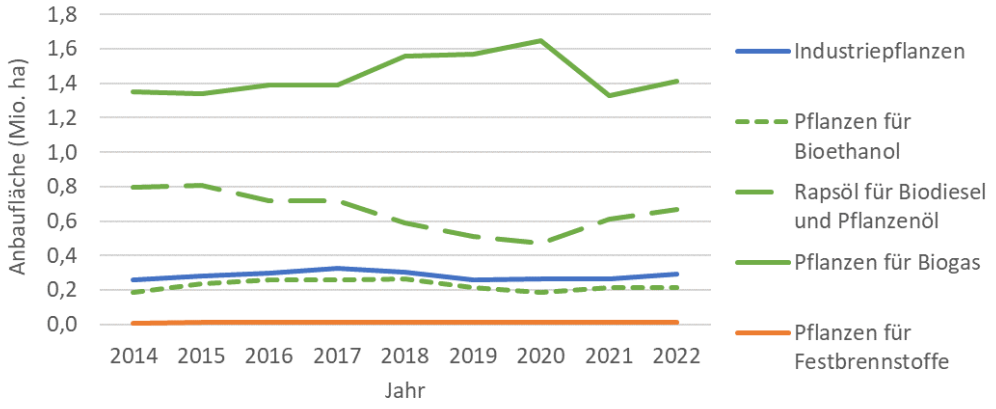
Quelle: FNR (2023) und vorangegangene Jahrgänge. 2021: vorläufig, 2022: geschätzt.

Abbildung 7: Anbaufläche für Industrie- und Energiepflanzen (nachwachsende Rohstoffe)



Quelle: FNR (2023).

Abbildung 8: Anbaufläche für Industrie- und Energiepflanzen (nachwachsende Rohstoffe)



Quelle: FNR (2023) und vorangegangene Jahrgänge. 2021: vorläufig, 2022: geschätzt.

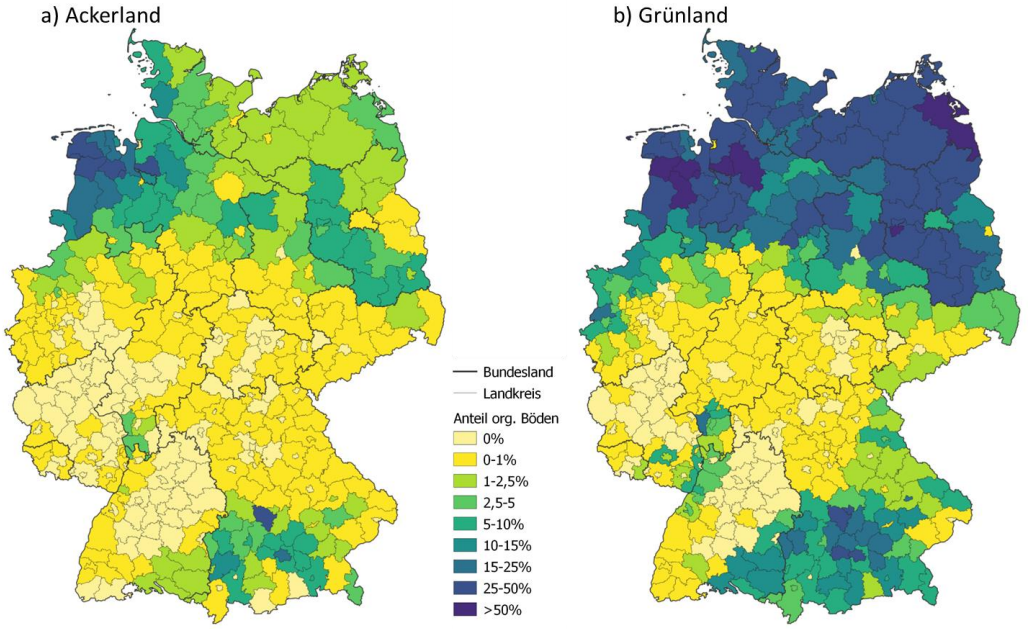
Organische Böden

Organische Böden, also Moorfolgeböden, emittieren sehr große Mengen an Treibhausgasen, wenn sie trocken bewirtschaftet werden. Für Ackerland auf organischen Böden liegen die Emissionen im Mittel für Deutschland bei ca. 35 t CO_2-Äq. pro ha und Jahr[3] und für Grünland auf organischen Böden bei ca. 29 t CO_2-Äq. pro ha und Jahr.[4] In Summe verursachten die trocken genutzten Acker- und Grünlandflächen in Deutschland im Jahr 2021 ca. 39 Mio. t CO_2-Äq./Jahr an Emissionen (UBA 2023). Wird der Wasserstand angehoben, kann die Zersetzung der organischen Substanz in diesen Böden stark reduziert werden. Bei einer Vollvernässung sinken die Emissionen deutlich auf Werte von ca. 5 t CO_2/ha (Hennenberg und Böttcher 2023). Auf vernässten Flächen ist eine herkömmliche landwirtschaftliche Bewirtschaftung jedoch nicht möglich. Daher werden die vernässten Flächen entweder aus der landwirtschaftlichen Nutzung genommen, oder es werden Paludikulturen wie Torfmoos, Rohrkolben oder Rohrglanzgras angebaut, oder die Flächen werden als nasses Grünland mit Wasserbüffeln bewirtschaftet. In Abbildung 9 ist die räumliche Verteilung der organischen Böden in Deutschland dargestellt. Die Herausforderungen zum Moorbodenschutz betreffen vor allem den Norden Deutschlands und in geringerem Umfang Süddeutschland.

[3] CO_2-Äq. = CO_2-Äquivalente; zur Vereinheitlichung wird die Wirkung aller Triebhausgase auf die von CO_2 umgerechnet.

[4] Bei einer bestehenden Acker- und Grünlandflächen auf mineralischen Böden wird im THG-Inventar eine ausgeglichene Humusbilanz angenommen. Entsprechen werden keine THG-Emissionen ausgewiesen (UBA 2023).

Abbildung 9: Räumliche Verteilung von Acker- und Grünland auf organischen Böden in Deutschland



Quelle: Reise et al. (in press.). Darstellung nach Daten in Tiemeyer et al. (2021)[5] und zu CORINE Land Cover (CLC 2018)[6].

Importe und Exporte landwirtschaftlicher Biomasse und Flächenbelegung im In- und Ausland

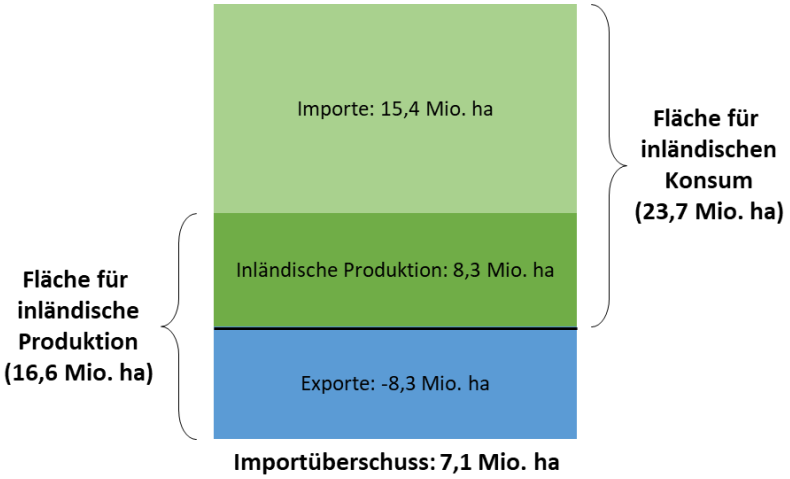
Daten zu Importen von landwirtschaftlicher Biomasse nach Deutschland und Exporten aus Deutschland sind sehr ausführlich in destatis (2019) zusammengestellt. Dabei werden Agrarrohstoffe wie Getreide oder Ölsaaten sowie Produkte bis zur zweiten Verarbeitungsstufe wie Tierprodukte, Teigwaren oder Getränke berücksichtigt. Auf der Hälfte der landwirtschaftlichen Flächen in Deutschland (8,3 Mio. ha) wurde im Jahr 2017 Biomasse für den inländischen Konsum und auf der anderen Hälfte für den Export produziert. Zudem wurden Biomasse bzw. Biomasseprodukte für Verarbeitung und Konsum in Deutschland importiert, für deren Produktion in den Herkunftsländern 15,4 Mio. ha genutzt wurden. In Summe werden für den deutschen Konsum an landwirtschaftlicher Biomasse 7,1 Mio. ha mehr an Fläche in Anspruch genommen, als landwirtschaftliche Fläche in Deutschland zur Verfügung steht (siehe Abbildung 10).

[5] Aggregierte Karte der organischen Böden Deutschlands unter: https://www.greifswaldmoor.de/files/dokumente/GMC%20Schriften/DEU_orgBod_A4_GMC_2021.jpg;

Daten-download unter: https://www.greifswaldmoor.de/gmc-schriftenreihe.html

[6] Daten-Download unter: https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc2018

Abbildung 10: Flächenbelegung für inländische Produktion und Konsum sowie für Importüberschüsse im Jahr 2017



Quelle: Eigene Darstellung nach Daten in destatis (2019).

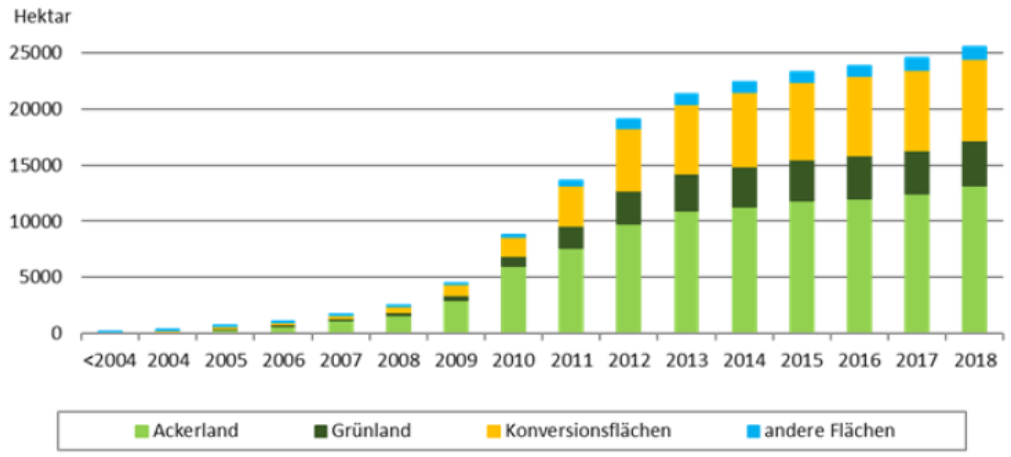
Bezogen auf Agrarrohstoffe und Produkte bis zur 2. Verarbeitungsstufe wurde im Jahr 2017 eine Frischmassemenge von 54,1 Mio. t_{FM} Biomasse importiert und 38,9 Mio. t_{FM} an Biomasse exportiert. Dies bedeutet einen Importüberschuss für Biomasse von 15,2 Mio. t_{FM} (destatis 2019). Für das Jahr 2020 ermitteln Banse et al. (2023, S. 27) einen Importüberschuss für Biomasse von 12,4 Mio. t_{FM} (Import: 66,8 Mio. t_{FM} Biomasse, Export: 54,4 Mio. t_{FM} Biomasse). Aus Daten im Pilotbericht zum Monitoring der deutschen Bioökonomie (Bringezu et al. 2020) errechnet sich für das Jahr 2015 ein Importüberschuss von ca. 15 Mio. t_{FM} Biomasse und ein Netto-Flächenimport von ca. 20 Mio. ha. Die Unterschiede zu Destatis (2018) resultieren u.a. daraus, dass Bringezu et al. (2020) mit dem Datensatz EXIOBASE umfangreicher Vorketten von Produkten abbilden.

2.1.3 Belegung landwirtschaftlich genutzter Flächen durch PV-Freiflächenanlagen und Windenergie

Im Jahr 2018 waren auf 25.500 ha PV-Freiflächenanlagen installiert (Abbildung 11). Etwa 13.300 ha davon wurden zuvor als Ackerland und 3.800 ha als Grünland genutzt. Weiterhin existieren 7.500 ha PV-Freiflächenanlagen auf bisherigen Konversionsflächen[7] und 950 ha auf sonstigen Flächenkategorien. Im Jahr 2023 wird eine kumulative Fläche durch PV-Freiflächen von 37.500 ha erwartet (siehe Zusammenstellung in Osterburg et al. (2023, S. 16).

[7] Als Konversionsflächen werden brachliegende Flächen verstanden, die in der Vergangenheit anderweitig genutzt wurden als heute.

Abbildung 11: Kumulierte Entwicklung der in Anspruch genommenen Fläche durch Freiflächen-PV.



Quelle: Böhm et al. (2022).

Für die durch Windenergieanlagen beanspruchten Flächen[8] gibt es bislang keine amtliche Statistik. Osterburg et al. (2023, S. 17) schätzen die bisherigere Flächeninanspruchnahme für Windkraftanlagen auf 9.700 ha.

Zum Flächenverbrauch durch Solar- und Windkraftanlagen kommt der notwendige Bedarf an Ausgleichsflächen hinzu. Die Umsetzung wird in Deutschland regional sehr unterschiedlich ausgestaltet. Im Projektionsbericht der Bundesregierung (BReg 2023) wird für die Abschätzung der Ausgleichsflächen 0,2 ha je Hektar PV-Freifläche und 2 ha je Windkraftanlage mit einer Größe von 5 MW angenommen.[9]

Auf landwirtschaftlichen Flächen können Bioenergiepflanzen angebaut oder PV- oder Windkraftanlagen errichtet werden. Böhm (2023) stellt heraus, das mit PV-Freiflächenanlagen und Windkraftanlagen ein Vielfaches mehr an Energie je Flächeneinheit erzeugt werden kann.[10] Allerdings hat Bioenergie ein breiteres Anwendungsspektrum als Strom aus Windkraft- und PV-Anlagen, sodass ein direkter Vergleich von Energieerträgen nur bedingt aussagekräftig ist. Wird Bioenergie zur Schließung von Lücken im Energiesystem eingesetzt – also für Bedarfe, die nicht ohne Weiteres bzw. zeitnah elektrifizierbar sind – kann die Flächennutzung für Bioenergie klimapolitisch sinnvoll sein.

[8] Berücksichtigt in der Abschätzung sind die bebaute Fläche und die Umgriffsfläche (Kranstellplatz, etc.).
[9] Mündliche Mitteilung Bernhard Osterburg (Thünen-Institut), angelehnt an Osterburg et al. (2023).
[10] Beispiele: Stromerträge von PV-Freiflächenanlagen sind 28-mal höher als bei Biogas. Strom aus PV-FFA eingesetzt in Wärmepumpen erzeugt 54-mal mehr Wärme je Fläche als eine Hackschnitzelproduktion aus Kurzumtriebsplantagen.

2.2 Biomasseaufkommen und seine Verwendung in Deutschland

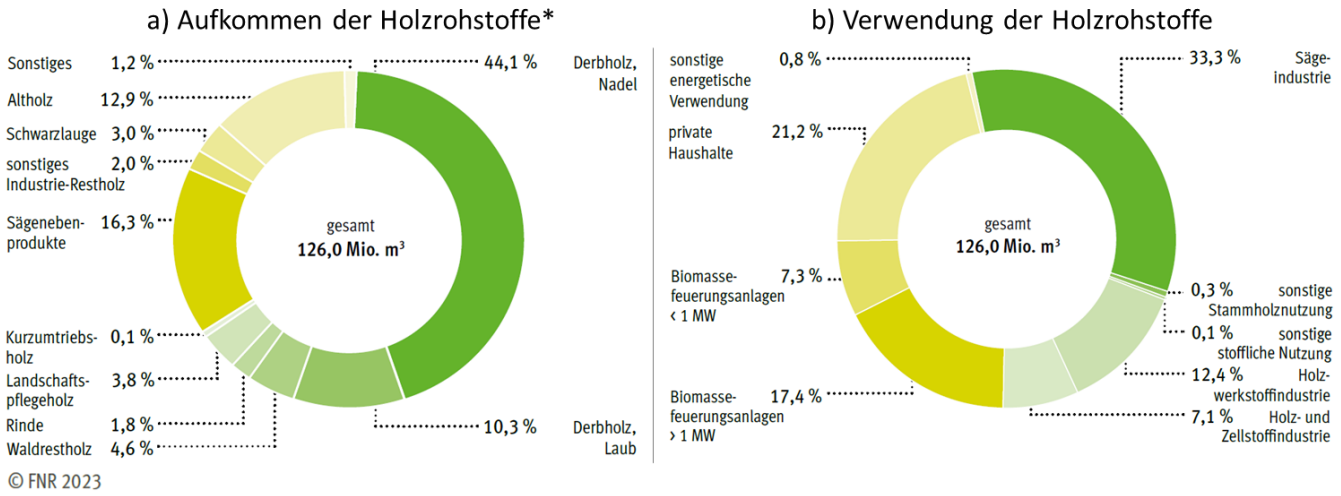
2.2.1 Holzrohstoffe

Holzrohstoffaufkommen

Laut der aktuellen Erfassung im Rohstoffmonitoring Holz (INFRO 2023, Mantau 2023) lag im Jahr 2020 das Aufkommen und die Verwendung an Holzrohstoffen bei 126 Mio. m³ (Abbildung 12 a). Um eine Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Holzrohstoffe zu ermöglichen, werden die Mengen in Festmeteräquivalente umgerechnet (siehe Details in Mantau 2023). Ein Festmeteräquivalent beschreibt einen Kubikmeter Holz, bei dem z.B. Zwischenräume wie bei geschütteten Holzpellets oder gestapeltem Scheitholz herausgerechnet sind. Das hier berechnete Gesamtvolumen entspricht nicht nur der Menge Rohholz (Derbholz und Waldrestholz), die aus dem Wald entnommen wurde, sondern umfasst auch Sägenebenprodukte, Restholz, Landschaftspflegeholz oder Altholz, die bei dieser Betrachtung aller Holzrohstoffe ebenfalls berücksichtigt werden.

Vom Aufkommen der Holzrohstoffe entfallen große Anteile auf Waldrohholz wie Nadelderbholz (44,1 %) und Laubderbholz (10,3 %). Kleinere Anteile sind Waldrestholz und Rinde sowie Landschaftspflege- und Kurzumtriebsholz (Abbildung 12 a). Auf den Reststoff Sägenebenprodukte (siehe Definition in Vis et al. 2016), der bei der Verarbeitung von Rohholz zu Schnittholz in Sägewerken anfällt und als Rohstoff für die Herstellung von z.B. Holzwerkstoffen oder Pellets genutzt wird, entfallen 16,3 % der Holzrohstoffe. Mit 12,9 % hat Altholz einen hohen Anteil an den holzigen Abfällen- und Reststoffen. Schwarzlauge und sonstiges Restholz haben im Jahr 2020 deutlich kleinere Anteile (Abbildung 12 a).

Abbildung 12: Aufkommen der Holzrohstoffe und ihre Verwendung im Jahr 2020



Quelle: FNR (2023), nach INFRO (2023). Altpapier ist in dieser Darstellung nicht berücksichtigt.
*Im Inland verwendetes Aufkommen der Holzrohstoffe.

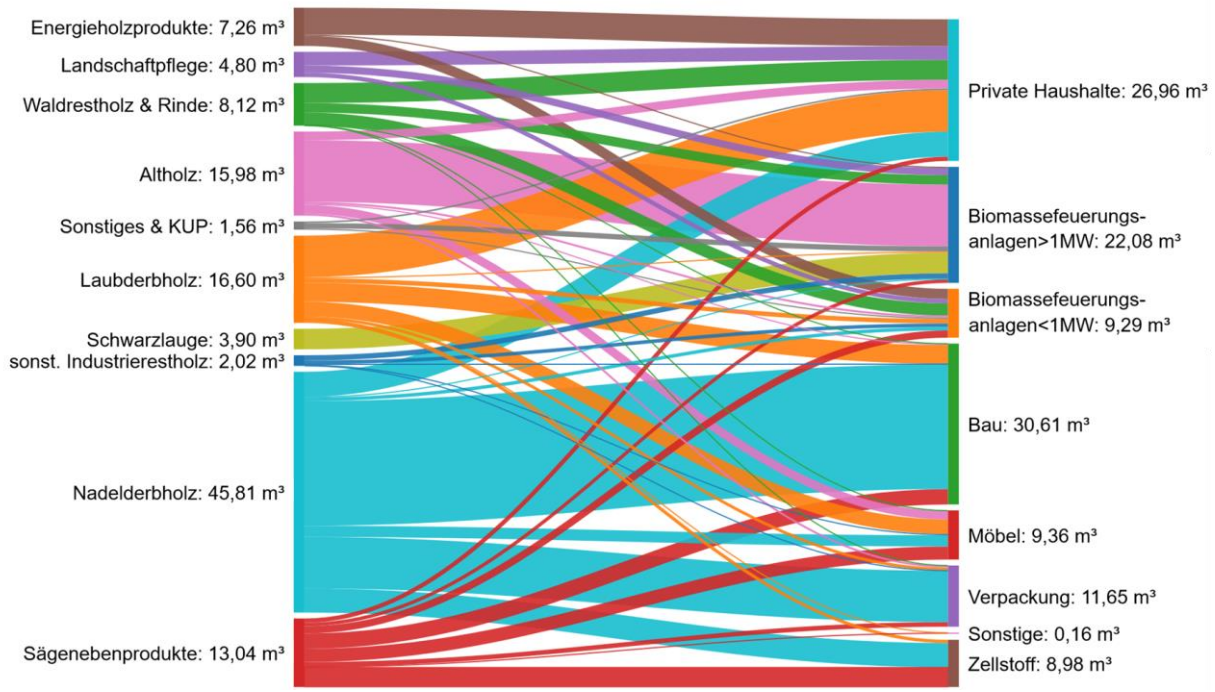
Holzrohstoffverwendung

Vom Holzrohstoffaufkommen – bestehend aus Waldholz, Abfällen und Reststoffen – werden 53 % einer stofflichen Verwendung zugeführt und 47 % energetisch genutzt (Abbildung 12 b). Die stoffliche Nutzung erfolgt überwiegend in der Sägeindustrie (33,3 %) und Holzwerkstoffindustrie (12,4 %). Bei Schnittholzprodukten und Holzwerkstoffen kann häufig von einer vergleichsweise längeren Lebensdauer und damit einer längeren Speicherung des Kohlenstoffs im Holz ausgegangen werden. In der Holz- und Zellstoffindustrie werden 7,1 % des Holzaufkommens verwendet. Die Kohlenstoffspeicherzeiten der aus diesen Halbwaren hergestellten Erzeugnisse sind in vielen Fällen deutlich kürzer. Die energetische Nutzung von Holz erfolgt überwiegend in privaten Haushalten (21,2 %) und in großen Biomasseanlagen (Leistung >1 MW, 17,4 %). Kleinere Biomasseanlagen (<1 MW) spielen mit 7,3 % eine kleinere Rolle (Abbildung 12 b). Die Ergebnisse des Rohstoffmonitorings Holz sind für die NABIS eine hilfreiche Informationsgrundlage, da alle holzbasierten Biomassen und deren Verwendung betrachtet werden.[11]

In Abbildung 13 sind die Flüsse der Holzrohstoffe in die Endverwendungssektoren dargestellt. So wird deutlich, dass Nadelderbholz und Sägenebenprodukte zu hohen Anteilen stofflich in den Sektoren Bau, Möbel, Verpackung und Zellstoff und zu kleineren Anteilen energetisch verwendet werden. Im Gegensatz dazu wird mehr als die Hälfte des Laubderbholzes direkt energetisch genutzt, mit einem starken Schwerpunkt in privaten Haushalten (siehe auch Anteile im Energieholz, Abbildung 13). Altholz wird zu sehr hohen Anteilen in großen Biomassefeuerungsanlagen verbrannt und nur zu etwa 15 % in Form von z.B. Spanplatten mit einem Verwendungsschwerpunkt im Möbelsektor stofflich genutzt. Die übrigen Holzrohstoffe werden fast ausschließlich energetisch verwendet (Abbildung 13).

[11] Das Rohstoffmonitoring Holz wird seit 2022 als Daueraufgabe vom Thünen-Institut fortgeführt (https://www.thuenen.de/de/fachinstitute/waldwirtschaft/projekte-liste/holzmaerkte/rohstoffmonitoring-holz)

Abbildung 13: Verwendung von Holzrohstoffen in Endwarensektoren im Jahr 2020 in Festmeteräquivalente (Mio. m^3_{swe})



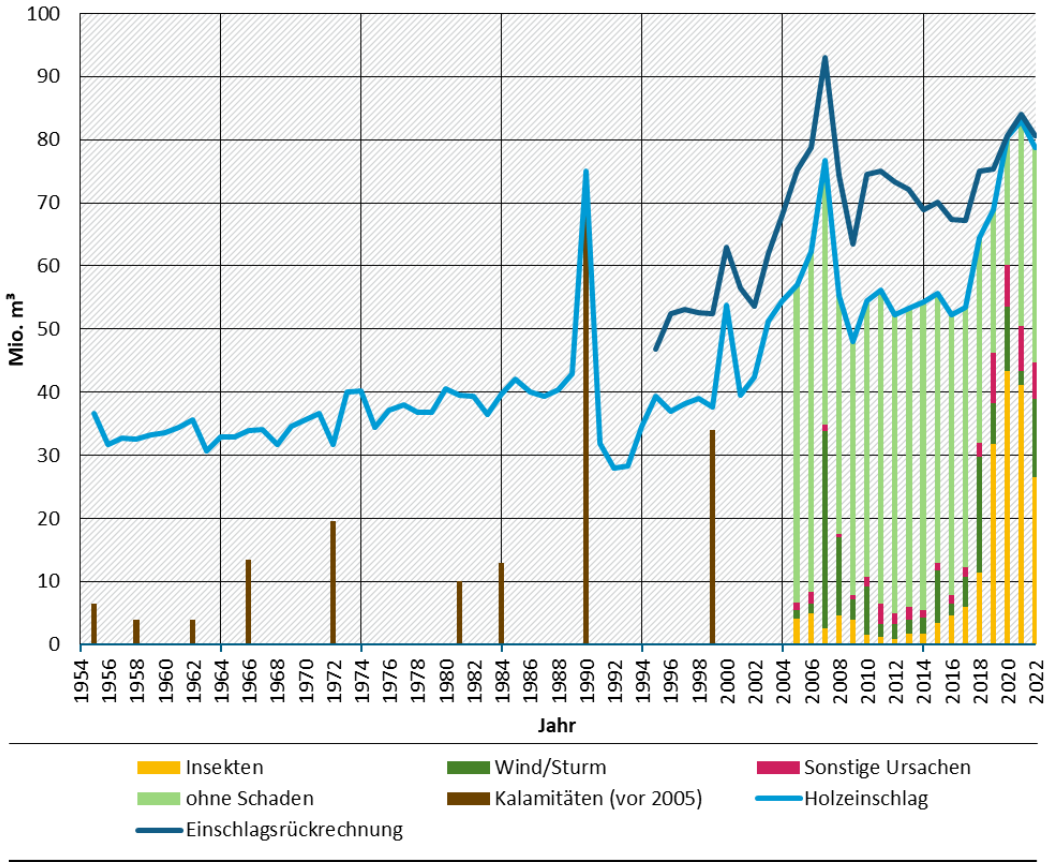
Quelle: Daten aus Pfeiffer et al. (2023), auf Grundlage von INFRO (2023), Mantau) (2023) und Hennenberg et al. (2022). KUP = Kurzumtriebsplantagen, swe = solid wood equivalent.
Energieholzprodukte setzen sich zusammen aus 81,3 % sonst. Industrierestholz, 11,9 % Laubderbholz, 3,6 % Schwarzlauge und 3,2 % Landschaftspflegeholz. Menge von KUP in Sonstiges & KUP = 0,09 Mio. m^3_{swe}; Menge von Rinde in Waldrestholz & Rinde = 2,39 Mio. m^3_{swe}. Nicht berücksichtigt ist Altpapier mit einem Volumen von 44,53 m^3_{swe}. Die Graphik wurde erstellt mit SankeyMATIC.

In der Einschlagsrückrechnung des Thünen-Instituts (Thünen-ESRR, Jochem et al. 2023, siehe Abbildung 14), die jährlich zur Abschätzung der Rohholzentnahme und des Holzeinschlags in Deutschland erstellt wird, wird ebenfalls nach stofflicher und energetischer Verwendung von Waldrohholz unterschieden. Grundsätzlich zeigt sich dort ein ähnliches Muster der Holzverwendung wie in Abbildung 13. Die Verwendung von Waldrohholz wird in der Thünen-ESRR aber lediglich bis zur ersten stofflichen Verarbeitungsstufe oder der direkten energetischen Nutzung betrachtet. Die Verwendungssektoren sind vergleichbar zu denen in Abbildung 12 b. Für Fragestellungen der NABIS, die nur Waldrohholz betreffen und eine jährliche Auflösung verlangen, bietet daher die Thünen-ESRR ebenfalls eine geeignete Datengrundlage.

Auswirkungen natürlicher Störungen

In Abbildung 14 sind Daten zum Holzeinschlag in Deutschland und Auswirkungen von natürlichen Störungen abgebildet. Seit Anfang der 2000er Jahre liegen differenzierte Daten zum Schadholzaufkommen vor. Ab dem Jahr 1990 ist zu sehen, dass sowohl die absolute Holzentnahme als auch das Schadholzaufkommen in Jahren mit starken natürlichen Störungen deutlich ansteigt. Beispiele sind der Orkan Kyrill im Jahr 2007 und die Extremjahre 2018 bis 2020 mit starker Trockenheit und resultierenden Käferschäden. Schadholz fiel insbesondere in Nadelbaumbeständen an, Laubmischwälder zeigten eine höhere Resilienz gegenüber natürlichen Störungen.

Abbildung 14: Holzeinschlag, Thünen-Einschlagsrückrechnung und Schadholzentnahme von 1954 bis 2020



Quelle: Hennenberg et al. (2022), Up-date bis zum Jahr 2022.
Daten nach Destatis (mehrere Jahrgänge, Daten-Code 41261), Franzmann (2014), Jochem et al. (2023), Möbius et al. (2000) sowie eigene Recherchen in Hennenberg et al. (2022). Kalamitäten (vor 2005) umfasst natürliche Störungen wie Sturmschäden, Trockenheit und Käferkalamitäten.

Kohlenstoffspeicherung in Wald und Holzprodukten und CO_2 Freisetzung bei der Holzverbrennung

Bäume binden im Holz durch ihren Zuwachs CO_2 aus der Atmosphäre. Sterben Bäume ab (natürliche Mortalität), entsteht Totholz und das gebundene CO_2 wird beim Verrotten wieder frei. Ein Teil der Holzbiomasse verbleibt im Boden als Humus bzw. Bodenkohlenstoff. Die Ernte und Durchforstung in bewirtschafteten Wäldern ist ein wichtiger Mortalitätsfaktor, und mit der Holzentnahme wird der gespeicherte Kohlenstoff direkt der Waldfläche entzogen, bleibt aber im Holz gebunden. Eingeschlagenes, aber nicht entnommenes Waldholz (Kronenholz, Stammfuß, Wurzelraum) geht zunächst in den Totholzpool über, bevor es verrottet und das im Holz gespeicherte CO_2 wieder freigesetzt wird. Wird das entnommene Waldholz zur Energiegewinnung verbrannt, entstehen CO_2-Verbrennungsemissionen in Höhe von 102 g/MJ (UBA 2022). Die CO_2-Freisetzung bei der Verbrennung und beim Verrotten sind gleich groß, der Verrottungsprozess erstreckt sich aber über einen längeren Zeitraum. Wird das Waldholz in Holzprodukten genutzt, so wird der Kohlenstoff weiter im Holz gespeichert. Wird ein Holzprodukt am Ende des Lebenswegs verbrannt, verlässt es den Holzproduktspeicher, und das gespeicherte CO_2 wird als CO_2-Verbrennungsemission freigesetzt.

Dieser Zusammenhang wird im nationalen Treibhausgasinventar (UBA 2023) nach der IPCC-Methode (IPCC 2006) abgebildet. Danach gilt für die folgenden Holzverwendungstypen[12]:

- Nutzung von Waldholz in einem Holzprodukt: CO_2-Verlust auf der Waldfläche und anschließende CO_2-Speicherung im Holzprodukt; in Summe keine CO_2-Emissionen.
- Nutzung von Holz, das den Holzproduktspeicher verlassen hat (z.B. Altholz), in einem neuen Holzprodukt: CO_2-Verlust aus dem Holzproduktspeicher und anschließende CO_2-Speicherung im neuen Holzprodukt; in Summe keine CO_2-Emissionen.
- Verbrennung von Waldholz zur Energiegewinnung: CO_2-Verlust auf der Waldfläche und anschließende Freisetzung des im Holz festgelegten CO_2; in Summe werden die CO_2-Verbrennungsemissionen frei.
- Verbrennung von Holz aus dem Holzproduktspeicher (z.B. Altholz) zur Energiegewinnung: CO_2-Verlust aus dem Holzproduktspeicher und anschließende Freisetzung des im Holz festgelegten CO_2; in Summe werden die CO_2-Verbrennungsemissionen frei.

Nach der Methode des IPCC und dem darauf basierenden deutschen Treibhausgasinventar werden die bei der Holzverbrennung entstehenden CO_2-Verbrennungsemissionen erfasst.

In produktbezogenen Treibhausgasbilanzen z.B. in der UBA-Emissionsbilanzierung (Lauf et al. 2021) und der Erneuerbaren-Energien-Richtlinie (RED III)[13] sowie im Europäischen Emissionshandel (ETS)[14] werden die CO_2-Verbrennungsemissionen teilweise mit Null bewertet. Diese Praxis wird in zahlreichen Publikationen kritisch gesehen, da in zentralen klimapolitischen Instrumenten die Klimaeffekte der Holznutzung nicht vollumfassend berücksichtigt werden (z.B. Searchinger et al. 2018, Fehrenbach et al. 2022, SRU 2022[15], Hennenberg et al. 2023, Rüter 2023 und Schindler et al. 2023)

[12] In der folgenden Aufstellung wird die CO_2-Freisetzung aus Totholz nicht beschrieben. Sie wird in der Dynamik der Waldentwicklung abgedeckt.

[13] RED III (Directive (EU) 2023/2413; https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/2413/oj) auf Grundlage der RED II (Directive (EU) 2018/2001. (https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32018L2001&qid=1699610056216)

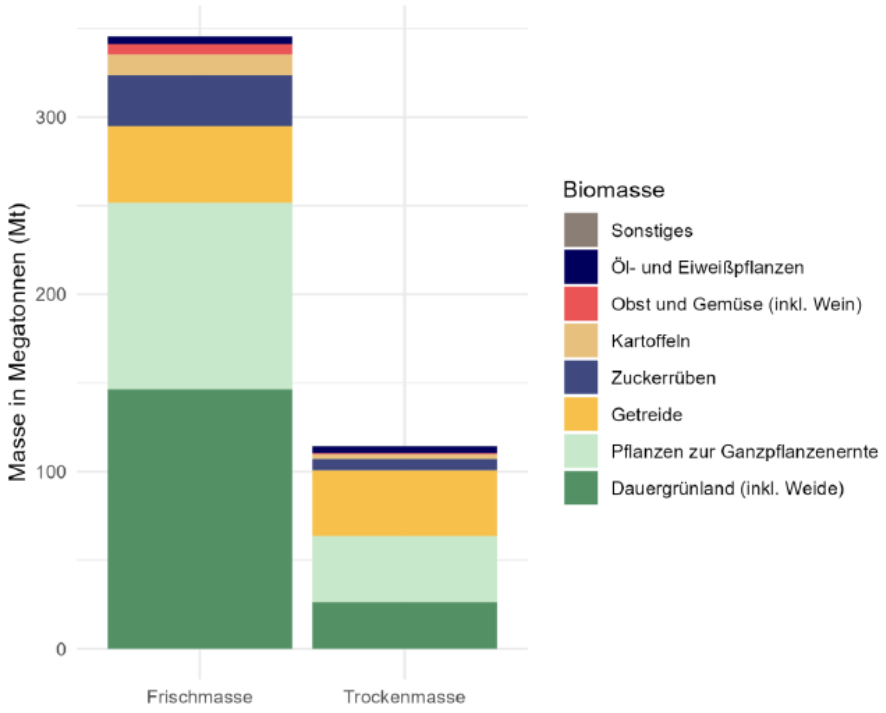
[14] Siehe z.B. unter: https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/der-europaeische-emissionshandel#teilnehmer-prinzip-und-umsetzung-des-europaischen-emissionshandels

[15] SRU (2022): Kurzstellungnahme des SRU zu den Eckpunkten der Nationalen Biomassestrategie https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/04_Stellungnahmen/2020_2024/2022_12_NABIS.pdf?__blob=publicationFile&v=5

2.2.2 Landwirtschaftliche Rohstoffe

Die im Jahr 2020 erzeugte landwirtschaftliche Biomasse beträgt 345,6 Mio. t Frischmasse (t_{FM}) bzw. 114,2 Mio. t Trockenmasse (t_{TM}; Abbildung 15). Ganzpflanzenernte und Dauergrünland machen mit 251,6 Mio. t_{FM} 72,8 % der in Deutschland geernteten Frischmasse aus. Aufgrund des relativ hohen Wassergehalts dieser Biomasse ist der Anteil der Trockenmasse etwas geringer, beträgt aber mit 63,5 Mio. t_{TM} immer noch 55,6 % der gesamten Trockenmasse. Ein Drittel der erzeugten Trockenmasse ist Getreide mit 37,2 Mio. t_{TM} (als Korn, ohne Ganzpflanzensilage). Die Hackfrüchte Zuckerrüben und Kartoffeln haben zusammen mit 9,0 Mio. t_{TM} einen Anteil von 7,8 % an der geernteten Trockenmasse. An Obst und Gemüse inklusive Weintrauben wurden im Jahr 2020 rund 5,9 Mio. t_{FM} Frischmasse geerntet (Anteil 1,7 %). Aufgrund des hohen Wassergehalts der Produkte entspricht dies nur etwa 0,6 Mio. t_{TM} (Anteil von 0,5 %). Öl und Eiweißpflanzen hatten mit 3,8 Mio. t_{TM} geernteter Trockenmasse einen Anteil 3,3 %. Unter sonstiger Biomasse sind Festbrennstoffe, wie Miscanthus, Holz aus Kurzumtriebsplantagen, Hopfen und Honig sowie Rübsen zusammengefasst. Diese nehmen zusammen weniger als 0,1 Mio. t_{TM} Trockenmasse (Anteil < 0,1 %) ein (Abbildung 15).

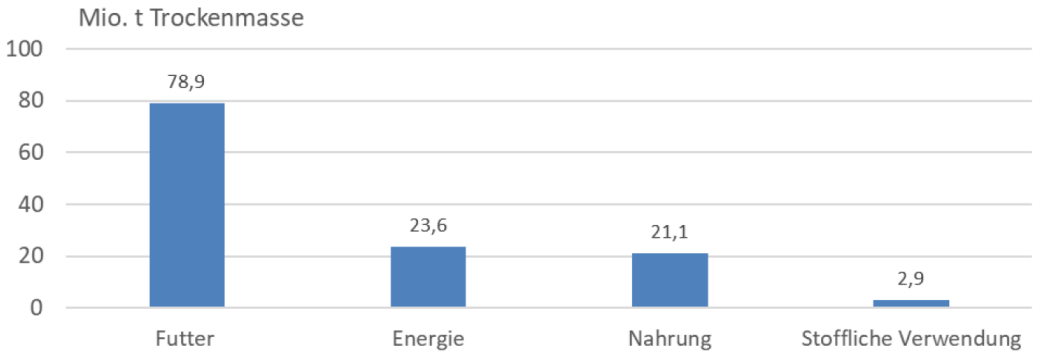
Abbildung 15: Erzeugung landwirtschaftlicher Primärbiomasse in Deutschland im Jahr 2020



Quelle: Zusammenstellung in Banse et al. (2023, S. 28). Mt = Megatonnen (synonym für Mio. t).

In Deutschland wurden im Jahr 2020 mit 78,9 Mio. t_{TM} der landwirtschaftlichen Biomasse als Futter in der Tierhaltung verwendet (Abbildung 16). Auf die Ernährung entfielen 21,1 Mio. t_{TM}. Dieser Anteil lag sogar niedriger als die Verwendung von Biomasse für Bioenergie (23,6 Mio. t_{TM}). Die stoffliche Verwendung von Landwirtschaftlicher Biomasse betrug lediglich 2,9 Mio. t_{TM} (Abbildung 16). Es ist zu beachten, dass in allen vier Bereichen pflanzliche und tierische Biomasse eingesetzt wird. Eine Summenbildung würde daher zu Doppelzählungen führen, da die als Futtermittel genutzte Biomasse das Ausgangsmaterial für tierische Biomasse ist. Ein direkter Vergleich mit den ermittelten Biomassepotentialen ist daher nicht möglich (siehe Banse et al. 2023, S. 56). Dennoch deckt sich das Muster der Verwendung landwirtschaftlicher Biomasse sehr gut mit dem dargestellten Muster der Flächennutzung in Kapitel 2.1.2.

Abbildung 16: Nutzung landwirtschaftlicher Biomasse in Deutschland im Jahr 2020



Quelle: Banse et al. (2023, S. 56). TM = Trockenmasse. In der Bilanz sind Importe berücksichtigt. Eine Summenbildung ist aus methodischen Gründen nicht erlaubt (siehe Text).

2.2.3 Biogene Abfälle und Reststoffe

Mit der Ressourcendatenbank[16] stellt das DBFZ umfangreiche Daten zu biogenen Abfällen und Reststoffen für das Erhebungsjahr 2015 bereit. Gut 80 %[17] der Daten zum Status quo des technischen Potenzials ausgewählter biogener Abfälle und Reststoffe wurden für das Jahr 2020 aktualisiert. Ein vollständiger, neuer Datensatz liegt aber noch nicht vor. Es zeigt sich zwischen den Erhebungsjahren 2015 und 2020 eine leichte Abnahme im Mittel von 5 % (siehe Details in Banse et al. 2023, S. 110).

In Abbildung 17 ist für Deutschland im Jahr 2015 die Menge an landwirtschaftlichen und sonstigen biogenen Abfällen und Reststoffen dargestellt. Waldrestholz und Rinde sind hier nicht berücksichtigt, da sie zur Holzernte zählen (siehe Abbildung 12). In der Summe lag das technische Potenzial an Abfällen und Reststoffen bei 101,4 Mio. Tonnen an Trockenmasse (Mio. t_{TM}). Hiervon wurde bereits ein deutlicher Anteil von 42,9 % stofflich genutzt, mit hohen Anteilen bei Siedlungsabfällen und industriellen Reststoffen (Abbildung 17).

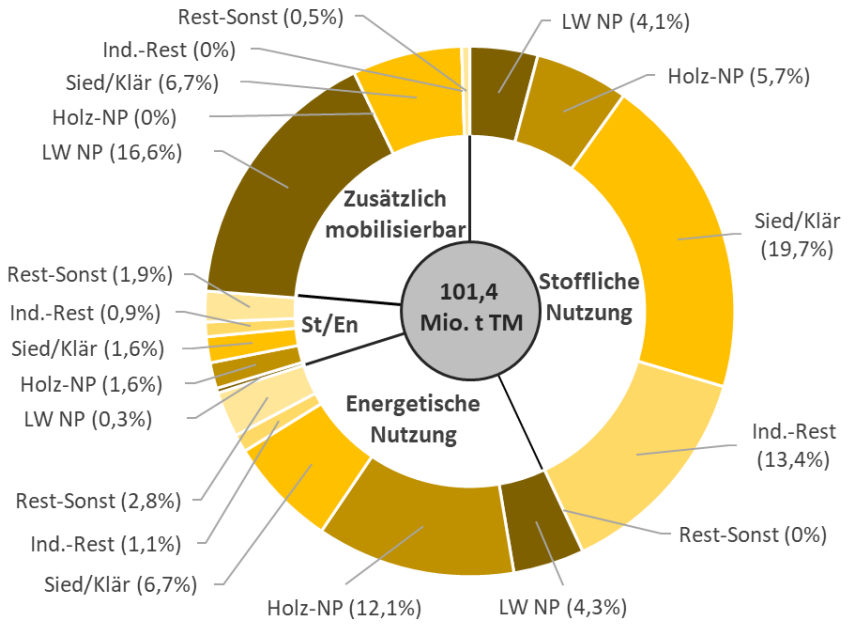
[16] DBFZ- Ressourcendatenbank (Version 2.0) unter: https://webapp.dbfz.de/resources/?lang=de

[17] Bezogen auf die Mengen ausgewählter Reststoffe (Top 15 - Bezugsjahr 2015, ohne holz- und forstwirtschaftliche Nebenprodukte, zzgl. weiterer tierischer Reststoffe/Exkremente von Rindern, Schweinen und Hühnern) in Tonnen Trockenmasse.

Weitere 27,0 % des technischen Potenzials an biogenen Abfällen und Reststoffen wurden energetisch verwendet. Hier spielen Holz-Nebenprodukte, Siedlungsabfälle und Klärschlamm eine größere Rolle. Für einen kleineren Anteil der Abfälle und Reststoffe ist eine Zuordnung zur Art der Nutzung nicht möglich (6,3 %, Abbildung 17).

Der mobilisierbare Anteil des technischen Potenzials der Abfälle und Reststoffe beträgt 23,8 % bzw. 24,1 Mio. t_{TM}. Dieses Potenzial verteilt sich fast ausschließlich auf landwirtschaftliche Nebenprodukte, Siedlungsabfälle und Klärschlamm sowie sonstige Reststoffe. Insbesondere für industrielles Restholz und Holz-Nebenprodukte wird das technische Potenzial bereits ausgeschöpft (Abbildung 17).

Abbildung 17: Technisches Potenzial der biogenen Abfälle und Reststoffe in Deutschland im Jahr 2015 differenziert nach stofflicher und energetischer Nutzung sowie mobilisierbarer Potenziale



Quelle: Eigene Darstellung nach Daten DBFZ-Ressourcendatenbank[16]. 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.

Im Jahr 2015 setzte sich das mobilisierbare technische Potenzial der landwirtschaftlichen Nebenprodukte zusammen aus 6,8 Mio. t_{TM} an Getreidestroh und 14,3 Mio. t_{TM} an Tierexkrementen. Bis zum Jahr 2020 nahm das technische Potenzial an Getreidestroh um 12 % und das technische Potenzial an Tierexkrementen um 8 % ab (Banse et al. 2023, S. 110). Für Getreidestroh besteht die Möglichkeit einer stofflichen Nutzung z.B. als Dämmmaterial sowie einer energetischen Nutzung, z.B. in Biogasanlagen oder als Rohstoff für Bioethanol. Tierexkremente können vor allem zur Produktion von Gasen verwendet werden. Die Gase können entweder energetisch genutzt oder als Rohstoff für z.B. die chemische Industrie eingesetzt werden.

3 Szenarien zum zukünftigen Biomasseangebot und dessen Nutzung

Ausgehend von der heutigen Situation strebt die Nationale Biomassestrategie an, einen zukünftigen Umgang mit Biomasse zu entwickeln, der mit den Zielen und Verpflichtungen Deutschlands im Bereich des Klima- und des Biodiversitätsschutzes sowie mit der Nutzung von Biomasse für die Energiewende und die Industrietransformation im Einklang steht. Da die Nutzung von Biomasse für die Zielerreichung in zahlreichen Sektoren eine Rolle spielt, ist es erforderlich zu wissen, welche Mengen an Biomasse zukünftig voraussichtlich zur Verfügung stehen werden. Daher sollte das zukünftig verfügbare Biomassepotenzial unter der Annahme abgeleitet werden, dass gesteckte Ziele erreicht werden. Um eine mögliche, zukünftige Entwicklung einzuschätzen, ist das Modellieren von Szenarien eine etablierte Methode. Zwei Typen von Szenarien können unterschieden werden: Maßnamenszenarien und Zielszenarien.

Bei Maßnahmenszenarien werden die Wirkungen bestimmter Maßnahmen für zukünftige Entwicklungen modelliert und abgeschätzt. Entsprechend wird nicht modelliert, wie ein bestimmtes Ziel (z.B. Treibhausgasneutralität Deutschlands bis 2045) erreicht werden kann, sondern es wird analysiert, ob ein gesetztes Ziel erreicht wird und wie groß der Beitrag einer (oder mehrerer) Maßnahmen an der Zielerreichung ist.

Ein prominentes Beispiel für ein Maßnahmenszenario ist das „Mit-Maßnahmen-Szenario“ (MMS) im Projektionsbericht der Bundesregierung (BReg 2023). Bei dem MMS wird die Entwicklung der Treibhausgasemissionen in Deutschland unter Annahme der bestehenden Maßnahmen, Rahmenbedingungen und Instrumente bis zum Jahr 2045 modelliert. Dabei wird auch das verfügbare Biomassepotenzial mit betrachtet (z.B. Menge an Biogas aus Tierexkrementen, Wechselspiel zwischen Tierbestand und freier Anbaufläche für Energiepflanzen). Die Ergebnisse des MMS können im Anschluss mit den Zielen z.B. im Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) verglichen werden, um aufzuzeigen, in welchen Bereichen noch Lücken bestehen und wo weitere Instrumente und Maßnahmen zur Zielerreichung nötig sind. Im MMS werden die KSG-Ziele verfehlt. Beispielsweise steht die nach MMS benötigte zukünftige Biomassemenge aller Sektoren nicht im Einklang mit den Zielen der Bundesregierung (z.B. im LULUCF-Sektor). Diese würden eine veränderte Bewirtschaftung der land- und forstwirtschaftlichen Fläche wie z.B. mehr Wiedervernässung von organischen Böden oder weniger Holzentnahme aus dem Wald verlangen. Aus diesen Gründen ist das aus dem MMS resultierende Biomassepotenzial nicht als Grundlage für die Ableitung eines Zielbildes der NABIS geeignet, die sich im ersten Schritt der Frage widmen möchte, wie viel Biomasse beim Erreichen der Klima- und Biodiversitätsschutzziele zukünftig zur Verfügung stehen wird. Vielmehr zeigt die erwartete Nachfrageentwicklung im Bereich der energetischen Biomassenutzung auf Grundlage der derzeitigen Rahmenbedingungen im MMS die Überschreitung des inländisch verfügbaren Biomassepotenzials auf.

Ein anderer Szenarientyp sind „**Zielszenarien**“. Hier wird ein zu erreichendes Ziel definiert wie z.B. die Ziele zur THG-Minderung im KSG. Iterativ werden Maßnahmen und Instrumente in die Modellierung aufgenommen bzw. ausgestaltet, bis die gesetzten Ziele erreicht

werden. Abgeleitete Biomassepotenziale als Ergebnis der Modellierung stehen also im Einklang mit den berücksichtigten Zielsetzungen. Für die strategische Ausrichtung der NABIS sollten abgeleitete zukünftige Biomassepotenziale aus Zielszenarien stammen, welche die für Deutschland gesetzten Ziele berücksichtigen. Wichtige Ziele, die die Erzeugung und Bereitstellung von Biomasse beeinflussen, sind: Klimaschutzziele für Landwirtschaft und LULUCF gemäß KSG, Ziel zum Ausbau des ökologischen Landbaus bis 2030, Biodiversitätsziele nach der Biodiversitätsstrategie, Ziele der Bioökonomiestrategie, Ziele der Charta für Holz 2.0, Ziele zum Moorbodenschutz der Nationale Moorschutzstrategie und Ziele zur Reduktion des Flächenverbrauchs nach der Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie.

Die politische Entwicklung im Bereich Klimaschutz ist sehr dynamisch, so dass aktuell nur zwei deutschlandweite Zielszenarien vorliegen, die eng an den Zielen des KSG ausgerichtet sind: das Langfristszenario 3 (LFS 3, Köppen und Rettenmaier in press.)[18] und das Klimaschutzinstrumente-Szenario 2030 (KIS 2030, Repenning et al. 2023). Ältere Szenarien sind weniger geeignet, da sie wichtige Zielsetzungen in Deutschland außer Acht lassen[19], und selbst LFS 3 und KIS 2030 berücksichtigen noch nicht die aktuellen politischen Entwicklungen wie das Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz (ANK). Das BEPASO-Szenario „Bioökonomie-Wende“ (BEPASO-Wende) ist zwar vom Szenarientyp her ein Maßnahmenszenario, die getroffenen Maßnahmen und Instrumente stehen aber im Einklang mit einem größeren Teil der oben genannten Ziele und ist daher vergleichbar zu denen eines nötigen Zielszenarios (vgl. Banse et al. 2023).

Vor diesem Hintergrund wurde in Absprache mit den für die Erarbeitung der NABIS federführenden Ministerien entschieden, die Biomassepotenziale der Szenarien BEPASO-Wende, LFS 3 und KIS 2030 als Teil der Ausgangslage für die NABIS heranzuziehen und – falls nötig und möglich – veraltete Daten durch neuere Daten zu ersetzen (z.B. biogene Abfälle und Reststoffe). Um die aktuellen politischen Entwicklungen abzubilden, sollen die aus diesen Szenarien resultierenden Biomassepotenziale entsprechend angepasst werden. Da die neueren politischen Entwicklungen teilweise nicht nur die Erzeugung, sondern auch die Nutzung von Biomasse für bestimmte Anwendungen beeinflussen (z.B. RED III)[13], sollten zudem Aussagen zu dem zukünftigen Biomassepotenzial aufgeteilt nach stofflicher und energetischer Nutzung generiert werden.

Im Folgenden werden die Grundannahmen in den drei Szenarien kurz zitiert. Da bei den Szenarien LFS 3 und KIS 2030 recht ähnliche Vorgehensweisen gewählt wurden, werden diese beiden in einem Kapitel zusammengefasst.

[18] Vorstellung LFS 3 unter: https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFS3_T45_Webinar_Angebot_Nov_2022_final_webinarversion.pdf (Biomasse ab Folie 31).

[19] Beispielsweise decken die „dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität“ (dena 2021) und die Agroa-Studie „Klimaneutrales Deutschland 2045“ (Dambeck et al. 2021) die Ziele des KSG noch nicht vollumfänglich ab.

3.1 Beschreibung der Szenarien

3.1.1 BEPASO „Bioökonomie-Wende“

Im BMBF-Projekt „Bioökonomie 2050: Potentiale, Zielkonflikte, Lösungsstrategien (BEPASO)“ wurden unterschiedliche Bioökonomie-Szenarien abgebildet (siehe Details in Banse et al. 2020 und Banse et al. 2023, S 60). Die verwendeten Ergebnisse stammen aus dem Szenario „Bioökonomie-Wende“ (BEPASO-Wende). Hier ist die Nachfrageseite von nachhaltigem Konsum einschließlich Konsumverzicht (Suffizienz) geprägt. Es kommt zu einem Rückgang des Konsums ressourcenintensiver Produkte und Dienstleitungen und, durch den Ausbau des öffentlichen Nahverkehrs, zu einem Rückgang der Nachfrage nach Kraftstoffen im Verkehr.

Auf der Angebotsseite begünstigen unterschiedliche Entwicklungen die Entkopplung der Biomasseproduktion von der Fläche: Es kommen neue Technologien zur Energieerzeugung bzw. zur Verarbeitung von Biomasse zum Einsatz sowie neue landwirtschaftliche Systeme und Züchtungsmethoden. Schließlich gelingt die industrielle Produktion von Rohstoffen mit Hilfe von Mikroorganismen (im chemischen Sektor sowie als Fleischersatz). Im Bereich der stofflichen Holznutzung entsteht zwar eine steigende Holznachfrage für die Herstellung von Möbeln und Gebäuden; gleichzeitig kommt es jedoch zu einem Absenken des Einsatzes von Primärholz je Endprodukt durch Effizienzsteigerungen.

Die durch diese Entkopplung freiwerdenden Produktionsflächen werden für den Naturschutz sowie zur Wiederherstellung funktionierender Waldökosysteme genutzt. Auch international kommt es zu einer deutlichen Zunahme von Waldgebieten bis 2050, da die globale Entwaldung gestoppt werden kann. Der verminderte Biomassebedarf kann hauptsächlich durch inländische Produktion gedeckt werden. In der Landwirtschaft kommt es bis 2050 schrittweise zu einem Wandel hin zu einer ökologischen Landwirtschaft, was zu einer verminderten Nutzung von Dünger und Pestiziden führt.

3.1.2 LFS 3 und KIS 2030

Detaillierte Beschreibungen zu den Narrativen und den getroffenen Annahmen in LFS 3 und KIS 2030 finden sich im Anhang (Kapitel 6.1 und 6.2). Aufgrund der zahlreichen thematischen Überschneidungen zwischen LFS 3 und KIS 2030 werden die wesentlichen Grundannahmen der beiden Szenarien kurz zusammengefasst und miteinander verglichen.

3.1.2.1 Anbaubiomasse aus der Landwirtschaft

Die Ermittlung des Potenzials aus **Anbaubiomasse** aus der Landwirtschaft erfolgte in den Szenarien LFS 3 und KIS 2030 mit derselben Vorgehensweise und umfasst die folgenden Schritte:

1) Entwicklung der Landwirtschaftlichen Nutzfläche sowie der Erträge

In einem ersten Schritt wurde die Größe der künftig zur Verfügung stehenden landwirtschaftlichen Nutzfläche (LN) unter Berücksichtigung der folgenden Elemente ermittelt.

- Abzug der Flächen für die Wiedervernässung von organischen Böden in der Landwirtschaft (**LFS 3**: 85% bis 2045; **KIS 2030**: 68 % bis 2040) (siehe Moorbodenschutz z.B. im ANK)
- Absenkung der Neuinanspruchnahme für Siedlungs- und Verkehrsfläche[20]
- Stopp des Grünlandumbruchs (Umsetzung der GAP in Deutschland)

Hinsichtlich der zu erwartenden Erträge wurde grundsätzlich von Ertragssteigerungen ausgegangen. Gleichzeitig kommt es jedoch durch den Anstieg des Ökolandbaus auf 30%[21] bis zum Jahr 2030 zu geringeren Erträgen. Auch führt die Reduktion des Stickstoffüberschusses zu Ertragsminderungen.

2) Ermittlung der für nachwachsende Rohstoffe (NawaRo) zur Verfügung stehenden Fläche

Im zweiten Schritt wurden von der insgesamt zur Verfügung stehenden landwirtschaftlichen Nutzfläche der Flächenanteil ermittelt, der für den Anbau nachwachsender Rohstoffe (NawaRo) genutzt werden kann. Hierbei wurde in den beiden Szenarien unterschiedlich vorgegangen.

In **LFS 3** wurde zunächst eine netto ausgeglichene Flächenbilanz angestrebt[22]. Nur durch eine starke Reduktion des Fleischverzehrs und damit der Viehhaltung entstehen überschüssige Flächenpotenziale, welche zur Produktion von NawaRo genutzt werden können. Teilweise werden diese jedoch wieder reduziert, um den durch die 30% Ökolandbau bedingten Ertragsrückgang auszugleichen.

In **KIS 2030** wird die Fläche für den Anbau von Nahrungs- und Futtermitteln für den Bedarf in Deutschland ermittelt. Dabei fließen Annahmen zum Rückgang der Viehhaltung und Veränderungen zu Erträgen (technische Innovationen, veränderte Stickstoffgabe und mehr Ökolandbau) ein. Ab 2030 wird von einer ausgeglichenen Import-/Export-Bilanz für Nahrungs- und Futtermittel ausgegangen. Von der landwirtschaftlichen Fläche (Punkt 1) wird die Anbaufläche für Anbau für Nahrungs- und Futtermittel abgezogen. Diese Fläche steht für den Anbau von NawaRo zur Verfügung (stofflich und energetisch genutzte Biomasse).

[20] Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung: unter 30 ha im Jahr 2030 (https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975274/1873516/9d73d857a3f7f0f8df5ac1b4c349fa07/2021-03-10-dns-2021-finale-langfassung-barrierefrei-data.pdf?download=1); Integriertes Umweltprogramm des BMU: 20 ha im Jahr 2030 (https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Pools/Broschueren/integriertes_umweltprogramm_2030_bf.pdf).

[21] Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie: 20 %fordert im Jahr 2030; Europäische Farm-to-Fork-Strategie: 25 % bis zum Jahr 2030; Koalitionsvertrag 2021: 30 % bis 2030 (Zusammenstellung unter https://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/oekologischer-landbau#okolandbau-in-deutschland)

[22] Laut Statistischem Bundesamt beanspruchte der deutsche Inlandsverbrauch von Ernährungsgütern im Jahr 2017 weltweit rund 19 Mio. ha Fläche (destatis 2019). In Deutschland standen jedoch nur rund 14 Mio. ha zur Verfügung, so dass sich unter Berücksichtigung sämtlicher Importe (z. B. Futtermittel) und Exporte (z. B. Fleisch- und Milchprodukte) ein Netto-Flächendefizit von rund 5 Mio. ha ergab, welches auch als virtueller Flächenimport bezeichnet wird. Im LFS 3 wurde dieses Flächendefizit ausgeglichen, zum einen durch die Reduktion des Fleischkonsums, zum anderen durch eine Reduktion der NawaRo-Flächen.

3) Aufteilung der Anbaufläche für stofflich und energetisch genutzte NawaRo

Die für den NawaRo-Anbau zur Verfügung stehende Fläche wird zwischen dem stofflich sowie energetisch genutzten Anteil aufgeteilt. Zunächst wird der Anteil abgezogen, der für die Produktion stofflich genutzter Biomasse eingesetzt wird. Dies geschieht in beiden Projekten durch eine Fortschreibung der Flächenbelegung aus dem Basisjahr. Die verbliebene NawaRo-Fläche wird für die Bioenergieproduktion verwendet. In beiden Szenarien wird unterstellt, dass diese Fläche mit Agroforstsystemen / Kurzumtriebsplantagen (LFS 3, KIS 2030) und anderen Bioenergiepflanzen (nur in KIS 2030) belegt werden.

4) Ermittlung sonstiger Potenziale an Anbaubiomasse

Zwar fallen durch die Wiedervernässung Teile der landwirtschaftlichen Nutzfläche aus der regulären Nutzung, teilweise wird dies jedoch durch die Etablierung von Paludikulturen (Schilf, Torfmoose) auf Teilen der wiedervernässten Flächen kompensiert.

3.1.2.2 Waldholz

Zur Ermittlung des Potenzials an Holzentnahme aus dem Wald wurde wie folgt vorgegangen:

1) Ermittlung der im Zieljahr möglichen Erntemenge im Wald unter Berücksichtigung der LULUCF-Senkenziele

Unter Berücksichtigung des LULUCF-Senkenziels im KSG wurde in beiden Projekten die Holzmenge modelliert, die insgesamt aus dem Wald geerntet werden kann. Dabei kommt es zu einer Extensivierung der Holzentnahme und damit zum Vorratsaufbau.

2) Abzug des Anteils für die stoffliche Nutzung

Vom insgesamt zur Verfügung stehenden Waldholz wurde die Menge an stofflich genutztem Holz abgezogen. In **LFS 3** wurde dazu die absolute Menge an stofflich genutztem Waldholz aus dem Basisjahr (als Durchschnitt der vergangenen 10 Jahre) abgezogen. In **KIS 2030** erfolgt die Fortschreibung hingegen auf Basis des prozentualen Anteils an stofflich genutztem Waldholz aus dem Basisjahr, wodurch es im Zeitverlauf mit der Abnahme der Holzentnahme auch zu einer leichten Abnahme der stofflichen Nutzung kommt.

3.1.2.3 Ermittlung der Reststoffpotenziale

Waldrestholz wurde in der Waldmodellierung berücksichtigt, und Tierexkremente wurden in der Landwirtschaft auf Basis der Tierzahlen berechnet. Die sonstigen Reststoffpotenziale – ohne Waldrestholz und Tierexkremente – stammen in den beiden Szenarien aus älteren Datensätzen. Da dieses Aufkommen nicht mit anderen Annahmen in der Modellierung interagiert, wurden die sonstigen Reststoffpotenziale sowie die tierischen Exkremente in Kooperation von DBFZ, ifeu und Öko-Institut neu ermittelt, bzw. konsistent mit den Annahmen in LFS 3 und KIS 2030 (anhand der Entwicklungen von Getreideflächen, Tierbestandszahlen sowie der Bevölkerung basierend auf den DBFZ-Daten) abgeleitet.

3.1.2.4 Nutzungsansprüche und Anpassung zur Erhöhung der stofflichen Nutzung

In LFS 3 und KIS 2030 werden zukünftige Biomassepotenziale ausgewiesen (siehe Methode in Kapitel 3.1.2.1 bis 3.1.2.3). Welcher Anteil dieser Biomassepotenziale stofflich genutzt wird, hängt insbesondere von den politischen Rahmenbedingungen ab. Als bereits bestehende politische Rahmenbedingungen sind zu nennen: das Kaskadenprinzip für die Holznutzung in der RED III[23] und Aktivitäten zur Kreislaufwirtschaft der Holznutzung im Rahmen der Charta für Holz, oder die Nutzung von Torfersatzstoffen in der Torfminderungsstrategie des BMEL[24] und der Nationalen Moorschutzstrategie[25] und Ansätze im ANK.

Laut dem Eckpunktepapier zur NABIS (BMWK, BMEL und BMUV 2022, S. 2) *„ist die Biomasse innerhalb ihrer nachhaltigen Potenzialgrenzen einzusetzen, in den effizientesten Anwendungsbereichen entsprechend der Kaskaden- und Mehrfachnutzung mit dem Vorrang einer stofflichen vor der energetischen Nutzung zu priorisieren und die Effizienz des Einsatzes von Biomasse – dort wo möglich – deutlich zu erhöhen.“*

In den Szenarien LFS 3 und KIS 2030 wurden diese politischen Zielsetzungen noch nicht ausreichend berücksichtigt. So liegt ein deutlicher Fokus auf der energetischen statt der stofflichen Nutzung der Biomassepotenziale. Um den genannten politischen Zielsetzungen gerecht zu werden, wird das Nutzungsmuster der Biomassepotenziale nachträglich verändert und mit zwei Schritten angepasst:

1. Literaturrecherche zu stofflichen Nutzungsansprüchen
2. Ableitung von Anpassungsfaktoren zur Erhöhung der stofflichen Nutzung der Biomassepotenziale in den Szenarien LFS 3 und KIS 2030

Literaturrecherche zu stofflichen Nutzungsansprüchen

In Banse et al. (2023, S. 75 ff.) wurde eine Literaturrecherche zu Nutzungsansprüchen der stofflichen Nutzung in Bezug auf nationale Biomasseressourcen durchgeführt. Ein Fokus lag auf dem stofflichen Biomasseeinsatz in den Bereichen Bau, Chemie, Papier und Torfersatz. Die Angaben zum zusätzlichen Biomassebedarf in der Literatur zeigen eine große Spannbreite, welche sich durch unterschiedliche Betrachtungsrahmen und Datengrundlagen in den einzelnen Sektoren ergeben (siehe Minimum und Maximum in Abbildung 18) und durch Unsicherheiten über zukünftige Marktentwicklungen verstärkt werden. Im Papiersektor und für Anbaubiomasse im Chemiesektor kann eine gleichbleibende Biomassenutzung bis hin zu einer Abnahme von 2,4 Mio. t_{TM} im Jahr 2050 im Vergleich zum Referenzjahr 2020 erwartet werden. Für den Einsatz an Reststoffen und Lignozellulose-haltiger Biomasse im Chemiesektor wird hingegen ein Anstieg der Nutzung auf bis zu 8,4 Mio. t_{TM} im Jahr 2050 erwartet. Für Torfersatzstoffe ist im Jahr 2030 bzw. 2050 mit einem Anstieg der Biomassenutzung um 2,7 Mio. t_{TM} zu rechnen. Die größten Zunahmen können aber im Bausektor mit Mengen von bis zu 10,3 Mio. t_{TM} auftreten (Abbildung 18). In Summe kann

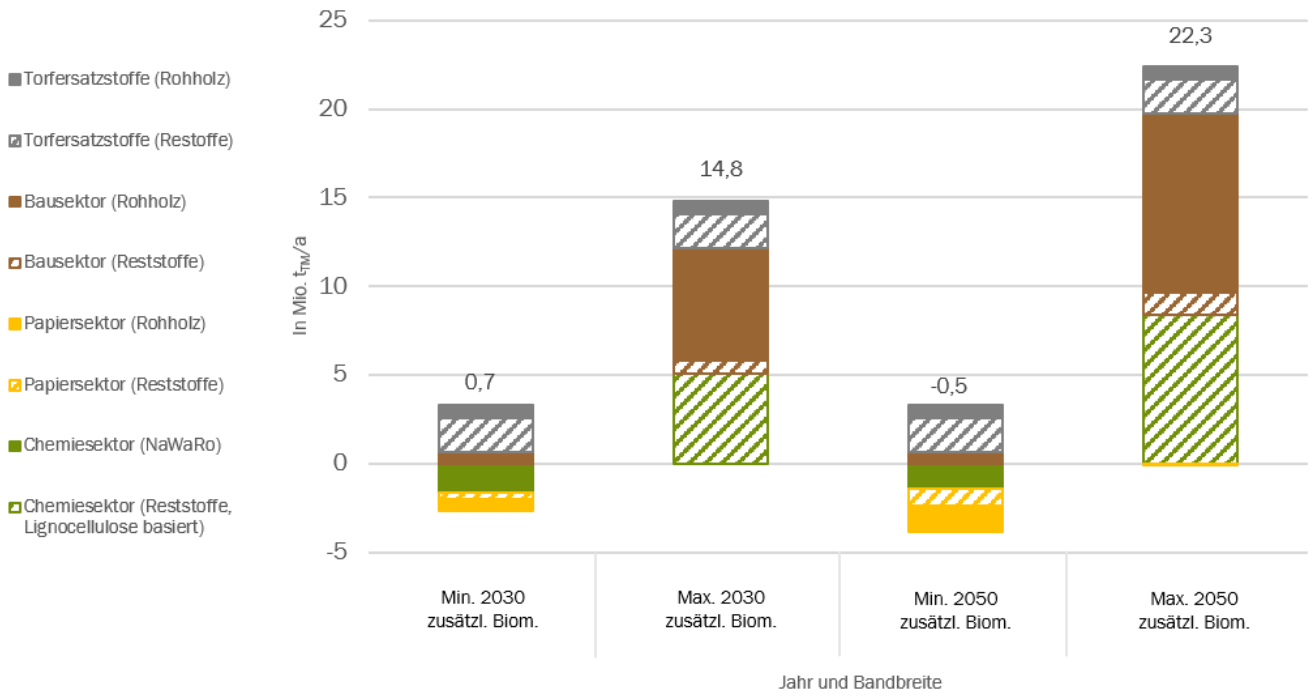
[23] Kaskadenprinzip nach Artikel 3.3, RED III: Es soll sichergestellt werden, dass holzartige Biomasse entsprechend ihrem höchsten wirtschaftlichen und ökologischen Mehrwert in der folgenden Rangfolge genutzt wird: (1) Holzprodukte, (2) Verlängerung ihrer Nutzungsdauer, (3) Wiederverwendung, (4) Recycling, (5) Bioenergie und (6) Entsorgung.

[24] BMEL (2022): Torffrei gärtnern, Klima schützen - Die Torfminderungsstrategie des BMEL. https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/torfminderungsstrategie.html

[25] https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Naturschutz/nationale_moorschutzstrategie_bf.pdf

eine Veränderung der stofflichen Biomassenutzung, bezogen auf Biomassenutzung aus nationalen Ressourcen, bis zum Jahr 2030 von +0,7 bis +14,8 Mio. t_{TM} (Mittelwert: +7,7 Mio. t_{TM}) und im Jahr 2050 von -0,5 bis +22,3 Mio. t_{TM} (Mittelwert: +10,9 Mio. t_{TM}) erwartet werden (vgl. Abbildung 18).

Abbildung 18: Zusätzlicher Biomassebedarf entsprechend stofflicher Nutzungsansprüche in den Bereichen Bau, Chemie, Papier und Torfersatz in den Jahren 2030 und 2050 in Bezug zum Referenzjahr 2020 in Mio. t Trockenmasse.



Quelle: Banse et al. (2023, S. 81). Mengen im Referenzjahr 2020: 2,4 Mio. t_{TM} im Chemiesektor, 5,7 Mio. t_{TM} im Papiersektor, 10,2 Mio. t_{TM} im Bausektor und 1,7 Mio. t_{TM} für Torfersatzstoffe. Min. = Minimum, Max. = Maximum.

Anpassung zur Erhöhung der stofflichen Nutzung der Biomassepotenziale

Bei der Modellierung der energetischen Biomassenutzung müssen die oben genannten politischen Vorgaben und die steigenden Nutzungsansprüche berücksichtigt werden. Gleichwohl besteht erhebliche Unsicherheit darüber, wie eine nachhaltige Aufteilung der verfügbaren Biomassepotenziale auf stoffliche und energetische Nutzungen zukünftig aussieht. Diese Unsicherheit ergibt sich nicht zuletzt aus der unklaren zukünftigen Technologieentwicklung, aber auch der zunehmenden Integration stofflicher und energetischer Nutzungen etwa in Bioraffinerien, die Produkte für beide Anwendungsfelder herstellen (Multiproduktanlagen). Die oben mithilfe der Literatur abgebildeten Nutzungsansprüche können die Größenordnung einer solchen Aufteilung plausibilisieren. Sie stellen allein aber keine ausreichende Datengrundlage dar, da sie teilweise auf bloße Nutzungsansprüche bestimmter Sektoren verweisen, die noch nicht mit den Nutzungsansprüchen anderer Sektoren abgewogen wurden. Auch in den oben beschriebenen Modellannahmen zu LFS 3 und KIS 2030 fehlen Aussagen hierzu. Um die steigenden stofflichen Nutzungsansprüche in diesen Szenarien dennoch abzubilden, wurden die in LFS 3 und KIS 2030 ermittelten NawaRo-Potenziale annahmebasiert verstärkt einer stofflichen Nutzung zugewiesen und weniger der energetischen Nutzung. Die Biomasse für Nahrungs- und Futtermittel blieb

hiervon unberührt. Diese Annahmen wurden in Kooperation der Forschungsinstitute ifeu, Öko-Institut und DBFZ getroffen, mit den Angaben in der Literatur abgeglichen und mit den beteiligten Ministerien abgestimmt. Zudem flossen Ergebnisse aus einem Fachdialog zur energetischen Holznutzung beim BMEL ein.[26] Die Annahmen stellen ausdrücklich keine Prognosen dar, sondern sind als Szenariosetzungen zu betrachten. Sie sollen aufzeigen, wie eine kosteneffiziente energetische Nutzung von Biomasse zukünftig aussieht, wenn eine wie in Tabelle 3-1 beschriebene Aufteilung zwischen stofflicher und energetischer Biomassenutzung eintritt.

Für die landwirtschaftlichen Flächen, die in den Szenarien LFS 3 und KIS 2030 für den Anbau von Energiepflanzen verwendet werden, wurde angenommen, dass von dieser Fläche im Jahr 2030 0,5 Mio. ha und im Jahr 2040/2045 0,8 Mio. ha für den Anbau von Industriepflanzen zur stofflichen Nutzung verwendet werden (ebenfalls Tabelle 3-1). Diese Veränderung ist wiederum eine Setzung durch die Forschungsinstitute ifeu, Öko-Institut und DBFZ, die mit den beteiligten Ministerien abgestimmt wurde.

Für die Modellierung der energetischen Biomassenutzung auf Basis des BEPASO-Wende-Szenarios wurden keine solchen Änderungsfaktoren berücksichtigt, da das Szenario steigende stoffliche Nutzungen berücksichtigt und der Modellierungsansatz eine nachträgliche Veränderung einzelner Variablen nicht zulässt.

Tabelle 3-1: Änderungsfaktoren für eine zusätzliche stoffliche Nutzung anstelle einer energetischen Nutzung in den Szenarien LFS 3 und KIS 2030

Berücksichtigtes Element	Angenommene Veränderungen von einer energetischen Nutzung hin zu einer stofflichen Nutzung von Biomasse
Waldholz - 2030	25 % des Waldenergieholzes wird stofflich statt energetisch genutzt
Waldholz – 2040/2045	80 % des Waldenergieholzes wird stofflich statt energetisch genutzt
Rest- und Abfallholz (ohne Waldrestholz) - 2030:	10 % des Energieholzes aus Abfällen und Reststoffen wird statt energetisch stofflich genutzt
Rest- und Abfallholz (ohne Waldrestholz) – 2040/2045:	55 % des Energieholzes aus Abfällen und Reststoffen wird stofflich statt energetisch genutzt
Anbaufläche 2030	Auf einer Fläche von 0,5 Mio. ha werden Industriepflanzen anstatt Energiepflanzen angebaut.
Anbaufläche 2040/2045	Auf einer Fläche von 0,8 Mio. ha werden Industriepflanzen anstatt Energiepflanzen angebaut.

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Banse et al. (2023, S. 76).
Umrechnungsfaktor 1 m³ = 0,55 in t_{atro}; 1 t_{lutro} = 0,8 in t_{atro}; t_{atro} = Trockenmasse (absolut trocken), t_{lutor} = lufttrockenes Holz (15 % Wassergehalt); Rindenanteil = 12 %.

[26] Fachdialog „Bewertung der Klima-/Treibhausgaswirkung der energetischen Nutzung von Holz“ am 18./19.04.2023 beim BMEL.

3.2 Modellierte und abgeleitete Biomassepotenziale

Für die Darstellung der Biomassepotenziale werden je Biomassetyp unterschiedliche, möglichst aussagekräftige Einheiten verwendet. Waldholz wird in Mio. Festmeter ohne Rinde (FM o.R. bzw. Mio. m³), Anbauflächen in Mio. ha, Tierzahlen in Mio. GVE (Großvieheinheit) und biogene Abfälle und Reststoffe in Mio. t Trockenmasse (Mio. t_{TM}) angegeben.

Folgende Ergebnisse sind in diesem Bericht zusammengestellt:

- Die Biomassepotenziale zum Szenario BEPASO-Wende sind in Tabelle 3-2 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 (Tabelle 3-3).
- Der besseren Übersichtlichkeit halber werden ausgewählte Ergebnisse zu den Biomassepotenzialen zusammenfassend grafisch dargestellt (Abbildung 19 und Abbildung 20).

Tabelle 3-2: Flächennutzung und Biomassepotenziale in BEPASO-Wende in den Jahren 2020, 2030 und 2050

	Einheit	2020	2030	2050
Forstwirtschaft				
Waldholz inkl. Restholz*	Mio. Fm o.R. (= Mio. m³)	74,9 - 123,3	67,05	72,03
Landwirtschaft				
Ernährung & Futtermittel	ha	14.015.000	14.883.000	13.343.000
NawaRo inkl. KUP (stofflich & energetisch)	ha	2.583.000	1.466.000	2.791.000
Biogene Abfälle und Reststoffe				
tierische Exkremente (anteilige Nutzung als Biogas)	Tierzahlen (Mio. GVE)	9,9	8,2	5,6
holzige Abfälle & sonstige Reststoffe* (technisches Potenzial)	Mio. t_{TM}	27,10 - 36,10	20,42	19,36
weitere holzige Abfälle & sonstige Reststoffe** (technisches Potenzial)	Mio. t_{TM}	13,25 - 14,95	nicht ableitbar	nicht ableitbar
nicht-holzige Abfälle/Reststoffe*** (technisches Potenzial)	Mio. t_{TM}	52,4	50,9	48,9

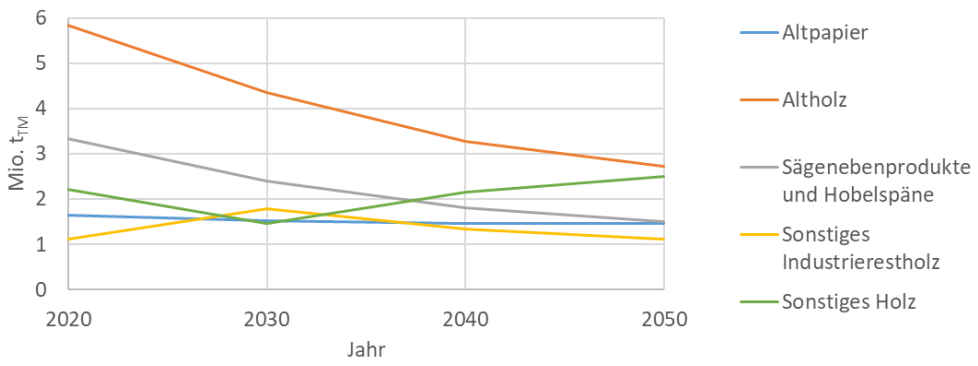
Quelle: Eigene Zusammenstellung, Thünen-Institut. KUP = Kurzumtriebsplantagen, Fm o.R. = Festmeter ohne Rinde, TM = Trockenmasse. * holzige Abfälle & sonstige Reststoffe umfasst Sägenebenprodukte, Rinde, Ablauge und Altpapier. ** weitere holzige Abfälle & sonstige Reststoffe umfasst sonstiges Industrierestholz, Altholz, Landschaftspflegeholz (diese Biomassen können nicht über BEPASO-Ergebnisse abgeleitet werden, sind aber im Status Quo enthalten und daher hier separat aufgeführt). *** ohne Tierexkremente.

Tabelle 3-3: Flächennutzung und Biomassepotenziale in LFS 3 und KIS 2030 in den Jahr 2030 und 2040

	2030		2045	2040
Szenario	**LFS 3**	**KIS 2030**	**LFS 3**	**KIS 2030**
Forstwirtschaft				
Waldholz o.R. (inkl. Waldrestholz), stofflich	57 Mio. m³	55,1 Mio. m³	56 Mio. m³	68,5 Mio. m³
Waldholz o.R. (inkl. Waldrestholz), energetisch	13 Mio. m³	10,2 Mio. m³	2,2 Mio. m³	4,0 Mio. m³
Landwirtschaft				
Ackerland: Nahrung und Futtermittel	10.200.524 ha	10.160.360 ha	10.390.487 ha	9.597.694 ha
Grünland: Futtermittel	4.459.566 ha	4.430.000 ha	4.152.111 ha	4.240.000 ha
Ernährung & Futtermittel	**14.660.090 ha**	**14.590.360 ha**	**14.542.598 ha**	**13.837.694 ha**
Ackerland: stoffliche Nutzung	793.333 ha	800.000ha	1.083.333 ha	1.100.000 ha
Ackerland: energetische Nutzung (inkl. Paludikultur und Agroforst/KUP)	553.338 ha	1.339.640 ha	383.345 ha	1.602.306 ha
NawaRo inkl. KUP (stofflich & energetisch)	**1.346.671 ha**	**2.139.640 ha**	**1.466.678 ha**	**2.702.306 ha**
Moorbodenschutz (informativ)	617.522 ha	368.203 ha	1.049.788 ha	911.438 ha
Biogene Abfälle und Reststoffe				
tierische Exkremente (anteilige Nutzung als Biogas)	9,9 Mio. GVE	9,1 Mio. GVE	5,9 Mio. GVE	8,8 Mio. GVE
Summe der biogenen Abfälle und Reststoffe (stofflich, energetisch oder ungenutzt)	112,7 Mio. t_{TM}	107,6 Mio. t_{TM}	108,1 Mio. t_{TM}	105,4 Mio. t_{TM}
Holzige sonstige Abfälle und Reststoffe (energetisch) *	11,4 Mio. t_{TM}	11,5 Mio. t_{TM}	9,9 Mio. t_{TM}	10,1 Mio. t_{TM}
Nicht-holzige sonstige Abfälle und Reststoffe (energetisch)**	34,2 Mio. t_{TM}	29,2 Mio. t_{TM}	34,7 Mio. t_{TM}	28,2 Mio. t_{TM}

Quelle: Eigene Zusammenstellung, ifeu, Öko-Institut. KUP = Kurzumtriebsplantagen, Fm o.R. = Festmeter ohne Rinde, TM = Trockenmasse. * Holzige sonstige Abfälle und Reststoffe (energetisch) umfasst Altpapier, Altholz, Sägenebenprodukte und Hobelspäne, Sonstiges Industrierestholz und sonstiges Holz.
** ohne Tierexkremente.

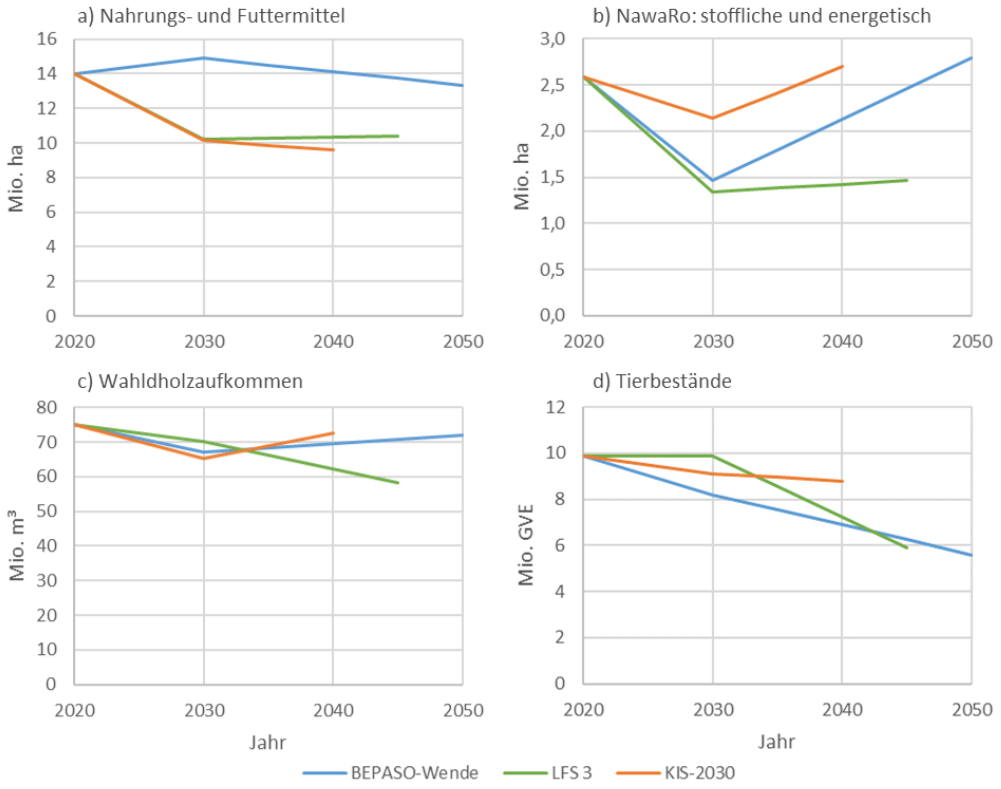
Abbildung 19: Entwicklung der energetisch genutzten holzigen sonstigen Rest- und Abfallstoffpotenziale in LFS 3 und KIS 2030.



Quelle: Eigene Darstellung, Daten im Rahmen der BenOpt-Modellierung in Banse et al. (2023, S. 82 ff.).

Die Anbauflächen für Nahrungs- und Futtermittel bewegen sich in allen drei Szenarien in einer vergleichbaren Größenordnung. Beispielsweise liegt der Wert im Jahr 2030 in BEPASO-Wende bei 14,9 Mio. ha, in LFS 3 bei 14,7 Mio. ha und in KIS 2030 bei 14,6 Mio. ha (Abbildung 20 a). Bei den Tierzahlen in Abbildung 20 d ist in allen drei Szenarien eine abnehmende Tendenz zu sehen, die sich bis zu 2 Mio. GVE unterscheidet. Annahmen zu Tierzahlen, aber auch zum Ökologischen Landbau, zu Veränderungen der Erträge und – im Fall von LFS 3 – zur ausgeglichenen Netto-Flächenbilanz führen in den Szenarien zu einer unterschiedlichen Flächenkulisse der NawaRo-Flächen mit einer Spannbreite von 1,5 bis 2,7 Mio. ha (Abbildung 20 b). Unterschiede in den NawaRo-Flächen sind mit ursächlich für die Unterschiede in den Anbauflächen für Nahrungs- und Futtermittel in den Jahren ab 2040 (Abbildung 20 a).

Abbildung 20: Zusammenfassung der Biomassepotenziale in den drei Szenarien.



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Tabelle 3-2 und Tabelle 3-3. FM o.R. = Festmeter ohne Rinde, NawaRo = Nachwachsende Rohstoffe.

Beim Waldholzaufkommen sind die modellierten Unterschiede zwischen den drei Szenarien ebenfalls gering. Die Ergebnisse in LFS 3 liegen im Jahr 2045 deswegen niedriger, weil im Vergleich zu z.B. KIS 2030 weniger Anbaufläche für Agroforst und KUP unterstellt wird. Die geringere CO_2-Einbindung an dieser Stelle wird in LFS 3 durch einen stärkeren Senkenaufbau im Wald und damit verbunden durch eine verringerte Holzernte ausgeglichen.

3.3 Analysen zur optimalen Verwendung der zur energetischen Nutzung verfügbaren Biomassepotenziale

In Kapitel 3.2 werden zukünftige Biomassepotenziale ausgewiesen, die auf den Szenarien BEPASO-Wende, LFS 3 und KIS 2030 aufbauen. Diese zukünftigen Biomassepotenziale wurden hinsichtlich der Aspekte stoffliche bzw. energetische Nutzung aufgegliedert. Gerade im Bereich der energetischen Nutzung von Biomasse bestehen zahlreiche Nutzungsoptionen in den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr sowie im Hinblick auf unterschiedliche Technologiepfade. Für die NABIS ist es aufgrund der potenziell hohen Kosteneinsparungen durch Bioenergie bei gleichzeitig knappen energetischen Biomassepotenzialen eine relevante Frage, in welchen der Sektoren und mit welchen Technologien diese Ressource zukünftig energetisch genutzt werden sollte.

Um diese Frage zu beantworten, wurde das auf Biomasse spezialisierte Optimierungsmodel BenOpt (BioENergy OPTimisation model) verwendet, um den optimalen Einsatz der entsprechend Kapitel 3.2 für die energetische Nutzung verfügbaren Biomasse zu analysieren. Eine Betrachtung der zur stofflichen Nutzung ausgewiesenen Biomassemengen findet in diesem Abschnitt nicht statt. In BenOpt wird der Bioenergieeinsatz hinsichtlich der verwendeten Technologien sowie die Auswahl der angebauten Feldfrucht optimiert. Eine wichtige Rahmenbedingung sind die Vorgaben zum Klimaschutz im Bundes-Klimaschutzgesetz. Details zu den Ergebnissen finden sich in Banse et al. (2023, S. 82 ff.).

BenOpt ist ein lineares Energiesystemoptimierungsmodell. Mit der Modellierung in BenOpt können mögliche kostenoptimale Transformationspfade für die zukünftige Bioenergienutzung in verschiedenen Szenarien aufgezeigt werden. Es besteht dabei aber nicht der Anspruch, Prognosen oder Trendfortschreibungen für die Zukunft zu entwickeln.

Biomasse kann in verschiedensten Bereichen des Energiesystems eingesetzt werden. Sie ist allerdings nur begrenzt verfügbar, wie auch die Anbaufläche, auf der unterschiedliche Bioenergiepflanzen angebaut werden können. Die Ergebnisse der BenOpt Modellierung zeigen als **generelles Muster**, dass Bioenergie ihren kostenoptimalen Nutzen in den Bereichen hat, in denen eine direkte Elektrifizierung nicht oder nur sehr eingeschränkt möglich ist, oder zur Flexibilisierung des Stromsektors. Die direkte Konkurrenz zur Biomasse in diesen Bereichen werden zukünftig die kostenintensiven Energieträger Wasserstoff und synthetische Brennstoffe stellen. Eine Reduktion der zukünftigen Biomassepotenziale im Energiesystem der gewählten Szenarien bedeutet eine deutliche Steigerung der Kosten, besonders für den Zeitraum ab dem Jahr 2045. Ursächlich ist, dass Biomasse vermehrt in der stofflichen Nutzung z.B. als Ersatz für fossile Rohstoffe eingesetzt wird, woraus vor allem ein Mehrbedarf an Wasserstoff und an synthetischen Brennstoffen als Folge der Reduktion des Biomasseeinsatzes im Energiesystem resultiert.

Im **Wärmesektor** ergibt das Modell einen optimalen Einsatz der größten Menge der für den Energiebereich verfügbaren Biomasse für Hochtemperatur-Industrieanwendungen optimal, und zwar vorrangig in Form von Hackschnitzeln aus Holzreststoffen und Miscanthus als angebaute Feldfrucht. Daneben wird laut BenOpt in Gebäuden weiterhin Scheitholz (Derbholz) aus dem Wald in Scheitholzfeuerungen und Holzpellets vor allem in hybriden Systemen mit Wärmepumpen oder Solarthermie eingesetzt, allerdings deutlich effizienter als heute. Wie hoch der zukünftige Anteil von Holzpellets in Gebäudeheizungen sein wird, hängt auch vom hierfür zur Verfügung stehenden Biomassepotenzial ab. Als wettbewerbsfähigste Optionen wurden durch BenOpt Solarthermie- oder Wärmepumpen-

Hybrid-Systeme identifiziert, in denen die Biomassetechnologie (Scheitholz aus Klein(st)privatwald bzw. Holzpellets, soweit zur energetischen Nutzung verfügbar) die Spitzenlast deckt. Vergärbare Abfälle und Reststoffe als Rohstoffe für Biomethan spielen ab den 2040er Jahren in Hochtemperatur-Industrieanwendungen und als Substitut in den noch vorhandenen Gasthermen eine Rolle, um auch diese Anwendungen klimaneutral zu gestalten.

Im **Stromsektor** ist laut BenOpt der Einsatz von Biogas aus heimischen vergärbaren Abfällen und Reststoffen sowie Stroh zur flexiblen Bedarfsdeckung der Residuallast die kosteneffizienteste Option. Auch kann der Einsatz von Holzvergasern mit Kraft-Wärme-Kopplungs-Technik und Miscanthus als Biomasse Marktanteile erzielen.

Im **Verkehrssektor** erweist sich die Elektrifizierung des Straßen- und Schienenverkehrs als wettbewerbsfähigste Option, gefolgt von Biokraftstoffen und strombasierten Kraftstoffen (Wasserstoff, PtL, PtG). Generell sind im Verkehrssektor nur geringe Bioenergieanteile ökonomisch vorteilhaft bzw. notwendig. Am vordringlichsten ist dies im Schiffsverkehr der Fall, wo HEFA Diesel (ölige Reststoffe) und SNG (BTG LNG ligno aus Ablauge und/oder Miscanthus) zum Einsatz kommen. Verbleibende Mengen an öligen Reststoffen gehen als HEFA SAF in den Flugverkehr.

4 Zusammenfassung

Mit der Entwicklung einer Nationalen Biomassestrategie (NABIS) will die Bundesregierung Leitlinien und Ziele für eine nachhaltige Erzeugung und einen effizienten Einsatz von Biomasse vorlegen. So soll ein Beitrag zur mittel- und langfristigen nachhaltigen Ressourcennutzung, zur Energiewende und Industrietransformation sowie zum Klima- und Biodiversitätsschutz geleistet werden. Der vorliegende Bericht stellt wesentliche Daten, Ergebnisse und Überlegungen zum Biomassepotenzial in Deutschland und zukünftigen Nutzungserwartungen kompakt zusammen, die als Grundlage in die Erarbeitung der NABIS eingeflossen sind.

Status Quo der Land- und Forstwirtschaft

Die **Landesfläche in Deutschland** beträgt 35,8 Mio. ha. Davon sind 35 % Ackerland, 17,5 % Grünland, 30,8 % Wald, 2,2 % Feuchtgebiete und Gewässer sowie 13 % Siedlungs- und Verkehrsflächen. Im Mittel der letzten 20 Jahren nahmen die Siedlungsfläche um 83 ha pro Tag und die Waldfläche um 76 ha pro Tag zu. Im Gegenzug konnte ein durchschnittlicher Rückgang der landwirtschaftlichen Flächen um 116 ha pro Tag und sonstiger Flächen um 42 ha pro Tag verzeichnet werden.

Die **Waldfläche** in Deutschland befindet sich zu 52 % in staatlichem Besitz und zu 48 % in privater Hand. Im Staatswald stocken etwa gleiche Anteile an Nadel- und Laubbäumen, im Privatwald sind es hingegen 60 % Nadelwald und 40 % Laubwald. Bei den Nadelbäumen dominieren Fichte und Kiefer, und auf Lärche, Tanne und Douglasie entfallen deutlich kleinere Flächenanteile. Bei den Laubbäumen sind Buche gefolgt von Eiche am häufigsten, aber auch andere Laubbaumarten haben deutliche Flächenanteile.

Das **Holzrohstoffaufkommen in Deutschland** betrug im Jahr 2020 126 Mio. m³. Große Anteile entfielen auf Nadelderbholz (44,1 %), Laubderbholz (10,3 %), Sägenebenprodukte (16,3 %) und Altholz (12,9 %). Kleinere Anteile waren Landschaftspflege- und Kurzumtriebsholz, Schwarzlauge und sonstiges Restholz. In den letzten 10 Jahren wurden 66,4 bis 82,2 Mio. m³ an Holz pro Jahr aus dem Wald entnommen. Die Entnahme an Nadelderbholz war etwa viermal größer als die von Laubderbholz. In den Extremjahren 2018-2020 ging eine hohe Holzentnahme mit hohen Schadholzanteilen einher. Holzrohstoffe wie Sägenebenprodukte, Altholz und Schwarzlauge werden auch bei den Mengen der biogenen Abfälle und Reststoffe berücksichtigt (s.u.). Holzrohstoffe wurden im Jahr 2020 zu 53 % stofflich und zu 47 % energetisch verwendet. In der **stofflichen Nutzung** wurden zu sehr großen Anteilen Nadelderbholz und Sägenebenprodukte eingesetzt. Kleinere Mengen an Laubholz wurden im Bau- und Möbelsektor verwendet. **Energieholz** stammte zu hohen Anteilen aus Altholz, Industrieholz, Schwarzlauge, Waldrestholz und Landschaftspflegeholz. Es wurden aber auch deutliche Mengen an Waldderbholz energetisch genutzt. Dazu zählten im Jahr 2020 9,0 Mio. m³ an Laubderbholz und 6,5 Mio. m³ Nadelderbholz, mit denen vor allem private Haushalte heizten.

Die **landwirtschaftlichen Flächen** wurden im Jahr 2021 zu 59 % für den Anbau von Futtermitteln und zu 21 % für pflanzliche Nahrungsmittel verwendet. Hinzu kamen 13 % für den Anbau von Energiepflanzen, 2 % für Industriepflanzen und 5 % für anderen Nutzungen. Von der landwirtschaftlichen Fläche wurden 11% nach Anforderungen des ökologischen Landbaus bewirtschaftet. Gut 1,3 Mio. ha der landwirtschaftlichen Fläche befinden sich auf organischen Böden. Ihre trockene Bewirtschaftung emittierte im Jahr 2021 ca. 39 Mio. t CO_2e.

Im Hinblick auf angebaute **Feldfrüchte** dominierten in Deutschland Getreidearten (50 %), Silomais (20 %) und Winterraps (7 %). Bei den Energiepflanzen überwog der Anbau von Biogassubstraten gefolgt von Rapsöl für Biodiesel und Pflanzen für Bioethanol. Industriepflanzen nahmen nur gut ein Zehntel der Anbaufläche der Energiepflanzen ein. Im Jahr 2020 dominierte in Deutschland die Verwendung landwirtschaftliche Biomasse als Futter. Die Verwendung von Biomasse für Nahrungsmittel lag um den Faktor 3,5 niedriger als für Futtermittel. Die Verwendung von Biomasse als Energiepflanzen war vergleichbar zu der Menge an Nahrungsmitteln. In Deutschland war im Jahr 2018 ein Importüberschuss an Biomasse zu verzeichnen. In Summe werden für den deutschen Konsum an landwirtschaftlicher Biomasse 7,1 Mio. ha mehr an Fläche in Anspruch genommen, als landwirtschaftliche Fläche in Deutschland zur Verfügung steht.

Das technische Potenzial an **biogenen Abfällen und Reststoffen** betrug im Jahr 2015 101 Mio. t an Trockenmasse (t_{TM}, ohne Waldrestholz und Rinde). Teilerhebungen zeigen, dass diese Menge bis zum Jahr 2020 um gut 5 % abgenommen hat. Von dem Potenzial im Jahr 2015 befanden sich bereits 76 % in Nutzung. Dabei wurden etwa 46% stofflich und 30 % energetisch verwendet. Mobilisierbare technische Potenziale sind in den Kategorien landwirtschaftliche Nebenprodukte, Siedlungsabfälle und sonstige Reststoffe zu nennen.

Szenarien zum zukünftigen Biomasseangebot und dessen Nutzung

Szenarienanalysen sind eine geeignete Methode, um ein zukünftiges Biomassepotenzial und seine Nutzung einzuschätzen. Im Rahmen dieses Berichts wurden in enger Abstimmung mit den federführenden Ministerien drei Szenarien ausgewählt, die die heutigen und zukünftigen Rahmenbedingungen derart beschreiben, dass sie als Grundlage für die NABIS herangezogen werden können. Diese sind das BEPASO Szenario „Bioökonomie-Wende“ (BEPASO-Wende), das Langfristszenario 3 (LFS 3) und das Klimaschutzinstrumente-Szenario 2030 (KIS 2030).

Von zentraler Bedeutung war bei der Auswahl, dass die Szenarien bestehende Ziele, die Deutschland sich gesetzt hat, adäquat berücksichtigen. Als **wichtige Ziele**, die die Erzeugung und Bereitstellung von Biomasse beeinflussen, sind zu nennen: Klimaschutzziele für Landwirtschaft und LULUCF gemäß Bundes-Klimaschutzgesetz, Ziel zum Ausbau des ökologischen Landbaus bis zu Jahr 2030, Biodiversitätsziele nach der Biodiversitätsstrategie, Ziele zum Moorbodenschutz der Nationale Moorschutzstrategie und Ziele zur Reduktion des Flächenverbrauchs nach der Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie. Zu den Annahmen in „Bioökonomie-Wende“ sei auf Kapitel 3.1.1 und in LFS 3 und KIS 2030 auf Kapitel 3.1.2 verwiesen. Bei den weiteren Analysen zur energetischen Nutzung (vgl. Kap. 3.3) wurde eine zukünftige Begrenzung von Biomasseimporten angenommen.

Die Ergebnisse der drei Szenarien bewegen sich in **vergleichbaren Korridoren**. Die folgenden zentralen Ergebnisse sind zu nennen:

- **Tierbestände nehmen deutlich ab.** Dies ist eine wichtige Voraussetzung, um z.B. Ziele im Bundes-Klimaschutzgesetz in der Landwirtschaft zu erreichen. Durch einen Wechsel hin zu einer mehr pflanzlichen Ernährung werden gleichzeitig ehemalige Futteranbauflächen frei und kompensiert abnehmende Erträge durch eine verringerte Düngergabe bzw. durch den Ökolandbau.
- Die **Biomassepotenziale** in Deutschland sind begrenzt und **nehmen in der Tendenz ab**. Eine sehr deutliche Abnahme zeigt sich bei der energetischen Nutzung von Waldholz und holzigen Abfällen und Reststoffen, da sie zukünftig vermehrt stofflich genutzt werden. Auch die Anbaufläche für Energiepflanzen geht zu Gunsten von Industriepflanzen zurück.
- Bei **Abfällen und Reststoffen** wie Tierexkrementen, Getreidestroh, Siedlungsabfällen und Klärschlamm besteht noch die Möglichkeit, in Zukunft **ungenutzte Potenziale** für die zukünftige stoffliche und energetische Nutzung zu erschließen. Alle übrigen biogenen Abfälle und Reststoffe werden bereits stofflich oder energetisch verwertet.

Mit dem Energieoptimierungsmodell BenOpt wurde für die energetischen Biomassepotenziale, die jeweils in den drei Szenarien ausgewiesen wurden, analysiert, in welchen Energiesektoren und mit welcher Technik die knappe Ressource **Biomasse in Zukunft am effizientesten eingesetzt** werden kann. Bioenergie hat ihren kostenoptimalen Nutzen in den Bereichen, in denen eine direkte Elektrifizierung nicht oder nur sehr eingeschränkt möglich ist, oder zur Flexibilisierung des Stromsektors. Im **Wärmesektor** ergibt das Modell einen optimalen Einsatz großer Menge an Biomasse für Hochtemperatur-Industrieanwendungen, und zwar vorrangig in Form von Hackschnitzeln aus Holzreststoffen, Biogas aus vergärbaren Abfällen und Reststoffen und Miscanthus als angebaute Feldfrucht. Im **Stromsektor** ist der Einsatz von Biogas aus vergärbaren Abfällen und Reststoffen sowie Stroh zur flexiblen Bedarfsdeckung der Residuallast die kosteneffizienteste Option. Aufgrund Elektrifizierung des Straßen- und Schienenverkehrs sind im **Verkehrssektor** nur geringe Bioenergie-Anteile ökonomisch vorteilhaft bzw. notwendig, so z.B. im Schiffs- und Flugverkehr.

5 Literaturverzeichnis

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. et al. (2023): Bausteine für eine Biomassestrategie: Biomassepotenziale und Erwartungen an ihre künftige Nutzung (BIOSTRAT), Abschlussbericht. Deutsches Biomasseforschungszentrum (Hg.). Leipzig.

Banse, M.; Zander, K.; Babayan, T.; Bringezu, S.; Dammer, L.; Egenolf, V.; Göpel, J.; Haufe, H.; Hempel, C.; Hüfner, R.; Millinger, M.; Morland, C.; Musonda, F. et al. (2020): Eine biobasierte Zukunft in Deutschland – Szenarien und gesellschaftliche Herausforderungen. Johann Heinrich von Thünen-Institut (Hg.). Braunschweig. Online verfügbar unter https://www.ufz.de/export/data/2/245152_BEPASO-Broschuere.pdf, zuletzt geprüft am 24.11.2023.

BLE (2023): Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten der Bundesrepublik Deutschland, 66. Jahrgang. Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (Hg.). Online verfügbar unter https://www.bmel-statistik.de/fileadmin/SITE_MASTER/content/Jahrbuch/Agrarstatistisches-Jahrbuch-2022.pdf, zuletzt geprüft am 24.11.2023.

BMWK; BMEL; BMUV (2022): Eckpunkte für eine nationale Biomassestrategie (NABIS). Online verfügbar unter https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Naturschutz/nabis_eckpunkte_bf.pdf, zuletzt geprüft am 24.11.2023.

Böhm, J. (2023): Vergleich der Flächenenergieerträge verschiedener erneuerbarer Energien auf landwirtschaftlichen Flächen – für Strom, Wärme und Verkehr. In: *Berichte über Landwirtschaft - Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft* 101 (1), S. 1–35. DOI: 10.12767/BUEL.V101I1.462.

Böhm, J.; Witte, T. d.; Michaud, C. (2022): Land use Prior to Installation of Ground-mounted Photovoltaic in Germany—GIS-analysis Based on MaStR and Basis-DLM. In: *Z Energiewirtsch* 46 (2), S. 147–156. DOI: 10.1007/s12398-022-00325-4.

BReg (2023): Projektionsbericht 2023 für Deutschland, Gemäß Artikel 18 der Verordnung (EU) 2018/1999 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 über das Governance-System für die Energieunion und für den Klimaschutz, zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 663/2009 und (EG) Nr. 715/2009 (Climate Change, 39/2023). Umweltbundesamt. Umweltbundesamt (Hg.). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/39_2023_cc_projektionsbericht_2023.pdf, zuletzt geprüft am 24.11.2023.

Bringezu, S.; Banse, M.; Ahmann, L.; Bezama, N. A.; Billig, E.; Bischof, R.; Blanke, C.; Brosowski, A.; Brüning, S.; Borchers, M.; Budzinski, M.; Cyffka, K.-F.; Distelkamp, M. et al. (2020): Pilotbericht zum Monitoring der deutschen Bioökonomie. Center for Environmental Systems Research (CESR), Universität Kassel (Hg.). Kassel. Online verfügbar unter https://kobra.uni-kassel.de/handle/123456789/11591, zuletzt geprüft am 24.11.2023.

Dambeck, H.; Ess, F.; Falkenberg, H.; Kemmler, A.; Kirchner, A.; Koepp, M.; Kreidelmeyer, S.; Lübbers, S.; Piegsa, A.; Scheffer, S.; Spillmann, T.; Thamling, N.; Wünsch, A. et al. (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045, Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Zusammenfassung. Prognos; Öko-Institut; Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie. Agora Energiewende; Stiftung Klimaneutralität und Agora Verkehrswende (Hg.). Online verfügbar unter https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/klimaneutrales-deutschland-2045/, zuletzt geprüft am 09.08.2023.

dena (2021): dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität, Eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe. Abschlussbericht. Online verfügbar unter https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/Abschlussbericht_dena-Leitstudie_Aufbruch_Klimaneutralitaet.pdf, zuletzt geprüft am 24.11.2023.

destatis (2019): Umweltökonomische Gesamtrechnungen. Ein- und Ausfuhr und Flächenbelegung von Erzeugnissen pflanzlichen und tierischen Ursprungs. Berichtszeitraum 2008 – 2017. Statistische Bundesamt (Hg.). Wiesbaden. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/landwirtschaft-wald/Publikationen/Downloads/ein-ausfuhr-flaechenbelegung-pdf-5851311.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 24.11.2023.

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* 13, S. 1–14. DOI: 10.3390/f13030365.

FNR (2023): Basisdaten Bioenergie Deutschland 2024. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (Hg.). Gülzow-Prüzen. Online verfügbar unter https://www.fnr.de/fileadmin/Projekte/2023/Mediathek/Broschuere_Basisdaten_Bioenergie_2023_web.pdf, zuletzt geprüft am 24.11.2023.

Franzmann, G. (2014): Zeitreihen zur deutschen Forst- und Holzwirtschaft: Betriebe, Forstflächen, Holzeinschlag, Waldbrände, Gesamtholzbilanz und Aussenhandelsbilanz (1946–2010).

Hennenberg, K.; Böttcher, H. (2023): Biomasse und Klimaschutz, Im Rahmen des Vorhabens „Wissenschaftliche Analysen zu aktuellen klimapolitischen Fragen im Bereich der Energieeffizienz insbesondere in den Sektoren Industrie, GHD und Gebäude“ (67KE0064). Öko-Institut (Hg.). Berlin, Darmstadt. Online verfügbar unter https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Biomasse-und-Klimaschutz_BMWK.pdf, zuletzt geprüft am 24.11.2023.

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 (Climate Change, 12/2022). Öko-Institut; ifeu Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg; Informationssysteme für Rohstoffe. Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/cc_12-2022_aktuelle_nutzung_und_foerderung_der_holzenergie.pdf, zuletzt geprüft am 29.03.2022.

Hennenberg, K.; Bürck, S.; Fehrenbach, H.; Pfeiffer, M.; Köppen, S. (2023): Trägt die Energienutzung von Waldholz zum Klimaschutz bei? In: *AFZ DerWald* (3/2023), S. 31–34. Online verfügbar unter https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Hennenberg-et-al_2023_Traegt_die_Energienutzung_von_Waldholz_zum_Klimaschutz_bei_Energieholz_07_2022_MKG.pdf, zuletzt geprüft am 29.09.2023.

INFRO (2023): Verbundvorhaben: Systemisches Rohstoffmonitoring Holz (RMHsys); Teilvorhaben 1: Aufkommen und Verwendung von Holzrohstoffen in der gesamten Wertschöpfungskette, Schlussbericht. Online verfügbar unter https://www.fnr.de/ftp/pdf/berichte/22005918.pdf, zuletzt geprüft am 24.11.2023.

IPCC (2006): 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Unter Mitarbeit von Eggleston, S.; Buendia, L.; Miwa, K.; Ngara, T. und Tanabe, K. Japan. Online verfügbar unter https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/, zuletzt geprüft am 29.10.2023.

Jochem, D.; Weimar, H.; Dieter, M. (2023): Holzeinschlag im Jahr 2022 erreicht 80,7 Mio. m^3, Die energetische Verwendung von Rohholz ist annähernd konstant, während die stoffliche Nutzung etwas abnimmt. In: *Holz-Zentralblatt* 149 (40), S. 675–676. Online verfügbar unter https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn067101.pdf, zuletzt geprüft am 24.11.2023.

Köppen, S.; Rettenmaier, N. (in press.): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3 - Rahmendaten zu Biomassepotenzialen und den Emissionen aus dem Landwirtschafts- und dem LULUCF-Sektor, Im Auftrag des BMWK. Fraunhofer ISI, Consentec, TU Berlin, ifeu (Hg.).

Lauf, T.; Memmler, M.; Schneider, S. (2021): Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger, Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2020 (Climate Change, 71/2021). Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2021-12-13_climate-change_71-2021_emissionsbilanz_erneuerbarer_energien_2020_bf_korr-01-2022.pdf, zuletzt geprüft am 03.11.2023.

Mantau, U. (2023): Holzrohstoffbilanzierung - Kreislaufwirtschaft und Kaskadennutzung, 20 Jahre Rohstoffmonitoring Holz (Schriftenreihe nachwachsende Rohstoffe,

Band 40). Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. Gülzow-Prüzen. Online verfügbar unter https://mediathek.fnr.de/band-40-holzrohstoffbilanzierung-kreislaufwirtschaft-und-kaskadennutzung.html, zuletzt geprüft am 05.12.2023.

Möbius, K.; Becker, M.; Lückge, F. J. (2000): Forstkalamitäten in der Bundsrepublik Deutschland 1955-1999. EUWID Holz.

Osterburg, B.; Ackermann, A.; Böhm, J.; Bösch, M.; Dauber, J.; Witte, T. d.; Elsasser, P.; Erasmi, S.; Gocht, A.; Hansen, H.; Heidecke, C.; Klimek, S.; Krämer, C. et al. (2023): Flächennutzung und Flächennutzungsansprüche in Deutschland (Thünen Working Paper, 224). Johannes Heinrich von Thünen Institut (Hg.). Braunschweig. Online verfügbar unter https://www.thuenen.de/media/publikationen/thuenen-workingpaper/ThuenenWorkingPaper_224.pdf, zuletzt geprüft am 23.11.2023.

Pfeiffer, M.; Hennenberg, K.; Böttcher, H.; Reise, J.; Mantau, U. (2023): Referenzszenario der Holzverwendung und der Waldentwicklung im UBA-Projekt BioSINK (Öko-Institut Working Paper, 4/2023). Öko Institut e.V. Berlin. Online verfügbar unter https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/WP-Referenzszenario-BioSINK.pdf, zuletzt geprüft am 24.11.2023.

Reise, J.; Hennenberg, K.; Benndorf, A.; Böttcher, H. (in press.): Klimaschutzmaßnahmen im LULUCF-Sektor in Deutschland: Eine Analyse der Annahmen, Potenziale und Sensitivitäten, Bericht im Rahmen des Projektes Transformation zu einem vollständig treibhausgasneutralen Deutschland (CARE) (Cliamte Change). Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau.

Reise, J.; Hennenberg, K.; Winter, S.; Winger, C.; Höltermann, A. (2017): Analyse und Diskussion naturschutzfachlich bedeutsamer Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur (BfN-Skript, 427). Bonn: Bundesamt für Naturschutz. Online verfügbar unter https://bfn.bsz-bw.de/frontdoor/deliver/index/docId/220/file/Skript_427.pdf, zuletzt geprüft am 24.11.2023.

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. et al. (2023): Klimaschutzinstrumente-Szenario 2030 (KIS-2030) zur Erreichung der Klimaschutzziele 2030, Teilbericht (Climate Change, 30/2023). Öko-Institut; Fraunhofer ISI; IREES. Umweltbundesamt (Hg.). Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/klimaschutzinstrumente-szenario-2030-kis-2030-zur, zuletzt geprüft am 24.11.2023.

Rüter, S. (2023): Abschätzung von Substitutionspotentialen der Holznutzung und ihre Bedeutung im Kontext der Treibhausgas-Berichterstattung (Thünen Working Paper, 214). Johann Heinrich von Thünen-Institut. Braunschweig. Online verfügbar unter https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn066391.pdf, zuletzt geprüft am 29.10.2023.

Schindler, H.; Majer, M., Thrän, D.; Lenz, V. (2023): Nachhaltigkeit von Holzenergie (DBFZ Diskussionspapier). Deutsches Biomasseforschungszentrum (Hg.). Leipzig. Online verfügbar unter

https://www.dbfz.de/fileadmin/user_upload/Referenzen/Statements/Diskussionspapier_Nachhaltigkeit_Holzenergie.pdf, zuletzt geprüft am 24.11.2023.

Searchinger, T. D.; Beringer, T.; Holtsmark, B.; Kammen, D. M.; Lambin, E. F.; Lucht, W.; Raven, P.; van Ypersele, J.-P. (2018): Europe's renewable energy directive poised to harm global forests. In: *Nature communications* 9 (1), S. 3741. DOI: 10.1038/s41467-018-06175-4.

Tiemeyer, C.; Barthelmes, K.-D.; Busse, S.; Barthelmes, A. (2021): Aggregierte Karte der organischen Böden Deutschlands. 2., überarbeitete Fassung (Greifswald Moor Centrum-Schriftenreihe, 01/2021). Greifswald Moor Centrum (Hg.). Online verfügbar unter https://www.greifswaldmoor.de/files/dokumente/GMC%20Schriften/2021-01_Tegetmeyer%20et%20al.pdf, zuletzt geprüft am 24.11.2023.

UBA (2022): Kohlendioxid-Emissionsfaktoren für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen (1990 – 2020). Korrigierter Endstand: 15.01.2022 (Excel-Tabelle). Umweltbundesamt. Dessau. Online verfügbar unter https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiQ24WDhdf_AhUeQ_EDHVsPBOMQFnoECCAQAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.umweltbundesamt.de%2Fsites%2Fdefault%2Ffiles%2Fmedien%2F361%2Fdokumente%2Fco2_ef_liste_2022_brennstoffe_und_industrie_final.xlsx&usg=AOvVaw2OzORflMHq2xw_bZiFtoYf&opi=89978449, zuletzt geprüft am 24.11.2023.

UBA (2023): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2023, Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2021 (Climate Change, 28/2023). Umweltbundesamt (Hg.). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/28_2023_cc_berichterstattung_unter_der_klimarahmenkonvention.pdf, zuletzt geprüft am 03.11.2023.

Vis, M.; Mantau, U.; Allen, B. (2016): Study on the optimised cascading use of wood, No 394/PP/ENT/RCH/14/7689. Final report. European Commission. Brussels.

6 Anhang

6.1 Narrative und Szenarienannahmen in LFS 3

Der Klimawandel ist in der Gesellschaft anerkannt als die größte Herausforderung, gleichwohl treten auch andere ökologische Krisen zunehmend ins Bewusstsein, allen voran das globale Artenaussterben. Maßnahmen, die diese Zwillingskrise adressieren – wie der Natürliche Klimaschutz – gewinnen daher an Bedeutung. Neben bestehenden Zielen ist das neue ambitionierte Ziel die Erfüllung des Bundes-Klimaschutzgesetzes (KSG). Dies umfasst nicht nur die Transformation in den Bereichen Energie, Industrie, Verkehr und Gebäude, sondern vor allem auch in den Sektoren Landwirtschaft und LULUCF.

Die Langfristszenarien adressieren mit Blick auf eine Biomassestrategie somit eine komplexe Gemengelage: Biomasse, als nachwachsender Rohstoff Teil der erneuerbaren Ressourcen, sowie die genutzte Fläche sind nur begrenzt verfügbar und tragen je nach ihrer Bewirtschaftung unterschiedlich, zum Teil sogar gegenläufig zum Klima- und Biodiversitätsschutz bei. Die Entwicklung der Erzeugung und Nutzung von Biomasse bis zum Jahr 2045 wird sich daher folgendermaßen in LFS-3 gestalten.

Die **Zielvorgaben des KSG** werden in den Sektoren **Landwirtschaft und LULUCF** erfüllt. Das bedeutet, dass die **Waldbewirtschaftung** sich aktiv den Herausforderungen des Klimawandels stellt. Durch eine ausbalancierte Kombination aus Holzernte, Waldumbau und Vorratsaufbau wird – trotz erhöhter Risiken durch natürliche Störungen wie Trockenheit, Käferkalamitäten und Sturm – erreicht, dass der Wald eine Senkenleistung erbringt. Zudem wird der Holzproduktespeicher durch die Nutzung von langlebigen Holzprodukten und die Abnahme der Nutzung von Waldenergieholz kontinuierlich erhöht. Weitere Maßnahmen zum Natürlichen Klimaschutz sichern die Zielerreichung im LULUCF-Sektor und stehen gleichfalls im Einklang mit den Zielen des Biodiversitätsschutz und der Wildnisentwicklung.

Mit der **Ernährungswende** nimmt der Konsum an Tierprodukten zugunsten von pflanzlicher Nahrung deutlich ab. So werden eine gesündere Ernährung, mehr Tierwohl und geringere THG-Emissionen durch die Tierhaltung erreicht. Verringerte Tierbestände resultieren in einem verringerten Flächenbedarf für Futtermittel. Als Konsequenz wird landwirtschaftliche Fläche frei. Somit können derzeit bewirtschaftete Moorboden wiedervernässt und mit nur noch teilweise und mit geringeren Erträgen (z.B. Paludikultur) genutzt werden. Außerdem wird der Bestand an Grünland erhalten, der Anteil an Ökolandbau erhöht und der Stickstoffeintrag verringert. Insgesamt geht damit die derzeitige Produktion an agrarischer Biomasse zurück.

Diese **produktionsverringernden Maßnahmen** tragen gleichsam zum **Schutz der Biodiversität** bei und Ziele der Nationalen Strategie zur Biologischen Vielfalt werden erreicht. Verluste an Ackerfläche entstehen aber auch durch die weitere Versiegelung von Flächen – selbst wenn das 30-Hektarziel erfüllt werden sollte.

Heute werden in hohem Maße Nahrungs- und Futtermittel importiert, was in den Produktionsländern ein Potenzial an Nachhaltigkeitskonflikten aufwirft. Eine nachhaltige Biomassenutzung sollte daher möglichst unabhängig von Importen sein. Die sich verändernde Flächenkulisse (s.o.) ermöglicht eine insgesamt **ausgeglichene Import-/Export-Bilanz** bei der Biomasse – angestrebt bis zum Jahr 2030 –, d.h. was Nahrungs-/Futtermittel betrifft wie auch die stoffliche und energetische Biomassenutzung. Auf freien Flächen, die nicht für die Produktion von Nahrungs-/Futtermittel als Grundlage für die **flächensuffiziente Ernährungssicherheit** benötigt werden, werden vorrangig Bioenergiesubstrate und in einem geringeren Umgang stofflich genutzte Feldfrüchte angebaut. Biogene Rest- und Abfallstoffe werden verstärkt erschlossen und ebenfalls vorrangig energetisch genutzt.

Umsetzung in der Modellierung der Sektoren Landwirtschaft und LULUCF

Der modellierte Zeitraum reicht bis zum Jahr 2045.

1. **Moorbodenschutz:** Von der derzeit agrarisch genutzten Fläche sind die Flächen für **Wiedervernässung** von organischen Böden abzuziehen.
   - Wiedervernässung für 85 % der organischen Böden angesetzt: d.h. insgesamt werden ausgehend vom Basisjahr 1,05 Mio. ha wiedervernässt, aufgeteilt auf
     - 0,38 Mio. ha Ackerfläche
     - 0,67 Mio. ha Grünlandfläche.
2. **Siedlungsfläche**
   - Aktuell werden in Deutschland rund 55 ha/d als Siedlungsflächen und Verkehrsflächen neu ausgewiesen; dies soll bis 2030 auf 30 ha/d gesenkt werden.
     - Von 2020 bis 2030: 0,2 Mio. ha,
     - bis 2045 sind es bei ab 2030 abgenommener Versiegelungsdynamik weitere 0,16 Mio. ha.
3. **Grünlanderhalt**
   - Die Grünlandfläche werden der Ackerfläche abgezogen, da **Grünlanderhalt** vorausgesetzt wird.
4. Bestimmung der **agrarischen Biomasseerträge**
   - von derzeit 10,9 % **Ökolandbau** auf 30 % in 2030
   - **Stickstoffüberschuss** wird auf 70 kg N / ha verringert
   - Erhöhung der Erträge durch Verbesserung / Anpassung von Maßnahmen gemäß Trendangaben der FAO durch Verbesserung / Anpassung von Maßnahmen in Höhe von um 0,3 % p. a. (entspricht 10 % bis zum Jahr 2050)
5. Anbaufläche für Ernährung unter Wahrung der **Flächensuffizienz**
   - Angenommen wird eine Abnahme des derzeitigen Fleischkonsums von ca. 60 kg/E/a um ein Drittel
   - Mit der Zunahme des Ökolandbaus verbunden ist eine Erhöhung des Flächenbedarfs für Proteinpflanzenanbau, gleichzeitig kommt es durch den verminderten

Fleischkonsum zu einer deutlich höheren Reduktion des Flächenbedarfs für den Futtermittelanbau.

6. Zur Bestimmung der nutzbaren **Holzentnahme**
   - Absenkung der Holzentnahme zur vollständigen Erfüllung der LULUCF-Ziele; Schließung der Lücke zum Senkenziel, da die Klimaschutzmaßnahmen im LULUCF-Sektor nicht zum Erreichen des Senkenziels ausreichen
   - Begrenzung der Entnahme auf Derbholz (>7 cm) (→ Umsetzung des FSC-Standards in den Bundeswäldern)
7. Holzproduktspeicher
   - Die Senkenleistung des Holzspeichers wird als Mittelwert der Jahre 2008-2018 konstant fortgeschrieben.
8. Erfüllung von Biodiversitätszielen
   - Maßnahmen in der Land- und Forstwirtschaft (Grünlanderhalt, Moorvernässung, mehr ökologischer Landbau, Vorratsaufbau in Laubwäldern) stützen die Biodiversitätsziele.
9. Biogene Rest- und Abfallstoffe
   - Biogas aus Wirtschaftsdünger werden entsprechend der abnehmenden Tierzahlen und der Annahme zu deren Vergärung abgebildet (maximal mögliche Vergärung wird bis 2045 erreicht)
   - Als Quelle für die übrigen Rest- und Abfallstoffe werden die Daten der Studie UBA-BioRest verwendet. Diese Mengen werden bis zum Jahr 2045 konstant fortgeschrieben.

6.2 Narrative und Szenarienannahmen in KIS 2030

Der Klimawandel ist in der Gesellschaft anerkannt als die größte Herausforderung, gleichwohl treten auch andere ökologische Krisen zunehmend ins Bewusstsein, allen voran das globale Artenaussterben. Maßnahmen, die diese Zwillingskrise adressieren – wie der Natürliche Klimaschutz – gewinnen daher an Bedeutung. Neben bestehenden Zielen setzt die Erfüllung des Bundes-Klimaschutzgesetzes (KSG) weitere ambitionierte Anforderungen. Diese umfassen nicht nur die Transformation in den Bereichen Energie, Industrie, Verkehr und Gebäude, sondern vor allem auch in den Sektoren Landwirtschaft und LULUCF.

Das KIS-2030 adressiert mit Blick auf eine Biomassestrategie somit eine komplexe Gemengelage: Biomasse, als nachwachsender Rohstoff Teil der erneuerbaren Ressourcen, sowie die genutzte Fläche sind nur begrenzt verfügbar und tragen je nach ihrer Bewirtschaftung unterschiedlich, zum Teil sogar gegenläufig zum Klima- und Biodiversitätsschutz bei. Die Entwicklung der Erzeugung und Nutzung von Biomasse bis zum Jahr 2040 wird sich daher folgendermaßen in KIS-2030 gestalten.

Die **Zielvorgaben des KSG** werden in den Sektoren **Landwirtschaft und LULUCF** erfüllt. Das bedeutet, dass die **Waldbewirtschaftung** sich aktiv den Herausforderungen des Klimawandels stellt. Durch eine ausbalancierte Kombination aus Holzernte, Waldumbau und Vorratsaufbau wird – trotz erhöhter Risiken durch natürliche Störungen wie Trockenheit, Käferkalamitäten und Sturm – erreicht, dass der Wald eine deutliche Senkenleistung erbringt. Zudem wird der Holzproduktespeicher durch die verstärkte Nutzung von langlebigen Holzprodukten und die Abnahme der Nutzung von Waldenergieholz kontinuierlich erhöht. Weitere Maßnahmen zum Natürlichen Klimaschutz sicher die Zielerreichung im LULUCF-Sektor und stehen gleichfalls im Einklang mit den Zielen des Biodiversitätsschutz und Wildnisentwicklung.

Mit der **Ernährungswende** nimmt der Konsum an Tierprodukten zugunsten von pflanzlicher Nahrung deutlich ab. So werden eine gesündere Ernährung, mehr Tierwohl und geringere THG-Emissionen durch die Tierhaltung erreicht. Verringerte Tierbestände resultieren in einem verringerten Flächenbedarf für Futtermittel. Als Konsequenz wird landwirtschaftliche Fläche frei. Somit können derzeit bewirtschaftete Moorböden wiedervernässt und teilweise noch mit geminderten Erträgen (z.B. Paludikultur) genutzt werden. Außerdem wird der Bestand an Grünland erhalten, der Anteil an Ökolandbau erhöht und der Stickstoffeintrag verringert. Insgesamt geht damit die derzeitige Produktion an agrarischer Biomasse zurück.

Diese **produktionsverringernden Maßnahmen** tragen gleichsam zum **Schutz der Biodiversität** bei und Ziele der Nationalen Strategie zur Biologischen Vielfalt werden erreicht. Um Verluste an Ackerfläche durch die weitere Versiegelung von Flächen zu reduzieren, wird der Flächenverbrauch stärker reduziert als es in der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie gefordert wird.

Heute werden in einem hohen Maße Nahrungs- und Futtermittel importiert, was in den Produktionsländern eine Reihe von Nachhaltigkeitskonflikten aufwirft. Eine nachhaltige Biomassenutzung sollte daher möglichst unabhängig von Importen sein. Die sich verändernde Flächenkulisse (s.o.) ermöglicht eine insgesamt **ausgeglichene Import-/Export-Bilanz** bei der Biomasse – angestrebt bis zum Jahr 2030 –, sowohl bei Nahrungs-/Futtermitteln als auch für die stoffliche und energetische Biomassenutzung. Auf freien Flächen, die nicht für die Produktion von Nahrungs-/Futtermittel als Grundlage für die nationale **Ernährungssicherheit** benötigt werden, werden vorrangig Bioenergiesubstrate

und in einem geringeren Umgang stofflich genutzte Feldfrüchte angebaut. Ungenutzte biogene Rest- und Abfallstoffe werden verstärkt erschlossen und ebenfalls vorrangig energetisch genutzt.

Umsetzung in der Modellierung der Sektoren Landwirtschaft und LULUCF

Der modellierte Zeitraum reicht bis zum Jahr 2040. Annahme zur Entwicklung werden z.T. für spätere Zeitpunkte gesetzt.

1. Moorbodenschutz: Von der derzeit agrarisch genutzten Fläche sind die Flächen für Wiedervernässung von organischen Böden abzuziehen.
   - Umwandlung von Ackerland auf organischen Böden zu Grünland:
     - bis 2030: 22.822 ha;
     - bis 2040: 176.962 ha
   - Summe der Vernässung von Acker- und Grünland auf organischen Böden:
     - bis 2030: 35.189 ha Ackerland; 333.014 ha Grünland
     - bis 2040: 240.822 ha Ackerland; 670.616 ha Grünland
   - Summe der vernässten Torfabbauflächen:
     - bis 2030: 11.584 ha;
     - in 2040: 18.520 ha
   - Bewirtschaftung vernässter Flächen:
     - 2030: 45% frisches Moorgrünland; 15% feucht bis sehr feuchtes Moorgrünland; 20% sehr feuchtes Moorgrünland; 20% nasses Moorgrünland
     - 2040: 0% frisches Moorgrünland; 20% feucht bis sehr feuchtes Moorgrünland; 40% sehr feuchtes Moorgrünland; 40% nasses Moorgrünland
2. Siedlungsfläche
   - Ausgehend von 77,5 ha/Tag wird die Netto-Neuinanspruchnahme an Siedlungsfläche bis 2030 auf 20,0 ha/Tag und bis 2050 auf 0 ha/Tag gesenkt. Zwischen diesen Zeitschritten wird linear interpoliert. Im Jahr 2040 liegt die Netto-Neuinanspruchnahme an Siedlungsfläche bei 10,0 ha/Tag und im Jahr 2050 bei 0 ha/Tag.
3. Grünlanderhalt
   - Die Entwicklung der Grünlandflächen wird wie im MMS auf Basis der historischen Daten fortgeschrieben
4. Zur Bestimmung der agrarischen Biomasseerträge
   - Ökolandbau auf 30% der landwirtschaftlichen Fläche im Jahr 2030; Ertragsverringerung Kulturartspezifisch berechnet, ca. 50% Ertragsreduktion
   - Begrenzung der N-Gesamtbilanz für Deutschland im Jahr 2030 auf 70 kg N/ha Landwirtschaftsfläche, keine Ertragsverringerung angenommen

- Ertragsentwicklung konventionell aus RMD Daten (TI-Institut) für die Berechnung des THG-Inventar übernommen. Steigerung ca. 7% im Vergleich Mittel 2014:2019
- Wirtschaftsdüngerwirksamkeit wird ab dem Jahr 2030 bis 2040 schrittweise angehoben (um 10 % für flüssigen Wirtschaftsdünger, um 5 % für Festmist gegenüber DüV 2020).
- Ertrags- und Leistungssteigerungen entsprechen den Annahmen im Mit-Maßnahmen-Szenario im Projektionsbericht 2021 für Deutschland.
- Leguminosenanbau:
  - Konventionell: 5% der Anbaufläche
  - Ökolandbau: 20% der Anbaufläche
- Nicht-produktive Ackerfläche (Brache auf Ackerland) im Rahmen der Öko-Regelungen der GAP (Biodioversitätsfläche): 312.000 ha in 2030 bis 2030 (745.000 ha Brachfläche gesamt)
- Keine expliziten Annahmen zu Zwischenfrüchten, Fortschreibung Status Quo

5. Humuserhalt und -aufbau im Ackerland
   - Humuserhalt und -aufbau im Ackerland: Umnutzung von Ackerland mineralischen Böden hin zu Agroforstsystemen (2030: 400.000ha, 2040: 750.000 ha)
6. Anbaufläche für Ernährung
   - Annahmen zum Konsum von Tierprodukten in Kombination mit Ökolandbau, Annahmen zu Futtermittelwahl und Veränderung von Erträgen + Tierleistung führt zu einer Abnahme der Tierbestände (2040 in Relation zu 2018: Rindfleisch 71%, Schwein & Geflügel 87%, Milchprodukte 76%).
   - Vergärung von Wirtschaftsdünger: 70% in 2030
   - In Abhängigkeit der Annahmen für LULUCF und Landwirtschaft resultiert eine Fläche, die für Anbaubiomasse genutzt werden kann.
7. Zur Bestimmung der nutzbaren Forstfläche und der Holzentnahme
   - Fortschreibung der historischen LULUCF-Daten zur Waldflächenentwicklung, leichte Zunahme der Waldfläche nach dem historischen Trend
   - Im Jahr 2023 wird eine Holzentnahme von 72,1 Mio. m³ (6,6 m³/ha) als Mittelwert der Jahre 2008 bis 2017 angenommen. Diese Einschlagsintensität wird ab dem Jahr 2024 fortgeschrieben. Dabei verändert sich der absolute Holzeinschlag in Abhängigkeit von der Entwicklung der Waldfläche.
   - Ab dem Jahr 2023 werden mittlere Schäden angenommen. Dies entspricht einem Schadniveau, das 1,5 mal höher ist als die Schäden, die im Zeitraum von 2002 bis 2017 auftraten.
8. Holzproduktspeicher
   - Im Jahr 2022 wird die Senkenleistung des Holzspeichers als Mittelwert der Jahr 2008-2017 angenommen und bis 2050 linear auf 5,0 Mio. t CO_2-Äq erhöht, um eine steigende Nutzung langlebiger Holzprodukte als Schätzwert abzubilden.
9. Erfüllung von Biodiversitätszielen
   - Die bestehende Schutzgebietskulisse und die rechtlichen Naturschutzanforderungen werden fortgeschrieben.

- Maßnahmen in der Land- und Forstwirtschaft (Grünlanderhalt, Moorvernässung, mehr ökologischer Landbau, Vorratsaufbau in Laubwäldern) stützen die Biodiversitätsziele.

10. Biogene Rest- und Abfallstoffe

- Biogas aus Wirtschaftsdünger werden entsprechend der Tierzahlen und der Annahme zu deren Vergärung abgebildet (siehe Landwirtschaft)
- Angaben aus dem Sektor zu Deponiegas und der biologischen Abfallbehandlung werden aus dem Abfallmodell, das in KIS-2030 eingesetzt wird, übernommen

Als Quelle für die übrigen Rest- und Abfallstoffe werden die Daten der Studie UBA-BioRest verwendet. Diese Mengen werden bis zum Jahr 2050 als konstant fortgeschrieben.