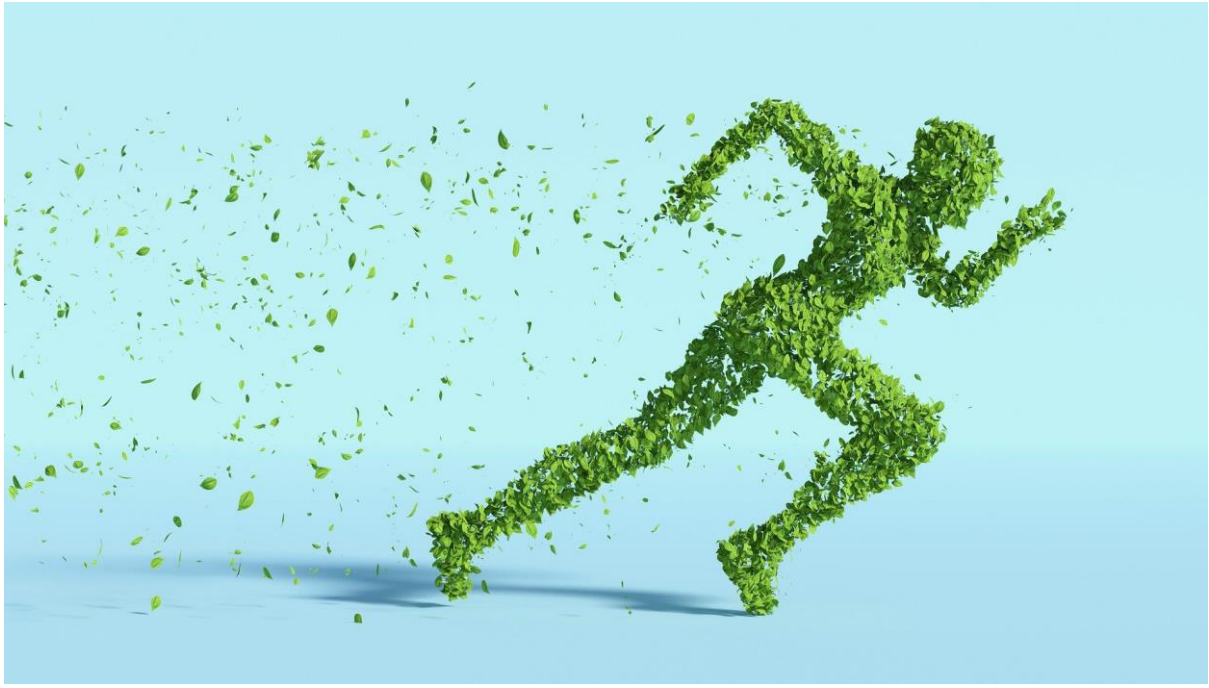
consentec

Fraunhofer ISI



Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland 3

-T45 Welten-

Rahmendaten zu Biomassepotenzialen und den Emissionen aus dem Landwirtschafts- und dem LULUCF-Sektor

---

Ort: Heidelberg

Datum: 24.07.2023

Status:

Impressum

Rahmendaten Biomasse

Projektleitung

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe
Dr. Frank Sensfuß, frank.sensfuss@isi.fraunhofer.de

Consentec GmbH

Grüner Weg 1, 52070 Aachen
Dr. Christoph Maurer, maurer@consentec.de

Verantwortlich für den Inhalt des Textes

Susanne Köppen, susanne.koeppen@ifeu.de
Nils Rettenmaier, nils.rettenmaier@ifeu.de

Beteiligte Institute

Consentec GmbH

Grüner Weg 1, 52070 Aachen
Dr. Christoph Maurer, maurer@consentec.de (Administrative Leitung)

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe
Dr. Frank Sensfuß, frank.sensfuss@isi.fraunhofer.de (Projektleitung)
Gerda Deac, gerda.deac@isi.fraunhofer.de (Projektmanagement)

ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg

Wilckensstraße 3, 69120 Heidelberg
Peter Mellwig, peter.mellwig@ifeu.de

Technische Universität Berlin

Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin
Prof. Dr. Joachim Müller-Kirchenbauer, jmk@er.tu-berlin.de

Verfasst im Auftrag von

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)

Scharnhorststr. 34-37, 10115 Berlin

Veröffentlicht

Juli 2023

Hinweise

Dieser Bericht einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Die Informationen wurden nach bestem Wissen und Gewissen unter Beachtung der Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis zusammengestellt. Die Autorinnen und Autoren gehen davon aus, dass die Angaben in diesem Bericht korrekt, vollständig und aktuell sind, übernehmen jedoch für etwaige Fehler, ausdrücklich oder implizit, keine Gewähr. Die Darstellungen in diesem Dokument spiegeln nicht notwendigerweise die Meinung des Auftraggebers wider.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 5

2 Methodik und Grundannahmen 6

2.1 Methodik: das ALMOD-Modell 6

2.1.1 Landwirtschaft 6

2.1.2 LULUCF-Sektor 7

2.2 Setzungen für das Zieljahr 7

2.2.1 LULUCF-Sektor 7

2.2.2 Landwirtschaft 8

3 Ableitung der Emissionen aus Landwirtschaft und LULUCF-Sektor 11

3.1 Landwirtschaft 11

3.2 LULUCF-Sektor 11

4 Ermittlung des energetisch nutzbaren Biomassepotenzials 12

4.1 Ermittlung des Energieholzpotenzials aus dem Wald 12

4.1.1 Schritt 1: Ermittlung der Lücke 12

4.1.2 Schritt 2: Ableitung des Energieholzpotenzials 14

4.1.3 Annahmen zum Pfad 14

4.2 Ermittlung der Potenziale aus Anbaubiomasse (NawaRo) 15

4.2.1 Ermittlung der Fläche zur NawaRo-Nutzung 15

4.2.2 Zusätzliche Potenziale aus wiedervernässten Flächen 15

4.2.3 Annahmen zum Pfad 15

4.3 Ermittlung weiterer Biomassepotenziale 16

4.3.1 Sonstige Rest- und Abfallstoffe 16

4.3.2 Importierte Biomasse 17

4.4 Gesamt-Biomassepotenziale und Pfad 18

5 Diskussion und Fazit 19

6 Abbildungsverzeichnis 21

7 Tabellenverzeichnis 22

8 Literaturverzeichnis 23

A.1 Ableitung einer flächensuffizienten NawaRo-Anbaufläche 26

Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
ALMOD	Agriculture and LULUCF Model
CO_{2eq}	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente
d.h.	das heißt
DGE	Deutsche Gesellschaft für Ernährung e.V.
FT	Fischer-Tropsch
g	Gramm
ha	Hektar
kg	Kilogramm
KSG	Klimaschutzgesetz
KSP	Klimaschutzprogramm
KUP	Kurzumtriebsplantage
LN	Landwirtschaftliche Nutzfläche
LULUCF	Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft
m^3	Kubikmeter
MER	Mit erweiterten Restriktionen
Mio.	Million
N	Stickstoff
NawaRo	Nachwachsende Rohstoffe
NIR	National Inventory Report, Nationaler Inventarbericht
PJ	Petajoule
RED II	Renewable Energy Directive II, Erneuerbare Energien Richtlinie II
s.a.	siehe auch
t	Tonne
t_{atro}	Tonne absolut trocken
t_{TM}	Tonne Trockenmasse
WEHAM	Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung

1 Einleitung

Im Projekt „Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland" (Langfristszenarien 3) werden im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) Szenarien für die zukünftige Entwicklung eines treibhausgasneutralen Energiesystems modelliert. Die Modellierung umfasst das gesamte Energiesystem, also übergreifend die Erzeugung von Strom, Wärme und Wasserstoff sowie die Nachfrage nach Energie in den Sektoren Industrie, Verkehr und Gebäude. Darüber hinaus werden die Energieinfrastrukturen (Strom-, Gas- und Wasserstoffnetze) modelliert.

Die beiden Sektoren Landwirtschaft sowie Landnutzung, Landnutzungsänderung und Waldwirtschaft (engl. Land Use, Land-Use Change and Forestry, LULUCF) sind zum einen im Emissionsgeschehen relevant und zum anderen Quellen von Biomasse, die in verbrauchenden Sektoren (z. B. Verkehrs- und Energiesektor) energetisch oder stofflich eingesetzt wird. Die Treibhausgasemissionen der Landwirtschaft können zwar reduziert, jedoch nie vollständig vermieden werden. Auch der LULUCF-Sektor stellt eine Besonderheit dar: er umfasst sowohl Emissionsquellen als auch -senken und stellt bislang eine signifikante (Netto-)Senke dar. Das bedeutet, dass er mehr Kohlenstoff speichert als emittiert. Zu den relevantesten Quellen zählen die Emissionen aus Landnutzungsänderungen (beispielsweise Grünlandumbruch zu Ackerland), aus der Bewirtschaftung organischer Böden (sowohl Ackerland als auch Grünland) sowie aus dem Torfabbau. Gleichzeitig bindet der Sektor aber auch Kohlenstoff in der aufwachsenden Biomasse und ist dadurch eine Kohlenstoffsenke. Dies findet vor allem im Wald statt.

Dieser Bericht stellt die Methodik und die Ergebnisse der Modellierung sowohl der Emissionen beider Sektoren als auch der jeweiligen energetischen Biomassepotenziale dar. Hierbei ist zu beachten, dass die Ableitung der Biomassepotenziale in zwei Schritten erfolgte. Im Jahr 2020 wurde in einer ersten Modellierungsrunde ein energetisch nutzbares Biomassepotenzial abgeleitet. Mit der Novellierung des Bundes-Klimaschutzgesetzes (KSG) im Jahr 2021 bekam der LULUCF-Sektor konkrete Zielvorgaben. So soll der Sektor im Jahr 2030 eine (Netto-)Senke von -25 Mio. t CO_{2eq} darstellen, die bis 2040 auf -35 Mio. t CO_{2eq} und in 2045 auf -40 Mio. t CO_{2eq} anwächst (BMJ 2021). In der Folge wurde deshalb das Energieholzpotenzial aus dem Wald unter Berücksichtigung der LULUCF-Senkenziele neu berechnet. Dabei wurde auch das landwirtschaftliche Potenzial für energetisch nutzbare Biomasse unter Berücksichtigung weiterer neuer politischer Ziele (z. B. die Anhebung des Ökolandbau-Anteils auf 30 % gemäß Koalitionsvertrag 2021 (SPD et al. 2021)) überarbeitet.

2 Methodik und Grundannahmen

2.1 Methodik: das ALMOD-Modell

Das Agriculture and LULUCF Model (ALMOD) wurde vom ifeu im Rahmen des RESCUE-Projekts entwickelt zur Berechnung der Landwirtschafts- und LULUCF-Emissionen in Deutschland (Purr et al. 2019). Es basiert auf der Methodik der deutschen Treibhausgasinventare. Ausgangspunkt sind die Daten zu Flächennutzungen, Düngemitteleinsatz sowie Viehhaltung (Tierplätze). Darauf aufbauend werden die einzelnen Treibhausgasemissionen berechnet. Die dafür erforderlichen Emissions- und Umrechnungsfaktoren entstammen dem Nationalen Inventarbericht (UBA 2019), bzw. (Rösemann et al. 2019). Der im Inventar angewandte TIER 3-Ansatz wurde bezüglich der Aufgliederung der Tierkategorien, Haltungsformen und einzelner Emissionsfaktoren vereinfacht übernommen, indem Durchschnittswerte genutzt wurden.

Innerhalb des Sektors Landwirtschaft sind die Module so verzahnt, dass Daten aus der Tierhaltung in den Ackerbau einfließen. Außerdem werden flächenrelevante Veränderungen im LULUCF-Sektor in der Landwirtschaft berücksichtigt. Darunter fallen beispielsweise Aktivitäten zur Wiedervernässung von Moorböden oder die Flächenneuinanspruchnahme für Siedlungen und Verkehr.

Zusätzlich zu den Emissionsberechnungen in beiden Sektoren erlaubt das Modell eine Bilanzierung der Flächeninanspruchnahme für Nahrungs- und Futtermittel sowie zur Erzeugung von nachwachsenden Rohstoffen. Damit können die Mengenströme an inländisch produzierten Agrarprodukten erfasst und zur Erstellung von detaillierten Versorgungsbilanzen herangezogen werden. Importe und Exporte bleiben dabei unberücksichtigt.

Die Modellergebnisse beinhalten neben den Treibhausgasen die entsprechenden Mengenströme bezüglich agrarischer Produktion (Extraktion) sowie rohstoffseitige Inputs. Durch die Verknüpfung der Tierhaltung mit den Futterflächen können beispielsweise Aussagen darüber getroffen werden, wie sich der Futterflächenbedarf bei sich ändernden Tierbeständen entwickelt.

2.1.1 Landwirtschaft

Die Daten für das Basisjahr 2018 beruhen auf dem Nationalen Inventarbericht aus dem Jahr 2021 ((UBA 2021), (Rösemann et al. 2019)) sowie den Statistischen Jahrbüchern des BMEL (BMEL 2019). Dies umfasst die folgenden Posten:

- Agrarproduktion: Größe der landwirtschaftlich genutzten Fläche (differenziert nach Ackerland und Grünland), Erntemengen aufgeteilt nach verschiedenen Feldfrüchten, ausgebrachter Mineraldünger
- Viehhaltung: Tierplatzzahlen aufgeteilt nach den verschiedenen Vieharten
- Ausgehend von den Tierplatzzahlen sowie den Berechnungsfaktoren aus (Rösemann et al. 2019) wurden in der Viehhaltung die folgenden Parameter abgeleitet:
    - Jährlich anfallender Wirtschaftsdünger
    - Anteil des in die Vergärung gehenden Wirtschaftsdüngers
    - Anteil offener / abgedeckter Gärrestlager
    - Verfügbare Wirtschaftsdüngermengen und Gärreste zur Ausbringung

2.1.2 LULUCF-Sektor

Die Aufteilung des LULUCF-Sektors in seine Quellgruppen orientiert sich an der Kategorisierung der Klimaberichterstattung. Der Sektor umfasst positive (CO_{2eq}-Quellen) und negative (CO_2-Senken) Treibhausgasemissionen. Die Daten für das Basisjahr stammen aus dem Nationalen Inventarbericht aus dem Jahr 2021 (UBA 2021) und enthalten die folgenden Subkategorien:

- Ackerland / Grünland: Der größte Anteil der Emissionen entstammt der Nutzung organischer Böden sowie aus der Umwandlung von Grünland zu Ackerland.
- Feuchtgebiete: Emissionen entstammen den Flächen mit industriellem Torfabbau.
- Siedlungen: Auch hier stammen die Emissionen aus den organischen Böden.
- Wald: Der Wald stellt derzeit eine Senke dar. Der Speicher wird im Modell differenziert nach a) der lebenden Biomasse im Wald, b) der Speicherung in Boden, Totholz und Streu der Waldfläche und c) lebender Biomasse, Boden, Totholz, Streu der Aufforstungsfläche. Diese Unterteilung ist wichtig für die Modellierung der künftigen Speicherentwicklung (vgl. Kapitel 4.1).
- Holzprodukte (z. B. Möbel, Bauholz): Auch diese Kategorie stellt eine Senke dar.

2.2 Setzungen für das Zieljahr

2.2.1 LULUCF-Sektor

Maßgeblich für die Modellierung des LULUCF-Sektors ist das im novellierten Klimaschutzgesetz (KSG) verankerte Senkenziel. So soll der Sektor im Jahr 2030 eine (Netto-)Senke von -25 Mio. t CO_{2eq} darstellen, die bis 2040 auf -35 Mio. t CO_{2eq} und in 2045 auf -40 Mio. t CO_{2eq} anwächst (BMJ 2021).

Dementsprechend folgt die Modellierung einem Top down-Ansatz. Das bedeutet, dass die Höhe der Emissionen in den Jahren 2030, 2040 und 2045 den vorgegebenen Senkenzielen entsprechen. Die Maßnahmen im LULUCF-Sektor wirken in zwei Richtungen: Zum einen reduzieren sie die Emissionen, zum anderen erhöhen sie die Kohlenstoffspeicher im Wald. Emissionsreduzierende Maßnahmen haben unter anderem einen Einfluss auf die in der Landwirtschaft zur Verfügung stehenden Fläche (vgl. Kapitel 2.2.2), Speicher erhöhende Maßnahmen im Wald haben einen Einfluss auf die Holzmenge, die künftig dem Wald entnommen werden kann (vgl. Kapitel 4.1).

Im Einzelnen werden die folgenden Maßnahmen berücksichtigt:

Wiedervernässung organischer Böden (Ackerland und Grünland)

Rund 6,5 % der landwirtschaftlichen Flächennutzung in Deutschland findet auf entwässerten Mooren statt (1,23 Mio. ha). Die Bewirtschaftung organischer Böden hat einen Anteil von 78 % an den Gesamtemissionen des LULUCF-Sektors (UBA 2021). Im Modell wird eine maximale Wiedervernässung der organischen Böden angesetzt, welche 85 % der entwässerten organischen Böden entspricht. Die verbleibenden 15 % müssen aus diversen wasserbaulichen Gründen weiterhin entwässert bleiben, weil sie beispielsweise Siedlungsflächen sind. Insgesamt werden ausgehend vom Basisjahr 1,05 Mio. ha wiedervernässt, aufgeteilt auf 0,38 Mio. ha Acker- und 0,67 Mio. ha Grünlandfläche.

Erhalt von Dauergrünland

Das Klimaschutzprogramm (KSP) 2030 strebt den Erhalt von Dauergrünland an (Bundesregierung 2019). Dementsprechend wird im Modell angesetzt, dass Grünland nicht mehr umgebrochen werden darf und dass infolgedessen die vorhandene Grünlandfläche konstant bleibt.

Flächenneuinanspruchnahme

Die tägliche Neuinanspruchnahme von Flächen für Siedlung und Verkehr soll bis zum Jahr 2030 auf unter 30 ha gesenkt werden. Die Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie 2021 (Bundesregierung 2021) strebt bis zum Jahr 2050 einen Flächenverbrauch von Netto-Null an. Wir unterstellen eine Zielerreichung bereits im Jahr 2045.

Torfabbau

Der Abbau von Torf führt zu einer Degradation noch vorhandener Moore und bedingt hohe Treibhausgasemissionen. Um die noch vorhanden Moore als Kohlenstoffsenke zu erhalten, wird der industrielle Torfabbau bis 2040 eingestellt.

Speicher in Holzprodukten

Für den Speicher in den Holzprodukten wird der Durchschnitt der letzten 10 Jahre (2008 bis 2018) aus dem Nationalen Inventarbericht 2021 (UBA 2021) fortgeschrieben.

Forst

Der Wald dient im Modell quasi als Puffer zur Erreichung des LULUCF-Senkenziels. Das bedeutet, dass zunächst alle anderen Emissionseinsparpotenziale ausgefüllt werden (v. a. die Wiedervernässung organischer Böden). Die verbleibende Lücke zum Senkenziel wird dann mit einer Reduktion des Holzeinschlags gefüllt. Das Vorgehen hierzu wird in Kapitel 4.1 erläutert.

2.2.2 Landwirtschaft

Entwicklung von Ackerland und Grünland

Die Verfügbarkeit der Acker- und Grünlandflächen wird zu einem Großteil durch die Entwicklungen im LULUCF-Sektor beeinflusst (vgl. Kapitel 2.2.1). So sorgt die Wiedervernässung landwirtschaftlich genutzter Moorflächen für einen Rückgang von Ackerfläche und Grünlandfläche. Gleichzeitig erfolgen weitere Ackerflächenverluste zugunsten von Siedlungs- und Verkehrsflächen, die jedoch bis 2045 auf Null sinken. Demgegenüber wird angesetzt, das im Jahr 2045 weniger Fläche stillgelegt wird, also Ackerfläche zur Produktion zur Verfügung steht. Insgesamt kommt es bis zum Zieljahr zu einem leichten Rückgang der Flächen (s. Tabelle 1).

Tabelle 1: Entwicklung von Ackerland und Grünland bis zum Zieljahr [Mio. ha]

Kategorie	2018	2045
Ackerland	11,1	11,09
Grünland	4,51	4,15
Gesamt	**15,61**	**15,25**

Quelle: 2018: (UBA 2021); 2045: eigene Modellierung ifeu

Anteil Ökolandbau

Das vormals in der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie 2021 (Bundesregierung 2021) formulierte Ziel eines Ökolandbau-Anteils von 20 % wurde mit dem Koalitionsvertrag 2021 auf 30 % erhöht und soll bis 2030 erreicht werden (SPD et al. 2021). Dieses Ziel wirkt sich nicht auf die Verfügbarkeit der insgesamt zur Verfügung stehenden landwirtschaftlichen Fläche, jedoch auf den Gesamtertrag

an Feldfrüchten und damit indirekt auf die für Anbaubiomasse (NawaRo) nutzbare Fläche aus (s. Kapitel 4.2.1).

Einsatz mineralischer Stickstoffdünger

Der Einsatz mineralischer Stickstoffdünger sinkt durch zwei Maßnahmen. Zum einen wird auf den ökologisch bewirtschafteten Flächen, deren Anteil ansteigt (s. oben), kein mineralischer Dünger verwendet. Zum anderen wird auch auf den Flächen mit konventionellem Anbau der Einsatz verringert. So soll gemäß der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie 2021 (Bundesregierung 2021) im Jahresmittel 2028 – 2032 der Stickstoffüberschuss auf 70 kg N / ha verringert werden. Dem wird in der Modellierung insofern Rechnung getragen, als dass unter Annahme einer steigenden Düngeeffizienz weniger Dünger eingesetzt wird.

Kalkung

Aufgrund der künftig zu erwartenden erhöhten Erosionsgefahr wird angesetzt, dass für den Erhalt einer guten Bodenstruktur künftig mindestens so viel Kalkung wie heute notwendig wird. Daher wird der Wert aus dem Basisjahr fortgeschrieben.

Erntemengen

Die insgesamt produzierte Menge an Feldfrüchten wird durch die zur Verfügung stehenden Ackerflächen sowie die Ertragssteigerungen bestimmt. Durch die geringeren Erträge auf den ökologisch bewirtschafteten Flächen gibt es hier aber auch gegenläufige Effekte. Darüber hinaus wird auf den ökologisch bewirtschafteten Flächen die Zusammensetzung der Feldfrüchte angepasst. Es werden beispielsweise mehr Hülsenfrüchte angebaut, um den fehlenden Einsatz mineralischer Stickstoffdünger zu kompensieren (s. oben). In der zweiten Modellierungsrunde wird außerdem der höhere Anteil des Ökolandbaus gegenüber der ersten Runde berücksichtigt (30 % statt 20 %). Dazu wurde zunächst der Minderertrag durch den zusätzlichen Ökolandbau ermittelt. Die in der ersten Modellierungsrunde ermittelte NawaRo-Fläche wurde sodann reduziert, um den Minderertrag zu kompensieren (s. a. Kapitel 4.2).

Viehhaltung

Mit 60 % ist ein erheblicher Teil der landwirtschaftlichen Emissionen auf die Viehhaltung zurückzuführen. Gleichzeitig liegt Deutschland mit seinem derzeitigen Fleischkonsum weit oberhalb der Empfehlungen der Deutschen Gesellschaft für Ernährung e. V. (DGE). Im Jahr 2017 betrug der Pro-Kopf-Verzehr von Fleisch 62,4 kg (BMEL 2019), während die DGE eine Menge von 300 – 600 g / Woche empfiehlt (DGE 2017). Das entspricht einem jährlichen Pro-Kopf-Verbrauch von ungefähr 15,6 – 31,2 kg. Der untere Wert entspricht dabei der Empfehlung der EAT-Lancet-Kommission (Willett et al. 2019), die eine Ernährungsweise vorgeschlagen hat, welche sowohl gesund ist als auch sich innerhalb der planetaren Grenzen bewegt (und somit als zukunftstauglich bezeichnet werden kann). Eine Reduktion des Fleischkonsums ist sowohl aus Klimaschutzsicht als auch aus ernährungsphysiologisch-gesundheitlichen Gründen sinnvoll.

Es wird angesetzt, dass der derzeitige Fleischverbrauch bis 2045 um ein Drittel reduziert werden kann. Die Tierproduktion nimmt in etwa die Höhe der Inlandsnachfrage ein, so dass der Selbstversorgungsgrad tierischer Produkte (Fleisch, Eier, Milch) 100 % beträgt. Daraus ergibt sich eine erhebliche Reduktion des Viehbestandes im Vergleich zum Basisjahr. Die Entwicklung der Tierplatzzahlen ist in Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 2 Entwicklung der Viehplatzzahlen

Tierplatzzahlen [Mio.]	2017	2030	2040	2045
Milchkühe	4,2	4,0	3,7	3,6
Sonstige Rinder	8,1	7,9	4,8	3,2
Schweine	22,9	18,8	15,5	12,3
Geflügel	159	154	150	146
Schafe	2	1,53	1,16	0,79
Pferde	0,44	0,48	0,51	0,54

Quelle: 2018: (BMEL 2019); weitere: eigene Modellierung ifeu

Die Anzahl der Tierplätze hat einen Einfluss auf die für die Vergärung zur Verfügung stehende Menge und Zusammensetzung des Wirtschaftsdüngers. Gemäß des Klimaschutzprogramms (KSP) 2030 (Bundesregierung 2019) wird davon ausgegangen, dass bis 2025 30 % der verfügbaren Menge an Wirtschaftsdünger in Biogasanlagen genutzt wird. Ausgenommen hiervon sind die Mengen, die aufgrund der Weidehaltung nicht erfasst werden können. Bis 2045 wird der Anteil der Güllevergärung auf 80 % ansteigen. Hinsichtlich der Abdeckung der Gärrestlager wird im Jahr 2045 eine 100 %-ige Abdeckung erreicht, ausgehend von 62 % im Basisjahr.

3 Ableitung der Emissionen aus Landwirtschaft und LULUCF-Sektor

3.1 Landwirtschaft

Basierend auf den in Kapitel 2.2 beschriebenen Entwicklungen und Annahmen ergeben sich im Landwirtschaftssektor die in Tabelle 3 dargestellten Treibhausgasemissionen.

Tabelle 3 Entwicklung der Landwirtschaftsemissionen [Mio. t CO_{2eq}]

	2018 (NIR 2021)	2030	2040	2045
Gesamt	**62,49**	**56,02**	**45,99**	**39,37**
Tierhaltung / Verdauung	23,98	24,49	19,50	16,94
Wirtschaftsdüngermanagement	8,89	7,40	4,62	2,68
Böden	25,19	20,85	18,93	16,87
Kalkung	2,05	2,05	2,05	2,05
Harnstoffausbringung	0,61	0,75	0,69	0,63
Andere	0,20	0,48	0,20	0,20

Quelle: 2018: (UBA 2021); weitere: eigene Modellierungen ifeu

3.2 LULUCF-Sektor

Basierend auf den in Kapitel 2.2 beschriebenen Entwicklungen ergeben sich im LULUCF-Sektor die in Tabelle 4 dargestellten Treibhausgasemissionen.

Tabelle 4 Entwicklung der Emissionen im LULUCF-Sektor [Mio. t CO_{2eq}]

	2018 (NIR 2021)	2030	2040	2045
Gesamt	**-18,29**	**-25,00**	**-35,00**	**-40,00**
Wald - Streu	-16,05	-16,05	-16,05	-16,05
Wald - lebende Biomasse	-41,59	-37,44	-36,22	-37,29
Acker, Grünland, Feuchtgebiete, Siedlungen	44,52	33,45	22,38	16,84

Quelle: 2018: (UBA 2021); weitere: eigene Modellierungen ifeu

4 Ermittlung des energetisch nutzbaren Biomassepotenzials

Das Biomassepotenzial setzt sich aus unterschiedlichen Kategorien zusammen: Es wird Energieholz aus dem Wald genutzt, nachwachsende Rohstoffe (NawaRo) von Acker- und Grünlandflächen sowie unterschiedliche Rest- und Abfallstoffe. Während das Waldholz in der ersten Modellierungsrunde als Teil der Rest- und Abfallstoffe behandelt worden war, wurde es in der zweiten Modellierungsrunde separat betrachtet und modelliert.

4.1 Ermittlung des Energieholzpotenzials aus dem Wald

Die Ableitung des Energieholzpotenzials aus dem Wald steht unter der Prämisse, dass das LULUCF-Senkenziel von -40 Mio. t CO_{2eq} im Zieljahr 2045 erreicht werden muss (vgl. Kapitel 2.2.1). Dementsprechend erfolgte die Ableitung in zwei Schritten: In einem ersten Schritt wurde die projizierte Differenz zwischen dem Senken-Zielwert und den zu erwartenden Emissionen bzw. der Senkenleistung des Sektors ermittelt. Diese Lücke wurde in einem zweiten Schritt über eine Anpassung des Holzeinschlags geschlossen. Aus dem korrigierten Holzeinschlag abzüglich des Bedarfs für die stoffliche Nutzung wird die Menge an Holz ermittelt, die künftig zur energetischen Verwendung zur Verfügung steht.

4.1.1 Schritt 1: Ermittlung der Lücke

Im Basisjahr 2018 bildete der LULUCF-Sektor eine Netto-Senke von -18,29 Mio. t CO_{2eq} (UBA 2021). Das bedeutet, dass die Senke mehr als verdoppelt werden muss, um den Zielwert im Jahr 2045 zu erreichen. Dies kann auf zweierlei Arten erfolgen: Zum einen können die Emissionen des LULUCF-Sektors verringert werden, zum anderen müssen die Senken vergrößert werden. Das Klimaschutzprogramm (KSP) 2030 sieht verschiedene Klimaschutzmaßnahmen im LULUCF-Sektor vor (Bundesregierung 2019). Unter Berücksichtigung dieser Maßnahmen leitet der Projektionsbericht 2021 eine Entwicklung der Emissionen im LULUCF-Sektor bis 2040 ab (Repenning et al. 2021). Dem Projektionsbericht zufolge stellt der LULUCF-Sektor im Zieljahr keine (Netto-)Senke mehr dar, sondern wird zur (Netto-)Quelle und verursacht Emissionen von insgesamt 21,87 Mio. t CO_{2eq}. Dies liegt an der im Projektionsbericht unterstellten Entwicklung des Waldes, wonach dieser seine Senkenfunktion bis 2040 erheblich verringert, und zwar von -67 Mio. t CO_{2eq} im Jahr 2018 auf nur noch -14,46 Mio. t CO_{2eq} im Jahr 2040. Dadurch könnten die LULUCF-Emissionen in Höhe von 37,58 Mio. t CO_{2eq} nicht mehr ausgeglichen werden.

Allerdings gibt es Kritik an dieser projizierten Waldentwicklung, da diese sich auf das WEHAM-Basisszenario und damit zum einen auf eine vergleichsweise alte Datenbasis (2002 bis 2012) bezieht. Zum anderen wird hier das potenzielle Holzaufkommen zugrunde gelegt und nicht der vom Markt nachgefragte Holzeinschlag. In der Vergangenheit lagen marktgetrieben die Holzentnahmen unter den Zuwächsen. Damit unterschätzt der Projektionsbericht die Senkenleistung und ihre künftige Entwicklung (Hennenberg et al. 2021). Aus diesem Grund schlagen (Hennenberg et al. 2021) einen alternativen Ansatz zur Projizierung der Senkenleistung vor, den wir hier ebenfalls anwenden. Dieser Ansatz beruht auf dem linearen Zusammenhang zwischen der Senkenleistung der lebenden Biomasse und dem Holzeinschlag: Je intensiver die Holzentnahme ist (also je mehr Bäume gefällt und entnommen werden) desto mehr verringert sich der Kohlenstoffspeicher im Wald. Dieser Zusammenhang variiert je nach zugrunde gelegter Annahme zum Schadniveau: In Jahren mit geringen Schäden erfolgt eine hohe Senkenleistung der lebenden Biomasse auf der Waldfläche, in Jahren mit starken Schäden fällt die Senkenleistung entsprechend geringer aus. Die unterschiedlichen

Schadniveaus spiegeln dabei Durchschnitte verschiedener Zeiträume wider[1]. Diese Zusammenhänge ermöglichen eine Ableitung der Senkenleistung der lebenden Biomasse auf der Waldfläche in Abhängigkeit des Holzeinschlags sowie des angesetzten Schadniveaus (für die detaillierte Herleitung der Berechnungsformeln s. (Hennenberg et al. 2021)).

Bei der Ermittlung der Lücken sind wir wie folgt vorgegangen:

- Die projizierten Emissionen für Ackerland, Grünland, Feuchtgebiete, Siedlungen wurden dem Projektionsbericht 2021 (Repenning et al. 2021) entnommen und ab 2040 konstant fortgeschrieben.
- Für die Speicherung von Kohlenstoff in Holzprodukten wurde der Durchschnitt der Jahre 2008 bis 2018 aus dem Nationalen Inventarbericht 2021 (UBA 2021) herangezogen und konstant fortgeschrieben.
- Die Senkenleistung des Waldes wurde basierend auf der in (Hennenberg et al. 2021) beschriebenen Methodik modelliert. Ausgangspunkt bildeten der mittlere Holzeinschlag der letzten zehn Jahre (2008 bis 2018, 72,12 Mio. m^3 / Jahr, (Jochem et al. 2022)) sowie ein mittleres Schadniveau[2]. Die Modellierung der Waldsenke betrifft lediglich die Speicherung in der lebenden Biomasse der Waldfläche. Die Speicherung in den übrigen Kompartimenten (Boden, Totholz, Streu der Waldfläche und lebende Biomasse, Boden, Totholz und Streu in der Aufforstungsfläche) wurde basierend auf dem NIR-Wert für 2018 in die Zukunft fortgeschrieben (Hennenberg et al. 2021).

Tabelle 5 zeigt die Emissionen aus dem LULUCF-Sektor sowie die projizierten Emissionen und Senken für das Zieljahr 2045.

Tabelle 5: Entwicklung der Emissionen im LULUCF-Sektor und Ermittlung der Lücke [Mio. t CO_2-Äq.]

Kategorie	2018	2045
Wald	-57,65	-47,35
Ackerland	17,19	15,45
Grünland	18,15	15,41
Feuchtgebiete	4,79	3,01
Siedlungen	4,91	3,71
Holzprodukte	-5,93	-3,5
Gesamt LULUCF	-18,29	-13,27
Korrigierte[3] Lücke zum KSG-Ziel		**-28,36**

Quelle: 2018: (UBA 2021); 2045: eigene Modellierung ifeu

[1] Starke Schäden: 2002 bis 2007 (2002 Orkan Jeanett, 2003 Dürre, 2007 Orkan Kyrill); geringe Schäden: 2008 bis 2017

[2] Für die mittleren Schäden wird eine Schadensintensität angenommen, die im Mittel zwischen den geringen und starken Schäden liegt und die etwa der Situation im Zeitraum 2002 bis 2012 entspricht.

[3] Der Projektionsbericht 2021 (Repenning et al. 2021) modellierte die Emissionen des LULUCF-Sektors basierend auf dem Inventarbericht 2020 (UBA 2020). Für unser Bezugsjahr 2018 wurden im Inventar 2020 für den LULUCF-Sektor Emissionen von 38,26 Mio. t CO_2-Äq. (o. Wald) berichtet. Hingegen wurden im Inventar 2021 Emissionen von 40,24 Mio. t CO_2-Äq. (o. Wald) ausgewiesen, die also um 1,62 Mio. t CO_2-Äq höher waren (UBA 2021). Diese methodische Korrektur wird hier ebenfalls berücksichtigt.

Zum Erreichen des Klimaschutzziels ergibt sich damit eine Lücke von -28,36 Mio. t CO_{2eq}. Diese Lücke lässt sich durch zusätzliche Klimaschutzmaßnahmen im LULUCF-Sektor verkleinern. So berücksichtigt der Projektionsbericht lediglich die im Klimaschutzprogramm (KSP) 2030 definierten Maßnahmen. Um jedoch die Ziele des Klimaschutzgesetzes (KSG) zu erreichen, werden weitere Maßnahmen notwendig sein. Dazu zählt die maximal mögliche Umsetzung der Wiedervernässung: Hierbei setzen wir an, dass 85 % der bewirtschafteten organischen Böden wiedervernässt werden (vgl. Kapitel 2.2.1). Damit ergeben sich über den Projektionsbericht hinaus zusätzliche Einsparungen von -16 Mio. t CO_{2eq}. Weitere zusätzliche Einsparungen betreffen die Humusanreicherung in mineralischen Ackerböden. Hierfür wurde konservativ ein Wert von -1 Mio. t CO_{2eq} angesetzt (vgl. (Harthan et al. 2020)). Weitere Emissionseinsparungen ergeben sich aus der Reduzierung der Torfverwendung in Kultursubstraten (-2 Mio. t CO_{2eq}, s. (Repenning et al. 2021)). Darüber hinaus wurde unterstellt, dass auf 420.000 ha Kurzumtriebsplantagen angebaut werden, deren Erntegut energetisch genutzt wird[4]. Hieraus ergibt sich eine zusätzliche Kohlenstoffeinbindung in Höhe von insgesamt -3,36 Mio. t CO_{2eq}.

4.1.2 Schritt 2: Ableitung des Energieholzpotenzials

In Summe belaufen sich die zusätzlichen Einsparungen auf -22,36 Mio. t CO_{2eq}, so dass sich die Lücke auf -6 Mio. t CO_{2eq} reduziert. Die verbleibende Lücke wird durch eine Reduktion des Holzeinschlags geschlossen. Basierend auf der in (Hennenberg et al. 2021) beschriebenen Methode ist im Jahr 2045 noch ein Holzeinschlag von insgesamt 58,5 Mio. m^3 / Jahr möglich. Ein Teil hiervon wird für die stoffliche Nutzung benötigt. Diese betrug im Durchschnitt der Jahre 2008 bis 2018 46,74 Mio. m^3 / Jahr (Jochem et al. 2022) und wird konstant fortgeschrieben. Damit verbleiben noch 11,78 Mio. m^3 / Jahr für die energetische Nutzung. Dies bedeutet mehr als eine Halbierung gegenüber dem Durchschnitt der Jahre 2008 bis 2018 (25,39 m^3 / Jahr) (Jochem et al. 2022).

Neben dem Waldholz bestehen zusätzliche Energieholzpotenziale aus den 420.000 ha Kurzumtriebsplantagen. Diese sind allerdings dem Sektor Landwirtschaft zugeordnet und werden in Kapitel 4.2 beschrieben.

4.1.3 Annahmen zum Pfad

Der Pfad unterstellt eine lineare Entwicklung der Emissionen und Senken bis 2045 für die Elemente Ackerland, Grünland, Feuchtgebiete, Siedlungen sowie Speicherung in den Holzprodukten. Ab 2040 stehen Flächen mit Kurzumtriebsplantagen zur Kohlenstoffspeicherung zur Verfügung (vgl. Kapitel 4.2.3).

Die zur Verfügung stehende Menge an Energieholz aus dem Wald orientiert sich an den LULUCF-Sektorzielen (2030: -25 Mio. t CO_{2eq}, 2040: -35 Mio. t CO_{2eq}, 2045: -40 Mio. t CO_{2eq}). Ausgehend von der Entwicklung in allen anderen Quellgruppen wird auch hier die mögliche Entnahmemenge analog zu der in den vorhergehenden Kapiteln dargestellten Vorgehensweise ermittelt. Bezüglich des Schadniveaus wird der Übergang von einem niedrigen Schadniveau im Basisjahr hin zu einem mittleren Schadniveau im Zieljahr modelliert.

[4] Zur Herleitung dieser Flächengröße siehe Kapitel 4.2.

4.2 Ermittlung der Potenziale aus Anbaubiomasse (NawaRo)

4.2.1 Ermittlung der Fläche zur NawaRo-Nutzung

Ausgehend von der insgesamt zur Verfügung stehenden landwirtschaftlichen Nutzfläche (siehe Kapitel 2.2.2) wird abgeleitet, welcher Anteil hiervon zur Erzeugung energetisch genutzter Biomasse zur Verfügung steht. Analog zu den beiden Modellierungsrunden im Projekt erfolgt die Ableitung dieser Fläche in zwei Schritten. In der ersten Modellierungsrunde (Zieljahr damals: 2050) wurde die Fläche basierend auf der Annahme der „Flächensuffizienz" abgeleitet. Dies beschreibt eine netto ausgeglichene Flächenbilanz (notabene: Importe und Exporte sind weiterhin möglich!). Eine Herleitung findet sich in Anhang A.1. Daraus ergab sich eine Flächengröße von 1 Mio. ha.

In der zweiten Modellierungsrunde erfolgte – bei Gleichsetzung der Zieljahre 2050 und 2045 – eine weitere Reduktion dieser Fläche, um der Erhöhung des Ökolandbau-Anteils von 20 % auf 30 % (im Jahr 2030) Rechnung zu tragen. Die Anhebung des Ziels führt durch die geringeren Erträge im Ökolandbau zu Ertragseinbußen. Die insgesamt erzeugte Menge an Lebens- und Futtermittel sollte jedoch im Vergleich zur ersten Modellierungsrunde konstant bleiben. Daher wird ein Teil der dort abgeleiteten NawaRo-Fläche zum Ausgleich der Ertragseinbußen verwendet. Im Ergebnis reduziert sich die Fläche von 1 Mio. ha auf 420.000 ha.

Um einen Beitrag zum Erreichen des LULUCF-Senkenziels zu leisten, wird davon ausgegangen, dass die gesamte Fläche für Kurzumtriebsplantagen genutzt wird (vgl. Kapitel 4.1.2). Wir setzen einen Flächenertrag von 12 t_{atro} / (ha*a) an. Das bedeutet einen erheblichen Ausbau der heutigen Anbaufläche von 11.200 ha (FNR 2022).

4.2.2 Zusätzliche Potenziale aus wiedervernässten Flächen

Im Zuge der Klimaschutzmaßnahmen im LULUCF-Sektor werden insgesamt rund 380.000 ha Ackerland auf organischen Böden wiedervernässt (vgl. Kapitel 2.2.1). Wir setzen an, dass diese Fläche für Paludikultur, bzw. für die Produktion von Energiepflanzen verwendet wird. Die Produktion von Schilf und Rohrkolben auf wiedervernässten Ackerflächen ermöglicht eine produktive landwirtschaftliche Nutzung, die v. a. aus sozialen bzw. sozio-ökonomischen Gründen geboten ist. Dies erhöht die Chance, dass das sehr ambitionierte Ziel der Wiedervernässung überhaupt erreicht werden kann (vgl. (Närmann et al. 2021)). Wir legen für das Jahr 2045 einen Flächenertrag von 8,5 t_{TM} / (ha*a) zugrunde.

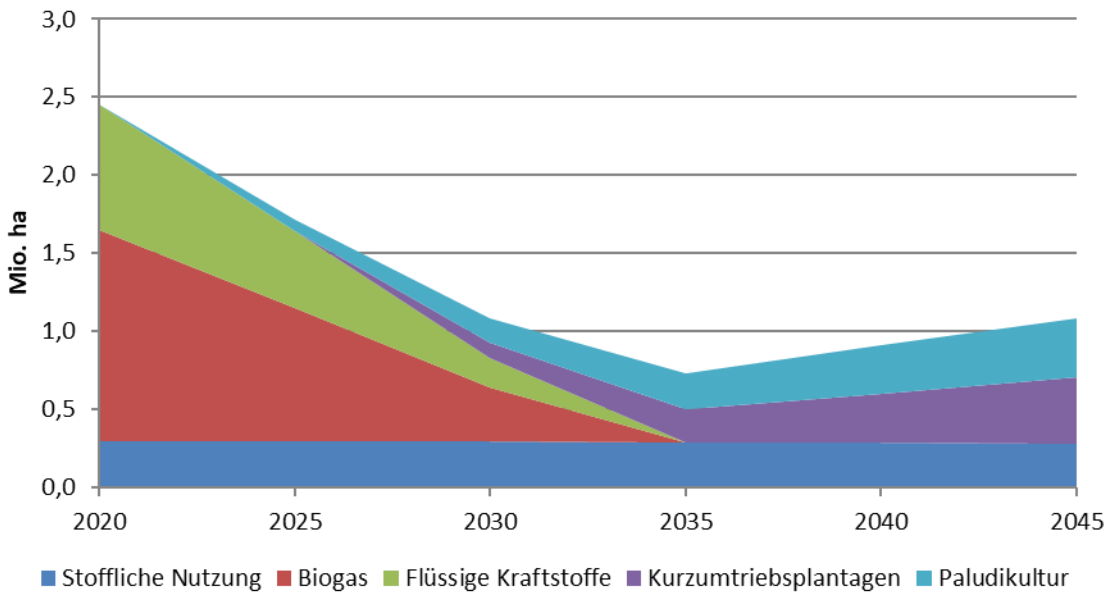
4.2.3 Annahmen zum Pfad

Für die Ermittlung des Pfades sind zwei Kenngrößen entscheidend: Die Entwicklung der Flächengröße sowie die Entwicklung der Flächenbelegung. Erstere setzen wir als linear an. Bei der Flächenbelegung hingegen spielen unterschiedliche politische Entwicklungen eine Rolle.

Für die Biogaspflanzen setzen wir diesbezüglich ein Auslaufen der Förderungen durch das EEG und damit einen Ausstieg aus der Biogaserzeugung aus NawaRo an. Auch die Produktion flüssiger Biokraftstoffe der so genannten ersten Generation (aus Nahrungs- und Futtermittelpflanzen) ist rückläufig und wird zunehmend durch den Anbau von Kurzumtriebsplantagen (lignozellulosehaltige Pflanzen) ersetzt. Als Zwischenschritt werden die typischen Biokraftstoffe der ersten Generation (Biodiesel und Bioethanol) durch fortschrittliche Biokraftstoffe (Hydrierte Pflanzenöle, HVO) ersetzt, welche auch im Flugverkehr eingesetzt werden können. Auch für die Wiedervernässung von Flächen und der Etablierung von Paludikulturen setzen wir eine lineare Entwicklung an. Die Fläche für die stoffliche Nutzung bleibt hingegen konstant.

Abbildung 1 fasst die Entwicklung der Flächen zusammen.

Abbildung 1 Entwicklung der NawaRo-Flächen und ihrer Nutzung [Mio. ha]



Quelle: eigene Darstellung ifeu

4.3 Ermittlung weiterer Biomassepotenziale

4.3.1 Sonstige Rest- und Abfallstoffe

Für die weiteren Potenziale an Rest- und Abfallstoffen werden die Zahlen aus der BioRest-Studie (Fehrenbach et al. 2019) zugrunde gelegt und entsprechen dem Szenario „Mit erweiterten Restriktionen" (MER). Die Werte sind in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Sonstige Rest- und Abfallstoffpotenziale

[PJ/a]	2020	2030	2040	2045
Gülle	37	62	77	91
Sonst. gasförmig (Deponiegas, Bioabfälle, Ernterückstände)	97	98	99	100
Stroh	179	160	160	160
Industrierestholz	132	132	132	132
Sonst. fest (Altholz, Landschaftspflegegut, sonst. Holz, Klärschlamm)	199	215	216	217
Biodiesel aus Altspeiseöl / -fett	12	12	12	12

Quelle: eigene Zusammenstellung ifeu auf Basis von (Fehrenbach et al. 2019)

Die Potenziale tierischer Exkremente (Gülle und Festmist) wurden an die reduzierten Tierzahlen (aufgrund des um ein Drittel reduzierten Fleischverzehrs) angepasst (vgl. Kapitel 2.2.2).

Das in der BioRest-Studie abgeleitete Strohpotenzial berücksichtigt die Menge an Stroh, die zur Humusreduktion auf dem Acker verbleiben muss, sowie die Menge an Stroh, die als Tiereinstreu benötigt wird. Es werden immer wieder Argumente für eine Verringerung des nachhaltig nutzbaren Strohpotenzials vorgebracht, mit dem Verweis auf eine potenzielle Klimawirkung des Verbleibs auf dem Acker („Erhöhung der Kohlenstoffsenke"). Diesem Argument stehen wir aus mehreren Gründen kritisch gegenüber:

- Die standorttypischen Humusgehalte von Böden sind höchst variabel und sind bei mineralischen Böden abhängig vom Standort (klimatische und pedologische Gegebenheiten) sowie vom Flächenmanagement (Fruchtfolge, Art der Bodenbearbeitung etc.). Der Einfluss von Managementmaßnahmen (mit dem eigentlichen Ziel der Reduktion des Stickstoff-Austrags) auf die Kohlenstoff-Sequestrierung wurde im BMBF-geförderten Projekt INPLAMINT untersucht (Gärtner et al. 2020): hier konnte gezeigt werden, dass trotz signifikanter Strohzugaben bei den betrachteten Fruchtfolgen kein Humusaufbau erfolgte. Grundsätzlich ist eine Anreicherung von Bodenkohlenstoff durch Managementmaßnahmen nur auf mit Humus unterversorgten Böden möglich und kann nur soweit erfolgen, bis der standorttypische Humusgehalt erreicht ist, d. h. das Potenzial ist zeitlich und mengenmäßig begrenzt). Ist dieser Wert erreicht, besteht ein neues Gleichgewicht zwischen dem Kohlenstoffeintrag und -abbau und es wird kein weiterer Kohlenstoff angereichert.
- Die Erhöhung der Kohlenstoffsenke durch eine Anreicherung des Bodenkohlenstoffs ist hochgradig reversibel. Das bedeutet, dass das erreichte Niveau der Kohlenstoffspeicherung nur dann gehalten werden kann, wenn sich Kohlenstoffzufuhr und -verlust durch das Flächenmanagement die Waage halten. Bei Beendigung der konstanten Zufuhr oder (Wieder-)Einsatz einer humuszehrenden Art der Bodenbearbeitung erfolgt ein rascher Abbau der Kohlenstoffvorräte.

4.3.2 Importierte Biomasse

Im Jahr 2018 wurden durch den Import flüssiger Bioenergieträger (93,7 PJ) im Ausland 0,91 Mio. ha belegt (eigene Berechnungen auf Basis von (BLE 2019)). Im Rahmen der vorliegenden Studie werden Biomasseimporte noch bis 2030 zugelassen (maximal auf dem heutigen Niveau), u. a. zur Erfüllung der Ziele der RED II (Renewable Energy Directive II, Erneuerbare Energien Richtlinie II (Europäische Kommission 2018)). Da letztere aber im Jahr 2030 ausläuft, werden Biomasseimporte danach drastisch zurückgefahren. Aufgrund der Überlegungen zur Flächensuffizienz betragen sie im Jahr 2045 dann 0 PJ.

4.4 Gesamt-Biomassepotenziale und Pfad

Tabelle 7 fasst die in dieser Studie angesetzten Potenziale aus Biomasse zusammen.

Tabelle 7 Biomassepotenziale [PJ/a]

		2020	2030	2040	2045
Rest- und Abfallstoffe					
Gasförmig	Gülle	37	62	77	91
	sonst. (Deponiegas, Bioabfälle, Ernterückstände)	97	98	99	100
Fest	Waldholz	204	167	131	113
	Stroh	179	160	160	160
	Industrierestholz	132	132	132	132
	sonst. fest (Altholz, Landschaftspflegegut, sonst. Holz, Klärschlamm)	199	215	216	217
Flüssig	Biodiesel aus Altöl / -fett	12	12	12	12
NawaRo					
	Biogas	221	63	0	0
	Flüssige Kraftstoffe	52	40	51	45
	Davon aus KUP (als FT-Diesel)	0	11	33	45
	Paludikultur (als feste Biomasse)	0	14	37	46
Importe		90	45	0	0
Summe		**1221**	**1008**	**913**	**915**

Quelle: eigene Darstellung ifeu

5 Diskussion und Fazit

Die Ableitung des energetischen Biomassepotenzials stand unter der Prämisse, dass das im novellierten Klimaschutzgesetz (KSG) verankerte Senkenziel für den LULUCF-Sektor erreicht werden soll. Die im Basisjahr 2018 erreichte (Netto-)Senke von -18,29 Mio. t CO_{2eq} soll bis zum Jahr 2045 auf -40 Mio. t CO_{2eq} vergrößert werden. Die Erreichung dieses Ziels setzt sowohl Maßnahmen zur Emissionsminderung als auch zur Vergrößerung bestehender Senken voraus. Aufgrund der engen Verknüpfung des Landwirtschafts- mit dem LULUCF-Sektor wirken Klimaschutzmaßnahmen auf die Potenziale in beiden Sektoren. So beeinflussen im LULUCF-Sektor angesiedelte Klimaschutzmaßnahmen die landwirtschaftliche Nutzfläche (LN) im Landwirtschaftssektor und damit letztendlich die zur Verfügung stehenden Biomassepotenziale. Beispielsweise wirkt sich die Wiedervernässung von Mooren auf die LN aus. In die andere Richtung kann die Wahl der angebauten Feldfrüchte (inkl. Energiepflanzen) in der Landwirtschaft wiederum einen Einfluss auf die im LULUCF-Sektor erfassten Senken haben, etwa wenn es um Agroforstsysteme oder den Anbau von Kurzumtriebsplantagen geht.

In diesem Bericht wurden die in einer ersten Modellierungsrunde abgeleiteten Biomassepotenziale vor dem Hintergrund des LULUCF-Senkenziels neu bewertet und modelliert. Im Fokus stand dabei das Waldholz, aber durch die Verzahnung mit dem Landwirtschaftssektor wurde auch das Potenzial aus Anbaubiomasse (NawaRo) neu modelliert. Im Ergebnis erfordert die Erreichung des Senkenziels eine über 50 %-ige Reduktion der Energieholznutzung aus dem Wald von durchschnittlich 25,39 Mio. m^3 / Jahr auf 11,78 Mio. m^3 / Jahr.

Im Bereich der Anbaubiomasse wurde die NawaRo-Fläche von 1 Mio. ha aus der ersten Modellierungsrunde auf 0,42 Mio. ha reduziert, um die Ertragseinbußen aus der Erhöhung des Ökolandbau-Anteils zu kompensieren. Als Beitrag zur Erreichung des Senkenziels wurde angesetzt, dass die gesamte für Non-food-Zwecke verbleibende NawaRo-Fläche mit Kurzumtriebsplantagen bewirtschaftet wird. Zusätzliche Potenziale ergeben sich aus der Paludikultur-Nutzung der wiedervernässten Ackerflächen.

Vor dem Hintergrund, dass das LULUCF-Senkenziel höchst ambitioniert ist, wurden in der Modellierung bewusst ambitionierte Annahmen getroffen. Im Einzelnen sind dies:

Wiedervernässung

Als wichtigste Maßnahme wird vorausgesetzt, dass die maximal möglichen Optionen zur Reduktion der Emissionen im LULUCF-Sektor ausgeschöpft werden. Dies betrifft die Nutzung organischer Böden. So wird angesetzt, dass insgesamt 85 % der organischen Böden wiedervernässt werden. Die weiterhin aus diversen wasserbaulichen Gründen entwässerten Flächen nehmen also nur noch einen Anteil von 15 % ein. Dies ist eine sehr optimistische Setzung, da für diese Transformation viele sozio-ökonomischen Herausforderungen gemeistert werden müssen. Um potenziellen Zielkonflikten mit der Landwirtschaft zumindest teilweise zu begegnen, wurde angesetzt, dass die wiedervernässte Ackerfläche (0,38 Mio. ha) für Paludikultur, also der Produktion von Schilf und Rohrkolben, genutzt wird. Dies bietet zugleich auch ein weiteres Potenzial an fester Biomasse, das energetisch genutzt werden kann. Allerdings ist der unterstellte Hochlauf der Paludikultur-Fläche sowohl technisch als auch im Hinblick auf benötigte Weiterbildungsangebote sicherlich sehr ambitioniert.

Kurzumtriebsplantagen

Um neben dem Wald eine zusätzliche Kohlenstoffsenke zu schaffen, wurde unterstellt, dass die gesamte zur Verfügung stehende NawaRo-Fläche mit Kurzumtriebsplantagen (KUP) bewirtschaftet

wird. Dies bringt zum einen ein zusätzliches Potenzial an fester Biomasse, zum anderen wird Kohlenstoff gespeichert, was zur Senkenleistung im LULUCF-Sektor beiträgt. Allerdings werden große Anstrengungen vonnöten sein, um den Ausbau von derzeit 11.200 ha auf 420.000 ha zu bewerkstelligen, zumal der Flächenzuwachs in den vergangenen Jahren eher stagnierte. Der unterstellte Hochlauf der KUP-Fläche ist daher durchaus als sehr optimistisch anzusehen.

Waldschadensniveau

Im Waldmodell wurde für den Zusammenhang zwischen Erntemenge und Speicherwirkung ein mittleres Schadensniveau unterstellt. Allerdings dürfte dies angesichts der Stürme, Dürren und dem Schädlingsbefall in den letzten wenigen Jahren eine eher optimistische Annahme sein. Es ist vermutlich davon auszugehen, dass solche Kalamitäten mit Fortschreiten des Klimawandels tendenziell zunehmen werden.

Stoffliche Nutzung von Holz

Die geerntete Waldholzmenge teilt sich auf in einen Anteil für die stoffliche Nutzung sowie einen Anteil für die energetische Nutzung. Im Modell wurde der Anteil für die stoffliche Nutzung basierend auf dem Durchschnitt der letzten 10 Jahre konstant fortgeschrieben. Jedoch rückt auch im Holzsektor eine Ausdehnung der stofflichen Holznutzung in den Fokus – sowohl um über den Ersatz konventioneller Materialen eine Substitutionswirkung und damit Emissionsminderung zu erreichen als auch zur Erhöhung des Holzproduktespeichers. Darüber hinaus wird holzartige Biomasse auch zur Defossilisierung der chemischen Industrie benötigt und nicht wenige Bioraffinerien setzen auf den Rohstoff Holz. Angesichts der knapper werdenden Ressource „Waldholz" ist hier also eine Verschärfung des Nutzungskonfliktes zu erwarten, so dass die konstante Fortschreibung des Bedarfs für die stoffliche Nutzung vermutlich eine (zu) optimistische Annahme darstellt und den energetisch nutzbaren Anteil tendenziell eher überschätzt.

Fleischkonsum

Vor dem Hintergrund der knappen Biomasseressourcen und Landwirtschaftsflächen rückt zusehends der hohe Flächenverbrauch durch den hohen Fleischkonsum in den Fokus. Wir unterstellen einen Rückgang des Fleischkonsums um ein Drittel (bis 2045), was jedoch immer noch weit über den von der DGE empfohlenen Menge liegt und somit eine tendenziell eher konservative Abschätzung darstellt. Eine weitere Reduktion wäre aus ernährungsphysiologisch-gesundheitlichen Aspekten definitiv anzustreben. Gleichzeitig würden Flächen für alternative Nutzungen frei und auch die Treibhausgasemissionen aus dem Ladwirtschaftssektor könnten stark reduziert werden.

Im Fazit zeigen unsere Modellierungen, dass die nachhaltig verfügbaren Biomassepotenziale beschränkt sind und sich zukünftig tendenziell eher reduzieren dürften. Außerdem gelten die abgeleiteten Potenziale auch nur unter der Maßgabe, dass sich sämtliche ambitionierten Klimaschutzmaßnahmen realisieren lassen. Sollte dies nicht der Fall sein, wird künftig mit noch weniger Energieholz aus dem Wald zu rechnen sein. Das bedeutet zum einen, dass die entsprechenden Maßnahmen umgesetzt werden müssen und zum anderen, dass mit den vorhandenen Biomassepotenzialen sorgfältig gewirtschaftet werden muss. Die Verteilung auf die nachfragenden Sektoren sollte unter der Prämisse des größtmöglichen Klimaschutznutzens stehen und auch die zur Verfügung stehenden Sortimente und Nutzungstechnologien berücksichtigen. So können beispielsweise Schilf oder Hackschnitzel aus Kurzumtriebsplantagen nicht zur Wärmeerzeugung in vorhandenen Scheitholzöfen im Gebäudesektor eingesetzt werden, sondern würden eine Anpassung der Technologie nötig machen.

6 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Entwicklung der NawaRo-Flächen und ihrer Nutzung [Mio. ha] 16

7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Entwicklung von Ackerland und Grünland bis zum Zieljahr [Mio. ha] 8
Tabelle 2 Entwicklung der Viehplatzzahlen 10
Tabelle 3 Entwicklung der Landwirtschaftsemissionen [Mio. t CO_{2eq}] 11
Tabelle 4 Entwicklung der Emissionen im LULUCF-Sektor [Mio. t CO_{2eq}] 11
Tabelle 5: Entwicklung der Emissionen im LULUCF-Sektor und Ermittlung der Lücke [Mio. t CO_2-Äq.] 13
Tabelle 6: Sonstige Rest- und Abfallstoffpotenziale 16
Tabelle 7 Biomassepotenziale [PJ/a] 18
Tabelle 9: Flächenbelegung im In- und Ausland für Ernährungsgüter pflanzlichen und tierischen Ursprungs 27

8 Literaturverzeichnis

Alexandrotos, N.; Bruinsma, J. (2012): World Agriculture towards 2030/2050. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). *https://www.fao.org/3/ap106e/ap106e.pdf* (17.10.2022).

Benndorf, R.; Bernicke, M.; Bertram, A.; Butz, W.; Dettling, F.; Drotleff, J.; Elsner, C.; Fee, E.; Gabler, C.; Galander, C.; Hargita, Y.; Herbener, R.; Hermann, T.; Jäger, F.; Kanthak, J.; Kessler, H.; Koch, Y.; Kuntze, D.; Lambrecht, M.; Lehmann, C.; Lehmann, H.; Leuthold, S.; Lütkehus, I.; Martens, K.; Müller, F.; Müschen, K.; Nissler, D.; Plickert, S.; Purr, K.; Reichart, A.; Reichel, J.; Salecker, H.; Schuberth, J.; Schulz, D.; Strenge, U.; Sieck, M.; Westermann, B.; Werner, K.; Winde, C.; Wunderlich, D.; Zietlow, B. (2013): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Umweltbundesamt. *https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/treibhausgasneutrales-deutschland-im-jahr-2050* (09.06.2020).

BLE (2019): Evaluations- und Erfahrungsbericht für das Jahr 2018. Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung. *https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/Klima-Energie/Nachhaltige-Biomasseherstellung/Evaluationsbericht_2018.pdf;jsessionid=FA238CE555EF3497D16E9B839231B18D.1_cid335?__blob=publicationFile&v=2* (17.10.2022).

BMEL (2019): Statistisches Jahrbuch über Ernährung Landwirtschaft und Forsten 2019. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. *https://www.ble.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2020/200302_Statistisches_Jahrbuch.html* (11.10.2022).

BMJ (2021): Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG). Bundesministerium der Justiz. *https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/KSG.pdf* (21.03.2022).

Bundesregierung (2019): Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. *https://www.bundesregierung.de/resource/blob/974430/1679914/e01d6bd855f09bf05cf7498e06d0a3ff/2019-10-09-klima-massnahmen-data.pdf?download=1* (11.11.2021).

Bundesregierung (2021): Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie Weiterentwicklung. Bundesregierung. *https://www.bundesregierung.de/resource/blob/998006/1873516/3d3b15cd92d0261e7a0bcdc8f43b7839/2021-03-10-dns-2021-finale-langfassung-nicht-barrierefrei-data.pdf?download=1* (22.08.2022).

DGE (2017): Vollwertig essen und trinken nach den 10 Regeln der DGE. Deutsche Gesellschaft für Ernährung e. V. *https://www.dge.de/ernaehrungspraxis/vollwertige-ernaehrung/10-regeln-der-dge/* (11.10.2022).

Europäische Kommission (2018): Richtlinie zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen. Europäische Union. *https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001&from=DE* (11.11.2021).

Fehrenbach, H.; Giegrich, J.; Köppen, S.; Wern, B.; Pertagnol, J.; Baur, F.; Hünecke, K.; Dehoust, G.; Bulach, W.; Wiegmann, K. (2019): BioRest: Verfügbarkeit und Nutzungsoptionen biogener Abfall- und Reststoffe im Energiesystem (Strom-, Wärme- und Verkehrssektor). Umweltbundesamt. *https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/biorest-verfuegbarkeit-nutzungsoptionen-biogener* (09.06.2020).

FNR (2022): Basisdaten Bioenergie Deutschland 2022. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. *https://www.fnr.de/fileadmin/Projekte/2022/Mediathek/broschuere_basisdaten_bioenergie_2022_06_web.pdf* (15.09.2022).

Gärtner, S.; Rettenmaier, N.; Reinhardt, G. (2020): Ökologische Auswirkungen neuer Managementoptionen zur Erhöhung der Nährstoffnutzungseffizienz (Deliverable 6). INPLAMINT-Berichte ifeu -

Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Heidelberg, Germany. *https://www.ifeu.de/publikation/inplamint-phase-2-deliverable-6-oekologische-auswirkungen-neuer-managementoptionen-zur-erhoehung-der-naehrstoffnutzungseffizienz*.

Harthan, R. O.; Repenning, J.; Blanck, R.; Böttcher, H.; Bürger, V.; Cook, V.; Emele, L.; Görz, W. K.; Hennenberg, K.; Jörß, W.; Ludig, S.; Matthes, F. C.; Mendelevitch, R.; Moosmann, L.; Scheffler, M.; Wiegmann, K.; Brugger, H.; Fleiter, T.; Mandel, T.; Rehfeldt, M.; Steinbach, J. (2020): Abschätzung der Treibhausgasminderungswirkung des Klimaschutzprogramms 2030 der Bundesregierung. Umweltbundesamt. *https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-03-19_cc_33-2020_klimaschutzprogramm_2030_der_bundesregierung.pdf* (04.11.2021).

Hennenberg, K.; Böttcher, H.; Reise, J.; Herold, A.; Bohn, F.; Gutsch, M.; P.O. Reyer, C. (2021): Interpretation des Klimaschutzgesetzes für die Waldbewirtschaftung verlangt adäquate Datenbasis – Reaktion auf die Stellungnahme des Wissenschaftlichen Beirats für Waldpolitik beim BMEL. Öko-Institut e.V. *https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/03-WP-Klimaschutzgesetz-Waldbewirtschaftung.pdf* (01.06.2022).

Jochem, D.; Weimar, H.; Dieter, M. (2022): Holzeinschlag steigt im Jahr 2021 auf 84,2 Mio. m^3.

Närmann, F.; Tanneberger, F.; Birr, F.; Kaiser, M.; Nerger, M.; Luthardt, V.; Zeitz, J. (2021): Klimaschonende, biodiversitätsfördernde Bewirtschaftung von Niedermoorböden. Bundesamt für Naturschutz. *https://doi.org/10.19217/skr616* (22.08.2022).

Repenning, J.; Harthan, R. O.; Blanck, R.; Böttcher, H.; Braungardt, S.; Bürger, V.; Emele, L.; Görz, W. K.; Hennenberg, K.; Jörß, W.; Ludig, S.; Matthes, F. Chr.; Mendelevitch, R.; Moosmann, L.; Nissen, C.; Rausch, L.; Scheffler, M.; Schumacher, K.; Wiegmann, K.; Wissner, N.; Zerrahn, A.; Brugger, H.; Fleiter, T.; Rehfeldt, M.; Rohde, C.; Schlomann, B.; Yu, S.; Steinbach, J.; Deurer, J.; Osterburg, B.; Rösemann, C.; Gensior, A.; Rock, J.; Stümer, W.; Rüter, S.; Fuß, R.; Tiemeyer, B.; Laggner, A.; Adam, S. (2021): Projektionsbericht 2021 für Deutschland. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. *https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/projektionsbericht_2021_bf.pdf* (02.12.2021).

Rösemann, C.; Haenel, H.-D.; Dämmgen, U.; Ulrike Döring; Sebastian Wulf; Brigitte Eurich-Menden; Annette Freibauer; Helmut Döhler; Carsten Schreiner; Bernhard Osterburg; Roland Fuß (2019): Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990 - 2017. Johann Heinrich von Thünen-Institut. *https://doi.org/10.3220/REP1552549234000* (11.10.2022).

SPD; Grüne; FDP (2021): Mehr Fortschritt wagen. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit. SPD; Grüne; FDP. *https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag_2021-2025.pdf* (14.03.2022).

Statistisches Bundesamt (2019): Flächenbelegung von Ernährungsgütern 2010 – 2017. Statistisches Bundesamt. *https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/landwirtschaft-wald/Publikationen/Downloads/fachbericht-flaechenbelegung-pdf-5385101.html* (17.10.2022).

UBA (2019): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2019. Umweltbundesamt. *https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-05-28_cc_23-2019_nir-2019_0.pdf* (09.06.2020).

UBA (2020): Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2018. Umweltbundesamt. *https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/berichterstattung-unter-der-klimarahmenkonvention-5* (09.10.2020).

UBA (2021): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2021: Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990

– 2019. Umweltbundesamt. *https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-05-19_cc_43-2021_nir_2021_1.pdf* (11.11.2021).

United Nations (2019): World population prospects 2019. United Nations Department of Economic and Social Affairs Population Division. *http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12283219* (17.10.2022).

Willett, W.; Rockström, J.; Loken, B.; Springmann, M.; Lang, T.; Vermeulen, S.; Garnett, T.; Tilman, D.; DeClerck, F.; Wood, A.; Jonell, M.; Clark, M.; Gordon, L. J.; Fanzo, J.; Hawkes, C.; Zurayk, R.; Rivera, J. A.; De Vries, W.; Majele Sibanda, L.; Afshin, A.; Chaudhary, A.; Herrero, M.; Agustina, R.; Branca, F.; Lartey, A.; Fan, S.; Crona, B.; Fox, E.; Bignet, V.; Troell, M.; Lindahl, T.; Singh, S.; Cornell, S. E.; Srinath Reddy, K.; Narain, S.; Nishtar, S.; Murray, C. J. L. (2019): Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. In: *The Lancet*. Vol. 393, No. 10170, S. 447–492.

A.1 Ableitung einer flächensuffizienten NawaRo-Anbaufläche

In Deutschland wurden im Jahr 2017 auf rund 2,3 Mio. ha nachwachsende Rohstoffe (NawaRo) angebaut, davon rund 2,0 Mio. ha Energiepflanzen und 0,3 Mio. ha für die stoffliche Verwendung (Statistisches Bundesamt 2019). Diese Flächen stehen nicht für die Ernährung zur Verfügung.

Laut Statistischem Bundesamt beanspruchte der deutsche Inlandsverbrauch von Ernährungsgütern im Jahr 2017 weltweit rund 19 Mio. ha Fläche (Statistisches Bundesamt 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 (s. Tabelle 8, Spalte "2017"), welches auch als virtueller Flächenimport bezeichnet wird.

Im Betrachtungszeitraum der vorliegenden Studie wird die Weltbevölkerung von 7,7 Mrd. im Jahr 2019 voraussichtlich auf 8,5 Mrd. im Jahr 2030 und weiter auf 9,7 Mrd. im Jahr 2050 anwachsen (United Nations 2019). Angesichts dieser Prognose und des in Zeiten des Klimawandels zu erwartenden Verlusts fruchtbarer Ackerflächen weltweit ist die derzeit hohe Flächenbelegung durch den deutschen Inlandsverbrauch von Ernährungsgütern als nicht nachhaltig anzusehen. Eine Flächensuffizienz, also eine netto ausgeglichene Flächenbilanz (notabene: Importe und Exporte sind weiterhin möglich!), ist nach Überzeugung der Autor:innen anzustreben.

Tabelle 8: Flächenbelegung im In- und Ausland für Ernährungsgüter pflanzlichen und tierischen Ursprungs

	2017 (1000 ha)	**2050** (1000 ha)
Inland		
Landwirtschaftlich genutzte Fläche (LN)	16.687[a]	15.174[c]
Nachrichtlich: Ackerfläche (AF)	11.800[a]	11.321[c]
Nachrichtlich: Grünland (GL)	4.700[a]	3.853[c]
Davon für:		
- Futterpflanzen	9.552[a]	7.002[c]
- Pflanzliche Ernährung	4.497[a]	6.727[c]
- Nachrichtlich: Inlandsbelegung für Ernährung	14.049[c]	13.728[c]
- Energiepflanzen	2.014[a]	**1.000**
- Industrielle Verwendung	307[a]	276[c]
- Stillgelegte Flächen, Brache	318[a]	170[b]
Inlandsverbrauch von Ernährungsgütern	19.082[a]	13.684[c]
- pflanzlichen Ursprungs	7.450[a]	6.705[c]
- tierischen Ursprungs	11.632[a]	6.979[c]
Flächensaldo (Inlandsverbrauch – Inlandsbelegung)	-5.033[a]	-44[c]

Quelle: eigene Darstellung ifeu basierend a: (Statistisches Bundesamt 2019), b: (Benndorf et al. 2013) und c: eigene Berechnungen

In der ersten Modellierungsrunde wurde eine Abnahme der landwirtschaftlich genutzten Fläche von rund 16,7 Mio. ha auf rund 15,2 Mio. ha im Jahr 2050 angesetzt. Dabei ist sowohl die Ausdehnung der Siedlungs- und Verkehrsfläche als auch die aus Klimaschutzgründen angezeigte Wiedervernässung von Mooren berücksichtigt. Dies macht sich insbesondere beim Grünland bemerkbar, welches um knapp 1 Mio. ha zurückgeht. Stillgelegte Flächen und Brachen halbieren sich in etwa (s. Tabelle 8, Spalte "2050").

Der Inlandsverbrauch von Ernährungsgütern tierischen Ursprungs ist laut (Statistisches Bundesamt 2019) für ca. 60 % der Flächenbelegung verantwortlich. Ein zentraler Schlüssel zur Erreichung der Flächensuffizienz ist eine deutliche Reduktion des Fleischverzehrs, welcher derzeit im Durchschnitt rund 1.200 g pro Person und Woche beträgt. Die Deutsche Gesellschaft für Ernährung e. V. (DGE)

empfiehlt seit Jahren, den Fleischverzehr aus ernährungsphysiologisch-gesundheitlichen Gründen auf 300 bis 600 g pro Woche zu begrenzen (DGE 2017). Dies wäre also mindestens eine Halbierung gegenüber heute.

In der vorliegenden Studie setzen wir konservativ eine Reduktion des Fleischverzehrs um lediglich ein Drittel an. Zusammen mit einer ebenfalls angesetzten Steigerung der landwirtschaftlichen Erträge um 0,3 % p. a. (entspricht 10 % bis zum Jahr 2050)[5] ergibt sich daraus eine deutliche Reduktion der ernährungsbedingten Flächenbelegung auf rund 13,7 Mio. ha im Jahr 2050. Unter der Annahme einer gleichbleibenden Nachfrage nach NawaRo für die stoffliche Nutzung (Menge bleibt gleich, Fläche verringert sich aufgrund der angesetzten Ertragssteigerung leicht auf 0,28 Mio. ha) könnten im Jahr 2050 auf 1,0 Mio. ha Energiepflanzen angebaut werden. Dies würde zu einem fast ausgeglichenen Flächensaldo (leichtes Defizit von rund 44.000 ha) führen.

Die Anbaufläche für NawaRo wurde in der zweiten Modellierungsrunde weiter nach unten korrigiert, um dem im Koalitionsvertrag 2021 (SPD et al. 2021) festgeschriebenen Ausbau des Ökolandbau-Anteils auf 30 % im Jahr 2030 Rechnung zu tragen (s. Kapitel 4.2).

[5] Laut (Alexandrotos und Bruinsma 2012) wird die weltweite Produktion von Nutzpflanzen weiter ansteigen, wobei die jährliche Ertragssteigerungsrate in Zukunft jedoch geringer ausfallen wird als in der Vergangenheit. So wird erwartet, dass die jährliche Ertragssteigerung zwischen 2030 und 2050 im Durchschnitt nur noch bei etwa 0,7 % liegt. Betrachtet man ausschließlich die Industrieländer, so ist eine deutlich geringere Ertragssteigerungsrate von 0,3 % p. a. für den Zeitraum zwischen 2030 und 2050 zu erwarten. Wir setzen global eine Steigerung von 0,3 % p. a. an, die unter anderem auch dem 20 %-igen Flächenanteil des Ökolandbaus in Deutschland Rechnung trägt.