



Szenarien zum optimalen Einsatz von Biomasse in der Bioökonomie bis 2050

Autor:innen:

Kathleen Meisel (DBFZ), Matthias Jordan (UFZ)

Susann Günther, Karl-Friedrich Cyffka, Lilli Sophia Röder, Ronja Wollnik, Tom Karras, Harry Schindler (DBFZ), Daniela Thrän (UFZ)

IMPRESSUM

Herausgeber:

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum
gemeinnützige GmbH
Torgauer Straße 116
04347 Leipzig
Tel: +49 (0)341 2434-112
info@dbfz.de

Förderung:

Das Deutsche Biomasseforschungszentrum wird institutionell gefördert durch das Bundesministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Heimat aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Geschäftsführung:

Prof. Dr. mont. Michael Nelles
(Wiss. Geschäftsführer)
Dr. Christoph Krukenkamp
(Administrativer Geschäftsführer)

DBFZ Report Nr. 56

Szenarien zum optimalen Einsatz von Biomasse
in der Bioökonomie bis 2050
Leipzig: DBFZ, 2026
ISSN: 2197-4632 (Online)
ISBN: 978-3-949807-41-1
DOI: 10.48480/17m2-3058

Autor:innen:

Kathleen Meisel (DBFZ), Matthias Jordan (UFZ)

Susann Günther, Karl-Friedrich Cyffka, Lilli Sophia Röder,
Ronja Wollnik, Tom Karras, Harry Schindler (DBFZ),
Daniela Thrän (UFZ)

Bilder:

Sofern nicht am Bild vermerkt: DBFZ, Stefanie Bader (Map)
Titel: Adobe Stock, Cosun Beet Company GmbH & Co. KG

Copyright:

Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil dieser Broschüre darf ohne die schriftliche Genehmigung des Herausgebers vervielfältigt oder verbreitet werden. Unter dieses Verbot fällt insbesondere auch die gewerbliche Vervielfältigung per Kopie, sowie die Aufnahme in elektronische Datenbanken.

Veröffentlichungsdatum:

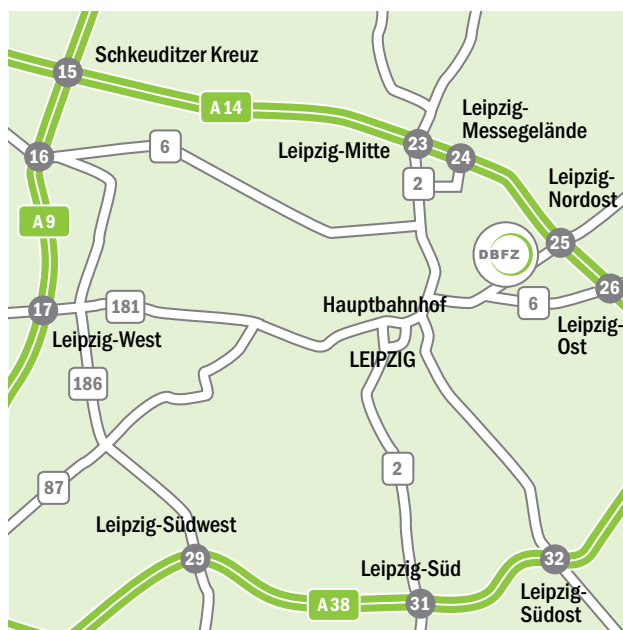
05/2026

ANFAHRT

Mit dem Zug: Ankunft Leipzig Hauptbahnhof; Straßenbahnlinie 3/3E (Richtung Taucha/Sommerfeld) bis Haltestelle Bautzner Straße; Straße überqueren, Parkplatz rechts liegen lassen und den Haupteingang des DBFZ (Haus 1, Torgauer Str. 116) benutzen. Bitte melden Sie sich am Empfang an.

Mit dem Auto: Über die Autobahn A 14; Abfahrt Leipzig NordOst, Taucha; Richtung Leipzig; Richtung Zentrum, Innenstadt; nach bft Tankstelle befindet sich das DBFZ auf der linken Seite (siehe „... mit dem Zug“).

Mit der Straßenbahn: Linie 3/3E (Richtung Taucha/Sommerfeld); Haltestelle Bautzner Straße (siehe „... mit dem Zug“)



Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikationen in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter der Adresse www.dnb.de abrufbar.

Szenarien zum optimalen Einsatz von Biomasse in der Bioökonomie bis 2050

Kathleen Meisel (DBFZ), Matthias Jordan (UFZ)

**Susann Günther, Karl-Friedrich Cyffka, Lilli Sophia Röder, Ronja Wollnik,
Tom Karras, Harry Schindler (DBFZ), Daniela Thrän (UFZ)**

In Kooperation mit dem Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung



DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum
gemeinnützige GmbH

Torgauer Straße 116
04347 Leipzig

Tel.: +49 (0)341 2434-112

www.dbfz.de
info@dbfz.de

Datum: 01.05.2025

Kontakt:

DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum
gemeinnützige GmbH
Torgauer Straße 116
04347 Leipzig
Tel.: +49 (0)341 2434-112
E-Mail: info@dbfz.de
Internet: www.dbfz.de

Dr. Kathleen Meisel
Deutsches Biomasseforschungszentrum
Tel.: +49 (0)341 2434-472
E-Mail: kathleen.meisel@dbfz.de

Dr. Matthias Jordan
Tel.: +49 (0)341 6025 2828
E-Mail: matthias.jordan@ufz.de



Zitationsempfehlung:

Meisel, K.; Jordan, M.; Günther, S.; Cyffka, K.-F.; Röder, L. S.; Wollnik, R.; Karras, T.; Schindler, H.; Thrän, D. (2026). Szenarien zum optimalen Einsatz von Biomasse in der Bioökonomie bis 2050. Leipzig: DBFZ. VIII, 9-59 S. (DBFZ-Report, 56). ISBN: 978-3-949807-41-1. DOI: 10.48480/17m2-3058.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis.....	VIII
Danksagung	9
Kurzfassung	10
Kernbotschaften	10
1 Hintergrund und Zielstellung	13
1.1 Hintergrund und Untersuchungsrahmen	13
1.2 Zielstellung	14
2 Methoden	14
2.1 Modellierung.....	14
2.2 Berücksichtigte Sektoren der Biomassenutzung	15
2.2.1 Energiesektor	17
2.2.2 Chemiesektor	18
2.2.3 Holz und Holzbau.....	20
2.2.4 Torfersatz	22
2.2.5 BioCCS und Kompensationsoptionen	23
2.3 Biomasse- und Flächenpotenziale	25
2.4 Szenarien und Sensitivitäten	29
3 Ergebnisse	33
3.1 Optimale Verteilung der Biomasse (Übersicht).....	33
3.2 Biomasseeinsatz in den Sektoren.....	35
3.2.1 Energiesektor	35
3.2.2 Chemiesektor	37
3.2.3 Holz und Holzbau.....	39
3.2.4 Torfersatz	40
3.2.5 BioCCS und Kompensationsoptionen	41
3.3 Biomasseeinsatz unter veränderten Rahmenbedingungen	42
3.3.1 Bioökonomie-Push.....	42
3.3.2 Technologie-Push	43
3.3.3 Kombiniertes Bioökonomie- und Technologie-Push	44
3.3.4 Biomasseknappheit	45
3.3.5 Suffizienz.....	46
3.3.6 Hoher CO ₂ -Preis	47
3.3.7 Holzbauquote.....	48
3.3.8 Zusammenfassende Darstellung der Szenarien	48
3.3.9 Weitere Sensitivitäten	50

4	Einordnung der Ergebnisse.....	51
5	Referenzen.....	54

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erklärung
AEA	Annual Emission Allocations
AtJ	Alcohol-to Jet
BECCS	Bioenergie mit CO ₂ -Abscheidung und -speicherung
BEV	Battery Electric Vehicle
BioCCS	Biomassenutzung mit CO ₂ -Abscheidung und -speicherung
BENOPT	BioENERgy OPTimization Modell
BtL	Biomass-to-Liquid
BtX	Aromaten Benzol, Toluol und Xylol
CCS	CO ₂ -Abscheidung und -speicherung
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
ETS	Emission Trading System
FAME	Fatty Acid Methyl Ester
FT	Fischer-Tropsch
GPFM	Global Forest Product Modell
HEFA	Hydroprozessierte Ester und Fettsäuren
HP	Holzpotenzial
HHS	Holzhackschnitzel
HP	Holzpotenzial
LNG	Liquefied Natural Gas
PtX	Power-to-X
VH	Vollholz
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LULUCF	Land Use, Land-Use Change and Forestry
MeOH	Methanol
MWV	Moorwiedervernässung

PFAD	Palmfettsäuredestillat
PtG	Power-to Gas
POME	Palm Oil Mill Effluent
PtX/PtL	Power-to-X/ Power-to-Liquid
REDIII	Erneuerbare-Energien-Richtlinie (novelliert)
SNG	Synthetic natural gas
THG	Treibhausgasemissionen
tsam	time series aggregation modul
UCO	Used cooking oil
VH	Vollholz

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	BENOPT-Modellstruktur	15
Abbildung 2	Betrachtete Sektoren mit ihren Erfüllungsoptionen	16
Abbildung 3	Betrachtete Intermediate und Produkte der organischen Chemie.....	19
Abbildung 4	Mögliche Holznutzungspfade im BENOPT Modell. HHS = Holzhackschnitzel; BioCCS = Biomass with Carbon Capture and Storage	22
Abbildung 5	Betrachtete Einsatz- und Torfersatzstoffe.....	23
Abbildung 6	Aggregierter Biomasseeinsatz in den Sektoren Energie, Chemie, Holzbau und Torfersatz im Referenzszenario unter der Annahme der insgesamt steigenden Biomassepotenziale von 2020 bis 2050	34
Abbildung 7	Biomasseeinsatz im Energiesektor in PJ im Referenzszenario	35
Abbildung 8	Biomasseeinsatz in der Mittel- und Hochtemperaturindustrieanwendung in PJ im Referenzszenario.....	36
Abbildung 9	Biomasseeinsatz für Gebäudeheizungen in PJ im Referenzszenario	36
Abbildung 10	Biomasseeinsatz im organischen Chemiesektor in Millionen Tonnen	38
Abbildung 11	Darstellung aller biomasse- und strombasierten sowie Recyclingoptionen des Intermediaten-Pools in PJ.....	38
Abbildung 12	Einsatz von Holz im Holzbau und im Energiesektor im Referenzszenario	39
Abbildung 13	Holzaufkommen und Holzverwendung im Referenzszenario	40
Abbildung 14	Eingesetzte Torfersatzsubstrate im Referenzszenario.....	41
Abbildung 15	BioCCS, Holzspeicher und Kompensationsoptionen der im System verbliebenden THG-Emissionen.....	42
Abbildung 16	Erhöhter Biomasseeinsatz im Bioökonomie-Push-Szenario im Vergleich zum Referenzszenario	43
Abbildung 17	Veränderter Kraftstoffmix im Technologie-Push-Szenario.....	44
Abbildung 18	Holzverwendung im Bioökonomie-Push-, Technologie-Push- und Bioökonomie-Technologie-Push-Szenario	45
Abbildung 19	THG-Emissionen und Kompensationsoptionen im Referenzszenario und bei Biomasseknappheit	46
Abbildung 20	Biomasseeinsatz im Stromsektor im Referenz- und Suffizienz-Szenario	47
Abbildung 21	Vergleich der THG-Emissionen zwischen Referenz- und Szenario mit hohem CO ₂ -Preis.....	48
Abbildung 22	Biomasseeinsatz in den verschiedenen Sektoren und Szenarien (schraffierte Flächen im Energie- und Chemiesektor markieren die Kombination der Biomassennutzung mit CCS)	49
Abbildung 23	veränderte Flächenverfügbarkeit bei veränderter Ernährungsweise (links: geringe-, Mitte: moderate-, rechts: ambitionierte Ernährungsumstellung)	51

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Bedarfe und Erfüllungsmöglichkeiten in den betrachteten Verbrauchssektoren.....	17
Tabelle 2	Überblick über ausgewählte BioCCS-Pfade (nach [59]) mit FT=Fischer-Tropsch, MeOH= Methanol.....	24
Tabelle 3:	Flächenveränderungen für die Anbaubiomasse entsprechend der Änderungen in der Ernährungsweise in Kombination mit weiteren Treibern. Basisjahr = 2024, Zieljahr = 2050; [+] = Flächengewinn, [-] = Flächenverlust; Angaben in Mio. ha.....	26
Tabelle 4	Szenarien für Rundholz nach Holzart in 2020 und 2050	27
Tabelle 5	Szenarien für Potenziale biogener Reststoffe, Nebenprodukte und Abfälle sowie weiterer Biomassen in 2020 und 2050	28
Tabelle 6	Wesentliche Charakteristiken der betrachteten Szenarien (Szenarienwerte beziehen sich auf das Jahr 2050)	32

Danksagung

Die Autor:innen danken den nachfolgend genannten Institutionen und Personen für ihre wertvolle Unterstützung und die Bereitstellung essentieller Datengrundlagen, ohne die die Erstellung dieser Studie in dieser Tiefe nicht möglich gewesen wäre:

- Dem **Thünen-Institut** für die Bereitstellung von zwei Szenarien zu Holzverfügbarkeiten, die eine zentrale Säule unserer Biomassemodellierung bilden.
- Dem **Öko-Institut e.V.** für die Überlassung der detaillierten Wärmebedarfsdaten für den Gebäudesektor, welche die Grundlage für die Modellierung in diesem Bereich darstellten sowie einem weiteren Szenario zur Holzverfügbarkeit.
- **Olivier Hirschler** für die fachliche Unterstützung sowie die Bereitstellung spezifischer Informationen und Daten zur Darstellung der Torfersatzstoffe.
- Dem **BioNET-Team** für die Bereitstellung der Negativemissions-Konzepte und deren technischer und ökonomischer Kenndaten.

Der Dank gilt darüber hinaus allen weiteren Beteiligten, die durch fachlichen Input und konstruktive Diskussionen zum Gelingen des Vorhabens beigetragen haben.

Kurzfassung

Im Vorhaben „Szenarien zum optimalen Einsatz von Biomasse in der Bioökonomie bis 2050“ wurde der kosteneffiziente Einsatz der begrenzt verfügbaren Biomasse in den Sektoren Energie, Chemie, Torfersatz und Holzbau zur Erreichung der Klimaschutzziele bis 2050 in Deutschland untersucht. Dabei wurden auch die Möglichkeiten, in diesen Sektoren Negativemissionen zu erzeugen, u. a. durch die Kombination mit der Abscheidung und Speicherung der emittierten CO₂-Emissionen, einbezogen. Die Nahrungs- und Futtermittelerzeugung wurde auf dem Status quo eingefroren und nicht weiter betrachtet, wenngleich veränderte Ernährungsweisen in Sensitivitätsanalysen Berücksichtigung fanden. Begrenzte Importe wurden ebenfalls einbezogen. Für die Deckung der Bedarfe in den untersuchten Sektoren wurden neben den Biomasseoptionen, je alternative fossile und erneuerbare Erfüllungsoptionen betrachtet. Unter Anwendung von Systemmodellierungen sowie verschiedenen Szenarien- und Sensitivitätsparametern liefert das Vorhaben robuste Perspektiven für die Etablierung der Bioökonomie innerhalb dieses Untersuchungsrahmens: Es zeigt sich, dass die Biomasse-nutzung langfristig und kosteneffizient in den betrachteten Sektoren wettbewerbsfähig ist und dort entscheidend zur Defossilisierung beiträgt. Die begrenzte Biomasse wird dort eingesetzt, wo nicht-biogene Alternativen am kostenintensivsten sind: im Flug- und Schiffsverkehr (HEFA, LNG), in der Hochtemperaturindustrieanwendung – hier in großen Teilen mit CCS kombiniert, in der flexiblen Stromerzeugung (Biogas), in der Spitzenlastwärmeerzeugung in älteren, unsanierten Gebäuden und in der chemischen Industrie (Ethanol, Methanol zur Erzeugung von Olefinen und Aromaten). Die eingesetzten Holzmengen im Holzbau steigen langfristig kosteneffizient erst signifikant, wenn zusätzliche Holzpotenziale über eine höhere Mobilisierung oder Importe verfügbar sind oder eine verbindliche Holzbauquote implementiert wird. Die relativ geringe Nachfrage nach Torfersatzstoffen kann in jedem Szenario biogen erfüllt werden.

Kernbotschaften

- » Unter allen untersuchten Optionen zur Deckung der Bedarfe in den betrachteten Sektoren (Energie, organische Chemie, Bau, Torfersatz) können sich Biomasseoptionen gegenüber alternativen Erfüllungsoptionen durchsetzen, und zwar bis zur umfassenden Ausnutzung der verfügbaren Biomassepotenziale bis 2050. Damit erweist sich die Nutzung von Biomasse zur Bedarfsdeckung und zur Erreichung der Klimaschutzziele unter den angenommenen Rahmenbedingungen als wettbewerbsfähig. Dennoch ist für die vollständige Zielerreichung in den untersuchten Sektoren ein Mix weiterer Optionen erforderlich.
- » Trotz umfänglicher Bedarfsdeckung in der stofflichen Biomassenutzung werden langfristig die größten Mengen an Biomasse kosteneffizient im Energiesektor eingesetzt, insbesondere in der Erzeugung industrieller Hoch- und Mitteltemperaturwärme. Größere Biomasse-mengen werden zudem im Stromsektor zur Deckung der Residuallast, zur Spitzenlastwärmeerzeugung in älteren, unsanierten Gebäuden sowie im schwer zu elektrifizierenden Flug- und Schiffsverkehr verwendet.

- » Der Chemiesektor ist in den modellierten Szenarien mittel- und langfristig der zweitgrößte Biomasseabnehmer. Biomasse kann maßgeblich zur Transformation der kohlenstoffbasierten organischen Chemie beitragen, wobei vor allem lignozellulosehaltige Biomassen zur Erzeugung von Methanol, aber auch Zuckerrüben zur Erzeugung von Ethanol genutzt werden. Beides kann direkt oder als Intermediat eingesetzt werden.
- » Daneben bildet erneuerbares Naphtha als Nebenprodukt aus der strombasierten Power-to-Kerosin-Produktion eine tragende Säule in der Transformation des Chemiesektors und schafft so eine wesentliche Synergie zwischen dem Energie- und dem Chemiesektor.
- » Im Bausektor bleiben langfristig die eingesetzten Holzmengen (Rund- und Restholz) stabil und können nicht signifikant erhöht werden, da das meiste Holz kosteneffizient in den schwer zu elektrifizierenden Teilmärkten des Energiesektors (Mittel- und Hochtemperaturwärme, alte, unzureichend gedämmte Gebäude), oft in Kombination mit der Abscheidung und Speicherung von CO₂ (BioCCS), eingesetzt wird.
- » Jedoch würden eine stärkere Mobilisierung inländischer Holzpotenziale sowie Holzimporte steigende Holzbauanteile und Sanierungsquoten im Bausektor ermöglichen. Eine verbindlich hohe Holzbauquote führte dazu, dass Holz in noch größerem Umfang im Bausektor genutzt würde. Das resultiert jedoch in steigenden Transformationskosten, da die Kostenvorteile von Biomasse im Bausektor geringer als im Energiesektor sind - selbst unter Berücksichtigung der C-Speicherung.
- » Zur Kompensation verbleibender und unvermeidbarer THG-Emissionen können BioCCS, fossiles CCS, die C-Speicherung im Holzbau und der staatliche Kauf von Emissionsrechten genutzt werden. Langfristig liefert BioCCS den größten Beitrag zur Kompensation, insbesondere durch die Verbrennung und Vergasung lignozellulosehaltiger Biomasse, jeweils mit nachgeschalteten CCS-Verfahren und zum größten Teil im Hochtemperaturwärmesektor. Wird in den Szenarien mehr Holz im Bausektor eingesetzt, steigt auch der Beitrag dieser C-Speicherung zur Kompensation der verbleibenden THG-Emissionen und es bedarf weniger BioCCS.
- » Wird im Szenario „Biomasseknappheit“ eine geringe Biomasseverfügbarkeit angenommen, so wird der Einsatz nicht biogener Optionen erzwungen, die den Prozess der Defossilisierung insgesamt verteuern. So setzen sich Wasserstoff, strombasierte PtX-Optionen und Recycling durch und fossile Rohstoffe verbleiben im System (und müssen dann kompensiert werden). Die geringen Biomassepotenziale werden dort eingesetzt, wo nicht-biogene Alternativen am kostenintensivsten sind: im Flug- und Schiffsverkehr (HEFA, LNG), in der Hochtemperaturindustrieanwendung, in der flexiblen Stromerzeugung (Biogas) und in der chemischen Industrie (Olefine aus Ethanol).
- » Steigt das verfügbare Biomassepotenzial (durch höhere Mobilisierung und Importe) wird es in den betrachteten Sektoren umfassend ausgeschöpft und führt zu geringeren Gesamtkosten.

- » Ein hoher CO₂-Preis im ETS und in den nicht-ETS-Sektoren beschleunigt die Transformation, verfügbare Biomassepotenziale werden zeitiger nahezu vollumfänglich genutzt und es werden in Summe deutlich weniger CO₂-Emissionen emittiert.
- » Die verfügbare Biomasse wird nahezu vollumfänglich zur Deckung der Bedarfe eingesetzt, auch bei langfristig sinkenden Nachfragen in allen betrachteten Sektoren (Suffizienzscenario), was deren Wettbewerbsfähigkeit unterstreicht. Bei geringerer Energienachfrage sinkt auch der Bedarf an Biomasse zur Energieerzeugung, und es werden höhere Holzbauanteile erreicht. Suffizienz führt zu geringeren Gesamtemissionen und –kosten.
- » Bei einem Technologie-Push durch verstärkte Innovationsförderung (bis zu maximalen Konversionseffizienzen und minimal möglichen Investitionskosten) wird die verbleibende Scheitholz- und Pelletnutzung in alten und unsanierten Gebäuden größtenteils durch Wärmepumpen ersetzt, Wasserstoff-ready Technologien werden vermehrt für die Residuallast eingesetzt, im Flugverkehr setzen sich zusätzlich Biomass-to-liquid-Kerosin (BtL) und Alcohol-to-Jet (AtJ) aus Bioethanol durch, in der organischen Chemie führt es zum verstärkten Einsatz von Recycling.
- » Mittel- und langfristig setzt sich in den modellierten Szenarienergebnissen die thermo-chemische Vergasung von lignozellulosehaltiger Biomasse zur Erzeugung von Industrie- und Gebäudewärme, von Kraftstoffen für die Schifffahrt (LNG) und von Methanol im Chemiesektor als sehr robusten Konversionstechnologien durch.
- » Weitere zentrale und über die Szenarienvariationen langfristig wettbewerbsfähige Technologien sind die direkte Biomassefeuerung zur Erzeugung von Mittel- und Hochtemperaturindustriewärme, die Biogasproduktion zur flexiblen Stromerzeugung, die HEFA-Produktion für den Flugverkehr, die LNG-Produktion für den Schiffsverkehr sowie die Bioethanolproduktion als Intermediat für den Chemiesektor sowie die Biomethanproduktion als Einsatz in noch verbliebenen Gasthermen.
- » Der geringe Bedarf an Torfersatzstoffen kann in allen Szenarien biogen erfüllt werden. Hier setzen sich vor allem Holzfasern, Torfmoos, Kokosmark und Rückstände aus der Pappelvergärung durch.

1 Hintergrund und Zielstellung

Die folgend dargestellten Arbeiten wurden im Rahmen des DBFZ Projektes *SoBio2 – Szenarien einer optimalen Biomasseverteilung in der Bioökonomie bis 2050* zusammen mit dem UFZ erstellt.

1.1 Hintergrund und Untersuchungsrahmen

Mit der Anpassung des Bundes-Klimaschutzgesetzes [1] hat sich die Bundesregierung zur Erreichung der Klimaneutralität bis zum Jahr 2045 sowie zu netto-negativen Emissionen ab 2050 verpflichtet. Vor diesem Hintergrund steht die deutsche Wirtschaft vor einer Transformation der derzeit noch weitgehend auf fossilen Ressourcen basierenden Wirtschaft hin zu einem System, das primär auf dem Einsatz erneuerbarer Rohstoffe, konsequentem Recycling und einer Reduktion des Gesamtbedarfs basiert. Ein weiterer Bestandteil der Transformation ist die Kompensation verbleibender, unvermeidbarer Treibhausgas(THG)-Emissionen durch den gezielten Ausbau natürlicher und technischer Senken [2, 3].

In diesem Transformationsprozess kann Biomasse als erneuerbare Ressource einen wesentlichen Beitrag leisten. Die in vielfältiger Form vorliegenden Biomasse wie zum Beispiel land- und forstwirtschaftliche Biomassen sowie deren Rest- und Abfallstoffe, aber auch kommunale und industrielle Abfallströme, Algen oder Paludikulturen können über eine Vielzahl an Konversionstechnologien aufbereitet und für verschiedene Sektoren der Bioökonomie valorisiert werden. Biomasse wird bereits in signifikantem Umfang im Energiesektor [4] und im Holzbau [5] eingesetzt und deckt bereits als Torfersatz 50 % der Nachfrage nach Kulturerden [6]. In der organischen Chemie machen die nachwachsenden Rohstoffe ca. 14% der Rohstoffbasis aus [7]. Mit zunehmendem Defossilierungsdruck steigt auch der Nutzungsdruck auf die begrenzt verfügbaren Biomassepotenziale, welche dann mit größtmöglichem Nutzen für den Klimaschutz und kosteneffizient in den nachfragenden Sektoren eingesetzt werden sollten.

Weitere Klimaschutzbeiträge werden bei der energetischen und stofflichen Nutzung von Biomasse durch die Kopplung mit Verfahren zur CO₂-Abscheidung und -Speicherung (BioCCS) oder durch den Kohlenstoffspeichereffekt der Holzbauprodukte möglich, wodurch negative Emissionen erzeugt werden können.

In den bisherigen Studien, die den Weg zur Klimaneutralität in Deutschland aufzeigen [8–13] werden die Biomassepotenziale und deren Nutzungen häufig vorgegeben und wenig detailliert modelliert. Auch die gemeinsame Betrachtung von stofflicher und energetischer Nutzung ist selten. Damit bleibt die Frage des kostenoptimalen Einsatzes der begrenzten Biomasse über die Sektoren hinweg oft unbeantwortet. Die vorliegende Arbeit bezieht die 18 wesentlichen nachwachsenden Rohstoffe, 77 biogene Rest- und Abfallstoffe gruppiert in 19 Kategorien sowie weitere Biomassen wie Paludikulturen ein und betrachtet 310 Konversionstechnologie, auch hybride Systeme zur Deckung der Bedarfe in den betrachteten Sektoren. In der Modellierung können die eingesetzten Biomassen kosteneffizient frei zwischen den Sektoren alloziert und auch zusätzlich zur Kompensation von verbleibenden THG-Emissionen eingesetzt werden.

1.2 Zielstellung

Vor diesem Hintergrund adressiert das Projekt SoBio2 die folgenden Forschungsfragen:

- Was ist die optimale Rolle der begrenzt verfügbaren Biomasse in der Bioökonomie, eingebunden in die Gesamtwirtschaft?
- Was sind die prioritären Zielmärkte der Biomasse?
- Was sind die zentralen und wettbewerbsfähigsten (Bio-)Konversionstechnologien?
- Welche robusten Trends zeichnen sich ab und wie sensitiv reagiert der Biomasseeinsatz auf veränderte Rahmenbedingungen?

Die Forschungsfragen adressieren die Entwicklungspfade von 2020 bis zum Jahr 2050. Dabei bilden die Deckung der Bedarfe der betrachteten Sektoren sowie die Einhaltung der gesetzlichen Klimaschutzziele gemäß Klimaschutzgesetz [1] die maßgeblichen Randbedingungen der Untersuchung. Um die Bandbreite an möglichen zukünftigen Entwicklungen des Biomasseeinsatzes in der Bioökonomie darzustellen, sollen die Randbedingungen in verschiedenen Szenarien variiert werden.

2 Methoden

In diesem Kapitel wird zunächst das vom UFZ entwickelte Optimierungsmodell BENOPT, mit dessen Hilfe die definierten Forschungsfragen beantwortet werden, vorgestellt. Anschließend werden die Sektoren beschrieben, die im SoBio-Projekt betrachtet und modelliert werden. Des Weiteren wird die Herleitung der Biomassepotenziale, die verwendeten Technologiedaten sowie die Definition der unterschiedlichen Szenarien erläutert.

2.1 Modellierung

BENOPT ist ein klassisches Energiesystemoptimierungsmodell, welches entwickelt wurde um den optimalen Einsatz der limitierten Biomasse in Deutschland im Rahmen der Energiewende zu analysieren [14–16]. Biomasse kann jedoch nicht nur im Energiebereich zur Transformation beitragen, sondern es ist zu erwarten, dass Biomasse zukünftig eine größere Rolle in der stofflichen Nutzung spielen wird. Zusätzlich geht man davon aus, dass Biomasse eine entscheidende Rolle für die Erzeugung negativer Emissionen spielen wird. Daher wurde in dieser Arbeit das BENOPT Modell um weitere stoffliche Nutzungssektoren (Chemie, Holzbau, Torfersatzstoffe) und ein umfassendes Portfolio an Negativen Emissionstechnologien, wie in den Kapiteln 2.2.2 bis 2.2.5 beschrieben, erweitert. Abbildung 1 gibt einen Überblick über den strukturellen Aufbau des Modells inkl. der implementierten Bedarfssektoren, Technologien und der biogenen Rohstoff- und Rohwarenebene. Wo technisch möglich, sind auch die fossilen und alternativen erneuerbaren Optionen abgebildet. Negative Emissionstechnologien sind an verschiedenen Stellen entlang der Wertschöpfungskette implementiert. Infrastrukturentwicklungen, wie z.B. Stromnetzausbau, Wärmenetze, Wasserstoff- und Gasnetzausbau werden nicht modelliert. Als Zielfunktion werden die Gesamtkosten des Systems

optimiert, bei gleichzeitiger Erfüllung der Klimaziele sowie der Bedarfe in den betrachteten Sektoren. Die Bilanzierung der Emissionen im Modell orientiert sich dabei an der offiziellen Berichterstattung Deutschlands [17].

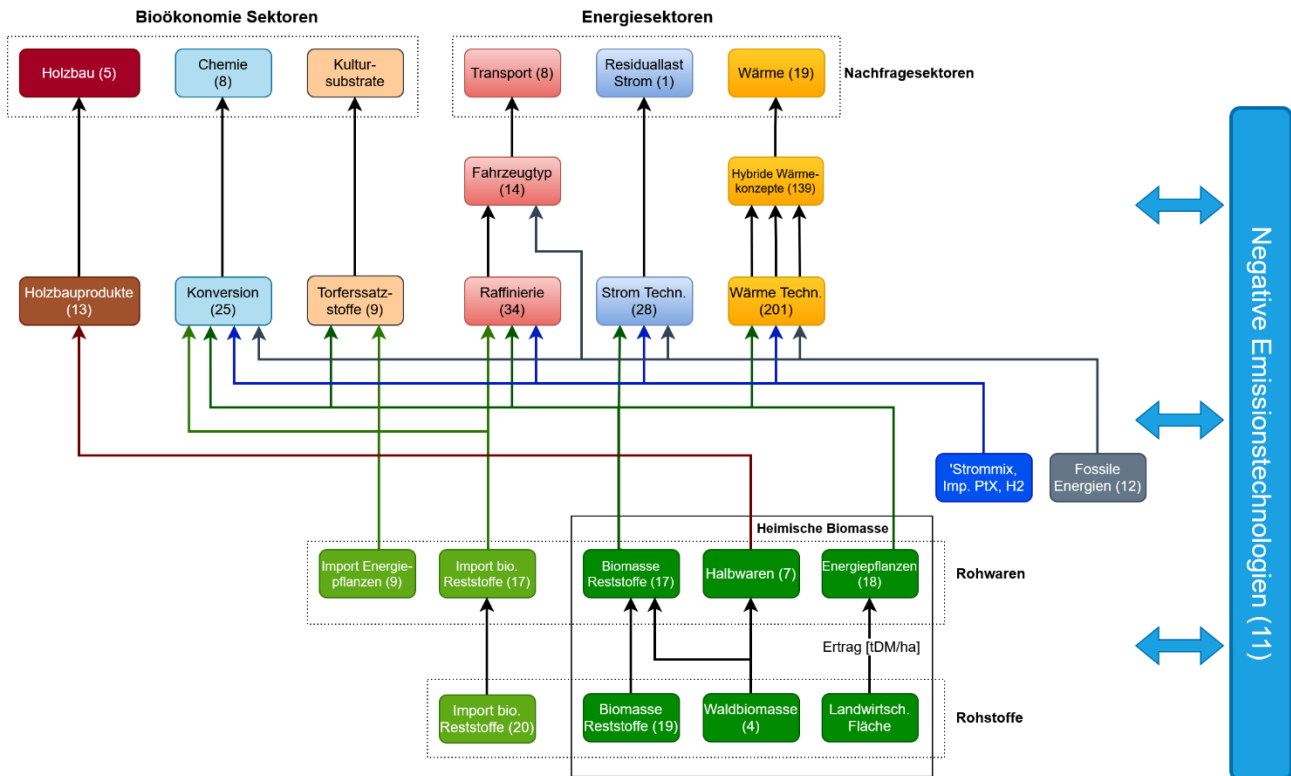


Abbildung 1 BENOPT-Modellstruktur

BENOPT ist ein lineares Optimierungsmodell. Es optimiert den Zeitraum von 2020 bis 2050 in einer jährlichen Auflösung. Im Stromsektor wird eine aggregierte stündliche Auflösung betrachtet. Die Aggregation wird mit *tsam* (time series aggregation modul) vom Forschungszentrum Jülich durchgeführt, um die jährliche Residuallast jeweils in 12 typischen Tagen mit jeweils 24h abzubilden [18].

2.2 Berücksichtigte Sektoren der Biomassenutzung

In der vorliegenden Arbeit wird der Einsatz von Biomasse in den Sektoren Energie, organische Chemie, Holzbau sowie Torfersatz betrachtet. Zudem wird die Nutzung von Biomasse zur Kompensation verbleibender THG-Emissionen zur Erreichung der Klimaschutzziele berücksichtigt. Der Biomasseinsatz in den Sektoren der Lebensmittel-, Futtermittel-, Zellstoff- und Möbelindustrie wird im Status quo eingefroren und ist nicht Teil der Untersuchungen.

Die betrachteten Sektoren weisen unterschiedliche Bedarfe auf (siehe Tabelle 1). Im Referenzjahr 2020 verzeichneten der Energie- und der Bausektor die höchste Nachfrage, gefolgt von der organischen Chemie. Der Torfersatz wies den geringsten Bedarf auf. Bereits zu diesem Zeitpunkt leistete Biomasse einen substantziellen Beitrag zur Bedarfsdeckung [4–7]. [Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben..](#) Zur Kompensation von THG-Emissionen im Bereich des Gebäude- und

Verkehrssektors wurden bereits in 2020 im Rahmen des Effort Sharings von staatlicher Seite Emissionsrechte aufgekauft.



Abbildung 2 Betrachtete Sektoren mit ihren Erfüllungsoptionen

Je Sektor existieren spezifische Erfüllungsmöglichkeiten (siehe Abbildung 1, Abbildung 2), die im BENOPT-Modell zur Deckung des Bedarfs eingesetzt werden können. In den Sektoren Energie, organische Chemie und Torfersatz werden derzeit noch fossile Optionen genutzt. Diese müssen bis 2050 jedoch weitgehend oder vollständig durch biogene oder alternative erneuerbare Rohstoffe ersetzt werden um die gesetzten klimaschutzziele zu erreichen. Eventuell verbleibende fossile Emissionen müssen kompensiert werden. Während im Energie- und Chemiesektor neben den biogenen auch die strombasierten Optionen (H₂, PtG, PtL, PtX¹) zur Verfügung stehen, beschränkt sich die Alternative im Torfersatz zum fossilen Torf in der vorliegenden Arbeit auf biogene Substrate. Im Bausektor bilden konventionelle Baustoffe des Massivbaus wie Stahl, Beton, Ziegel und Sandstein die Alternative zum Holzbau. Zur Kompensation verbleibender THG-Emissionen werden CCS-Anlagen als Add-on zu Biomassekonversionstechnologien, die Kohlenstoff(C)-Speicherung in Holzprodukten im Bausektor, der staatliche Kauf von Emissionsrechten im Rahmen des Effort Sharings², CCS-Technologien für den Erdgaseinsatz zur Erzeugung von Hochtemperaturprozesswärme in der Industrie sowie für eine Sensitivitätsanalyse die Waldsenke im LULUCF-Sektor betrachtet (siehe Tabelle 1).

¹ Bezieht sich auf den Chemiesektor und meint die erneuerbaren strombasierten Olefine und Aromate

² Hier können innerhalb der EU Mitgliedstaaten für den nicht-ETS Bereich im Rahmen des Effort Sharings sogenannte Annual Emission Allocations (AEA, deutsch: jährliche Emissionszuweisungen) zur Kompensation der national nicht erfüllten Klimaschutzziele gehandelt werden

Tabelle 1 Bedarfe und Erfüllungsmöglichkeiten in den betrachteten Verbrauchssektoren

	Energie	Organ. Chemie	Bau	Torfersatz	BioCCS + Kompensation
Bedarfs-/Zielsetzung	Bedarf	Bedarf	Bedarf	Bedarf	Kompensation verbleibender THGs
Erfüllungsoptionen	fossil/biogen/erneuerbar	fossil/biogen/erneuerbar	Holz-/Massivbau	fossil/biogen	BECCS/Holzbau/Zukauf Emissionsrechte/ foss. CCS
Biomassepotenziale (+Importe) 2020	1.630 PJ \pm 99 Mt				
Sektorbedarf 2020	8.668 PJ	15,9 Mt	800-1.000 Mt	1-4 Mt	148 Mt CO ₂ -Äq.

2.2.1 Energiesektor

Innerhalb des Energiesektors werden im BENOPT-Modell die Subsektoren Wärme- und Stromerzeugung sowie Verkehr abgebildet. Im Wärmesektor wird der Wärmebedarf in drei Bereichen betrachtet: Industrie (Nieder-, Mittel- und Hochtemperatur), Gebäude (Privathaushalte, Gewerbe und Handel) sowie Fernwärme.

Dabei umfasst der Wärmesektor nach dem Ansatz von Jordan et al. [15] insgesamt 19 Teilsektoren sowie 201 Einzeltechnologien, die auch als hybride Konzepte eingesetzt werden können (siehe Abbildung 1). Im Stromsektor liegt der Fokus ausschließlich auf der Deckung der Residuallast, also dem Teil des Strombedarfs, der nicht durch fluktuierende erneuerbare Energien wie Wind- und Sonnenkraft gedeckt werden kann. Dies ist dadurch begründet, dass Biomasse zukünftig nicht wettbewerbsfähig mit diesen fluktuierenden erneuerbaren Energien sein wird und mit den Optionen zur flexiblen Strombereitstellung zur Deckung der Residuallast konkurrieren wird. Zur Deckung der Residuallast stehen im BENOPT-Modell 28 verschiedene Technologien zur Verfügung. Anfallende Wärme aus Kraft-Wärme-Kopplungsprozessen kann zur Deckung des Fernwärmebedarfs im Wärmesektor eingesetzt werden. Im Verkehrssektor werden sechs Subsektoren für die Deckung des Mobilitätsbedarfs betrachtet: Personen- und Güterstraßen- und Schienenverkehr, nationale Luftfahrt, Binnen- und Seeschifffahrt. Anfallende Nebenprodukte wie Naphtha aus der PtL-, HEFA und BtL-Kerosinproduktion können einen Pool an Intermediaten speisen (siehe Kapitel 2.2.2), aus dem sich sowohl der Chemie- aber auch wiederum der Energiesektor zur Deckung der Bedarfe bedienen kann. Der Wärmebedarf in Gebäuden und im Fernwärmesektor basiert auf den Ergebnissen des Gebäudebestandsmodells „B-Star“ [19, 20] das die künftige Sanierung des deutschen Gebäudebestands mit einer jährlichen Auflösung unter Verwendung eines agentenbasierten Ansatzes modelliert. Der künftige Wärmebedarf der Industrie basiert auf eigenen Annahmen, die auf [21] beruhen. Der künftige Energiebedarf für den nationalen und internationalen Verkehr in jedem Teilsektor sowie der künftige Strombedarf basieren auf Szenarien vom Umweltbundesamt [12]. Die methodischen

Grundlagen zur Darstellung des Energiesektors wurde bereits im SoBio-Vorgänger-Projekt [14] ausführlich erläutert.

Die technischen und ökonomischen Daten zu den Konversionsrouten im Energiesektor sind bereits in Meisel et al. 2024 [14] und als Daten-Repository in ZENODO [22] veröffentlicht.

In dieser Arbeit kommt neu hinzu, dass Energieerzeugungstechnologien, bei denen es technisch möglich ist, mit nachgeschalteten Anlagen zur Abscheidung und Speicherung von freigesetztem CO₂ als Add-ons kombiniert werden können. Diese technischen Senken stellen eine Möglichkeit dar Negativemissionen zu erzeugen (siehe detailliertere Information in Kapitel 2.2.5).

2.2.2 Chemiesektor

In der vorliegenden Arbeit wird der Fokus im Chemiesektor auf die organische Chemie gelegt, mit dem Ziel, den derzeit dominierenden fossilen Kohlenstoff in kohlenstoffhaltigen Verbindungen durch erneuerbare Kohlenstoffquellen zu ersetzen. Andere Teilbereiche der chemischen Industrie, wie die stark von mineralischen Rohstoffen abhängige anorganische Chemie, werden ausgeschlossen, da hier kein direktes Substitutionspotenzial für fossilen Kohlenstoff besteht.

Ein Großteil der Produkte der organischen Chemie lässt sich über die Grundbausteine der Olefine (Ethylen, Propylen, Buten), der Aromaten (Benzol, Toluol, Xylol) und des Methanols abdecken. Derzeit dienen noch größtenteils Erdöl bzw. Erdgas als Rohstoffe [23, 24]. Olefine und Aromaten können auch aus biobasiertem Naphtha (mittels Cracking- und Reforming-Prozessen) oder katalytisch aus biobasiertem Methanol gewonnen werden. Biobasiertes Naphtha und Methanol können aus der Vergasung lignozellulosehaltiger Biomassen erzeugt werden. Methanol kann wiederum aus Biomethan aus der Vergärung erzeugt werden. Olefine können zudem über verschiedene Konversionsrouten aus biobasiertem Ethanol erzeugt werden, welches wiederum fermentativ erzeugt wird. Zusätzlich werden strombasierte Alternativen aus elektrolytisch erzeugtem Wasserstoff und CO₂ zur Erzeugung von Naphtha und Methanol betrachtet (siehe Abbildung 3).

Vor diesem Hintergrund wurde im BENOPT-Modell ein Pool aus biomasse-, strom- oder fossilbasiertem erzeugten Intermediaten Methan, Methanol, Naphtha und Ethanol angelegt, aus dem die Produkte der Olefine und Aromaten je nach Szenarienrahmenbedingungen kosteneffizient erzeugt werden können. Auch Nebenprodukte aus dem Energie- oder Torfersatzproduktsektor beispielsweise das bereits in Kapitel 2.2.1 erwähnte Naphtha aus der PtL-, HEFA- und BtL-Kerosinproduktion oder Biomethan aus der Torfersatzproduktion können diesen Intermediaten-Pool speisen. Darüber hinaus ist es aber auch möglich, dass die Intermediate nicht nur zur Erzeugung von Olefinen und Aromaten dienen, sondern auch wiederum in Technologien anderer Sektoren eingesetzt werden, z.B. Biomethan in Gasthermen oder Bioethanol zu Erzeugung von AtJ-Kerosin innerhalb des Energiesektors. Die Etablierung dieses Intermediaten-Pools schafft mehr Freiheiten und Flexibilität die Rohstoffe und Nebenprodukte optimal im Gesamtsystem einzusetzen.

Methanol dient sowohl als Intermediat, ist aber gleichzeitig auch ein Produkt mit eigenem Bedarf. Ergänzend zu den Grundbausteinen der organischen Chemie werden in der vorliegenden Arbeit auch

die Produktgruppen der Schmierstoffe und Tenside betrachtet, da deren Bedarf bereits heute teilweise durch biogene Öle gedeckt wird. Das Modell ermöglicht hier, je nach Randbedingungen, eine biobasierte oder petrochemische Bedarfsdeckung (siehe Abbildung 3).

Zudem besteht im BENOPT-Modell die Möglichkeit Naphtha über Pyrolyse von Altkunststoffen als ein Verfahren des chemischen Recyclings wieder zurückzugewinnen. Weiterhin wird auch die Möglichkeit des mechanischen Recyclings von Altkunststoffen mitberücksichtigt. Hier wird unterstellt, dass über die Hauptrecyclingrouten vor allem die Bedarfe an Ethylen und Propylen gedeckt werden können.

Entsprechend der gesetzten Szenarienrandbedingungen (siehe Kapitel 2.4) können petrochemische Erfüllungsoptionen bis zum Jahr 2050 in Höhe von 8% fossilen Kohlenstoff in der organischen Chemie zulässig bleiben oder müssen vorher durch erneuerbaren Kohlenstoff ersetzt werden.

Für den Sektor der organischen Chemie sind somit ein Pool aus vier Intermediaten (Methan, Methanol, Naphtha und Ethanol) sowie sieben Produktgruppen (Methanol, Ethylen, Propylen, Buten, BtX³-Aromaten, Schmierstoffe und Tenside) definiert (siehe Abbildung 3).

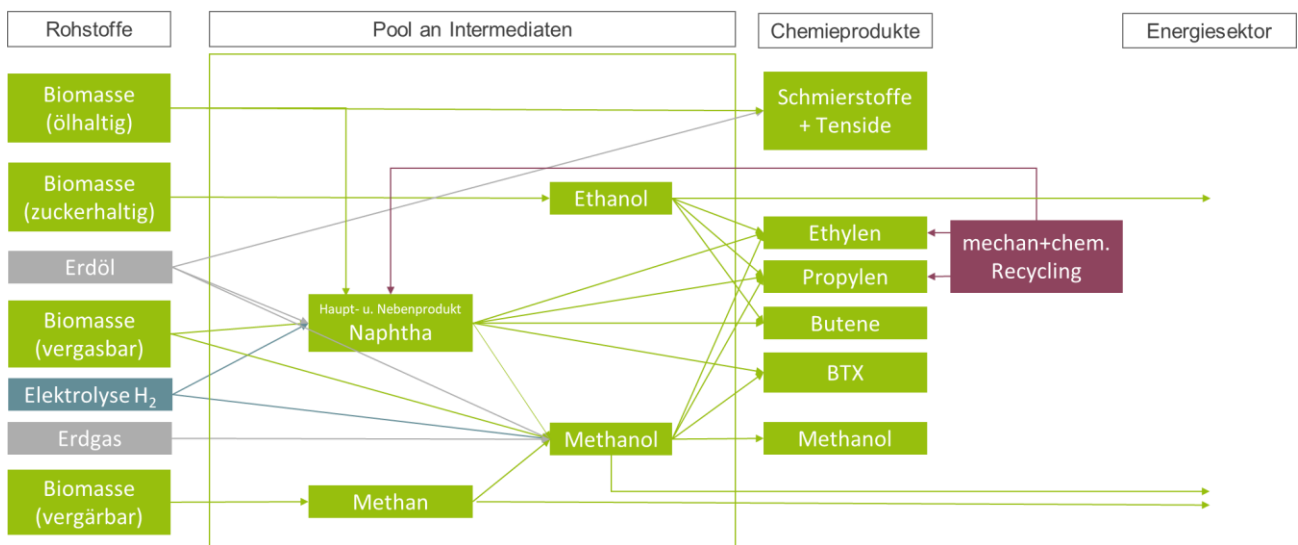


Abbildung 3 Betrachtete Intermediate und Produkte der organischen Chemie

Zur Abbildung der Erzeugungspfade sind im Modell insgesamt 25 Konversionstechnologien hinterlegt (siehe Abbildung 1, Abbildung 2). Die technischen und ökonomischen Spezifikationen der Konversionstechnologien zur Erfüllung der Bedarfe in der organischen Chemie wurden Literaturwerten entnommen [23, 25–37].

Unter den Erzeugungspfaden können die Bioethanolerzeugung mit CCS-Anlagen zur Erzeugung von Negativemissionen kombiniert werden (siehe Kapitel 2.2.5).

³ Hier sind die Aromate Benzol, Toluol und Xylol zusammengefasst als BtX

Die Ableitung der zukünftigen Bedarfe der sieben Produktgruppen basiert auf Studien des VCI [23], der dena [10], von Prognos, Öko-Institut, Wuppertal-Institut [38], des BDI [11] sowie weiteren Publikationen [10, 35, 37, 39–41].

2.2.3 Holz und Holzbau

Innerhalb des Bausektors wird ausschließlich der Gebäudebereich betrachtet. Hier dominiert aktuell die Massivbauweise mit Stahl, Beton, Ziegeln, Kalksandstein, etc. [42]. Eine Alternative ist die Holzbauweise, die jedoch abhängig vom Gebäudetyp aktuell nur zu geringen Anteilen eingesetzt wird.

Neben dem Einsatz von Holz als Baumaterial wird auch der Effekt der CO₂-Speicherung im verbauten Holz berücksichtigt. Der Klimaschutzbeitrag lässt sich mit 0,917 t CO₂/m³ bemessen [43]. Es gilt jedoch zu berücksichtigen, dass jedes Jahr durch Abriss bzw. Sanierung auch Mengen aus dem Holzbauspeicher entnommen werden. Diese werden entsprechend vom Holzbauspeicher abgezogen [44, 45]. Die Verwendung von Holz als Baumaterial mit gleichzeitigem CO₂-Speichereffekt (ohne zusätzliche CO₂-Speicherkosten) ist somit eine Option, um CO₂-Emissionen der Atmosphäre zu entfernen und Negativemissionen zu erzeugen und demnach eine Alternative zur Nutzung von Holz im Energie- und Chemiesektor mit nachgeschalteter Abscheidung und Speicherung der emittierten biogenen CO₂-Emissionen zur Erzeugung von Negativemissionen (siehe Kapitel 2.2.5).

Die Entscheidung für eine Holzbauweise wird aktuell jedoch nicht durch deren Klimaschutzbeitrag bestimmt, sondern vielmehr durch ökonomische oder individuelle Präferenzen. Aktuelle wissenschaftliche Untersuchungen zeigen, dass die Kosten der Massivbau- und der Holzbauweise jedoch sehr nah beieinander liegen und keine signifikanten Kostenunterschiede festgestellt werden können. Eine Ausnahme bilden die Mehrfamilienhäuser, die in Holzbauweise deutlich teurer sind [46].

Die Holznutzung im Holzbau wird über drei Ebenen: Rohstoffe, Rohwaren und Fertigwaren dargestellt. Ergänzend zur bisherigen Darstellung der energetischen Holznutzung im BENOPT-Modell gemäß [14, 16] werden zunächst die bestehende Rohstoffebene um die Sortimente Nadelrundholz und Laubrundholz erweitert, siehe Abbildung 4. Auf der Rohwarenebene werden die Holzhalbwaren und die Holzwerkstoffe ergänzt. Äquivalente Sortimente auf der energetischen Seite dieser Ebene sind z.B. das Scheitholz oder Holz hackschnitzel. Die finale Ebene bilden dann die Fertigwaren, welche im Holzbau verbleiben und auch den Kohlenstoffspeicher quantifizieren. Es wurde die Annahme getroffen, dass das Verhältnis der einzelnen Fertigwaren zueinander immer gleichbleibt, die absolute Gesamtmenge kann jedoch im Verlauf der Jahre mehr oder weniger werden. Bei den Halbwaren und Rohstoffen sind im Rahmen der technischen Möglichkeiten Veränderungen der Nutzungsverhältnisse möglich. Die aktuelle Verwendung 2020 von Rohstoffen, Halbwaren und die Zusammensetzung der Fertigwaren im Holzbau wurde der Literatur entnommen [47].

Der Wettbewerb um die limitierten Mengen an Holz wird auf der Rohstoffebene abgebildet. Hier wurden durchschnittliche Werte für Schnittholz und Holzwerkstoffe basierend auf den [48] ermittelt. Die Kosten für Massivbau wurden gleich hoch angesetzt, entsprechend der Erkenntnisse aus der Literaturrecherche [46]. Die einzige Einschränkung für die Nutzung der Rundhölzer in den betrachteten Sektoren besteht darin, dass max. 3 Mt Rundholz zu Holz hackschnitzeln, Pellets oder Briquettes

verarbeitet werden dürfen, die im Energie-, Chemie- und Torfersatzsektor eingesetzt werden können. Dieser Wert spiegelt den Status quo wider [47]. Auf der Ebene der Fertigwaren kann eine Schnittstelle zu den Holzbau- und Sanierungsquoten hergestellt werden.

Bei der Verarbeitung von Rohwaren zu Halbwaren fallen Sägenebenprodukte an. Bei der Verarbeitung von Halbwaren zu Fertigwaren fallen industrielle Reststoffe an. Diese beiden Nebenprodukte stehen dem Modell als extern festgelegte Rest- und Abfallstoffe für den Zeitverlauf für alle Nutzungssektoren bis 2050 zur Verfügung.

Bei der Implementierung der verschiedenen Ebenen (Rohstoffe, Rohwaren und Fertigwaren) wurde auf die Bilanzgrenzen von Mantau, [47] zurückgegriffen. Diese Quelle diente auch der Abbildung des Status quo der Holznutzung und zur Berechnung der Holzmengen in den Sektoren, welche nicht im Modell berücksichtigt sind (z.B. Möbel und Zellstoff). Für die Fortschreibung der Rundholzpotenziale bis 2050 wurden Ergebnisse der Bepaso Szenarien vom Thünen Institut [49–51] genutzt, siehe Kapitel 2.3.

Scheitholz ist in Bezug auf ältere Modellversionen nun kein Rohstoff mehr für den Energiesektor, sondern eine Rohware und ein Hauptkonkurrent zum Einsatz von Rundholz im Holzbau. Die Besitzverhältnisse der Wälder (Privatwald, Staatswald, etc.) und damit einhergehende bevorzugte Nutzungen von z.B. Scheitholz wurden nicht berücksichtigt.

Neben den bereits beschriebenen Einsatzmöglichkeiten von Holz im Holzbau, dem Energie- aber auch dem Chemiesektor kann Holz auch als Ausgangsstoff zur Erzeugung von Torfersatzstoffen dienen, siehe Kapitel 2.2.4.

Der kostenoptimale, zukünftige Einsatz von Holz zur Bedarfserfüllung oder zur Bereitstellung negativer Emissionen wird Modell endogen bestimmt und stellt damit ein Modellergebnis dar.

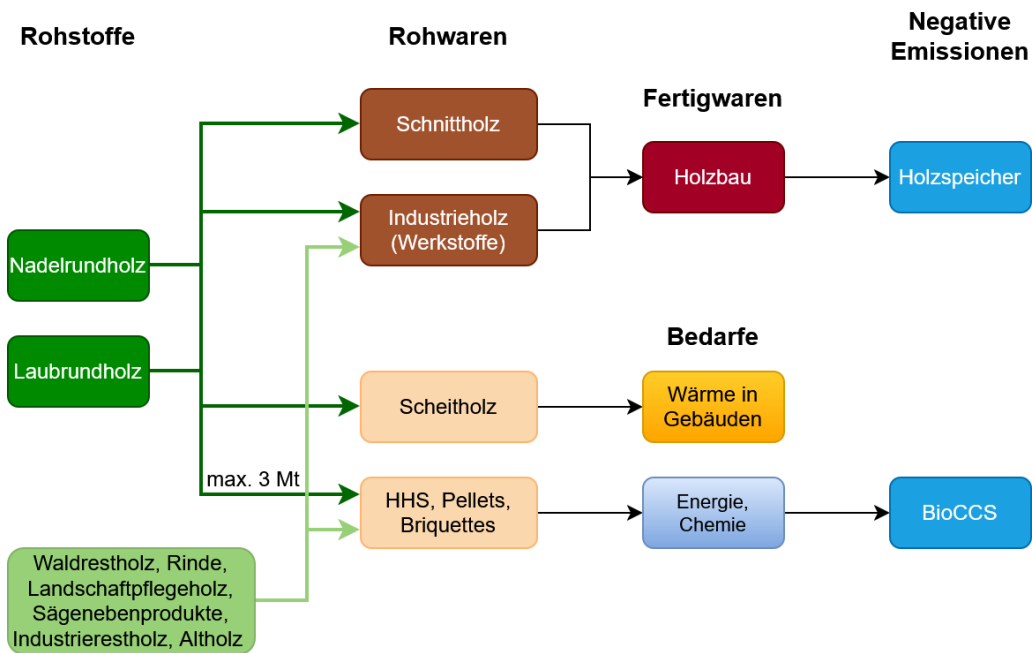


Abbildung 4 Mögliche Holznutzungspfade im BENOPT Modell. HHS = Holzhackschnitzel; BioCCS = Biomass with Carbon Capture and Storage

2.2.4 Torfersatz

Der Abbau von Torf stellt in Deutschland eine bedeutende Quelle für THG-Emissionen dar [52]. Vor diesem Hintergrund besteht ein wachsender Bedarf für die Entwicklung und Etablierung von Torfersatzstoffen. Abbildung 5 stellt die im Rahmen des Projektes betrachteten Einsatzstoffe bzw. Torfersatzstoffe dar. Die meisten dieser Konversionsverfahren bzw. Torfersatzstoffe sind bereits jetzt etabliert und basieren oft auf Reststoffen und Abfällen [53]. Um jedoch auch neuartige bzw. perspektivisch möglicherweise relevante Torfersatzstoffe aus weiteren Bezugsquellen (wiedervernässte Moorflächen bzw. Agrarflächen) einzubeziehen, wurden zudem Torfmoos (Sphagnum) und fermentierte Pappelholzfasern berücksichtigt [52, 54]. Die Torfersatzstoffe sind dadurch differenzierbar, dass diese entweder direkt einsetzbar sind (Torfmoos, Pinienrinde, Kokosmark, Ton und Perlite) oder mittels Konversion (z.B. Vergärung) aus gewissen Biomassen in Torfersatzstoffe umgewandelt werden.

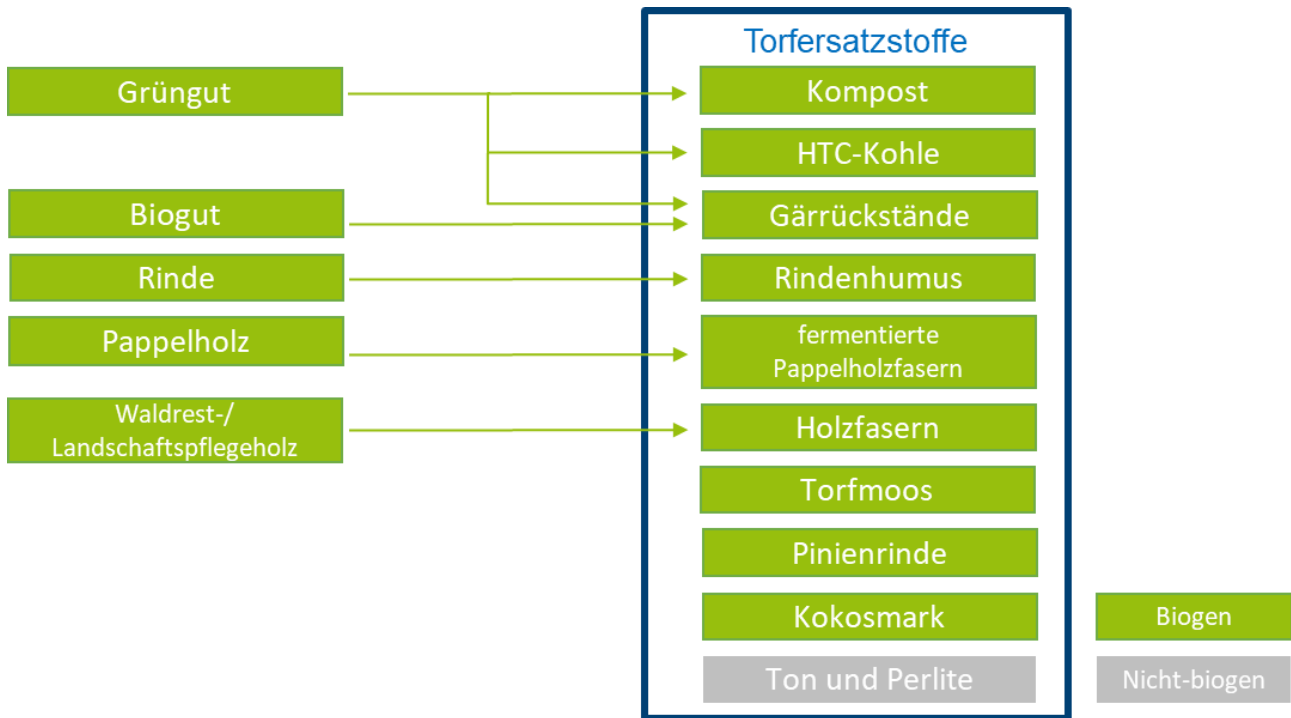


Abbildung 5 Betrachtete Einsatz- und Torfersatzstoffe

Die Technoliedaten und weitere Daten der betrachteten Optionen, die für Modellierung benötigt werden, basieren auf verschiedenen Publikationen, Literatur sowie einem Interview [52, 54–58]. Die Daten zu bisherigen Substratbedarfen sowie zur Nutzung von Torfersatzstoffen im Status-Quo beziehen sich auf Daten gemäß Torfminderungsstrategie [53]. Es wurde dahingehend die Annahme getroffen, die noch bestehende Torfnutzung bis 2030 gänzlich durch Torfersatzstoffe zu ersetzen, wobei der Gesamtbedarf für Substrate als konstant angenommen wird.

Verglichen mit den Bedarfen der anderen betrachteten Nutzungssektoren, siehe Tabelle 1, spielen Torfersatzstoffe eine untergeordnete Rolle. Jedoch ist dies der einzige Sektor in dem es zu den biogenen Rohstoffen weitestgehend keine Alternativen gibt (z.B. Ton/Perlite, Hydrokultur), um die zukünftigen Bedarfe zu erfüllen. Ausschlaggebend für den Wettbewerb zwischen den betrachteten Torfersatzstoffen sind die Effizienzen der Konversionsverfahren, die Marktpreise, die möglichen Mischungsverhältnisse der Optionen und die Verfügbarkeit der Rohstoffe.

2.2.5 BioCCS und Kompensationsoptionen

Die Nutzung von Biomasse zur Energieerzeugung kann mit einer Abscheidung und dauerhaften Speicherung des dabei freigesetzten CO₂ kombiniert werden. Dieses als Bioenergy with carbon capture and storage (BECCS, zu deutsch: Bioenergie mit CO₂-Abscheidung und -Speicherung) bezeichnete Prinzip wurde im BENOPT-Modell als Add-On zu bestehenden Bioenergieanlagen abgebildet. BECCS-Optionen gelten als technische Senken, mit denen Negativemissionen erzeugt werden können. Laut Klimaschutzgesetz können diese dazu beitragen, die Klimaschutzziele ab 2041 zu erreichen [1]. Da Bioethanol, wie in Kapitel 2.2.2 erwähnt, als Intermediat auch zur Erzeugung von Olefinen und Aromaten eingesetzt werden können, um die Bedarfe im organischen Chemiesektor zu

decken, und somit auch die Herstellung von Chemiegrundbausteinen mit der Erzeugung von Negativemissionen kombiniert werden kann, wird nachfolgend nicht mehr von BECCS, sondern von BioCCS gesprochen. Einen Überblick über die eingeführten Pfade gibt Tabelle 2.

Tabelle 2 Überblick über ausgewählte BioCCS-Pfade (nach [59]) mit FT=Fischer-Tropsch, MeOH= Methanol

BioCCS-Add-on-Konzept	Energieeffizienz (nur Biomasse-konversion)	Abscheiderate [mol C in CO ₂ /mol C in Biomasse]
Biogas-KWK, 500 kWel	90 %	34 %
Biomethan, 2500 kWel	56 %	24 %
Heizwerk, 800 kWth	65–80 %	66 %
Holzkraftwerk, 500 MWel	55–70 %	80 %
Vergasung + FT/Naphtha/MeOH, 100 MWth	25–75 %	25 %
Bioethanol (Zuckerrübe)	60 %	41 %
Biogas + Pflanzenkohle	90 %	34 % + 31 %
Biomethan + Pflanzenkohle	56 %	24 % + 19 %
Bioethanol + Pflanzenkohle	60 %	40 % + 60 %
Biomethan PostCCS	–	24 % + 28 %

** bei 3.000 Volllaststunden*

Die Auswahl der BioCCS-Modellkonzepte sowie die Daten wurden im Projekt BioNET erarbeitet, eine ausführliche Beschreibung der Modellkonzepte mit technischem und ökonomischen Kenndaten findet sich unter [60]. Darüber hinaus wurde die Option der Pflanzenkohleproduktion zur weiteren Verwertung des Gärrests im Modell eingeführt sowie die thermische Verwertung des erzeugten Biome-thans mit CO₂-Abscheidung aus dem Abgasstrom (post-combustion) implementiert. So wird ein breites Portfolio von BioCCS-Varianten mit unterschiedlichen Verfahren und Anlagengrößen im Modell abgebildet.

Im Modell bestehen drei Möglichkeiten Biomassekonversionsanlagen mit CCS-Anlagen zu kombinieren: (1) als Add-on an bestehende Anlagen, (2) eine neue Anlage mit CCS und (3) ein späteres Add-on an Neuanlagen. Darüber hinaus gibt es immer die Wahl, ob CCS überhaupt angeschlossen wird. Das Add-on von CCS-Anlagen ist mit zusätzlichen Investitionskosten und weiteren Kosten im Betrieb, etc. verbunden [60].

Neben diesen BioCCS -Optionen gibt es, wie in Kapitel 2.2.3 bereits erwähnt, auch die Möglichkeit, über die C-Speicherung in den im Holzbau eingesetzten Holzprodukten Negativemissionen zu erzeugen. Diese dürfen gemäß dem Klimaschutzgesetz innerhalb des LULUCF-Sektors angerechnet werden, um die Klimaschutzziele ab 2041 zu erreichen [1]. Während der C-Speichereffekt „automatisch“

erfolgt, wenn das Holz als Holzprodukt im Bausektor eingesetzt wird, sind die BioCCS-Optionen wie bereits erwähnt mit zusätzlichen Kosten verbunden.

Daneben existiert im Modell noch die Option im System verbleibende THG-Emissionen über den staatlichen Zukauf von Emissionsrechten im Rahmen des Effort Sharings im Umfang von maximal 30 Mt CO₂/a zu einem Preis von mindestens 250 €/tCO₂ zu kompensieren. Verbleibende THG-Emissionen sind größtenteils unvermeidbare THG-Emissionen aus der Landwirtschaft, der Abfallwirtschaft, aber auch einigen Industrieprozessen. Diese jährlich anfallenden Mengen werden dem Modell basierend auf den UBA Szenarien [12] extern vorgegeben und nicht modellendogen bestimmt.

Noch verbleibende THG-Emissionen aus dem Einsatz fossiler Rohstoffe können ebenfalls über CCS-Verfahren abgeschieden und geologisch gespeichert werden. Damit können jedoch keine negativen Emissionen erreicht werden, im Gegenteil verbleiben bei diesen Optionen weiterhin Restemissionen, welche z.B. über BioCCS Optionen kompensiert werden müssen.

Der Grund für die Ausklammerung des Waldsektors als natürliche C-Speicheroption innerhalb des LULUCF-Sektor in den Hauptszenarien liegt darin, dass die C-Speicherung in den letzten Jahren stark geschwankt ist und der Wald in einigen Jahren sogar eine CO₂-Quelle war [61]. Zudem wurde diese naturbasierte Option der C-Speicherung nicht im Technologiefokussierten BENOPT-Modell mitmodelliert. In einer Sensitivität wurde die Waldsenke jedoch berücksichtigt, siehe Kapitel 2.4.

2.3 Biomasse- und Flächenpotenziale

Flächenpotenziale. Im Jahr 2024 standen in Deutschland rund 2,3 Millionen Hektar Anbaufläche für nachwachsende Rohstoffe zur Verfügung [62]. Da diese Größe in den letzten zehn Jahren weitgehend stabil war, wird sie auch für die Modellierung bis 2050 konstant als verfügbare Fläche angenommen. Nur im Szenario Biomasseknappheit wird die Anbaufläche auf null gesetzt, d.h. den betrachteten Bioökonomiesektoren steht keine Biomasse aus den Anbauflächen zur Verfügung (siehe Tabelle 6). Im BENOPT-Modell wird die verfügbare Anbaufläche unter Berücksichtigung der Erträge und Preise der Anbaukulturen kostenoptimal mit nachwachsenden Rohstoffen belegt.

In der vorliegenden Arbeit wird die zur Verfügung stehende Fläche für Anbaubiomasse in einer **Sensitivität** verändert. Die Flächenpotenziale werden durch verschiedene Treiber beeinflusst. In der vorliegenden Arbeit werden insgesamt sechs Treiber analysiert. Ausgangspunkt ist der veränderte Flächenbedarf durch Änderungen in der Ernährungsweise. Dafür werden drei Varianten (V1 – ambitionierte Ernährungsumstellung, V2 – moderate Ernährungsumstellung, V3 – kaum Ernährungsumstellung) abgeleitet, die durch eine Reduktion des Fleischkonsums zu freiwerdenden Ackerflächen führen. Die konkreten Werte beziehen sich auf die Arbeit von Chan et al. [63] und sind der Tabelle 3 zu entnehmen. In allen drei Varianten gilt das Jahr 2024 im BAU-Szenario (100 %) mit einem Flächenbedarf von 14 Mio. ha für die Ernährung als Ausgangswert für die Ernährungsweise.

Tabelle 3: Flächenveränderungen für die Anbaubiomasse entsprechend der Änderungen in der Ernährungsweise in Kombination mit weiteren Treibern. Basisjahr = 2024, Zieljahr = 2050; [+] = Flächengewinn, [-] = Flächenverlust; Angaben in Mio. ha

Variante	V1		V2		V3	
	2035	2050	2035	2050	2035	2050
Zusammensetzung Ernährung	BAU(75%) + Vegan(25%)	BAU(50%) + Vegan(25%) + restricted meat(25%)	BAU(90%) + Vegan(10%)	BAU(75%) + Vegan(25%)	k.A.	BAU(90%) + Vegan(10%)
Fläche Ernährungsumstellung [+]	2,55	3,58	0,85	2,52	0,36	0,84
Ökolandbau [-]	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18	1,18
Neuversiegelung [-]	0,13	0,19	0,13	0,19	0,13	0,19
Wiedervernässung [-]	0,14	0,24	0,14	0,24	0,14	0,24
Aufforstung [-]	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Freiflächen-PV [-]	0,08	0,11	0,08	0,11	0,08	0,11
Flächenänderung (insgesamt)	1,00	1,62	-0,70	0,78	-1,16	-0,90
Fläche für Anbaubiomasse	3,30	3,92	1,6	3,08	1,14	1,40

Die restlichen fünf analysierten Treiber umfassen den Flächenmehrbedarf durch Ökolandbau, Flächenversiegelung, Wiedervernässung der Moore, Aufforstung und Freiflächen-PV. Die Anhebung der Fläche für Ökolandbau [64] erhöht den Flächenbedarf aufgrund der Annahme, dass im Ökolandbau die Erträge geringer ausfallen [65] und somit mehr Fläche für die gleiche Produktionsmenge benötigt werden. In der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie werden Ziele definiert, die die Fläche der täglichen Neuversiegelung für 2030 und 2050 festsetzen [66]. Unter der Annahme, dass dies zulasten der verfügbaren Fläche für Anbaubiomasse geschieht, führt die Neuversiegelung zu einer Flächenreduktion. Die Wiedervernässung der Moore kann einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz leisten [67]. Aus diesem Grund wurden Wiedervernässungsziele von 35'189 ha für 2030 und 240'822 ha für 2040 auch als Treiber aufgenommen, der die potenzielle Fläche für Anbaubiomasse reduziert [68]. Zusätzlich zur Wiedervernässung definiert die Wiederherstellungsverordnung der EU konkrete Ziele für die Aufforstung von zusätzlichen Bäumen bis 2030 [69]. Die Europäischen Ziele wurden anhand des Anteils der deutschen Waldfläche in der EU und des deutschen durchschnittlichen Baumbestandes je ha in Flächenziele umgewandelt [70, 71], die ebenfalls die verfügbare Fläche für Anbaubiomasse reduzieren. Der letzte betrachtete Treiber ist der Ausbau der Freiflächen-PV anhand der Ausbauziele des EEGs von 400 GW installierter Leistung in 2040 [72]. Dabei gilt die Annahme, dass zusätzlich benötigte Fläche zu 50 Prozent von Freiflächen-PV abgedeckt wird. Außerdem geht die Fläche für Freiflächen-PV zulasten der potenziellen Fläche für Anbaubiomasse.

Die Flächengewinne oder -verluste je Treiber entsprechend der Zielvorgaben steigen vom Status quo in 2024 linear über die Jahre an bis zur Zielerreichung. In den Jahren nach Erreichung der Flächenziele wird die Flächenveränderung gleichbleibend fortgeschrieben. Flächenänderungen für 2035 und 2050 sind in Tabelle dargestellt. Die Flächengewinne durch Ernährungsveränderung werden je Variante einzeln dargestellt. Die Flächenveränderung der anderen Treiber ändern sich nicht über die unterschiedlichen Ernährungsvarianten. In der letzten Zeile der Tabelle 3 ist die daraus errechnete verfügbare Fläche für Anbaubiomasse dargestellt.

Biomassepotenziale

Holz. Die Daten für Rundholz (Derbholz) basieren zunächst auf den zwei Bepaso-Szenarien „Bioökonomie am Tropf“ (BAU) und „Bioökonomie-Wende“ [49, 73], welche die Rohholzproduktionsmenge basierend auf der Nachfrage nach Holzprodukten im Rahmen der GPFM-Modellierung (Global Forest Product Model) darlegen [51]. Originär war die energetische und stoffliche Verwendung von Rundholz in diesen Szenarien vorgegeben. Dabei war die stoffliche Verwendung in Nadel- und Laubholz aufgeschlüsselt, die energetische Verwendung jedoch nicht. Die Differenzierung der energetischen Verwendung von Rundholz nach Nadel- und Laubholz wurden basierend auf gemittelten Daten der Einschlagsrückrechnung für den Zeitraum 2018-2022 hergeleitet [50]. Die Zuordnung von Rundholz zu einer gewissen Nutzung (stofflich oder energetisch) wurde im Rahmen der Modellierung aufgelöst, sodass zwar zwischen Nadel- und Laubholz differenziert wird, diese im Modell jedoch frei alloziert werden können. Zusätzlich zu den zwei oben beschriebenen Bepaso-Szenarien wurden zudem Daten zur Holzentnahme basierend auf dem CareSupreme-Szenario als drittes Szenario für Rundholz aufgenommen [74, 75]. Während Bepaso BAU jeweils das Startjahr (2020) darstellt, unterscheiden sich die Daten für 2030 bis 2050 je nach Szenario. Eine Zusammenfassung der Rundholz mengen in 2050 ist entsprechend der zuvor beschriebenen Szenarien in Tabelle 4 dargelegt.

Tabelle 4 Szenarien für Rundholz nach Holzart in 2020 und 2050

in Mio. t TM	2020		2050	
	Bepaso BAU	Bepaso BAU	Bepaso Wende	CareSupreme
Biomassekategorien				
Rundholz Nadel	26,8	24,3	29,9	18,4
Rundholz Laub	10,5	10,1	7,4	6,8

Biogene Reststoffe, Nebenprodukte und Abfälle. Die Daten biogener Reststoffe, Nebenprodukte und Abfälle fußen weitestgehend auf den Daten gemäß DBFZ DE-Biomassemonitor für das Jahr 2020 [76]. Zukünftige technische Potenziale für die Jahre 2030, 2040 und 2050 wurden für mengenmäßig besonders relevante biogene Reststoffe, Nebenprodukte und Abfälle basierend auf den Ergebnissen der MAGNET-Modellierung im Kontext des Bepaso-Szenarios „Bioökonomie-Wende“ („Erhöht“) hergeleitet [49, 73]. Relevant sind dahingehend beispielsweise Entwicklungen der Bevölkerung, der agrarischen Flächennutzung, der Tierzahlen sowie unterschiedlicher industrieller Produktionsvolumina. Bestehende Verwendungen biogener Reststoffe, Nebenprodukte und Abfälle in Sektoren, die nicht Teil der Modellierung sind (z.B. Papier- und Futtermittelsektor), wurden nicht berücksichtigt. Zudem wurden gewisse biogene Reststoffe und Abfälle im Kontext der Rohholzverwendung (Rinde), der Holzverarbeitenden Industrie (Sägenebenprodukte, Industrierestholz, Ablauge) und der Verwendung von Holzprodukten (Altholz, Altpapier) basierend auf der GPFM-Modellierung und weiterer

Literatur verwendet [73]. Die biogenen Reststoffe, Nebenprodukte und Abfälle im Szenario „Status-Quo“ basieren dagegen auf den Daten gemäß DBFZ DE-Biomassemonitor für das Jahr 2020 [76], welche fortgeschrieben wurden. Zwischen den Szenarien „Erhöht“ (Wende) und „Status Quo“ wurden zudem die Annahmen zu zukünftigen Mobilisierungsraten der mobilisierbaren Potenziale biogener Reststoffe, Nebenprodukte und Abfälle im zeitlichen Verlauf variiert. Die Daten basierend auf Bepaso „Bioökonomie am Tropf“ (BAU) und weitere Reststoffdaten gemäß DBFZ DE-Biomassemonitor für das Jahr 2020 [76] bilden zudem einheitlich das Startjahr (2020) der Modellierung. Im Sinne des Biodiversitätsschutzes sowie zukünftiger regulatorischer Vorgaben der novellierten Erneuerbare-Energien-Richtlinie (REDIII) wurde in den Szenarien entweder keine oder nur eine geringe zusätzliche Mobilisierung von Waldrestholz/Nicht-Derbholz (ohne Stümpfe und Wurzeln) angenommen [77]. Hinsichtlich bestehender und zukünftiger Verwendungen von Kokosprodukten (z.B. Kokosfasern) und Pinienrinde zur Herstellung von Torfersatzstoffen wurden diese Biomassen ergänzt und fortgeschrieben. Darüber hinaus wurden Import-Daten zu POME-Öl (Öl aus Abwasser von Palmölmühlen), Reststoffen der Fleischverarbeitung (inkl. Biokraftstoffe aus industriellen Fetten/Ölen) sowie Alt Speiseölen und -fetten basierend auf bestehenden Verwendungen als fortschrittlicher bzw. abfallbasierter Biokraftstoff in 2022 bzw. 2023 [78–80], und Palmfettsäuredestillat (PFAD) basierend auf [14] integriert.

Darüber hinaus wurden Szenarien für Paludikulturen bis 2050 basierend auf Zielsetzungen für die Wiedervernässung von Acker- und Grünland gemäß der nationalen Moorschutzstrategie [81] mit variierenden Flächenbelegungsannahmen für Paludikulturen (30% bzw. 50% der wiedervernässen Flächen) erstellt [82–86, 86].

Tabelle 5 fasst die hier beschriebenen Szenarien biogener Reststoffe, Nebenprodukte und Abfälle sowie von Paludikulturen für die Jahre 2020 und 2050 zusammen.

Tabelle 5 Szenarien für Potenziale biogener Reststoffe, Nebenprodukte und Abfälle sowie weiterer Biomassen in 2020 und 2050

in Mio. t TM	2020		2050			
	Bepaso BAU		Erhöht (Wende)		Status Quo	
kategorien	Inland	Import	Inland	Import	Inland	Import
Getreidestroh	0,08	-	6,63	-	1,40	-
Tierische Exkremete	8,58	-	9,98	-	11,28	-
Grüngut	5,55	-	11,24	-	7,26	-
Biogut	2,19	-	2,82	-	2,38	-
Klärschlamm	0,68	-	0,68	-	0,68	-
Laub	0,01	-	0,20	-	0,07	-
Reststoffe Fleischverarbeitung	0,45	1,06	0,65	1,06	0,45	1,06

Altspeiseöle und -fette	0,05	0,36	0,16	0,36	0,09	0,36
Sonstige vergärbare Reststoffe	7,84	-	11,09	-	7,99	-
Altpapier	1,08	-	-	-	1,14	-
Altholz	7,33	-	7,33	-	7,48	-
Rinde	4,05	-	3,91	-	3,38	-
Kokosprodukte	-	0,07	-	0,07	-	0,07
Pinienrinde	-	0,01	-	0,01	-	0,01
Sägenebenprodukte und Hobelspäne	6,76	-	7,44	-	8,91	-
Ablauge	1,03	-	1,82	-	1,78	-
Sonstiges Industrie-restholz	3,57	-	3,57	-	1,01	-
Sonstiges Holz	1,00	-	2,47	-	1,44	-
Nicht-Derbholz	2,27	-	0,70	-	5,05	-
POME-Öl	-	0,33	-	0,33	-	0,33
Palmfettsäuredestillate (PFAD)	-	0,04	-	0,04	-	0,04
Paludikulturen	-	-	3,21	-	1,92	-

Insgesamt beinhalten die Biomassedaten gewisse Nachhaltigkeits- sowie Restriktionsaspekte, jedoch können bislang nicht alle perspektivisch relevanten Nachhaltigkeitsanforderungen (z. B. Biodiversitäts- & LULUCF-Restriktionen) vollends und in Gänze abgebildet werden.

Die Preise der betrachteten Biomassen in den jeweiligen Szenarien und sowie deren Entwicklung bis 2050 wurden aus dem Zusatzmaterial von Meisel et al. [14] in die Modellierung übernommen.

2.4 Szenarien und Sensitivitäten

Im Rahmen dieser Arbeit wurden acht verschiedene Szenarien entwickelt, um die Bandbreite der Entwicklungsmöglichkeiten des Biomasseeinsatzes unter variierenden Randbedingungen aufzuzeigen. Die Szenario-Methodik dient dabei als Instrument, um alternative Entwicklungspfade darzustellen, sensitive und robuste Parameter sowie kritische Entwicklungen zu identifizieren und deren Auswirkungen zu analysieren [87]. Das methodische Vorgehen zur Identifikation der entscheidenden Einflussparameter für den Biomasseeinsatz im Energiesektor wurde bereits in Meisel et al. [14] beschrieben. Unter der Annahme, dass diese Parameter auch einen entscheidenden Einfluss auf den

Bioökonomiesektor haben, wurde diese in der vorliegenden Arbeit übernommen. In den Szenarien werden davon folgende Parameter variiert: die Verfügbarkeit von Biomasse (von verstärkter Verknappung bis hin zu erhöhten Potenzialen), die technologische Entwicklung der Konversionspfade bis hin zu maximalen Konversionseffizienzen, die Bepreisung fossiler CO₂-Emissionen sowie eine Konsumveränderungen in den betrachteten Sektoren. Zusätzlich wird in einem Szenario die Einführung einer verbindlichen Holzbauquote als zu variierender Parameter betrachtet, da dies laut eigener Annahme entscheidend für die sektorale Verteilung von Rund- und Restholz innerhalb der Bioökonomie ist. Die variierten Parameter werden entweder auf den Status quo, eine Basisgröße, auf einen verringerten/erhöhten Wert oder auf die minimale/maximale Ausprägung gesetzt (siehe Tabelle 6). Die Entwicklung der Biomassepreise bis 2050, auch unter den verschiedenen Randbedingungen wird aus Meisel et al 2024 [14] übernommen

Das Referenzszenario dient hierbei als Basisszenario, in welchem aktuelle Trends extrapoliert sowie sämtliche variablen Parameter auf ihren Status quo bzw. auf einen definierten Basiswert gesetzt werden. Als „Business-as-usual“-Szenario dient es primär zu Vergleichszwecken, um die Auswirkungen spezifischer Abweichungen innerhalb der anderen Szenarien fundiert analysieren zu können.

Im Bioökonomie-Push-Szenario wird eine erhöhte Mobilisierung der Abfall-, Reststoff- und Holzpotenziale⁴, eine erhöhte Verfügbarkeit von Recyclingmaterialien bei gleichzeitig reduziertem Preis unterstellt. Zudem werden ein höheres Aufkommen von Paludikulturen infolge verstärkter Moorwiedervernässung, ein Holzimport von maximal 20% des heimischen Holzpotenzials sowie eine Zielvorgabe von 100 % erneuerbarem Kohlenstoff im Chemiesektor angenommen. Das Technologie-Push-Szenario übernimmt die Parametereinstellungen des Referenzszenarios, maximiert jedoch die möglichen Konversionseffizienzen aller betrachteten Technologien bis zum Jahr 2050 (bei gleichzeitiger Reduzierung der Investitionskosten auf das minimal mögliche Niveau) und setzt reduzierte Preise für H₂ und Recyclingmaterial voraus. Im Bioökonomie-Technologie-Push-Szenario werden die Variationen beider Push-Szenarien kombiniert, um eine Entwicklung abzubilden, die durch eine hohe Biomasseverfügbarkeit, geringe H₂- und Recyclingmaterialpreise sowie technologische Reife gekennzeichnet ist.

Im Szenario Biomasseknappheit sind die verfügbaren Reststoff- und Holzpotenziale im Vergleich zum Referenzszenario deutlich geringer. Zudem entfallen die Anbauflächen für nachwachsende Rohstoffe innerhalb der betrachteten Bioökonomiesektoren vollständig. Die Importe von Biomasse beschränken sich auf biogene Reststoffe.

Während die definierten Klimaschutzziele gemäß des Klimaschutzgesetzes [1] im Referenzszenario die Transformation und die Defossilisierung im BENOPT-Modell lenken, wird im CO₂-Preis-Szenario zusätzlich ein CO₂-Preis für fossile Emissionen in Höhe von 500 €/t CO₂-Äq. bis zum Jahr 2050

⁴ Das erhöhte Potenzial bildet einige Nachhaltigkeitsanforderungen ab, jedoch können bislang nicht alle perspektivisch relevanten Nachhaltigkeitsanforderungen (z.B. aus der EU- Biodiversitätsstrategie, aus dem Klimaschutzgesetz zu den LULUCF-Zielen) in Gänze dargelegt werden.

implementiert. Parallel dazu wird für den AEA-Transfer von THG-Emissionen innerhalb des Effort Sharings ebenfalls ein Preis von 500 €/t CO₂-Äq. bis zum Jahr 2050 definiert.

Im Suffizienzscenario wird anders als im Referenzscenario unterstellt, dass die Bedarfe in den betrachteten Sektoren durch ein reduziertes Konsumverhalten stark reduziert sind. Damit verbunden wird ebenfalls angenommen, dass die Höhe der verbleibenden THG-Emissionen bis 2050 reduziert ist.

Im Szenario Holzbau-Quote wird unterstellt, dass das Ziel des Deutschen Holzwirtschaftsrats, die Holzbauquote bis 2050 auf 50% [88] zu erhöhen sowie die Forderung die jährliche Sanierungsquote auf 1,9% der Wohngebäude [10] umzusetzen, erreicht werden müssen.

Im Rahmen von Sensitivitätsanalysen wurde ergänzend untersucht, wie sich die Flächenverfügbarkeit für den Anbau von Biomasse für die Nutzung in den Bioökonomiesektoren unter Berücksichtigung einer veränderten Ernährungsweise, des Mehrbedarfs für den ökologischen Landbau sowie eines steigenden Flächenbedarfs für Wiedervernässung und Versiegelung verändert. Eine weitere Sensitivität umfasst die Berücksichtigung der natürlichen C-Speicherung im Wald als weitere Option zur Kompensation verbleibender Treibhausgasemissionen. Dabei werden die gemäß Klimaschutzgesetz geforderten Negativemissionen für den LULUCF-Sektor abzüglich der CO₂-Speicherung der Holzprodukte bereits von der extern festgesetzten Höhe an verbleibenden Treibhausgasemissionen abgezogen.

Tabelle 6 Wesentliche Charakteristiken der betrachteten Szenarien (Szenarienwerte beziehen sich auf das Jahr 2050)

	Referenz	Bioökonomie-Push	Technologie-Push	Bioökonomie-Tech-Push	Biomasse-knappheit	Erhöhter CO ₂ -Preis	Suffizienz	Holzbau-Quote
Klimaschutzziele	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ETS-CO ₂ -Preis in €/t	kein	kein	kein	kein	kein	500	kein	kein
AEA ⁵ -CO ₂ -Preis in €/t	250	250	250	250	250	500	250	250
Reststoffpotenziale	Status quo	erhöht	Status quo	erhöht	Status quo	Status quo	Status quo	Status quo
Holzpotenziale	Bepaso BAU	Bepaso Wende	Bepaso BAU	Bepaso Wende	CareSupreme	Bepaso BAU	Bepaso BAU	Bepaso BAU
Paludikulturpotenziale	30% MWV ⁶	50% MSS	30% MSS	50% MSS	30% MMS	30% MSS	30% MSS	30% MSS
Flächenpotenzial in Mio. ha	2,3	2,3	2,3	2,3	0	2,3	2,3	2,3
Import Reststoffe	Status quo	Status quo	Status quo	Status quo	Status quo	Status quo	Status quo	Status quo
Import Anbaubiomasse	Status quo	Status quo	Status quo	Status quo	keine	Status quo	Status quo	Status quo
Import Holz	keine	20% v. heim. HP ⁷	keine	20% v. heim. HP	keine	keine	keine	keine
Bedarfe	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch	Niedrig,	hoch
	Greenlate [12]	Greenlate [12]	Greenlate [12]	Greenlate [12]	Greenlate [12]	Greenlate [12]	Greenlife[12]	Greenlate [12]
Erneuerbarer C in Chemie	92%	100%	92%	100%	92%	92%	92%	92%
Verbleibende THG-E. in Mio. t CO ₂ -Äq.	55	55	55	55	55	55	35	55
Preise für H ₂ u. Recycling-material	Basis	reduzierter Recyclingpreis	reduz. H ₂ -und Recyclingpreis	reduz. H ₂ -und Recyclingpreis	Basis	Basis	Basis	Basis
Effizienz Technologien	Basis	Basis	Maximum	Maximum	Basis	Basis	Basis	Basis
Neubau-/Sanierungsquote	keine	keine	keine	keine	keine	keine	keine	50%/1,9% ⁸

⁵ Annual Emission Allocation: Innerhalb der EU können die jährlichen nationalen Emissionszuweisungen für den nicht-ETS-Sektor innerhalb des Effort Sharings gehandelt werden

⁶ MWV=Moorwiedervernässung: 30% und 50% der wiedervernässten Moorflächen

⁷ Holzpotenzial

⁸ 50% des Neubaus von Gebäuden und 1,9% der Sanierungsrate über Holzbau

3 Ergebnisse

Im folgenden Abschnitt wird zunächst die optimale sektorübergreifende Nutzung von Biomasse dargestellt, gefolgt von einer detaillierten Betrachtung der Nutzung von Biomasse und Bioenergietechnologien in den einzelnen Bioökonomiesektoren. Diese Abschnitte präsentieren robuste Modellierungsergebnisse für alle Szenarien und deren Bedeutung für die Bioökonomie. Im darauffolgenden Abschnitt wird aufgezeigt, wie veränderte Rahmenbedingungen den Biomasseeinsatz in den Bioökonomiesektoren auf dem Weg zur Erreichung der langfristigen Klimaschutzziele beeinflussen. Hier wird den Ergebnissen der einzelnen Szenarien und den Konsequenzen der Variationen besonderes Augenmerk gewidmet. Es ist zu beachten, dass im Abschnitt „Ergebnisse“ nur jene Technologieoptionen dargestellt werden, die die Sektorbedarfe unter Einhaltung des Klimaschutzziels decken. Alle anderen nicht aufgeführten Optionen tragen daher unter den in dieser Studie angenommenen Rahmenbedingungen nicht kostenoptimal zur Transformation der betrachteten Wirtschaftssektoren bei.

3.1 Optimale Verteilung der Biomasse (Übersicht)

Die begrenzt verfügbaren Biomassepotenziale werden unter den definierten Szenariobedingungen langfristig nahezu vollständig ausgeschöpft. Dies unterstreicht die Wettbewerbsfähigkeit der Biomassenutzung in den betrachteten Sektoren. Mit Ausnahme des Torfersatzsektors, der einen vergleichsweise geringen Bedarf aufweist, müssen neben der Biomasse weitere erneuerbare Optionen genutzt werden, um die zukünftigen Bedarfe zu decken und die langfristig gesetzten Klimaschutzziele zu erreichen.

Trotz umfänglicher Bedarfserfüllung in den Sektoren der stofflichen Biomassenutzung werden langfristig die größten Biomassemengen kosteneffizient zur Deckung der Bedarfe im Energiesektor eingesetzt (siehe Abbildung 6). Dabei handelt es sich um circa 21 Mt Restholz und die 3 Mt an Rundholz, die zur Nutzung in den Sektoren Energie, Chemie und Torfersatzstoffe begrenzt zur Verfügung gestellt werden (siehe Kapitel 2.2.3), 25 Mt mehrjährigen Kulturen wie Paludikulturen und Miscanthus, 20 Mt vergärbare Reststoffen, 16 Mt Energiepflanzen, 10 Mt Scheitholz und 2 Mt Stroh sowie ca. 1,5 Mt Altspeise- und tierische Fette. Die größten Mengen an Restholz und der mehrjährigen Kulturen werden insbesondere als Hackschnitzel in der industriellen Hoch- und Mitteltemperaturwärme, kombiniert mit CCS-Anlagen, eingesetzt. Die Mengen an Scheitholz sowie Miscanthuspellets werden in hybriden Systemen zur Abdeckung von Spitzenlasten in Gebäudeheizungen genutzt. Kleinere Mengen an Resthölzern und mehrjährigen Kulturen werden zur Erzeugung von Synthesegas verwendet, das anschließend für den Schiffsverkehr noch verflüssigt wird.

Die vergärbaren Reststoffe und Energiepflanzen werden langfristig in Biogasanlagen zur Erzeugung von flexiblem Strom für die Residuallast oder in kleineren Mengen als Biomethan in Gasthermen, die bis 2050 im System verbleiben, für Heizzwecke eingesetzt. Stroh wird langfristig ebenfalls als vergärbare Rohstoff in flexiblen Biogasanlagen co-vergoren um die Residuallast zu decken. Altspeise- und tierische Fette dienen der Herstellung von HEFA-Kerosin und tragen so zur Deckung des künftigen Bedarfs in der Luftfahrt bei.

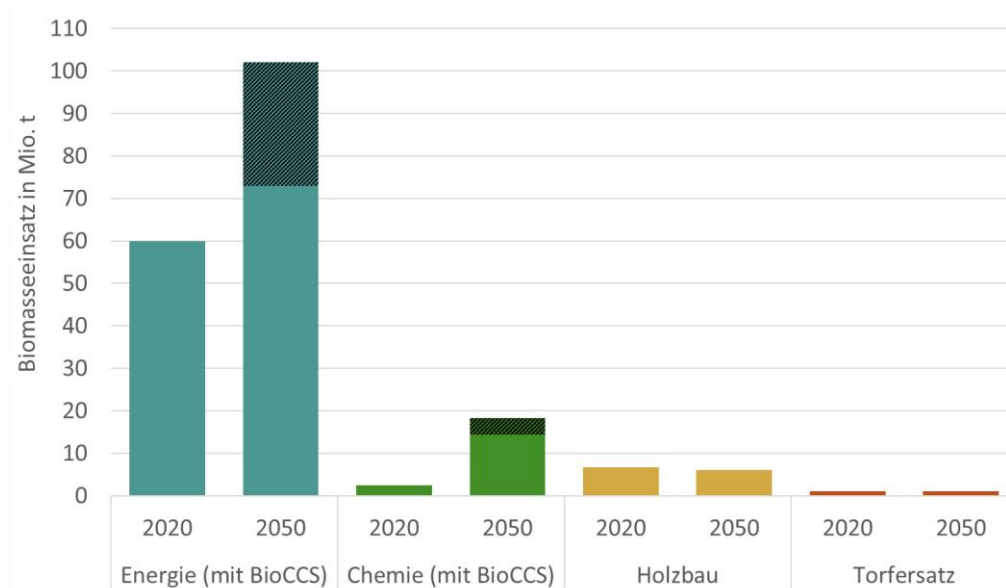


Abbildung 6 Aggregierter Biomasseinsatz in den Sektoren Energie, Chemie, Holzbau und Torfersatz im Referenzszenario unter der Annahme der insgesamt steigenden Biomassepotenziale von 2020 bis 2050

Der Chemiesektor ist langfristig bis 2050 der zweitgrößte Abnehmer von Biomasse. Biomasse kann maßgeblich zur Transformation der organischen Chemie beitragen. Vor allem lignozellulosehaltige Biomassen (ca. 9 Mt an Restholz, Paludikulturen, Miscanthus, Stroh) werden zur Erzeugung des Intermediates und Produkts Methanol genutzt, ebenso wie ca. 4 Mt Zuckerrüben zur Erzeugung des Intermediates Ethanol. Die Ethanolproduktion wird langfristig kosteneffizient mit CCS kombiniert, um ab 2041 verbleibende THG-Emissionen durch die Erzeugung von Negativemissionen zu kompensieren.

Im Bausektor bleiben die Mengen der eingesetzten Rund- und Restholzmengen stabil. Das meiste Holz wird in den schwer zu elektrifizierenden Teilmärkten des Energiesektors (Mittel- und Hochtemperaturwärme, unzureichend gedämmte Gebäude) eingesetzt, was unter der Bedingung der Klimazielerreichung kosteneffizienter ist als der Einsatz im Bausektor (auch unter Berücksichtigung des C-Speichereffektes), in dem die alternative Baumaterialien ähnlich teuer sind.

Der Bedarf an Torfersatzstoffen kann in allen Szenarien aufgrund des vergleichsweisen geringen Bedarfes biogen gedeckt werden. Hier setzen sich vor allem Holzfasern, Torfmoos, Kokosmark und Rückstände aus der Pappelvergärung durch.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Biomasse in einem kosteneffizienten System prioritär dort eingesetzt wird, wo ein direkter Stromeinsatz technisch nicht möglich ist oder mit vergleichsweise hohen Kosten verbunden wäre (gilt für das Energiesystem) sowie dort, wo die alternativen Erfüllungsoptionen am kostenintensivsten sind, um die Sektorbedarfe zu decken und die Klimaschutzziele zu erreichen (gilt für alle betrachteten Sektoren). Dies betrifft beispielsweise den Flug- oder Schiffsverkehr sowie Mittel- und Hochtemperaturanwendungen in der Industrie sowie die Methanol- und Ethanolproduktion in der organischen Chemie.

3.2 Biomasseeinsatz in den Sektoren

3.2.1 Energiesektor

Wie bereits im vorherigen Kapitel 3.1 erwähnt, werden die größten Biomasse mengen im Energiesektor eingesetzt. Demnach wird innerhalb des Energiesystems die größte Menge an Biomasse im Wärmesektor (ca. 850 PJ in 2050), geringere Mengen zur flexiblen Deckung der Residuallast (ca. 180 PJ in 2050) und ca. 100 PJ als Biokraftstoffe im Verkehrssektor eingesetzt (siehe Abbildung 7).

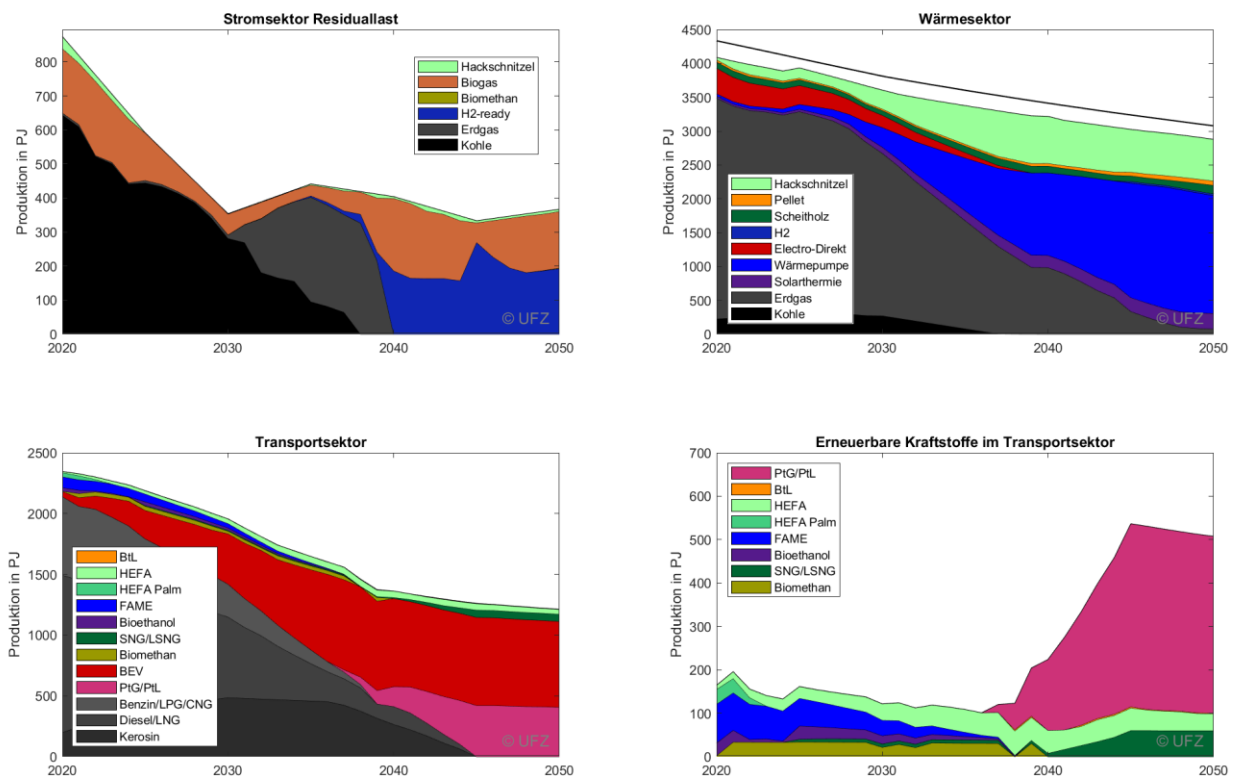


Abbildung 7 Biomasseeinsatz im Energiesektor in PJ im Referenzszenario

Wärmesektor. Im Wärmesektor erfolgt der größte Biomasseeinsatz langfristig in Form der direkten Feuerung und Vergasung von Hackschnitzeln aus Holzreststoffen, Miscanthus und Paludikultur zur Bereitstellung industrieller Prozesswärme im mittleren (200 – 500°C) sowie im Hochtemperaturbereich (> 500°C) (siehe Abbildung 8). Dabei wird auch das in Kapitel 2.2.3 erwähnte maximale Kontingent an Rundholz in Höhe von 3 Mt zur Erzeugung von Holz hackschnitzeln vollständig für den Hochtemperatursektor genutzt. Bis auf den verbleibenden Erdgaseinsatz und den geringen H₂-Einsatz erfolgt die Transformation in diesem Bereich überwiegend über den Einsatz von Biomasse.

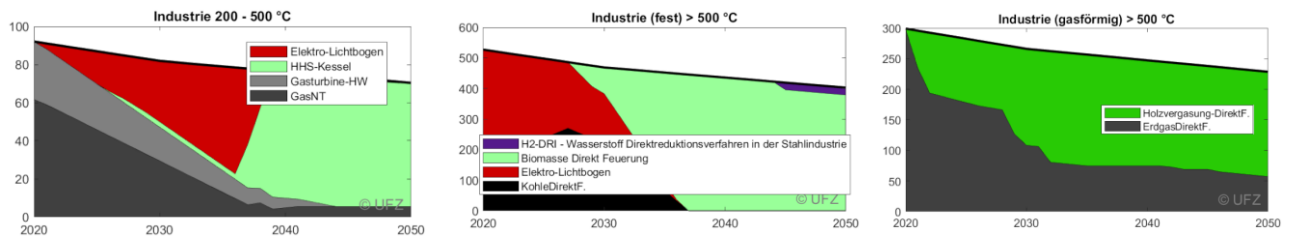


Abbildung 8 Biomasseeinsatz in der Mittel- und Hochtemperaturindustrieanwendung in PJ im Referenzszenario

Langfristig werden ca. 10 Mt Scheitholz in gut integrierten Hybridsystemen in älteren, ungedämmten Gebäuden zur Abdeckung der Spitzenlast genutzt, beispielsweise in Holzvergaserkesseln mit 30 kW Leistung in Kombination mit Solarthermie. In diesen Gebäuden sowie in älteren, ungedämmten Einfamilienhäusern kommen zudem Pellets aus Holzreststoffen oder Miscanthus in Pelletkesseln in Hybridsystemen mit Wärmepumpen oder mit Solarthermie ebenfalls zur Abdeckung von Spitzenlasten kosteneffizient zum Einsatz. In den anderen Gebäudetypen setzen sich Wärmepumpen allein oder als Hybridlösungen aus Wärmepumpen und Solarthermie als die kosteneffizientesten Lösungen durch.

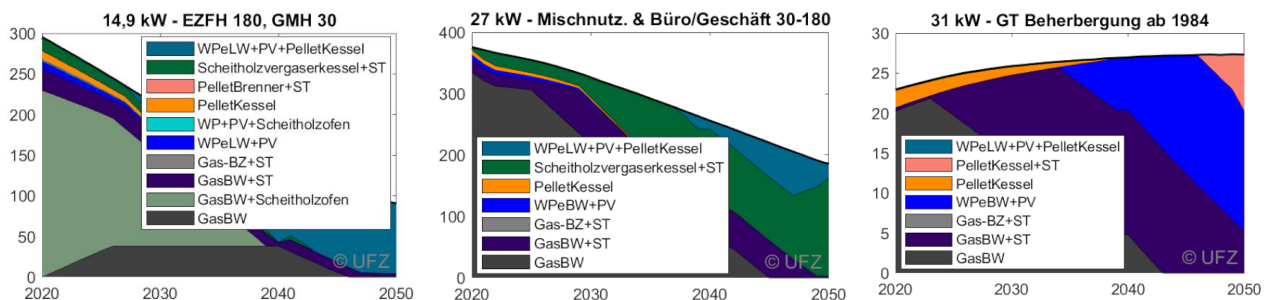


Abbildung 9 Biomasseeinsatz für Gebäudeheizungen in PJ im Referenzszenario

Stromsektor. Biogas wird vor allem ab 2040 einen wesentlichen Beitrag zur Deckung des flexiblen Bedarfs an Residuallast leisten (siehe Abbildung 7). Dabei sind 2,5-MW-Biogasanlagen, die vergärbare Abfälle, Stroh, Gülle und Maissilage nutzen und bei ungefähr 3.000 Volllaststunden betrieben werden, im Vergleich zu alternativen Optionen am wettbewerbsfähigsten. Darüber hinaus werden langfristig sehr geringe Mengen an Altholz in Altholz-Kraftwerken (20 MW) genutzt, um die Residuallast zu decken. Die kostenintensiveren Optionen der H₂-fähigen Gas- und Dampfturbinen (GuD) oder Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (KWK) decken den verbleibenden Bedarf aufgrund der Begrenzung der Biomasse ab (siehe Abbildung 7).

Verkehrssektor. Mittel- und langfristig sind Biokraftstoffe aus heimischen und importierten biogenen Reststoffen, Abfällen und Energiepflanzen die zweitgünstigste Option zur THG-Minderung nach der Elektromobilität. Strombasierten Kraftstoffe stellen die kostenintensivsten Optionen (PtG/PtL) dar. Demnach wird der Straßen- und Schienenverkehr langfristig vollständig kosteneffizient elektrifiziert. Bis 2039 sind im Straßenverkehr allerdings vor allem Biomethan aus Vergärung, Bioethanol, FAME und HVO-Diesel noch wettbewerbsfähig. Nach 2040 wird Biomasse nur noch im nicht zu elektrifizierenden Schiffs- und Flugverkehr eingesetzt. In der Schifffahrt wird verflüssigtes Biomethan aus der Vergasung lignozellulosehaltiger Biomasse sowie kleinere Anteile an HEFA-Diesel, der auf Basis

von Altspeise- und tierischen Fetten hergestellt wird, genutzt. Im Luftverkehrssektor wird HEFA-Kerosin ebenfalls auf Basis von Altspeise- und tierischen Fetten genutzt. Aufgrund der Verfügbarkeitsbegrenzung von Biomasse wird der größte Anteil der Kerosinnachfrage ab 2039 mit der kosteneffizienteren Option des strombasierten Kerosins (PtL) gedeckt (siehe Abbildung 7). Der Luftverkehrssektor ist der Sektor, der am spätesten vollständig defossilisiert wird, da die Kostendifferenz zwischen fossilem Kerosin und erneuerbaren Flugkraftstoffen im Vergleich zu anderen Sektoren am größten ist.

Damit können die Aussagen bezüglich robuster Trends zum optimalen Biomasseeinsatz im Energiesystem von Meisel et al. [14] in dieser Arbeit trotz der Erweiterung auf das Bioökonomiesystem bestätigt werden.

3.2.2 Chemiesektor

Wie in Kapitel 2.2.2 dargelegt, erfolgt die Deckung der Bedarfe an Olefinen und Aromaten über einen Intermediaten-Pool aus Naphtha, Methan, Methanol und Ethanol. Die Marktnachfrage nach Schmierstoffen, Tensiden und Methanol wird ohne Nutzung des Intermediaten-Pools bedient. Gemäß Abbildung 7 (links) werden für letzteres langfristig und kosteneffizient rund 2,7 Mt Biomasse in Form von Schredderholz aus Altholz und Hackschnitzeln aus Stroh und Paludikulturen zur Methanolproduktion sowie weitere 0,7 Mt ölhaltige Biomasse in Form von Rapsöl und Altspeisefetten zur Herstellung von Schmierstoffen und Tensiden eingesetzt.

Die Abbildung 7 (rechts) verdeutlicht, dass für die Herstellung der Intermediate langfristig insgesamt circa 21 Mt Biomasse kostenoptimal eingesetzt werden. Das sind hauptsächlich Miscanthus-Hackschnitzel, die via Holzvergasung und Methanolsynthese für die Erzeugung des Intermediates Methanol genutzt werden sowie Zuckerrüben, die über Fermentation für die Erzeugung des Intermediates Ethanol herangezogen werden. Die geringen Mengen des Intermediates Methans fallen als Nebenprodukt aus Bioethanolkraftstoff- und der biogenen Torfersatzproduktion an. Zudem speisen kleinere Mengen an biobasiertem Naphtha als Nebenprodukt aus der HEFA-Kerosinproduktion den Intermediaten-Pool. Wie aus Abbildung 11 (Mitte u. rechts) hervorgeht, nimmt Naphtha etwa die Hälfte des Intermediaten-Pools ein. Dabei stammt der überwiegende Anteil des Naphthas aus der strombasierten PtL-Kerosinerzeugung (siehe Abbildung 7). Hier wird eine wesentliche Synergie zwischen dem Energiesektor, insbesondere der Kerosinproduktion, und dem Chemiesektor deutlich. Ein weiterer geringerer Anteil des Naphthabedarfs wird noch ergänzend durch das chemische Recycling von Kunststoffen gedeckt (siehe Abbildung 8 links).

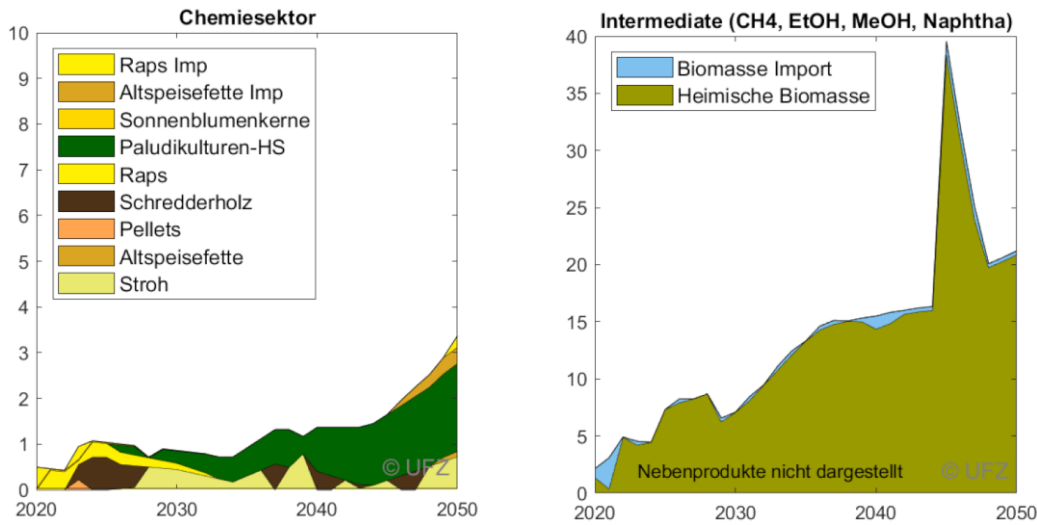


Abbildung 10 Biomasseinsatz im organischen Chemiesektor in Millionen Tonnen

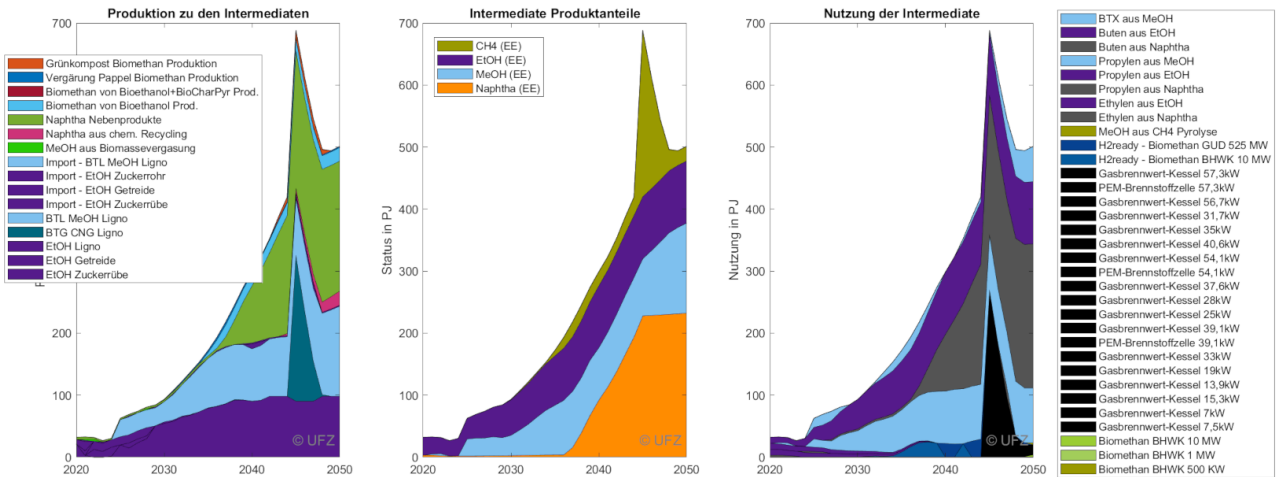


Abbildung 11 Darstellung aller biomasse- und strombasierten sowie Recyclingoptionen des Intermediaten-Pools in PJ

Zusammenfassend werden die Intermediate Methanol, Ethanol und Methan vollständig aus biogener Basis erzeugt, während das Intermediat Naphtha primär als Nebenprodukt aus der strombasierten PtL-Produktion bereitgestellt wird. Folglich leistet die Biomasse einen Beitrag von rund 50 % zur Transformation des betrachteten organischen Chemiesektors, während die verbleibende Hälfte maßgeblich von Naphtha durch die Kopplung an die PtL-Kerosinproduktion getragen wird.

Im kosteneffizienten System werden die Olefine Propylen und Buten primär aus Naphtha gewonnen, während Methanol als Basis für die Synthese von Aromaten (BtX) und Propylen dient. Aus Ethanol wird vorrangig das Olefin Buten erzeugt, wobei im Zuge dieser Umsetzung zusätzlich Ethylen und Propylen als Koppelprodukte anfallen. Grundsätzlich ist hervorzuheben, dass sowohl das Naphtha-cracking als auch die katalytische Methanolkonversion prozessbedingt stets ein breites Spektrum an Olefinen und Aromaten liefern, die ebenfalls zur Bedarfsdeckung beitragen. Das Intermediate Methan wird hingegen nicht für die Herstellung chemischer Grundbausteine herangezogen. Stattdessen findet es ab Mitte der 2040er-Jahre eine kostenoptimale Verwendung im Energiesektor, wo es

in den verbliebenen Gasthermen des Gebäudebestands eingesetzt wird, um die finale Defossilisierungslücke zu schließen.

3.2.3 Holz und Holzbau

Wie die in Kapitel 2.2.3 dargestellten Holznutzungspfade zeigen, können sowohl das Rundholz aus dem Wald als auch die anfallenden Sägenebenprodukte und Holzreste aus der Holzverarbeitung nicht nur vom Holzbau selbst nachgefragt und genutzt werden. Rundholz kann beispielsweise auch als Scheitholz für Gebäudeheizungen eingesetzt werden. Darüber hinaus können maximal 3 Mt zu Holzhackschnitzeln, Pellets und Briquetts verarbeitet werden, die im Energiesektor zur Erzeugung von Mittel- und Hochtemperatur für die Industrie oder im Chemiesektor zur Erzeugung von Naphtha und Methanol genutzt werden können. Auch die Sägenebenprodukte und Holzreste können in den Sektoren Bau, Energie, Chemie und Torfersatz genutzt werden.

Aus dem Ergebniskapitel 3.2.1 und aus Abbildung 12 wird deutlich, dass langfristig und kosteneffizient große Mengen an Rundholz als Scheitholz zur Abdeckung von Spitzenlasten in hybriden Systemen für Gebäudeheizungen (ca. 10 Mt im Jahr 2050) sowie die maximal 3 Mt Holzhackschnitzel und noch größere Mengen an Holzreststoffen (ca. 24 Mt im Jahr 2050) als Holzhackschnitzel im Bereich der Mittel- und Hochtemperaturindustrie genutzt werden.

Im Holzbau selbst werden dagegen langfristig nur ca. 6 Mt Holz genutzt. Das bedeutet, dass langfristig und kostenoptimal sowie unter der Bedingung die Klimaschutzziele zu erreichen, Holz nicht vermehrt stofflich im Bausektor eingesetzt wird, obwohl es dort auch gleichzeitig dem Klimaschutz als C-Speicher dient, sondern auch bis 2050 im Energiesektor hier größtenteils mit CCS kombiniert genutzt wird.

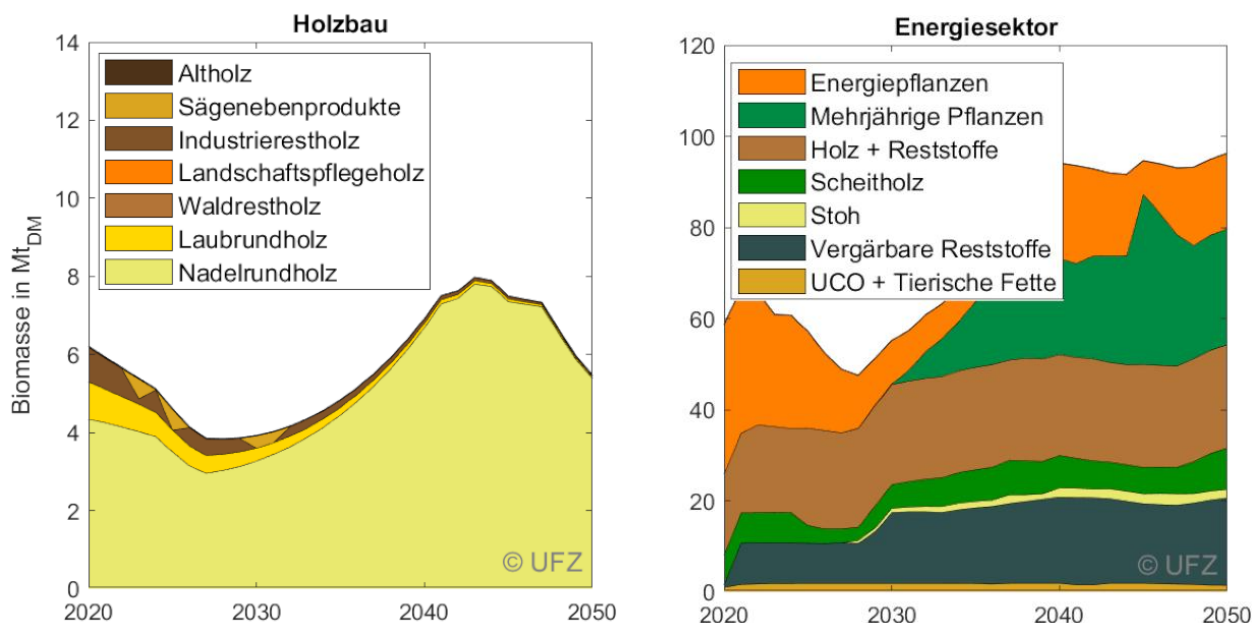


Abbildung 12 Einsatz von Holz im Holzbau und im Energiesektor im Referenzszenario

Wie Abbildung 12 links zeigt, unterliegt der Holzeinsatz im Bausektor zwischen 2020 und 2050 zwar Schwankungen, die Einsatzmengen liegen jedoch mit ca. 5 - 6 Mt ungefähr auf gleicher Höhe. Wie bereits erwähnt, kann ein langfristiger Anstieg des Holzeinsatzes im Bausektor im Modell nicht kosteneffizient dargestellt werden.

Von 2020 bis ca. 2025 erfolgte ein Einbruch der Holznutzung im Bausektor, der insgesamt auf den massiven Rückgang im Gebäudebau zurückzuführen ist. Die folgenden Jahre sind das Ergebnis der Modellierung und zeigen einen Peak von 2040 bis 2047, gefolgt von einem Abfall. Dieser Peak des vermehrten Holzeinsatzes im Bausektor ist im Modell vor allem darauf zurückzuführen, dass sich ab 2040 die Klimaschutzziele verschärfen, während gleichzeitig noch relativ viele THG-Emissionen im System verbleiben. Hier wird der Holzbau mit seinem C-Speichereffekt genutzt. Nach 2045 sinkt der Defossilisierungsdruck, da die extern vorgegebenen verbleibenden THG-Emissionen sinken. Ab 2047 wird Holz verstärkt als Scheitholz in alten, schlecht gedämmten Gebäuden zur Spitzenlastdeckung in hybriden Systemen kosteneffizient eingesetzt, sodass die im Holzbau eingesetzte Holzmenge nicht weiter steigt. Dieser Effekt wird auch Abbildung 13 deutlich.

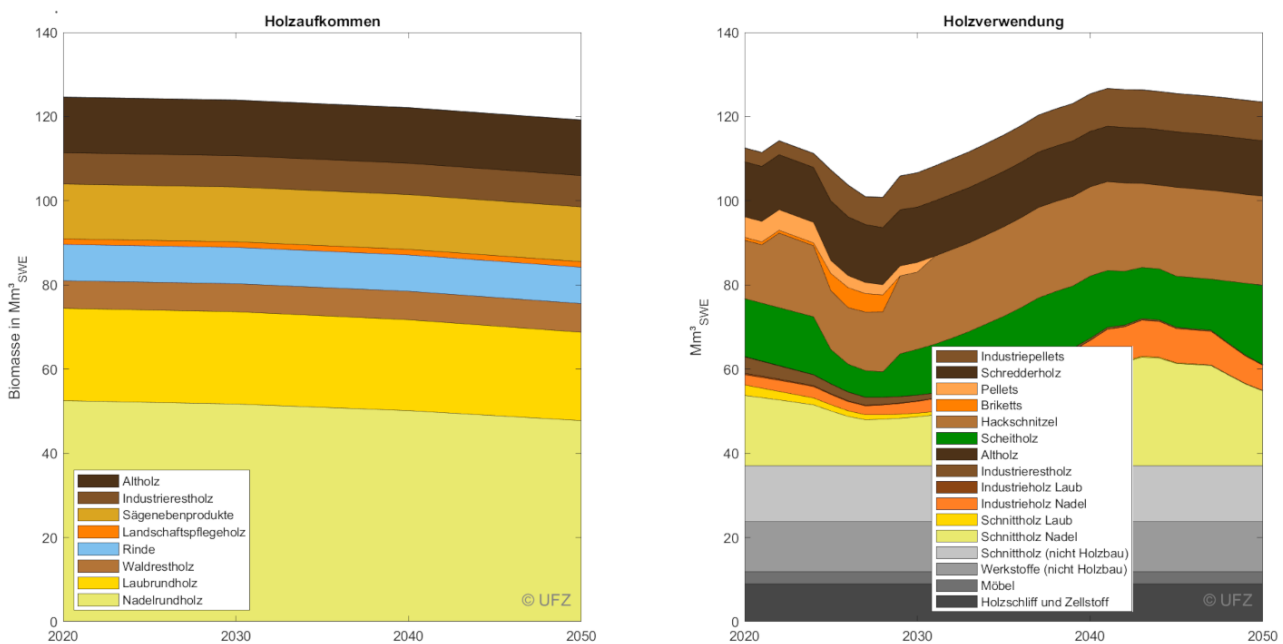


Abbildung 13 Holzaufkommen und Holzverwendung im Referenzszenario

3.2.4 Torfersatz

Der vergleichsweise geringe Bedarf an Torfersatzstoffen wird primär über biogene Rohstoffe erfüllt. Ergänzend verbleibt ein marginaler Anteil mineralischer Substrate aus Ton und Perlit. Bei den biogenen Torfersatzstoffen dominieren langfristig und kosteneffizient vor allem der Torfersatz auf Basis von Holzfasern, Torfmoos, Kokosmark sowie Gärreste aus der Pappelvergärung (siehe Abbildung 14). Das bei der Pappelvergärung erzeugte Biogas wird zu Biomethan aufbereitet und speist den Intermediatenpool. Es wird langfristig kostenoptimal in den noch verbliebenen Gasthermen älterer Einfamilienhäuser und Mischnutzungsgebäuden eingesetzt (siehe Kapitel 3.2.2).

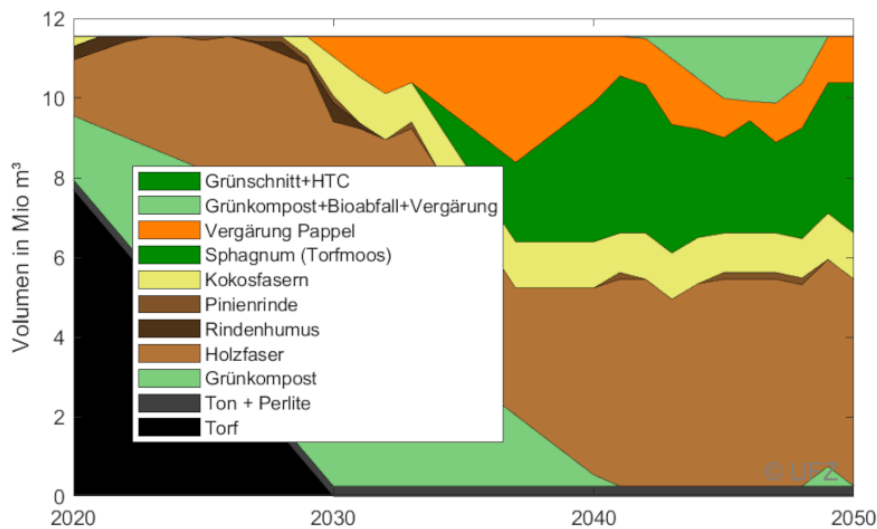


Abbildung 14 Eingesetzte Torfersatzsubstrate im Referenzszenario

3.2.5 BioCCS und Kompensationsoptionen

Wie in Kapitel 2.2.5 dargestellt, werden verschiedene Möglichkeiten betrachtet, um die im System verbleibenden THG-Emissionen zu kompensieren: die BioCCS-Optionen, die C-Speicherung in den Holzprodukten im Bausektor, der Kauf staatlicher Emissionsrechte sowie CCS-Verfahren für Emissionen aus dem Erdgaseinsatz zur Erzeugung von Hochtemperaturprozesswärme in der Industrie. Aus Abbildung 15 (links und rechts) wird deutlich, dass langfristig alle Möglichkeiten genutzt werden um die Klimaschutzziele zu erreichen. In 2050 werden die größten Mengen an CO₂ (ca. 49 Mt CO₂-Äq.) kosteneffizient über BioCCS dauerhaft entfernt. Insbesondere werden die großen Festbrennstoffverbrennungs- und -vergasungsanlagen (Festbrennstoffe th. und GasPost CCS in Abbildung 15) zur Erzeugung von Mittel- und Hochtemperaturprozesswärme für die Industrie genutzt um dort große Mengen an biogenem CO₂ abzuscheiden. Es werden aber auch Biogasanlagen mit BHKWs, Bioethanolanlagen sowie der Vergasungsprozess in Holzvergäsern mit CCS versehen. Die im Bausektor eingesetzten Mengen an Rund- und Restholz dienen als C-Speicher. Da im Holzbau im Vergleich zum Energiesektor jedoch deutlich geringere Biomassen eingesetzt werden, können hierüber nur ca. 6 Mt CO₂-Äq. gespeichert werden. Die im Jahr 2050 noch kostenoptimal verbleibenden THG-Emissionen aus der Erdgasfeuerung in der Industrie von ca. 3 Mt CO₂-Äq. werden über CCS vermieden. Aus Abbildung 15 (rechts) wird deutlich, dass nur in 2042-2044 vom staatlichen Zukauf von Emissionsrechten Gebrauch gemacht werden muss.

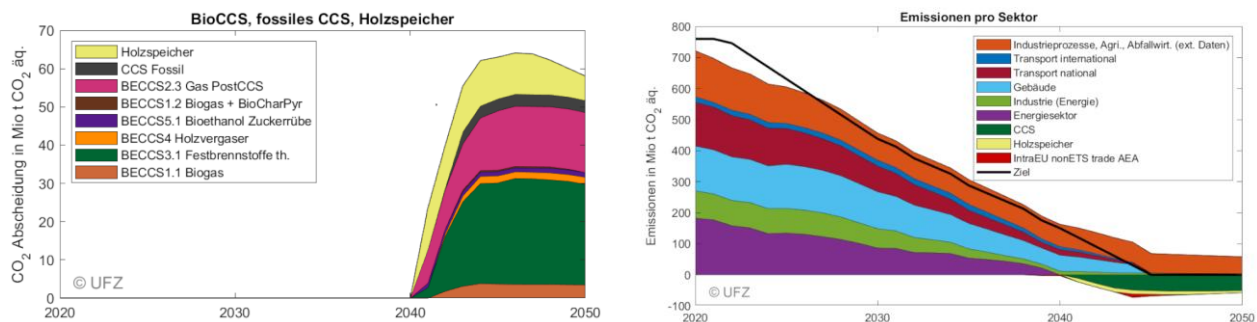


Abbildung 15 BioCCS, Holzspeicher und Kompensationsoptionen der im System verbliebenden THG-Emissionen

3.3 Biomasseinsatz unter veränderten Rahmenbedingungen

3.3.1 Bioökonomie-Push

Das höhere Biomassepotenzial infolge einer höheren Mobilisierung von Rest- und Abfallstoffen und Holz sowie nun möglichen Holzimporten (siehe Tabelle 6) wird in den betrachteten Sektoren nahezu vollständig ausgeschöpft und führt zu geringeren Gesamtkosten des Systems, was die Wettbewerbsfähigkeit der Biomasseoptionen unter den Erfüllungsoptionen unterstreicht. Die zusätzlich verfügbare Biomasse wird vor allem im Energie- und Bausektor eingesetzt (siehe Abbildung 16).

Im Vergleich zum Referenzszenario kann aufgrund der höheren Verfügbarkeit an vergärbaren Reststoffen im Stromsektor zur Deckung der Residuallast mehr Biogas erzeugt werden. Dadurch wird der kostenintensive Einsatz von H₂ in H₂-ready-Anlagen reduziert. Die höheren Holzpotenziale werden zum einen als Scheitholz zur Beheizung älterer, schlecht gedämmter Gebäudetypen zu Spitzenlastdeckung genutzt, zum anderen werden sie im Holzbau eingesetzt und führen dort zu höheren Holzanteilen im Neubau und in der Sanierung. Hier können Holzbauteile von bis zu 43% im Neubau von Einfamilienhäusern und nicht-Wohngebäuden erreicht werden. Die damit verbundene langfristige Kohlenstoffspeicherung in den Holzbauprodukten verringert die Notwendigkeit, in den kostenintensivere Ausbau von CCS-Anlagen an Biomassekonversionsanlagen zu investieren.

Um das ambitioniertere Ziel von 100% erneuerbarem C in der organischen Chemie bis zum Jahr 2050 zu erreichen, müssen nun auch alle Tenside und Schmierstoffe biogen statt erdölbasiert produziert werden. Zu diesem Zweck wird auf der begrenzt verfügbaren Anbaufläche Raps zulasten eines Teils von Miscanthus und Mais angebaut. Die geringeren Mengen an Miscanthus führen zu einer reduzierten Erzeugung des Intermediates Methanol im Chemiesektor. Die verringerte Produktion an Olefinen und Aromaten über die Methanolroute wird durch das Cracken von zusätzlichem Naphtha aus dem chemischen Recycling ausgeglichen, da in diesem Szenario gleichzeitig geringere Preise für Recyclingmaterial unterstellt sind. Die geringere Menge an verfügbarem Mais wird in den Biogasanlagen durch die höhere Verfügbarkeit an vergärbaren Reststoffen ausgeglichen.

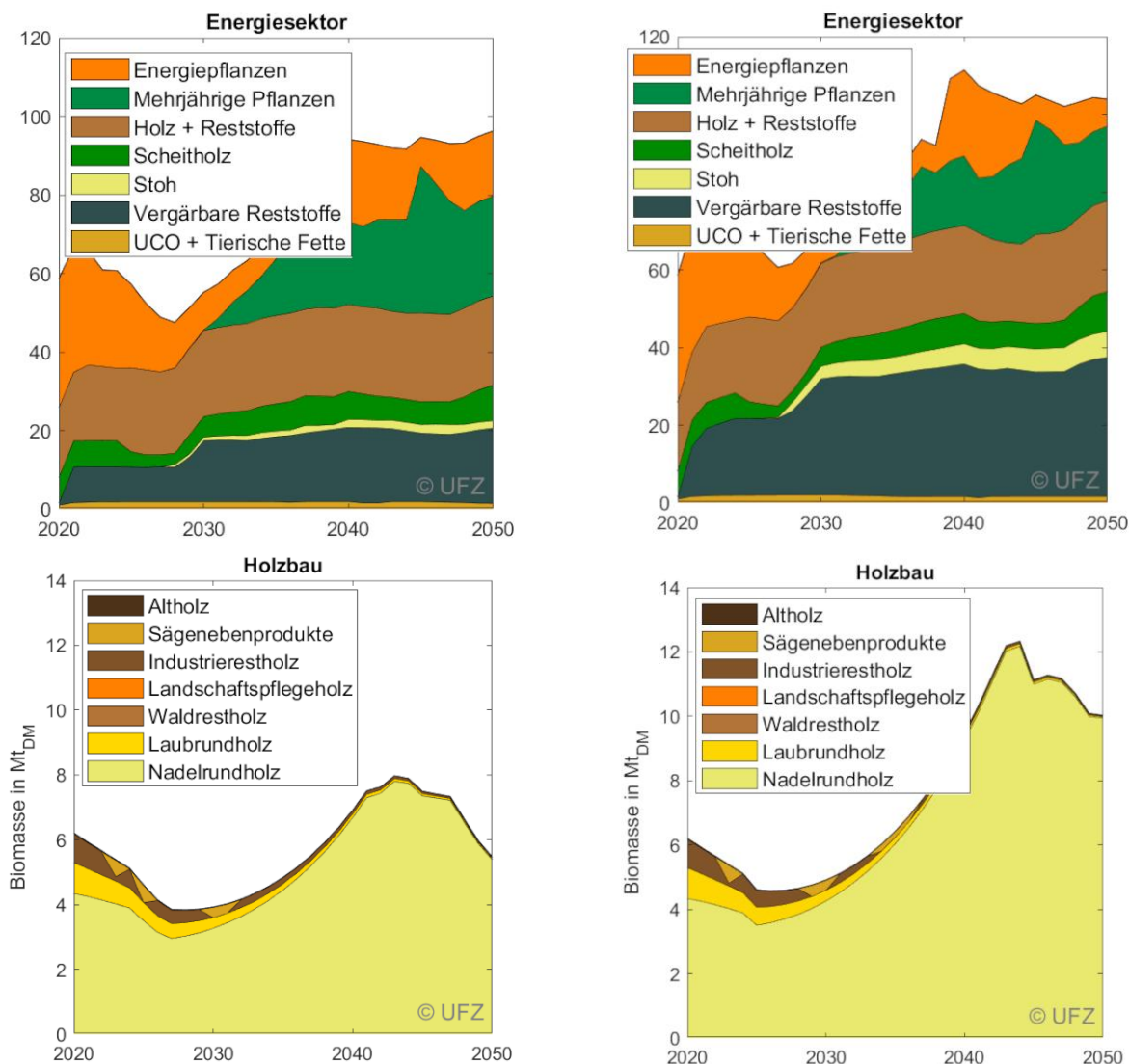


Abbildung 16 Erhöhte Biomasseinsatz im Bioökonomie-Push-Szenario im Vergleich zum Referenzszenario

3.3.2 Technologie-Push

Ein technologisch forcierter Fortschritt bis zur Erreichung der maximalen Konversionseffizienzen und minimal möglichen Investitionskosten führt dazu, dass sich Wärmepumpen zunehmend auch in älteren, energetisch unsanierten Gebäuden etablieren. Wenngleich geringe Mengen an Scheitholz zu Heizzwecken verbleiben, wird das dadurch freigewordene Holzpotenzial verstärkt im Bausektor genutzt, wo es zu höheren Holzbauanteilen im Neubau und bei Sanierungen führt. Im Stromsektor erlangen H₂-ready-Technologien zur Deckung der Residuallast Wettbewerbsfähigkeit, wobei der Einsatz von Wasserstoff geringe Anteile an Biogas verdrängt.

Parallel dazu werden in der Hochtemperaturindustrie Anteile der direkten Feuerung von Hackschnitzeln aus lignozellulosehaltiger Biomasse durch H₂-Direktreduktionsverfahren verdrängt. Im Chemiesektor bewirkt der Technologie-Push eine gesteigerte Wettbewerbsfähigkeit des chemischen Recyclings, wodurch größere Mengen an Naphtha zur Produktion von Olefinen und Aromaten bereitgestellt werden. In der Folge reduziert sich die Erzeugung von Methanol aus lignozellulosehaltiger Biomasse.

Die in diesen Sektoren freiwerdende lignozellulosehaltige Biomasse wird stattdessen zur Herstellung von BtL-Kraftstoffen für den Luftverkehr verwendet, da diese dort durch die technologische Entwicklung konkurrenzfähig werden. Ergänzend setzen sich im Vergleich zum Referenzszenario geringe Mengen an AtJ-Kerosin auf Basis von Bioethanol durch (siehe Abbildung 17).

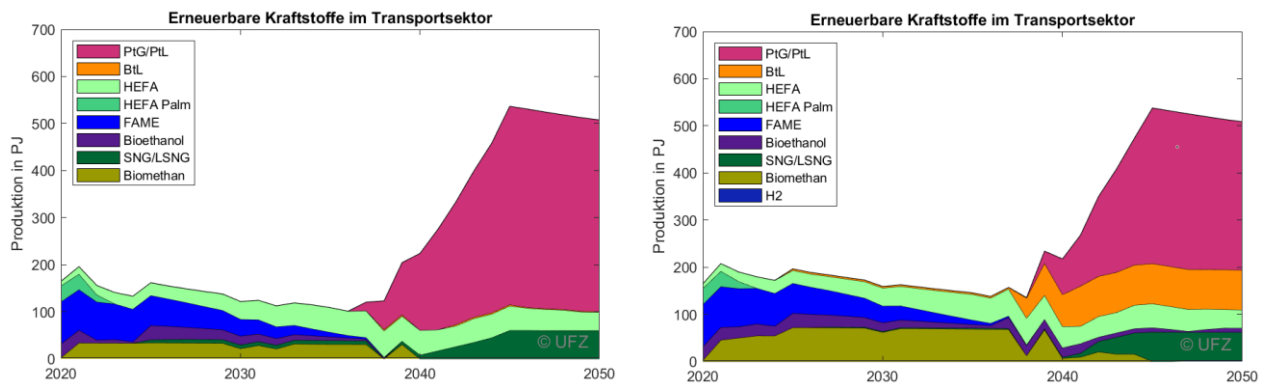


Abbildung 17 Veränderter Kraftstoffmix im Technologie-Push-Szenario

3.3.3 Kombiniertes Bioökonomie- und Technologie-Push

Stehen sowohl mehr Biomassepotenziale zur Verfügung, besteht zudem das ambitioniertere Ziel in der Chemie zum Einsatz 100 % erneuerbarem C (Bioökonomie-Push) und werden gleichzeitig die Technologien maximal entwickelt (Technologie-Push), so überlagern sich die Effekte der einzelnen Push-Szenarien.

Durch den Technologie-Push etablieren sich im Gebäudesektor verstärkt Wärmepumpen auch in den älteren, schlecht gedämmten Gebäuden, welche dort die Nutzung von Scheitholz teilweise verdrängen. Das dadurch freiwerdende Holz wird, ergänzt um die zusätzliche Potenziale aus einem Bioökonomie-Push, im Bausektor eingesetzt (siehe Abbildung 18). Dies führt zu einem höheren Holzeinsatz mit Anteilen von ca. 50 % im Neubau von Einfamilienhäusern und Nichtwohngebäuden sowie zu Sanierungsraten von bis zu 1,7 %. Die daraus resultierende gesteigerte Kohlenstoffspeicherung in Holzprodukten reduziert die Notwendigkeit für CCS-Add-ons an Biomassekonversionsanlagen.

Gleichzeitig erlangen H₂-basierte Technologien durch den Tech-Push Wettbewerbsfähigkeit und setzen sich bei der Deckung der Residuallast teilweise gegenüber der Biogaserzeugung sowie in der industriellen Hochtemperaturprozesswärmeerzeugung (Direktreduktionsverfahren) gegen die Direktfeuerung lignozellulosehaltiger Biomasse durch. Die somit verfügbare lignozellulosehaltige Biomasse wird für die Herstellung von BtL-Kraftstoff im Flugsektor genutzt, da diese Technologie infolge des Technologie-Pushes ebenfalls wettbewerbsfähig wird.

In der chemischen Industrie führt der Tech-Push in Kombination mit sinkenden Preisen für Recyclingmaterial dazu, dass chemisches Recycling wettbewerbsfähig wird. Aufgrund ambitionierterer Zielvorgaben werden zudem Tenside und Schmierstoffe zu 100 % biogen produziert, wofür die verfügbare Anbaufläche verstärkt mit Raps statt mit Miscanthus und Mais belegt werden. Die reduzierte Menge an Miscanthus bedingt eine geringere Erzeugung von Methanol sowie der daraus

resultierenden Olefine und Aromaten, was jedoch durch das zusätzliche Naphtha aus dem chemischen Recycling kompensiert wird. Die verringerten Maismengen in Biogasanlagen werden vermehrt durch vergärbare Reststoffe ausgeglichen. Diese Reststoffe werden jedoch nicht zur Deckung der Residuallast ausgeschöpft, sondern bis 2040 verstärkt als Biomethan im Schwerlastverkehr und im Zeitraum bis 2050 im Schiffsverkehr eingesetzt.

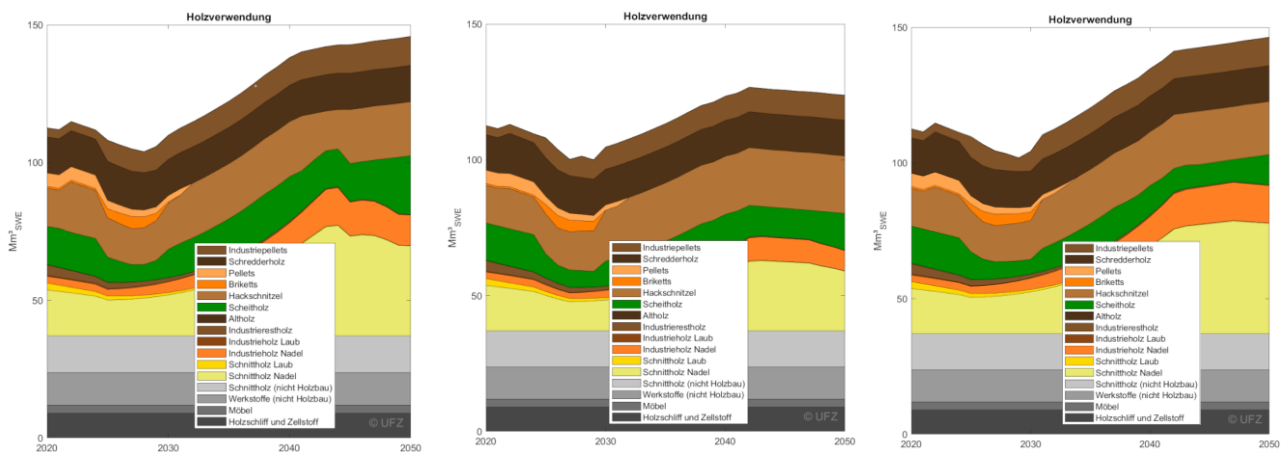


Abbildung 18 Holzverwendung im Bioökonomie-Push-, Technologie-Push- und Bioökonomie-Technologie-Push-Szenario

3.3.4 Biomasseknappheit

Angenommen, die Biomassepotenziale werden bis 2050 zunehmend knapper, so wird der Einsatz alternativer, nicht-biogener Optionen zur Deckung der Bedarfe langfristig und kosteneffizient erzwungen. Das führt insgesamt zu zusätzlichen Kosten im Gesamtsystem von bis zu 23 Mrd.€/a. So setzen sich H₂- und strombasierte Optionen sowie Recycling durch, während daneben mehr fossile Rohstoffe im System verbleiben. Deren fossile THG-Emissionen müssen nach dem Einsatz zusätzlich kompensiert werden.

Besonders im Energiesektor wird der Biomasseeinsatz reduziert. Die Deckung der Residuallast im Stromsektor erfolgt überwiegend durch den Einsatz von H₂ in H₂-ready-Anlagen, während geringere Mengen an Biogas auf Basis vergärbare Reststoffe im System verbleibt. In der industriellen Mittel- und Hochtemperaturprozesswärmeerzeugung reduziert sich der Biomasseanteil signifikant auf eine geringe Restmenge. Die restlichen Bedarfe werden durch H₂-Direktreduktionsverfahren sowie Erdgasfeuerungen gedeckt. Im Gebäudesektor beschränkt sich der Einsatz von Scheitholz und Pellets auf geringe Anteile in hybriden Wärmesystemen, während die Wärmeversorgung primär durch Wärmepumpen übernommen wird. Im Verkehrssektor führt das reduzierte Potenzial an lignozellulosehaltiger Biomasse zu einem geringen Einsatz von verflüssigtem Methan im Schiffsverkehr. Ölhaltige Biomassereststoffe werden weiterhin als HEFA-Kerosin im Luftverkehr und HEFA-Diesel in der Schifffahrt genutzt, während die verbleibenden Bedarfe durch strombasierte Kraftstoffe gedeckt werden.

Das verminderte Holzpotenzial bedingt zudem einen geringeren Holzeinsatz im Bausektor verbunden mit leicht sinkenden Anteilen beim Neubau und Sanierungen von Gebäuden. Innerhalb des Chemiesektors erfolgt die Bereitstellung von Olefine und Aromaten verstärkt über Naphtha aus

chemischen Recyclingprozessen. Die Methanolerzeugung erfolgt langfristig strombasiert statt bio-basiert. Ethanol, welches in anderen Szenarien stabil auf Zuckerrübenbasis als Intermediat für die Herstellung von Olefinen dient, wird aufgrund fehlender Anbaubiomasse nun aus lignozellulosehaltiger Biomasse gewonnen.

Der insgesamt reduzierte Biomasseeinsatz im Energie-, Chemie- und Bausektor führt dazu, dass Bio-CCS und der Kohlenstoffspeicher im Holzbau nur einen geringen Beitrag zur Kompensation verbleibender THG-Emissionen leisten. Folglich werden verbleibende Erzeugungsanlagen auf Erdgasbasis mit CCS-Technologien ausgestattet, und es erfolgt ein verstärkter staatlicher Zukauf von Emissionsrechten zur Erreichung der Klimaschutzziele (siehe Abbildung 19).

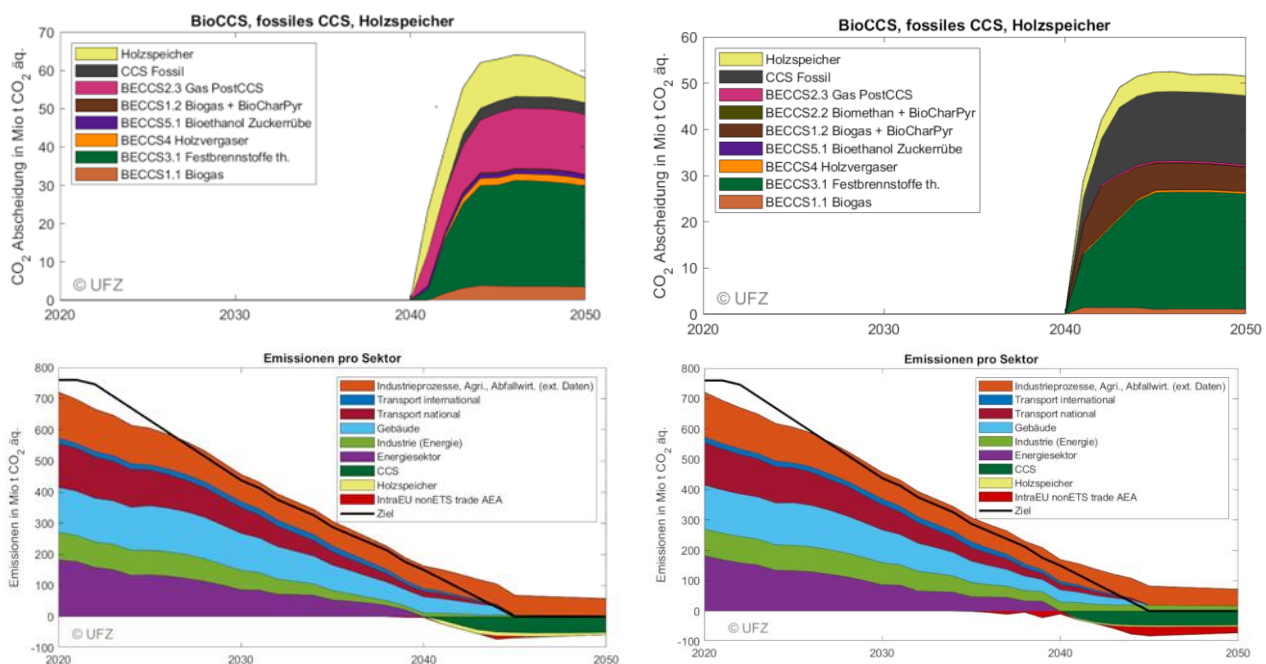


Abbildung 19 THG-Emissionen und Kompensationsoptionen im Referenzszenario und bei Biomasseknappheit

3.3.5 Suffizienz

Die verfügbare Biomasse wird stabil, auch bei langfristig sinkenden Verbräuchen in den Bioökonomiesektoren eingesetzt.

Durch die Verringerung der Residuallast im Stromsektor sinkt der Bedarf an kostenintensivem H₂ für den Einsatz in H₂-ready-Technologien (siehe Abbildung 20). Im Verkehrssektor führt ein geringerer Kerosinbedarf dazu, dass weniger kostenintensives PtL produziert werden muss. Dadurch steigt der relative Anteil von biobasiertem HEFA an der Bedarfsdeckung. Infolgedessen stehen jedoch geringere Mengen des Nebenprodukts Naphtha aus der PtL-Erzeugung für die Erzeugung von Aromaten und Olefinen zur Verfügung. Diese werden daher verstärkt durch die katalytische Umwandlung von Methanol übernommen, während gleichzeitig ein insgesamt geringerer Bedarf an chemischen Grundbausteinen besteht. Durch den sinkenden Bedarf an Gebäudewärme können zudem ungenutzte Scheitholz mengen im Bausektor genutzt werden, was zu steigenden Holzbauanteilen führt.

Da im Suffizienzscenario auch von einer geringeren Menge an verbleibenden THG-Emissionen ausgegangen wird, reduziert sich der Kompensationsbedarf. Dieser wird überwiegend durch die C-Speicherung des gestiegenen Holzbauanteil abgedeckt, sodass der Anteil von BioCCS sinkt. Insgesamt führen geringere Verbräuche und der reduzierte Einsatz teurer Technologien im Vergleich zu Biomasseoptionen zu niedrigeren Gesamtemissionen und Gesamtkosten.

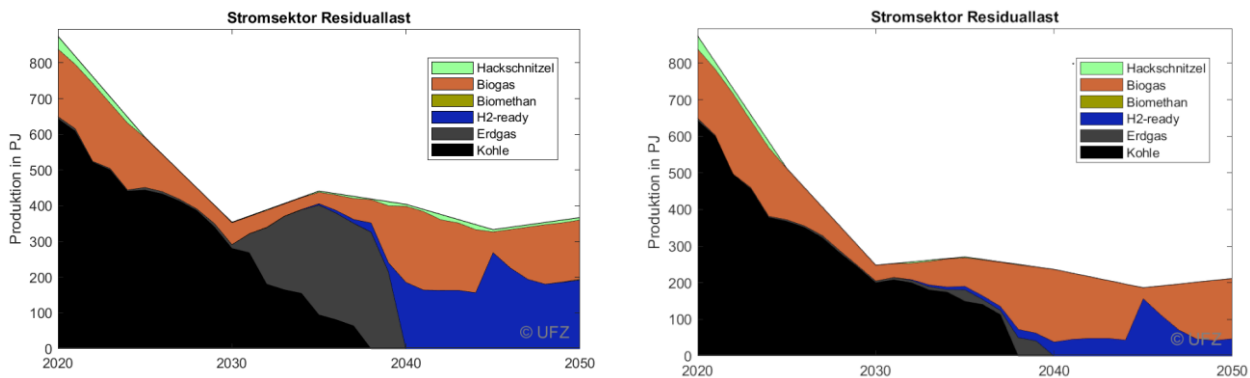


Abbildung 20 Biomasseeinsatz im Stromsektor im Referenz- und Suffizienz-Szenario

3.3.6 Hoher CO₂-Preis

Im Vergleich zum Referenzszenario, in dem die Defossilisierung modelltechnisch über die Einhaltung der Klimaschutzziele ohne expliziten CO₂-Preis für fossile CO₂-Emissionen umgesetzt wird, wird im Szenario mit hohem CO₂-Preis zusätzlich zur Randbedingung der Erfüllung der Klimaschutzziele noch ein CO₂-Preis (sowohl für die ETS-Sektoren als auch für die Effort Sharing-Sektoren) eingeführt, der bis 2050 auf einen Preis von 500 €/t ansteigt. Dieser CO₂-Preis führt in den betrachteten Nutzungssektoren im Jahr 2050 zu keinen grundlegend anderen Ergebnissen. Unterschiede ergeben sich lediglich in der Entwicklung bis zum Zieljahr 2050. Durch den erhöhten CO₂-Preis werden fossile Erfüllungsoptionen schneller verdrängt, wodurch die Biomassepotenziale früher ausgeschöpft werden und sich die Transformation beschleunigt. Im Energiesektor führt der definierte CO₂-Preis anders als im Referenzszenario dazu, dass die Mittel- und Hochtemperaturerzeugung in der Industrie vollständig mit dem Biomasseeinsatz transformiert wird. Eine Erdgasnutzung ist hier nicht kostenoptimal. In älteren, ungedämmten Gebäuden wird zudem mehr Scheitholz eingesetzt und Gasthermen gehen früher aus dem System. Das führt bis 2050 zu einem leicht höheren Biomasseeinsatz im Energiesektor, während er in den Bereichen Holzbau und Chemie etwas geringer ausfällt.

Insgesamt führt die zusätzliche Einführung eines hohen CO₂-Preises zu einer zeitigeren Verdrängung fossiler Erfüllungsoptionen und im Verlauf bis 2050 zu deutlich geringeren THG-Emissionen als im Referenzszenario (siehe Abbildung 21). Die Differenz beträgt 1'950 Mio.t CO₂-Äquivalente.

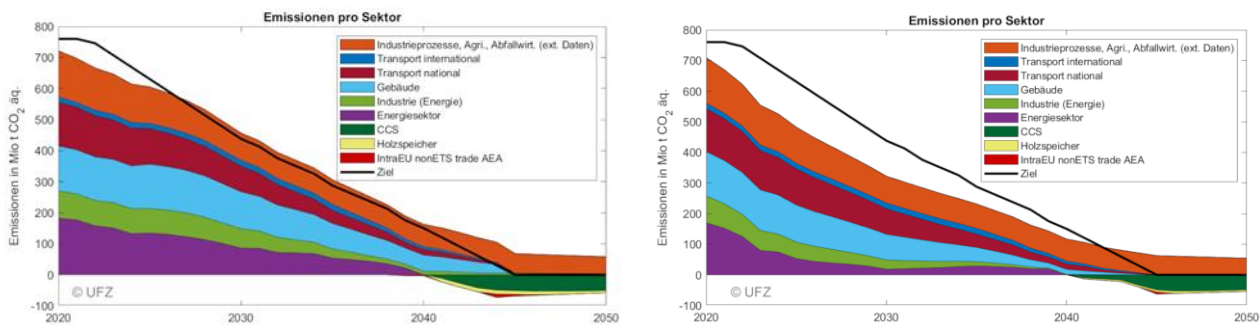


Abbildung 21 Vergleich der THG-Emissionen zwischen Referenz- und Szenario mit hohem CO₂-Preis

3.3.7 Holzbauquote

Eine verbindlich hohe Holzbauquote (50% des Neubaus von Gebäuden und 1,9% der Sanierungsrate gemäß [89, 90]) führt dazu, dass Holz in größerem Umfang (ca. 27 Mt) im Bausektor genutzt wird. Ab dem Jahr 2041 wird Holz in Gebäuden nicht mehr als Scheitholz genutzt, sondern ausschließlich im Bausektor verwendet. In älteren und unzureichend gedämmten Gebäuden wird die Wärmeversorgung dann über Pelletheizungen in Kombination mit Wärmepumpen sichergestellt. Die Pellets werden aus Miscanthus hergestellt. Parallel dazu werden Holzreststoffe, die andernfalls langfristig und kosteneffizient als Hackschnitzel zur Erzeugung industrieller Mittel- und Hochtemperaturprozesswärme genutzt würden, teilweise in den Bausektor umgeleitet. Die industriellen Wärmebedarfe werden stattdessen über Erdgasfeuerungen gedeckt, wobei die fossilen Treibhausgasemissionen durch nachgeschaltete CCS-Anlagen vermindert werden. Diese Verschiebung der Holzpotenziale führt jedoch zu steigenden Transformationskosten, da die Kostenvorteile der Biomassenutzung im Bausektor – selbst unter Berücksichtigung der Kohlenstoffspeicherung – geringer ausfallen als im Energiesektor.

3.3.8 Zusammenfassende Darstellung der Szenarien

Wie in Abbildung 22 dargestellt, erfolgt der größte Biomasseeinsatz trotz umfänglicher Bedarfserfüllung in den Sektoren der stofflichen Biomassenutzung im Energiesektor. Hier kann er neben dem Einsatz anderer erneuerbarer Erfüllungsoptionen einen wesentlichen Beitrag zur Transformation der Residuallast im Stromsektor, des Wärme- und des Verkehrssektors beitragen. Langfristig und kosteneffizient erfolgt die Transformation der Mittel- und Hochtemperaturerzeugung in der Industrie sogar nahezu ausschließlich mit Biomasse. Gerade in der Wärmeerzeugung für die Industrie, aber auch die Biogasanlagen zur Stromerzeugung sind größtenteils mit CCS-Anlagen zur Erzeugung von Negativemissionen kombiniert (schraffierte Flächen in Abbildung 22). Der Biomasseeinsatz im Energiesektor wird unter den Szenarien am stärksten durch die Biomasseverfügbarkeit beeinflusst, d.h. er ist am geringsten im Szenario mit der Biomasseknappheit und am höchsten im Bioökonomie-Push und Bioökonomie-Technologie-Push, in dem die Biomassepotenziale am höchsten sind. Das die jeweils verfügbare Biomasse fast vollständig ausgeschöpft wird, unterstreicht die Wettbewerbsfähigkeit der Biomasseoptionen.

Der Chemiesektor ist der zweitgrößte Biomasseabnehmer. Die eingesetzten Biomassemengen sind jedoch aufgrund der geringeren Bedarfe auch deutlich geringer als im Energiesektor. Biomasse leistet mit ca. 50% einen großen Beitrag zur Transformation im organischen Chemiesektor. Der Biomasseinsatz ist unter den Szenarien relativ robust. Um die Klimaschutzziele kostenoptimal zu erreichen, werden einige Anlagen zur Erzeugung des in der Chemie genutzten Intermediates Ethanol mit CCS-Anlagen kombiniert (schraffierte Flächen in Abbildung 22).

Der Holzbau nimmt kosteneffizient nur die dritt größten Biomassemengen auf. Größere Holzmengen werden beim Neubau von Einfamilienhäusern und Nicht-Wohngebäuden nur bei zusätzlich verfügbaren Holzpotenzialen wie im Bioökonomie-Push und Bioökonomie-Technologie-Push-Szenario eingesetzt. Der größte Holzeinsatz im Bausektor erfolgt unter Definition einer verbindlichen Holzbau- und Sanierungsquote. Die größte Gesamtmenge an Rund- und Restholz wird kosteneffizient in der Energiewende eingesetzt.

Die geringen Bedarfe im Torfersatz-Sektor können in allen Szenarien durch Biomasse gedeckt werden.

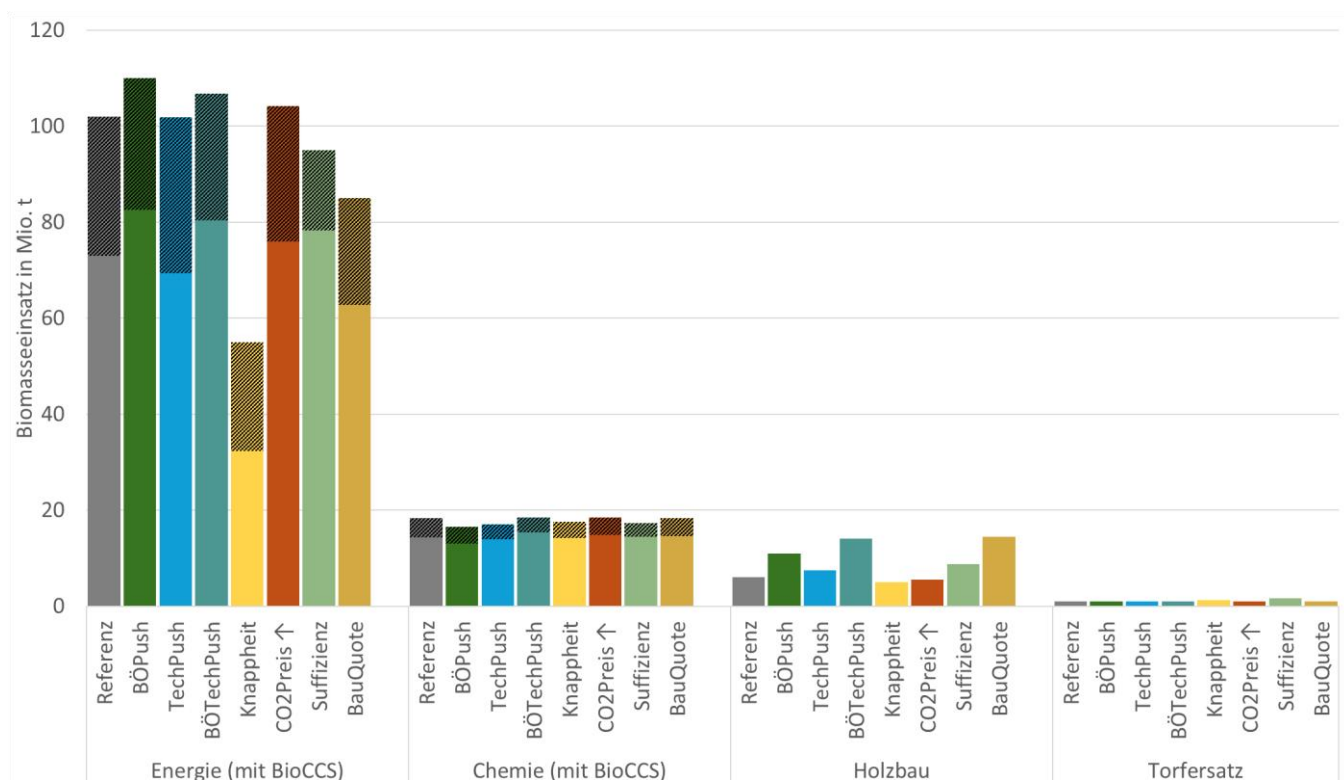


Abbildung 22 Biomasseinsatz in den verschiedenen Sektoren und Szenarien (schraffierte Flächen im Energie- und Chemiesektor markieren die Kombination der Biomassenutzung mit CCS)

3.3.9 Weitere Sensitivitäten

Verfügbarkeit der Anbaufläche über veränderte Ernährungsweisen

Wie in Kapitel 2.3 dargestellt, hat vor allem eine veränderte Ernährungsweise Einfluss auf die Verfügbarkeit von Anbauflächen für nachwachsende Rohstoffe, die in den betrachteten Bioökonomie-sektoren genutzt werden können.

Erfolgt bis 2050 nur eine geringfügige Umstellung auf eine vegane Ernährung, stehen im Vergleich zum Referenzszenario deutlich reduzierte Flächenpotenziale zur Verfügung. Eine moderate bis ambitionierte Ernährungsumstellung führt hingegen zu einer moderat bis signifikant höheren Flächenverfügbarkeit (siehe Tabelle 3).

Die kostenoptimierte Flächenbelegung bleibt in allen drei Varianten der Ernährungsumstellung grundsätzlich gleich: Sie erfolgt primär durch den Anbau von Miscanthus, gefolgt von Mais und Zuckerrüben. Bei zunehmender Flächenverfügbarkeit weiten sich die Anbauflächen für Mais und Miscanthus aus, während die Fläche für den Zuckerrübenanbau unverändert bleibt (siehe Abbildung 23). Die Ernährungsumstellung führt vor allem zu Veränderungen im Energiesektor, da Mais und Miscanthus langfristig und kostenoptimal vor allem energetisch verwertet werden.

Reduziert sich die verfügbare Fläche von 2,3 Mio. ha (Referenzszenario) auf 1,5 Mio. ha bedingt durch die geringe Ernährungsumstellung, sinkt infolge der geringeren Verfügbarkeit von Mais die Biogaserzeugung zur Deckung der Residuallast im Stromsektor, was durch einen verstärkten Einsatz von H₂ in H₂-ready-Anlagen ausgeglichen wird. Im Wärmesektor wird die reduzierte Hackschnitzelmenge auf Basis von Miscanthus zur Bereitstellung industrieller Mittel- und Hochtemperaturprozesswärme durch den Einsatz von H₂ in Direktreduktionsverfahren sowie durch Erdgasfeuerungen ausgeglichen.

Bei einer moderaten oder ambitionierten Ernährungsumstellung und der damit einhergehenden gesteigerten Verfügbarkeit von Mais und Miscanthus kehren sich diese Trends um: Der Anteil des H₂-Einsatzes zur Deckung der Residuallast sowie der Prozesswärmebedarfe sinkt. Zudem ermöglichen die zusätzlichen Miscanthuspotenziale die Produktion von BtL-Kerosin im Verkehrssektor, wodurch die kostenintensivere PtL-Kerosin-Erzeugung reduziert werden kann.

Infolgedessen führt eine höhere Flächenverfügbarkeit durch Ernährungsumstellung zu steigenden Biomassepotenzialen, einem höheren Einsatz von Biomasseoptionen zur Deckung der Bedarfe und zu sinkenden Gesamtsystemkosten.

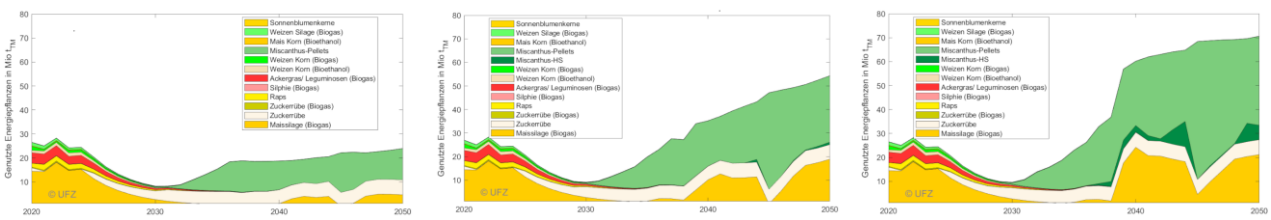


Abbildung 23 veränderte Flächenverfügbarkeit bei veränderter Ernährungsweise (links: geringe-, Mitte: moderate-, rechts: ambitionierte Ernährungsumstellung)

Berücksichtigung der Waldsenke im LLULUCF-Sektor. Da die zukünftige Waldsenke⁹ zur Kompensation verbleibender THG-Emissionen berücksichtigt wird, sind nun weniger sonstige Kompensationsmaßnahmen erforderlich. Vor allem werden weniger Biomassefeuerungs- und -vergasungsanlagen zur Erzeugung von Mittel- und Hochtemperaturprozesswärme für die Industrie mit CCS-Anlagen ausgestattet. Anstatt der im Referenzszenario abgeschiedenen und gespeicherten 49 Mt CO₂-Äquivalente, sind es nun nur noch 23 Mt. Der Holzeinsatz im Bausektor bleibt unverändert. Es werden in dieser Sensitivität weiterhin 6 Mt CO₂ in Form von Holzbauprodukten gespeichert. Aufgrund der zusätzlichen CO₂-Speicherung durch den Wald verbleiben sogar mehr fossile CO₂-Emissionen kostenoptimal im System. Diese stammen aus der Erdgasfeuerung zur Erzeugung von Mittel- und Hochtemperatur in der Industrie.

4 Einordnung der Ergebnisse

Grundsätzlich ist ein Vergleich der Ergebnisse mit anderen Studien, die Lösungsoptionen für ein klimaneutrales Deutschland bis 2045/2050 skizzieren, schwierig. Dies liegt daran, dass diese Studien andere Modellansätze und Szenarien verwenden, unterschiedliche Annahmen treffen und die Biomassepotenziale und deren Konversionsrouten nicht so detailliert wie in dieser Arbeit darstellen. Deshalb liegt der Fokus beim Vergleich insbesondere auf dem Einsatz und dem Zielsektor der Biomasse bis 2045/2050.

Alle Studien betonen, dass die Biomasse eine begrenzte und knappe Ressource ist, die entsprechend optimiert eingesetzt werden soll [8–13].

Die vorliegende Arbeit beinhaltet die stoffliche sowie energetische Nutzung von Biomasse und differenziert 77 Rest- und Abfallstoffe, 18 nachwachsende Rohstoffe und 9 Torfersatzstoffe. Im Chemiesektor wird der Fokus auf Basischemikalien und Zwischenmärkte gelegt, die in dieser Form in den anderen Studien nicht abgebildet sind. Die Langfristszenarien-Studie gliedert die Biomasse am weitesten mit 10 Biomassekategorien, die den drei Hauptkategorien Waldholz, Anbaubiomasse und Rest- sowie Abfallstoffe zugeordnet sind, auf [13]. Die Rescue Studie des Umweltbundesamt (UBA) verzichtet gänzlich auf Anbaubiomasse ab 2030 und Waldrestholz ab 2050 und fokussiert stattdessen auf Rest- und Abfallstoffe. Zudem wird BioCCS komplett ausgeschlossen [12]. Auch die Arbeit der Agora Think Tanks (Agora) reduziert die Fläche für Anbaubiomasse und setzt dafür vermehrt auf

⁹ Gemäß LULUCF-Zielen des Klimaschutzgesetzes

Agroforstsysteme, Kurzumtriebsplantagen und Paludikulturen, das Potential von Rest- und Abfallstoffen verdoppelt sich [8]. Die Studien von dena und das Ariadne-Projekt unterteilen zwischen heimischen Reststoffen und Anbaubiomassen [9, 10]. In der dena Studie wird auch ein verändertes Ernährungsverhalten und damit sinkende Tierzahlen betrachtet. Die freie Fläche wird für Aufforstung genutzt womit einerseits mehr Kohlenstoff im Wald gespeichert wird, andererseits weniger von der Agrarfläche emittiert wird. In der Studie des BDI wird keine Unterscheidung der Biomasseherkunft gemacht, sondern qualitative Aussagen für eine Kaskadennutzung der Biomasse insgesamt, sowie einer Biomassestrategie getroffen. Entsprechend der anfänglichen Biomasse- und sektoralen Limitierungen ist auch die eingesetzte Biomassemenge sehr unterschiedlich.

In allen Studien verringert sich die Biomassenutzung im Gebäudesektor sowie in Sektoren mit effizienten elektrischen Alternativen und im Straßenverkehr. Die Biomasse verschiebt sich zu Hochtemperaturprozessen, Luft- und Schiffskraftstoffen sowie zur stofflichen Nutzung in der Chemie. Diese Trends lassen sich im Allgemeinen auch in den SoBio2 Ergebnissen wiederfinden. Nur werden hier in alten unsanierten Gebäuden noch Scheitholz oder Pellets in hybriden Systemen mit Solarthermie oder Wärmepumpe eingesetzt.

In der vorliegenden Studie wird der Großteil der Biomasse im Energiesektor und vor allem für die Erzeugung von Mittel- und Hochtemperaturprozesswärme für die Industrie, aber auch zur Erzeugung der schwer zu defossilisierenden Schiffs- und Flugsektors eingesetzt. Der zweitgrößte Biomasseabnehmer ist der Chemiesektor. In der Agora-Studie ist eine ähnliche starke Verschiebung und ein massiver Anstieg der Biomassenutzung in der Hochtemperaturindustrie zu beobachten. Ein weiterer erheblicher Teil der Biomasse wird stofflich genutzt und dient als zentrale Kohlenstoffquelle für die Chemieindustrie. Ein geringer Teil der Biomasse wird im Flug- und Schiffsverkehr eingesetzt. In der Ariadne Studie wird Biomasse in der schwer zu dekarbonisierenden Industrie und Fernwärme eingesetzt. Der Fokus liegt hier vor allem darauf, negative Emissionen zu generieren, indem BECCS zum Einsatz kommt. Zu ähnlichen Ergebnissen kommt der BDI in seiner qualitativen Arbeit. Dena setzt ebenfalls auf den Aufbau von BECCS-Kapazitäten, sieht Biomasse aber mittelfristig noch in Form von Biomethan im Gebäudesektor und als Biokraftstoff im Verkehrssektor. Mit 19 TWh von insgesamt 145 TWh spielt die stoffliche Nutzung eine untergeordnete Rolle. Die Langfristszenarien-Studie kommt hingegen zu dem Ergebnis, dass sich das energetische Biomassepotenzial durch die Reduzierung der Importe sowie die stark verringerte Nutzung von Waldholz stark reduziert. Nachwachsende Rohstoffe werden nicht mehr in Biogasanlagen eingesetzt. Hier wird der stofflichen Nutzung eine hohe Priorität eingeräumt. In der Rescue-Studie wird die energetische Nutzung von Biomasse ebenfalls stark limitiert und sie wird fast ausschließlich für industrielle Prozesswärme oder die stoffliche Nutzung im organischen Chemiesektor eingesetzt. Maximal 9 TWh entfallen hier noch auf die Güllevergärung für den Stromsektor.

In den angeführten Studien wird zwar auf die wichtige Rolle der stofflichen Nutzung des Holzes im Holzbau hingewiesen, jedoch werden keine konkreten Mengen genannt. Nur in den Agora- und Rescue-Studien werden überhaupt Holzbauanteile genannt. Die Ergebnisse aus SoBio 2 zeigen, dass der Einsatz von Holz im Bausektor ohne erhöhte Holzpotenziale oder Zielquoten bis 2050 nicht wächst. Agora schätzt einen Zuwachs von Holz in Ein- und Zweifamilienhäusern auf einen Anteil von 35 % und bei Mehrfamilienhäusern auf 20%. Die Rescue Studie sieht im ambitionierten Szenario sogar

eine Quote von 80 % Holz in Neubauten, wobei auch stark auf biobasierte Dämmmaterialien in Wohngebäuden gesetzt wird. Auch die Studien der dena, der Langfristszenarien und von Ariadne verweisen auf die wichtige Rolle der stofflichen Nutzung von Holz im Bausektor und die damit verbundenen negativen Emissionen, quantifizieren diese aber nicht weiter.

SoBio2 zeigt, dass auch die erhöhten Biomassepotenziale in den Bioökonomie-Push und Bioökonomie-Technologie-Push-Szenarien durch eine steigende Mobilisierung heimischer Potenziale und Importe nahezu vollständig ausgeschöpft werden, wodurch sich die Gesamtkosten in den betrachteten Sektoren verringern. Importe an H₂, strombasierten Kraftstoffen und Intermediaten für die Chemie werden nicht begrenzt, aber werden in den Nutzungssektoren langfristig und kostenoptimal nicht erheblich genutzt. Die analysierten Studien der Langfristszenarien und des UBA setzen hingegen auf keine bzw. stark limitierte Importe. In der Rescue Studie werden die geringen ermittelten Biomassepotenziale mit heimischer Biomasse nahezu gedeckt. Agora sieht vor allem einen Importbedarf bei Kraftstoffen, insbesondere im Flug- und Schiffsverkehr, wobei diese eine untergeordnete Rolle spielen. Die dena sieht vor allem Importbedarf bei grünem Methanol von 50 TWh für die Chemieindustrie sowie bei synthetischen Powerfuels, wohingegen Biokraftstoffe kaum eine Rolle spielen. Der BDI geht ebenfalls von stofflichen Importen für die Chemieindustrie aus. Die Ariadne Studie zeigt verschiedene Möglichkeiten, bleibt aber bei einer Obergrenze von 410 TWh Importen, was insbesondere E-Fuels und Wasserstoff beinhaltet. Insgesamt gehen die dena-, Ariadne- und BDI Studien davon aus, dass Deutschland auch 2045 Importland von Biomasse und Verarbeitungsprodukten bleibt.

Insgesamt zeigt sich, dass Biomasse in allen Studien eine wichtige Säule der Transformation und eines klimaneutralen Wirtschaftssystems ist und bleibt. Die SoBio 2 Modellierungen liefern einen wichtigen Baustein für ein differenzierteres Bild der möglichen Input-Biomassen, ihrer Nutzungspfade und Technologien sowie ihrer Zwischen- und Zielmärkten. Das Modell ermöglicht die massenbilanzielle Nachverfolgung der Biomasseströme in den modellierten Sektoren und ihren zugehörigen Mengen. Unter Anwendung von Systemmodellierungen sowie verschiedenen Szenarien- und Sensitivitätsparametern liefert das SoBio2-Vorhaben robuste Perspektiven für die Etablierung der Bioökonomie innerhalb dieses Untersuchungsrahmens.

5 Referenzen

- [1] *Bundes-Klimaschutzgesetz vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2513), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 15. Juli 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 235) geändert worden ist.*
- [2] Bundesministerium für Bildung und Forschung, Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), *Nationale Bioökonomiestrategie*. [Online]. Available: https://www.bmftr.bund.de/SharedDocs/Publikationen/DE/7/31576_Nationale_Biooekonomiestrategie_Langfassung.pdf?__blob=publicationFile&v=6 (accessed: Apr. 20 2026).
- [3] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, *Langfriststrategie Negativemissionen zum Umgang mit unvermeidbaren Restemissionen (LNe): Eckpunkte*. [Online]. Available: https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/3d18c4e51ade07c50c9d937529af6c2828d7170e/0c28d600-e5fb-e73c-1be6-3e0395ec75ac/tap2_wByOck_dec/240226-eckpunkte-negativemissionen.pdf (accessed: Apr. 20 2026).
- [4] Umweltbundesamt, *Erneuerbare Energien in Zahlen*. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#berblick> (accessed: Apr. 28 2026).
- [5] Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe (FNR), *Holzbau wächst auf 24 Prozent – enormes Potenzial für die öffentliche Beschaffung*. [Online]. Available: <https://www.fnr.de/presse/pressemitteilungen/aktuelle-mitteilungen/aktuelle-nachricht/holzbau-waechst-auf-24-prozent-enormes-potenzial-fuer-die-oeffentliche-beschaffung> (accessed: Apr. 28 2026).
- [6] Industrieverband Garten (IVG) e.V., *Produktionsmengen und Absatzahlen der Substratbranche 2024 konstant – Torfanteil sinkt weiter*. [Online]. Available: <https://ivg.org/2025/03/19/ivg-produktionsmengen-und-absatzahlen-der-substratbranche-2024-konstant-torfanteil-sinkt-weiter/> (accessed: Apr. 28 2026).
- [7] Verband der chemischen Industrie e.V., *Branchenportrait der deutschen Chemie- und Pharmaindustrie*. [Online]. Available: https://www.vci.de/6d092fa8d39834e213a939e5e8abe146fe0ece53/0c28d600-e5fb-e73c-1be6-3e0395ec75ac/tap2_aKxVdZ_dec/branchenportraet-2025-2.pdf (accessed: Apr. 28 2026).
- [8] Agora Think Tanks, *Klimaneutrales Deutschland. Von der Zielsetzung zur Umsetzung*. [Online]. Available: https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2023/2023-30_DE_KNDE_Update/A-EW_344_Klimaneutrales_Deutschland_WEB.pdf (accessed: Apr. 20 2026).
- [9] Kopernikus-Projekt Ariadne, *Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045: Szenarien und Pfade im Modellvergleich*. [Online]. Available: https://ariadneprojekt.de/media/2022/02/Ariadne_Szenarienreport_Oktober2021_corr0222_lowres.pdf (accessed: Jun. 6 2023).
- [10] dena, *dena-Leitsudie Aufbruch Klimaneutralität*. [Online]. Available: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/Abschlussbericht_dena-Leitstudie_Aufbruch_Klimaneutralitaet.pdf (accessed: Jun. 6 2023).
- [11] Federation of German Industries - BDI, *Climate Paths 2.0 study – Recommendations for action: How to make our industrial country climate neutral*. [Online]. Available: <https://english.bdi.eu/publication/news/climate-paths-2-0-study-recommendations-for-action> (accessed: Jun. 6 2023).

- [12] J. Günther et al., *Resource-Efficient Pathways towards Greenhouse-Gas-Neutrality - RESCUE. Summary report*. [Online]. Available: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/rescue_kurzfassung_eng.pdf (accessed: Jun. 6 2023).
- [13] F. Sensfuß et al., *Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Treibhausneutrale Szenarien T45*. [Online]. Available: https://www.langfristszenarien.de/enertile-explorer-wAssets/docs/LFS3_T45_Szenarien_15_11_2022_final.pdf (accessed: Jun. 6 2023).
- [14] K. Meisel et al., "Quo Vadis, Biomass? Long-Term Scenarios of an Optimal Energetic Use of Biomass for the German Energy Transition," *International Journal of Energy Research*, vol. 2024, no. 1, 2024, doi: 10.1155/2024/6687376.
- [15] M. Jordan, V. Lenz, M. Millinger, K. Oehmichen, and D. Thrän, "Future competitive bioenergy technologies in the German heat sector: Findings from an economic optimization approach," *Energy*, vol. 189, 14–29, p. 116194, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.116194.
- [16] M. Jordan, K. Meisel, M. Dotzauer, J. Schröder, K.-F. Cyffka, and N. Dögnitz, "The controversial role of energy crops in the future German energy system: the trade offs of a phase-out and allocation priorities of the remaining biomass residues.," *Energy Reports*, no. 10, pp. 3848–3858, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.10.055>
- [17] Umweltbundesamt, *Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Übereinkommen von Paris 2025: Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2023*. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/berichterstattung-unter-der-klimarahmenkonvention-10> (accessed: May 1 2026).
- [18] Hoffmann, Leander Kotzur, Maximilian and others, *tsam - Time Series Aggregation Module: GitHub, GitHub repository*.
- [19] Braungardt Sibylle Braungardt, Malte Bei der Wieden, Tilman Hesse, Tanja Kenkmann, Matthias Koch, and Susanne Krieger, *Großbaustelle Gebäudesektor*. [Online]. Available: https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/WWF_OEko-Institut_Waermewende.pdf
- [20] Malte Bei der Wieden, Sibylle Braungardt, Michael Hörner, and Julian Bischof, *Minimum Energy Performance Standards for Non-Residential Buildings*. [Online]. Available: https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/MEPS_for_NRB.pdf
- [21] J. Nitsch, T. Pregger, T. Naegler, D. Heide, D. L. de Tena, and F. e. Trieb, *Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Schlussbericht BMU - FKZ 03MAP146*. [Online]. Available: http://www.dlr.de/dlr/Portaldata/1/Resources/bilder/portal/portal_2012_1/leitstudie2011_bf.pdf (accessed: Jun. 2 2023).
- [22] M. Dotzauer, *Bioenergy-Technology-Database (BET.db)*. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7586039> (accessed: Jun. 12 2023).
- [23] VCI, "Roadmap-chemie-2050-treibhausgasneutralitaet," 2019. [Online]. Available: <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/2019-10-09-studie-roadmap-chemie-2050-treibhausgasneutralitaet.pdf>
- [24] VCI, "Chemiewirtschaft-in-zahlen-2023," 2024.
- [25] *EnArgus*. [Online]. Available: https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d14567-2/*/*/%c3%96lpflanze?search=oil%20plant&op=Wiki.getwiki (accessed: Sep. 30 2025).
- [26] S. Khan et al., "A comparative physicochemical property assessment and techno-economic analysis of biolubricants produced using chemical modification and additive-based routes,"

- The Science of the total environment*, vol. 847, p. 157648, 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.157648.
- [27] Dressler and Daniela, "TFZ-Bericht 50: Rapsölkraftstoffproduktion in Bayern - Analyse und Bewertung ökologischer und ökonomischer Wirkungen nach der ExpResBio-Methode, Stand Dezember 2016,"
- [28] J. Jiang, X. Feng, M. Yang, and Y. Wang, "Comparative technoeconomic analysis and life cycle assessment of aromatics production from methanol and naphtha," *Journal of Cleaner Production*, vol. 277, p. 123525, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123525.
- [29] C. E. Cabrera Camacho, B. Alonso-Fariñas, A. L. Villanueva Perales, F. Vidal-Barrero, and P. Ollero, "Techno-economic and Life-Cycle Assessment of One-Step Production of 1,3-Butadiene from Bioethanol Using Reaction Data under Industrial Operating Conditions," *ACS Sustainable Chem. Eng.*, vol. 8, no. 27, pp. 10201–10211, 2020, doi: 10.1021/acssuschemeng.0c02678.
- [30] S. Russo, A. Valero, A. Valero, and M. Iglesias-Émbil, "Exergy-Based Assessment of Polymers Production and Recycling: An Application to the Automotive Sector," *Energies*, vol. 14, no. 2, p. 363, 2021, doi: 10.3390/en14020363.
- [31] F. Kullmann, "Recycling- und Defossilisierungsmaßnahmen der Energieintensiven Industrie Deutschlands im Kontext von CO₂-Reduktionsstrategien," 2022. [Online]. Available: <https://publications.rwth-aachen.de/record/862520/files/862520.pdf>
- [32] T. REN, M. PATEL, and K. BLOK, "Steam cracking and methane to olefins: Energy use, CO₂ emissions and production costs," *Energy*, 2008, doi: 10.1016/j.energy.2008.01.002.
- [33] Y. Zhao, C. Wang, L. Zhang, Y. Chang, and Y. Hao, "Converting waste cooking oil to biodiesel in China: Environmental impacts and economic feasibility," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 140, p. 110661, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110661.
- [34] Plastics Europe, *Plastics Transitions Roadmap. Our industry's roadmap for plastics in Europe to be circular and have net-zero emissions by 2050*. [Online]. Available: <https://plasticseurope.org/de/knowledge-hub/plastics-transitions-roadmap/> (accessed: May 1 2026).
- [35] Dechema, *Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry*. [Online]. Available: https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/Technology_study_Low_carbon_energy_and_feedstock_for_the_European_chemical_industry.pdf (accessed: Apr. 28 2026).
- [36] K. Meisel, L. Röder, N. Dögnitz, I. K. Götz, and K.-F. Cyffka, "Marktrelevante Biopolymere," 2025.
- [37] Verband der chemischen Industrie e.V., *Chemie in Zahlen*. [Online]. Available: <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/chiz-historisch/chemiewirtschaft-in-zahlen-2023.pdf> (accessed: Apr. 28 2026).
- [38] Prognos, Öko-Institut and Wuppertal Institut, *Towards a Climate-Neutral Germany by 2045. How Germany can reach its climate targets before 2050*. [Online]. Available: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_04_KNDE45/A-EW_213_KNDE2045_Summary_EN_WEB.pdf (accessed: Jun. 6 2023).
- [39] dena, *IMPULSPAPIER Erneuerbares Methanol. Grüne Basischemikalie und Importvektor für klimaneutralen Wasserstoff und Kohlenstoff mit erheblichem Potenzial*. [Online]. Available: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2024/IMPULSPAPIER_Erneuerbares_Methanol.pdf (accessed: Apr. 28 2026).

- [40] TEGEWA, *Eine kurze Einführung in die Welt der Tenside*. [Online]. Available: https://www.tegewa.de/wp-content/uploads/2018/09/Tensid_Broschuere_2014_deutsch.pdf (accessed: Apr. 28 2026).
- [41] Umweltbundesamt, *Implementierung von Nachhaltigkeitskriterien für die stoffliche Nutzung von Biomasse im Rahmen des Blauen Engel*. [Online]. Available: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-08-19_texte_89-2019_be_biomassenutzung_schmierstoffe.pdf (accessed: Apr. 28 2026).
- [42] Fraunhofer Materials, *Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft im Bauwesen: Diskussionspapier*. [Online]. Available: https://www.materials.fraunhofer.de/content/dam/materials/dokumente/broschueren_prospekte/Diskussionspapier%20Ressourceneffizienz-Resourceffizienz-2024-11-Einzelseiten-150dpi.pdf
- [43] FNR, *FAQ Kohlenstoffspeicher Wald und Holz in Zahlen*. Accessed: Apr. 24 2026. [Online]. Available: <https://wald.fnr.de/wissen/themendossiers/kohlenstoffspeicher/faq-kohlenstoffspeicher-wald-und-holz-in-zahlen>
- [44] Umweltbundesamt, *Stoffströme Altholzverwertung in Deutschland*. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/altholz#verwertung-und-produktion-in-deutschland> (accessed: May 1 2026).
- [45] Umweltbundesamt, *Evaluierung der Altholzverordnung im Hinblick auf eine notwendige Novellierung*. [Online]. Available: https://www.umweltbundesamt.de/system/files/medien/479/publikationen/texte_95-2020_evaluierung_der_altholzverordnung_im_hinblick_auf_eine_notwendige_novellierung.pdf (accessed: May 1 2026).
- [46] W. Kalusche, *Vergleich Holzbau und Massivbau - Grundflächen, Bauwerkskosten, Bauzeiten: 2. vollständig aktualisierte und erweiterte Fassung: Sonderband S6 Holzbau*. Stuttgart. Accessed: Feb. 24 2026. [Online]. Available: https://bki-files.de/downloads/objektdaten/S6/Vergleich_Holzbau_Massivbau_Grundflaechen_Bauwerkskosten_Bauzeiten_ProfKalusche.pdf
- [47] U. Mantau, Ed., *Holzrohstoffbilanzierung - Kreislaufwirtschaft und Kaskadennutzung: 20 Jahre Rohstoffmonitoring Holz*. Gülzow-Prüzen: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), 2023. [Online]. Available: <https://edocs.tib.eu/files/e01fn24/1905202296.pdf>
- [48] Volker Schade, *HMI Marktbilanz: Forst und Holz 2023: Deutschland*.
- [49] M. Banse, K. Zander, T. Babayan, S. Bringezu, L. Dammer, and V. e. a. Egenolf, "Eine biobasierte Zukunft in Deutschland - Szenarien und gesellschaftliche Herausforderungen," Thünen-Institut, 2020.
- [50] D. Jochem, S. Glasenapp, and H. Weimar, "Einschlagsrückrechnung Thünen," 2026. Accessed: Apr. 15 2026. [Online]. Available: https://www.thuenen.de/media/institute/wf/HM_div_Statistik_Dateien/Dateien_-_Bilanzen_-_Tabellen/Wald/Einschlagrueckrechnung/de_tab_Einschlagrueckrechnung_Einschlag_und_Verwendung.pdf
- [51] F. Schier and H. Weimar, "Holzmarktmodellierung - Szenarienbasierte Folgenabschätzung verschiedener Rohholzangebotssituationen für den Sektor Forst und Holz," Thünen-Institut, 2018.
- [52] O. Hirschler, B. Osterburg, H. Weimar, and S. Glasenapp, "Peat replacement in horticultural growing media: Availability of bio-based alternative materials," Thünen Working Paper 190, 2022. Accessed: Apr. 14 2026. [Online]. Available: https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn064753.pdf

- [53] BMLEH, "Torffrei gärtnern, Klima schützen: Die Torfminderungsstrategie des BMEL," 2022. Accessed: Feb. 15 2026. [Online]. Available: https://www.bmleh.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/torf-minderungsstrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=6
- [54] B. Schumacher et al., "Biomethan & Torfersatzstoff aus Pappelholz (Pap1Gas)," 2022. Accessed: Apr. 15 2026. [Online]. Available: <https://www.fnr.de/index.php?id=11150&fkz=22038318>
- [55] O. Hirschler, *Interview und Datenaustausch zur Integration von Torfersatzstoffen im Rahmen von Sobio2*. Online.
- [56] G. Schmilewski, "Kultursubstrate und Blumenerden – Eigenschaften, Ausgangsstoffe, Verwendung," 2018. Accessed: Apr. 15 2026. [Online]. Available: <https://substratbuch.ivg.org/static/flipbook/flipbook.html#p=1>
- [57] M. Stucki, S. Wettstein, A. Mathis, and S. Amrein, "Erweiterung der Studie «Torf und Torfersatzprodukte im Vergleich»: Eigenschaften, Verfügbarkeit, ökologische Nachhaltigkeit und soziale Auswirkungen," 2019. Accessed: Apr. 15 2026. [Online]. Available: <https://digitalcollection.zhaw.ch/server/api/core/bitstreams/1d4cb217-8a87-4c19-8ffc-bc04efd5f0d0/content>
- [58] S. Wichmann, M. Krebs, S. Kumar, and G. Gaudig, "Paludiculture on former bog grassland: Profitability of Sphagnum farming in North West Germany. Mires and Peat 26 (08), 18p," *Mires and Peat* 26 (08), 2020.
- [59] D. Thrän et al., "The role of BECCS in Germany: a key to sustainable and permanent CO₂ removal?," *Environ. Res. Commun.*, vol. 7, no. 9, p. 91010, 2025, doi: 10.1088/2515-7620/ae02ee.
- [60] R. Wollnik et al., "Factsheets for bio-based carbon dioxide removal options in Germany," 2025.
- [61] Umweltbundesamt, *Daten der Treibhausgasemissionen des Jahres 2025 nach KSG*. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/treibhausgas-emissionen>
- [62] FNR, "Anbau und Verwendung nachwachsender Rohstoffe in Deutschland," 2025. Accessed: Apr. 14 2026. [Online]. Available: https://www.fnr.de/fileadmin/Statistik/Statistikbericht_der_FNR_2025_web.pdf
- [63] K. Chan, M. Millinger, U. A. Schneider, and D. Thrän, "How diet portfolio shifts combined with land-based climate change mitigation strategies could reduce climate burdens in Germany," *Journal of Cleaner Production*, vol. 376, p. 134200, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.134200.
- [64] Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), "Bio-Strategie 2030: Nationale Strategie für 30 Prozent ökologische Land- und Lebensmittelwirtschaft bis 2030," Referat 712 a – Ökologische Lebensmittelwirtschaft, Berlin, Jan. 2024. Accessed: Apr. 16 2026. [Online]. Available: https://www.bmleh.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/bio-strategie-2030.pdf?__blob=publicationFile&v=10
- [65] Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL), Ed., *Faustzahlen für den Ökologischen Landbau*. Darmstadt, 2015.
- [66] Bundesregierung, "Transformation gemeinsam gerecht gestalten: Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie - Weiterentwicklung 2025," Berlin, Jan. 2025. Accessed: Apr. 16 2026. [Online]. Available: <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975228/2335292/3962877378d74837d4f4c611749b6172/2025-05-13-dns-2025-data.pdf?download=1>

- [67] J. Loisel and A. Gallego-Sala, "Ecological resilience of restored peatlands to climate change," *Commun Earth Environ*, vol. 3, no. 1, 2022, doi: 10.1038/s43247-022-00547-x.
- [68] J. Repenning *et al.*, "Klimaschutzinstrumente-Szenario 2030 (KIS-2030) zur Erreichung der Klimaschutzziele 2030: Teilbericht," Öko-Institut e.V.; Fraunhofer Institute for Systems and Innovation; Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien (IREES), Dessau-Roßlau, Jul. 2023. Accessed: Apr. 16 2026. [Online]. Available: https://www.umweltbundesamt.de/system/files/medien/11850/publikationen/2023_07_04_climate_change_30_2023_klimaschutzinstrumente.pdf
- [69] *Verordnung (EU) 2024/1991 über die Wiederherstellung der Natur und zur Änderung der Verordnung (EU) 2022/869.: Verordnung (EU) 2024/1991*, 2024. Accessed: Apr. 21 2026. [Online]. Available: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202401991
- [70] Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), "Der Wald in Deutschland: Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur," Berlin, 2014. Accessed: Apr. 17 2026. [Online]. Available: https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn054444.pdf
- [71] Eurostat, "Waldfläche (EFA-Fragebogen)," 2024. Accessed: Apr. 21 2026. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/for_area_efa_custom_9301747/default/table?lang=de
- [72] *Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien - Erneuerbare Energien-Gesetz: EEG 2023*, 2014. Accessed: Apr. 16 2026. [Online]. Available: https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/EEG_2023.pdf
- [73] M. Banse *et al.*, "Abschlussbericht Bausteine für eine Biomassestrategie: Biomassepotenziale und Erwartungen an ihre künftige Nutzung (BIOSTRAT)," 2023. Accessed: https://www.thuenen.de/78f9ad713c9aee07874a22ff34f48d85fe2e16c2/0c28d600-e5fb-e73c-1be6-3e0395ec75ac/tap2_THXlr2_dec/Abschlussbericht_BIOSTRAT.pdf. [Online]. Available: 22.3.2026
- [74] R. Harthan *et al.*, "Ambitionierte Pfade für Treibhausgasneutralität in Deutschland: CARESupreme und CARETech," 2025.
- [75] M. Pfeiffer, K. Hennenberg, and H. Böttcher, "Klimasensitive Waldmodellierung: Szenarienanalyse zu Klimaschutzpotenzialen im Wald – Bewertung der Ergebnisse des CARESupreme-Szenarios," Dessau-Roßlau, 2026. Accessed: Mar. 15 2026. [Online]. Available: https://www.umweltbundesamt.de/system/files/medien/11850/publikationen/2026-04/26_2026_CC.pdf
- [76] F. Naegeli de Torres *et al.*, "DBFZ Resource Database: DE-Biomass Monitor. Biomass Potentials and Utilization of Biogenic Wastes and Residues in Germany 2010-2020," 2024.
- [77] *Richtlinie (EU) 2023/2413 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Oktober 2023 zur Änderung der Richtlinie (EU) 2018/2001, der Verordnung (EU) 2018/1999 und der Richtlinie 98/70/EG im Hinblick auf die Förderung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Aufhebung der Richtlinie (EU) 2015/652 des Rates*, 2023. Accessed: Mar. 15 2026. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:32023L2413>
- [78] BLE, "Evaluations- und Erfahrungsbericht für das Jahr 2022," 2024. Accessed: Apr. 22 2026. [Online]. Available: https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/Klima-Energie/Nachhaltige-Biomasseherstellung/Evaluationsbericht_2022.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- [79] BLE, "Nutzung von Biokraftstoffen in 2023 nach Art, Herkunft, Herstellungsort und Emissionen", E-Mail und Excel-Datei (Datenanfrage 1), Nov. 2024.

- [80] BLE, "Nutzung von Biokraftstoffen in 2023 nach Art, Herkunft, Herstellungsort und Emissionen", E-Mail und Excel-Datei (Datenanfrage 2), Dec. 2024.
- [81] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, *Nationale Moorschutzstrategie*. [Online]. Available: https://www.bundesumweltministerium.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/nationale_moorschutzstrategie_bf.pdf (accessed: Apr. 28 2026).
- [82] Umweltbundesamt, "Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol 2022 National Inventory Report for the German Greenhouse Gas Inventory 1990 – 2020," *Climate Change* 25, 2022. Accessed: Apr. 23 2026. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/submission-under-the-united-nations-framework-7>
- [83] A. Nordt, S. Wichmann, J. Risse, J. Peters, and A. Schäfer, "Potenziale und Hemmnisse für Paludikultur: Hintergrundpapier zur Studie „Anreize für Paludikultur zur Umsetzung der Klimaschutzziele 2030 und 2050“,“ 2022. Accessed: Apr. 23 2026. [Online]. Available: <https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/DE/projektmechanismen/paludikultur-potenziale-hemmnisse.html>
- [84] F. Närmann *et al.*, "Klimaschonende, biodiversitätsfördernde Bewirtschaftung von Niedermoorböden," 2021. Accessed: Sep. 22 2022. [Online]. Available: <https://www.bfn.de/sites/default/files/2021-11/Skript616.pdf>
- [85] F. Tanneberger *et al.*, "Towards net zero CO₂ in 2050: An emission reduction pathway for organic soils in Germany," *mires peat*, vol. 27, p. 5, 2021, doi: 10.19189/MaP.2020.SNPG.StA.1951.
- [86] Susanne Abel, "Szenarien für die Moor-Transformation von Grünland und Acker und Ableitung von Flächen & Biomasse", Email vom 15.12.2022.
- [87] K. Steinmüller, *Grundlagen und Methoden der Zukunftsforschung*. [Online]. Available: https://steinmuller.de/en/zukunftsforschung/buecher/werkstattberichte/WB_21_Grundlagen.pdf (accessed: Jul. 7 2023).
- [88] Deutscher Holzwirtschaftsrat, *Positionspapier. Für Konjunktur und Klimaschutz: 50 % Holzbau bis 2050*. [Online]. Available: https://v2.verband-crm.de/docs/1677-ca/dhwr_positionspapier_zum_konjunkturprogramm.pdf (accessed: Apr. 17 2026).
- [89] Holzbau Deutschland – Bund Deutscher Zimmermeister im Zentralverband des Deutschen Baugewerbes e. V., *LAGEBERICHT 2025. Zimmerer/Holzbau*. [Online]. Available: https://www.holzbau-deutschland.de/fileadmin/user_upload/eingebundene_Downloads/2025-06-06_Lagebericht_2025_webversion.pdf (accessed: Apr. 30 2026).
- [90] Bundesverband energieeffiziente Gebäudehülle e.V., *Sanierungsquote*. [Online]. Available: <https://buveg.de/sanierungsquote/> (accessed: Apr. 30 2026).

PUBLIKATIONEN

Bisher erschienene Reports:

- DBFZ Report Nr. 55** Entwicklung und Anwendung neuartiger SCR-Katalysatoren zur Niedertemperaturentstickung von Abgasen aus der thermo-chemischen Konversion biogener Festbrennstoffe – Dissertationsschrift
- DBFZ Report Nr. 54** Transition towards a bioeconomy: discourses, vantage points, and actors' contextualized institutional work – Doctoral thesis
- DBFZ Report Nr. 53** Hydrothermal Conversion of Hemicellulose Sugars for the Production of Furfural – Doctoral thesis
- DBFZ Report Nr. 52** Strategies for Demand Side Management in Biorefineries – Exploring New Frontiers in Enhancing Load Flexibility and Optimization – Doctoral thesis
- DBFZ Report Nr. 51** Emissionsminderungsstrategien zur umweltverträglichen Verbrennung (UVV) auf Basis von aktuellen Forschungsergebnissen
- DBFZ Report Nr. 50** Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland - Report zum Anlagenbestand Biogas und Biomethan
- DBFZ Report Nr. 49** Modellregion Bioökonomie im Mitteldeutschen und Lausitzer Revier
- DBFZ Report Nr. 48** Adsorption and Membrane Filtration for the Separation and Valorization of Hemicellulose from Organosolv Beechwood Hydrolyzates – Doctoral thesis
- DBFZ Report Nr. 47** WasteGui: Guideline for organic waste treatment in East Africa
- DBFZ Report Nr. 46** Wasserstoff aus Biomasse
- DBFZ Report Nr. 45** Status-Quo of organic waste collection, transport and treatment in East Africa and Ethiopia
- DBFZ Report Nr. 44** Monitoring erneuerbarer Energien im Verkehr
- DBFZ Report Nr. 43** Beitrag zur Optimierung des Pelletierverhaltens von Gärresten und Landschaftspflegeheu sowie deren Mischungen
- DBFZ Report Nr. 42** Rahmenbedingungen für einen optimierten Betrieb von kleinen biomassebasierten BHKW
- DBFZ Report Nr. 41** National Resource Monitoring for Biogenic Residues, By-products and Wastes – Development of a Systematic Data Collection, Management and Assessment for Germany
- DBFZ Report Nr. 40** Basics of Anaerobic Digestion - Biochemical Conversion and Process Modelling
- DBFZ Report Nr. 39** Optimierte Regelungsstrategien für Pellet-Solar-Kombiheizanlagen zur Steigerung der Systemeffizienz bei gleichzeitiger Minimierung der Energiekosten
- DBFZ Report Nr. 38** Hydrothermal processing of biogenic residues in Germany - A technology assessment considering development paths by 2030
- DBFZ Report Nr. 37** Economic assessment of biogas plants as a flexibility option in future electricity systems
- DBFZ Report Nr. 36** BioplanW: Systemlösungen Bioenergie im Wärmesektor im Kontext zukünftiger Entwicklungen
- DBFZ Report Nr. 35** Leitfaden zur Substrat- und Effizienzbewertung an Biogasanlagen
- DBFZ Report Nr. 34** Entwicklung einer Methode zur Verwendung der Daten des Schornsteinfegerhandwerks für die energiewirtschaftliche Berichterstattung - Dissertationsschrift
- DBFZ Report No. 33** Recommendations for reliable methane emission rate quantification at biogas plants
- DBFZ Report Nr. 32** Wärmenutzung von Biogasanlagen
- DBFZ Report Nr. 31** Die Niedertemperatursynthese von Methan in Thermoöl-temperierten Plattenreaktoren – Dissertationsschrift
- DBFZ Report Nr. 30** Anlagenbestand Biogas und Biomethan – Biogaserzeugung und -nutzung in Deutschland
- DBFZ Report Nr. 29** Effiziente Bioenergie für Regionen - Ergebnisse der technisch-ökonomischen Begleitforschung zur Fördermaßnahme Bioenergie-Regionen 2012-2015
- DBFZ Report Nr. 28** Potenziale zur Steigerung der Leistungsfähigkeit von Biogasanlagen - Energetische Effizienz von Repoweringmaßnahmen
- DBFZ Report Nr. 27** Neuartiger emissionsarmer Kaminofen (DBU-NEKO)
- DBFZ Report Nr. 26** Bewertung technischer und wirtschaftlicher Entwicklungspotenziale künftiger und bestehender Biomasse-zu-Methan-Konversionsprozesse - Dissertationsschrift
- DBFZ Report Nr. 25** Nachrüstlösung zum katalytischen Abbau von gasförmigen organischen Emissionen aus Kaminöfen
- DBFZ Report Nr. 24** Biomasse zur Wärmeerzeugung – Methoden zur Quantifizierung des Brennstoffeinsatzes
- DBFZ Report Nr. 23** Technisch-ökonomische Begleitforschung des Bundeswettbewerbes „Bioenergie-Regionen“
- DBFZ Report Nr. 22** Die Biokraftstoffproduktion in Deutschland – Stand der Technik und Optimierungsansätze
- DBFZ Report Nr. 21** Entwicklung der Förderung der Stromerzeugung aus Biomasse im Rahmen des EEG
- DBFZ Report Nr. 20** KlimaCH4 – Klimaeffekte von Biomethan
- DBFZ Report Nr. 19** Hy-NOW – Evaluierung der Verfahren und Technologien für die Bereitstellung von Wasserstoff auf Basis von Biomasse
- DBFZ Report Nr. 18** Kleintechnische Biomassevergasung – Option für eine nachhaltige und dezentrale Energieversorgung
- DBFZ Report Nr. 17** Grünlandenergie Havelland – Entwicklung von übertragbaren Konzepten zur naturverträglichen energetischen Nutzung von Gras und Schilf am Beispiel der Region Havelland
- DBFZ Report Nr. 16** Algae biorefinery – material and energy use of algae
- DBFZ Report Nr. 15** Politics and Economics of Ethanol and Biodiesel Production and Consumption in Brazil
- DBFZ Report Nr. 14** Holzpelletbereitstellung für Kleinfeuerungsanlagen
- DBFZ Report Nr. 13** Basisinformationen für eine nachhaltige Nutzung von landwirtschaftlichen Reststoffen zur Bioenergiebereitstellung
- DBFZ Report Nr. 12** Monitoring zur Wirkung des Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) auf die Entwicklung der Stromerzeugung aus Biomasse
- DBFZ Report Nr. 11** Monitoring Biokraftstoffsektor
- DBFZ Report Nr. 10** Ermittlung des Verbrauchs biogener Festbrennstoffe im Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD-Sektor) – Endbericht

Weitere Informationen und kostenfreier Download:
www.dbfz.de/reports

**DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum
gemeinnützige GmbH**
Torgauer Straße 116
04347 Leipzig
Phone: +49 (0)341 2434-112
E-Mail: info@dbfz.de

www.dbfz.de