

This is the accepted manuscript version of the contribution published as:

Thrän, D., Dotzauer, M., Meisel, K., Szarka, N., Jordan, M. (2023):
Auch 2050 dominiert Holzeinsatz im Wärmebereich: Stand und Perspektiven der energetischen Holznutzung in Deutschland vor dem Hintergrund angestrebter Klimaneutralität
Holz-Zentralblatt **149** (38), 619 - 621

The publisher's version is available at:

<https://holz-zentralblatt.de/>

Auch 2050 dominiert Holzeinsatz im Wärmebereich

Stand und Perspektiven der energetischen Holznutzung in Deutschland vor dem Hintergrund angestrebter Klimaneutralität

Von Daniela Thrän¹, Martin Dotzauer², Kathleen Meisel³, Nora Szarka⁴ und Matthias Jordan⁵, Leipzig

Holz ist als Energieträger in vielen Ländern der Welt etabliert. Wenn er in gleichem Umfang nachwächst, in dem er genutzt wird, gelten die bei der Verbrennung emittierten CO₂-Emissionen als klimaneutral. Durch den Ausbau der Nutzung in den vergangenen Jahren und zunehmenden Erwartungen an den Beitrag des Waldes und des Holzes an den Klimaschutz sind die verfügbaren Mengen für die energetische Nutzung klar begrenzt. Vor diesem Hintergrund ist es notwendig, Nutzungskaskaden zu verlängern und verstärkt Abfallholz energetisch zu nutzen und außerdem den energetischen Holzeinsatz verstärkt in die Bereiche zu lenken, wo Bioenergie für die Transformation hin zu einem klimaneutralen Energiesystem bis 2045 bestmöglich unterstützen kann. Um diese Perspektiven auszuloten, wurden in einem Forschungsvorhaben unter Leitung der Deutschen Biomasseforschungszentrum gGmbH basierend auf der aktuellen energetischen Nutzung Zukunftsszenarien entwickelt und modelliert. Sie zeigen, dass eine substanzielle Weiterentwicklung der energetischen Holznutzung notwendig ist, um effizient zur Energiewende beizutragen.

Die energetische Nutzung von Holz hat sich in Deutschland seit Beginn der aktiven Förderung erneuerbarer Energien in den 1990er Jahren mehr als verdreifacht und umfasste im Jahr 2020 629 PJ/a (Abbildung 1). Durch zunehmende Erschließung von Rest- und Abfallholz sowie steigendes Rohholzaufkommen (zwischen 2000 und 2018 um 41%) und -entnahme (zwischen 2000 und 2018 um 29%) war diese Zunahme bei gleichzeitig moderater Steigerung der stofflichen Nutzung möglich; so ist die Holzhandelsbilanz von Deutschland weitgehend ausgeglichen. Zunehmende Nutzungskonkurrenzen werden allerdings von der Holzverarbeitenden Industrie, aber auch für den Beitrag des Waldes als zusätzlicher Kohlenstoffspeicher beklagt (Acatech 2022; FNR 2021).

Die energetische Holznutzung wird heute in ungefähr 11,5 Mio. Einzelfeuerungsanlagen in Form von Kaminöfen und Holzkesseln betrieben, wovon 680.000 Installationen mit Holzpellets beheizt werden; außerdem sind etwa 1 Mio. Feuerungsanlagen für feste Biomasse sowie gut 700 Holzvergaser und -heizkraftwerke installiert (Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerk 2022; DEPI 2023; DBFZ 2022). Eingesetzt werden in Summe insgesamt 60 Mio. m³ im Jahr 2020, davon ein Drittel Derbholz, die Hälfte unterschiedliche Reststoffe und ein Viertel Altholz (Abbildung 2). Holz aus Kurzumtriebsplantagen spielt keine Rolle. Der aktuelle Anlagenbestand wurde in vielen Fällen durch Investitionshilfen des Marktanzreizprogramms bzw. des Gebäude-Energie-Gesetzes (GEG) und durch die Vergütung des eingespeisten Stroms im Rahmen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) unterstützt. Insgesamt wurden im Jahr 2021

1) Prof. Dr. Daniela Thrän ist stellvertretende wissenschaftliche Geschäftsführerin des DBFZ und Leiterin des Forschungsschwerpunktes „Systembeitrag von Biomasse“. Darüber hinaus leitet sie das Department Bioenergy (BEN) am Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) und den Lehrstuhl Bioenergiesysteme an der Universität Leipzig. Zusätzlich ist Thrän in verschiedenen wissenschaftlichen Gremien und Ausschüssen (u.a. Bioökonomierat der Bundesregierung) tätig.
 2) Martin Dotzauer ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Deutschen Biomasseforschungszentrum, Leipzig, Bereich Bioenergiesysteme.
 3) Dr. Kathleen Meisel ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Deutschen Biomasseforschungszentrum, Bereich Bioenergiesysteme.
 4) Dr. Nora Szarka ist Arbeitsgruppenleiterin am Deutschen Biomasseforschungszentrum, Bereich Bioenergiesysteme.
 5) Dr. Matthias Jordan ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, Department Bioenergie.

durch die Wärmebereitstellung aus fester Biomasse in den privaten Haushalten und dem GHD-Sektor THG Emissionen in Höhe von etwa 17,3 Mio. t CO₂-Äq. und in der Industrie 7,4 Mio. t CO₂-Äq. vermieden (UBA 2022a).

Holzpotenziale für die energetische Nutzung

Die Frage der nachhaltigen Verfügbarkeit von Holz für die energetische Nutzung ist aktuell sehr umstritten. Unterschiedliche Definitionen von Nachhaltigkeit führen zu unterschiedlichen Erwartungen an die Verfügbarkeit. Die Diskussionspunkte sind vielfältig: Zum einen wird zur Erreichung des Klimaschutzziels im Sektor Landnutzung (LULUCF) bis 2045 eine vermehrte Stilllegung von Waldflächen gefordert, gleichzeitig sehen Forstwirte den Vorratsaufbau in der Langfristperspektive kritisch (Dieter 2018). Waldschäden durch zunehmende Dürren reduzieren die Holzverfügbarkeit und erfordern andererseits einen aktiven Waldumbau. Die Holzbastrategie und die Strategien zur Defossilisierung der Chemieindustrie – beides notwendige Maßnahmen für die Erreichung der Klimaschutzziele – erhöhen den Holzbedarf für die stoffliche Nutzung. Die Nutzung von Holz in mehrstufigen Kaskaden wird zwar einhellig gefordert, jedoch aktuell durch Vorgaben im Baurecht, Abfallrecht etc. gehemmt (Acatech 2022). Die Deckung der zunehmenden Nachfrage durch Holzimporte ist möglich, geht aber mit weiteren Nachhaltigkeitsrisiken einher, die durch Zertifizierungssysteme zwar abgemindert, aber nicht aufgelöst werden können (Majer et al. 2023; Alecci 2023). Vor diesem Hintergrund sollte die Verfügbarkeit von Holz für die energetische Nutzung eher sinken. Die finanzielle Förderung von Waldholz zur Energiebereitstellung erscheint nicht mehr zeitgemäß. Insbesondere die

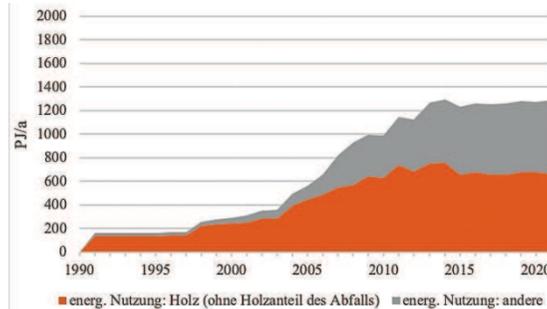


Abbildung 1 Entwicklung des Biomasseeinsatzes für die Energiebereitstellung in Deutschland (eigene Abschätzung auf Basis von AGEE-Stat 2022).

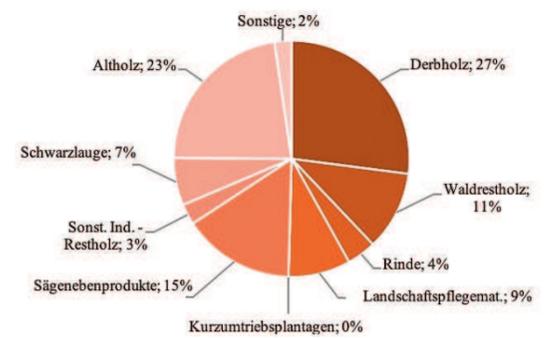


Abbildung 2 Rohstoffbilanz der energetischen Holzverwendung im Jahr 2020 (UBA 2022b)

Tabelle 1 Auszug aus den betrachteten Szenarien; Gesamtübersicht*

Szenarien	Referenz-szenario	Sz. 1	Sz. 2	Sz. 3	Sz. 4
Bezeichnung	Referenz moderat	Politik/ hoher Preis	Technologie/ Push in Entwicklung	Biomasse/ Nur Reststoff-mobilisierung	Biomass/ Max. Biomasse-verfügbarkeit
THG-Ziel der Sektoren (exkl. negative Emissionen)	0 Mio. t CO ₂ -Äq				
CO ₂ -Preis ETS [Euro/t]	150	500	150	150	150
Reststoffverfügbarkeit (biomassespezifisch)	Basis	Basis	Basis	erhöht	erhöht
Anbauflächen für Bioenergie [Mio. ha]	2,3	2,3	2,3	0	4,7
Import Reststoffe/ Biokraftstoffe [% des Potenzials heimischer Bioenergie]	50	50	50	50	100
Import Energiepflanzen/ Biokraftstoffe	Status quo 2020	Status quo 2020	Status quo 2020	keine Importe quo 2020	Status quo 2020
Endenergieverbrauch	UBA Greenlate				
Investitionskosten (technologiespezifisch)	Basis	Basis	Minimum	Basis	Basis
Wirkungsgrade (technologiespezifisch)	Basis	Basis	Maximum	Basis	Basis

*siehe Meisel & Jordan 2023; Meisel et al.)

Nachhaltigkeit der Holznutzung in bestehenden fossilen Kraftwerken oder neuen großen Verbrennungsanlagen ist kritisch zu hinterfragen (DBFZ 2021).

Perspektiven: Das SoBio-Projekt

Das Ziel des Projektes „Szenarien einer optimalen energetischen Biomassenutzung im Energiesystem (SoBio)“ war es unter anderem, eine Langfriststrategie für die optimale energetische Nutzung von Biomasse im zukünftigen deutschen Energiesystem bis 2050 zu erarbeiten, wobei ein klimaneutrales Energiesystem ab 2045 unterstellt wird. Wesentliche Forschungsfragen waren:
 ♦ Was ist die optimale Rolle der begrenzten Biomasse in der Energiewende, wie ändert sie sich unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen und über die Zeit?
 ♦ Was sind die wettbewerbsfähigsten Technologien und die vorrangigen Zielmärkte für Biomasse (z.B. Hochtemperaturwärme Industrie, Flugverkehr)?
 Zur Beantwortung dieser Forschungsfragen wurden verschiedene Zukunftsszenarien definiert und mit Hilfe des Wettbewerbs- und Optimierungsmodells „BenOpt“ analysiert. Die

wichtigsten Annahmen und Ergebnisse werden nachfolgend dargestellt. Die ausführlichen Ergebnisse sind unter Meisel & Jordan 2023; Meisel et al.; Jordan et al. nachlesbar.

Modellansatz

BenOpt ist ein klassisches lineares Energiesystemoptimierungsmodell, wie es vielfach auf diesem Forschungsgebiet eingesetzt wird (Millinger et.al. 2022; Jordan et.al. 2023). Es verteilt das limitierte Biomassepotenzial in Deutschland über alle Energiesektoren (Strom, Wärme, Verkehr) im Wettbewerb mit fossilen und anderen erneuerbaren Optionen optimal für die Erreichung eines Langfristziels (Abbildung 3). Das Modell berücksichtigt dabei Rohstoffe, Umwandlungstechnologien, Fahrzeugtypen und detaillierte Nachfragesektoren innerhalb des Wettbewerbs, u.a. zum Ausgleich der fluktuierenden erneuerbaren Energien in der Stromerzeugung, Deckung des Wärmebedarfs in den Sektoren Industrie, Gebäude und Fernwärme sowie die sechs verschiedenen Teilspektoren im Transportsektor. Die berücksichtigten 263 Einzeltechnologien umfassen auch Kombinationen mit anderen erneuerbaren Energien (hybride Versorgungskonzepte) und sind in einer SQL-Datenbank

„BET.db“ beschrieben (Dotzauer et al. 2023) und auf einem Zenodo-Repository verfügbar (Dotzauer 2023).

Die Infrastrukturkosten für Transport-, Strom-, Wärme- oder Wasserstoffnetze werden nicht berücksichtigt. Ein definiertes Klimaziel, in diesem Fall ein Szenarien a₂-gängiges Treibhausgas Emissionsbudget, muss als Restriktion erfüllt werden. Der Zeithorizont des BENOPT-Modells beträgt 31 Jahre von 2020 bis 2050, mit einer flexiblen Zeitauflösung (d. h. bis zu einer stündlichen Auflösung im Stromsektor und einer jährlichen Auflösung in anderen Bereichen). Als Startpunkt wird die aktuelle energetische Nutzung berücksichtigt.

Szenarien

Das derzeitige und künftige Energiesystem, in dem Bioenergie und andere erneuerbare und fossile Energieträger als Erfüllungsoptionen beitragen können, wird im Modell über Parameter beschrieben. Nachfolgend werden die Langfristszenarien dargestellt. Für diese werden Parameterwerte szenarienspezifisch vom Startjahr 2020 bis 2050 festgesetzt. Einige Parameter bleiben über die Zeit und in den verschiedenen Szenarien konstant, andere variieren. Die wichtigste Zielbedingung ist das Einhalten des Treibhausgasemissionsziels von Null CO₂-Äquivalenten in Summe über die betrachteten Sektoren Energie, Gebäude, Industrie (energiebedingt) und Verkehr. Die zulässigen Treibhausgasemissionen, die aus dem Klimaschutzgesetz stammen bzw. abgeleitet sind, bilden eine Randbedingung im Modell. Sie sinken von 602 Mio. t CO₂-Äquivalenten in 2020 über 301 Mio. t CO₂-Äquivalent in 2030 und 18 Mio. t CO₂-Äquivalent in 2045 auf Null in 2050 (abgeleitet aus Bundes-Klimaschutzgesetz 2021; Dena 2021). Bilanziert wurden dabei ausschließlich positive Treibhausgasemission. Negative Emissionen, wie beispielsweise über CCS (carbon capture and storage) oder BECCS (bioenergy with carbon capture and storage) wurden nicht berücksichtigt. In den Szenarien werden im Wesentlichen veränderte Biomasseverfügbarkeiten, eine veränderte Ausgestaltung von Politikinstru-

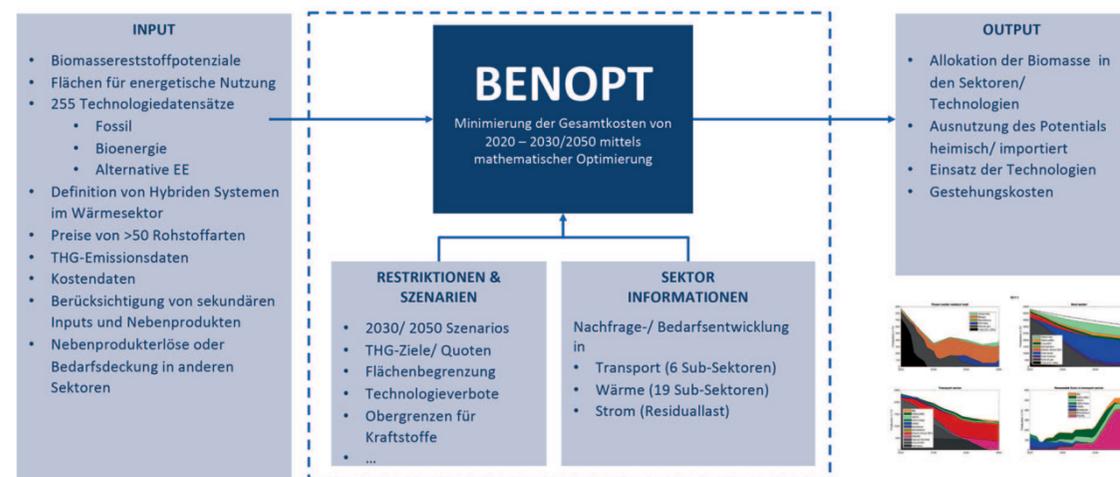


Abbildung 3 Skizzierung der Input-/ Outputdaten des BenOpt-Modells

Fortsetzung auf Seite

Auch 2050 dominiert Holzeinsatz im Wärmebereich

Fortsetzung von Seite 000

menten und unterschiedliche Technologieentwicklungen (siehe Tabelle 1) betrachtet.

Biomassepotenziale

Als Ausgangsstoffe für die Bioenergieoptionen wurden verschiedene Rest- und Abfallstoffe, auf einer begrenzten Anbaufläche verfügbare Anbaukulturen bzw. Energiepflanzen und sonstige Biomassen betrachtet. Zu den sonstigen Biomassen zählen Scheitholz aus privaten Klein- und Kleinstwäldern für die nicht-kommerzielle Nutzung sowie Algen und Paludikulturen (land- und forstwirtschaftliche Nutzung nasser Moorstandorte). Die Potenzialabschätzung der Rest- und Abfallstoffe erfolgte in Abhängigkeit der Entwicklung der land- und forstwirtschaftlichen Flächen und der Bevölkerungsentwicklung. Heimische Anbauflächen für die Bioenergie, die Mengen an Scheitholz, Paludikulturen und Algen sowie Biomasse- und Bioenergieimporte wurden szenariospezifisch begrenzt. In Abbildung 4 sind beispielhaft die heimischen Potenziale für Szenario 1 dargestellt: holzartige Biomasse dominiert die Potenziale an Rest- und Abfallstoffen mit etwa 31,5 Mio. t Trockenmasse in 2050; zusätzlich wurden Importpotenziale von bis zu 20 Mio. t Trockenmasse je nach Szenario angenommen. Die Größe der verfügbaren nationalen Anbaufläche von derzeit 2,3 Mio. ha wird unter Berücksichtigung einer veränderten Ernährungsweise und der Zunahme eines ökologischen Landbaus bis 2050

gas aus vergärbaren Biomassen sowie geringere Mengen Altholz in Altholzheizkraftwerken die kosteneffizienteste Option, wenn nach 2030 der Anteil Erneuerbarer Energien über 80 % steigt.

◆ Im Verkehrssektor erweist sich die Elektrifizierung des Straßen- und Schienenverkehrs als wettbewerbsfähigste Option, gefolgt von Biokraftstoffen und strombasierten Kraftstoffen. Langfristig wird lignozellulosehaltige Biomasse kostenoptimal als Biokerosin im Flugverkehr und auch als verflüssigtes synthetisch erzeugtes Biomethan im Schiffsverkehr eingesetzt.

Die Biomasseverfügbarkeit ist für den Beitrag zur Energiewende entscheidend. Die politische Entscheidung über die Einbeziehung von Energiepflanzen beeinflusst u. a., ob Bioenergie als wettbewerbsfähigste Option den Prozesswärmebedarf über 200 °C vollumfänglich transformieren kann oder lediglich als Brückentechnologie mit langfristigem Wechsel auf Wasserstoff und dessen Folgeprodukte eingesetzt wird (Tabelle 2). Je weniger Biomasse verfügbar ist, desto stärker wird der Energiebedarf durch Produktion/Import von Power-to-X-Energieträgern gedeckt, was zu erheblichen Mehrkosten im Energiesystem führt (Jordan et al.). Im Gegensatz dazu zeigt ein Technologie-Push, der sich in technologiespezifischen minimalen Investitionskosten und maximal möglichen Wirkungsgrade ausdrückt, nur eine geringe Wirkung auf die Ergebnisse (Tabelle 2).

Ein hoher CO₂-Preis (ab etwa 300

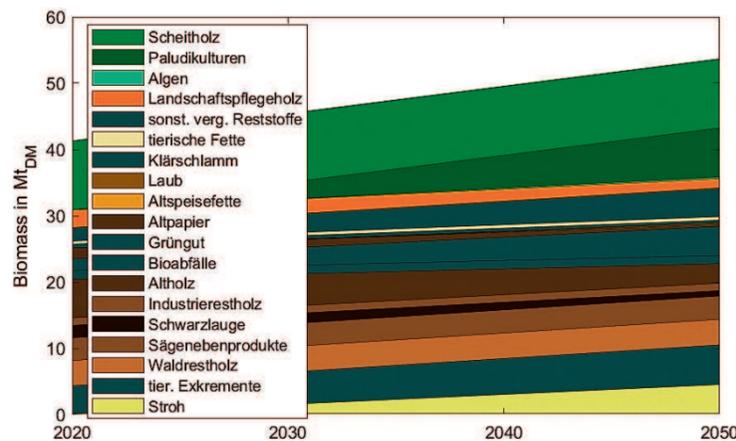


Abbildung 4 Nationale Biomassepotenziale beispielhaft für das Referenzszenario

minimal verändert, die Belegung dieser Fläche ist ein Modellergebnis. Auch ist der Anbau von Kurzumtriebsholz auf den Anbauflächen für Bioenergie eine Wettbewerbsoption. Den Potenzialen werden – je nach Verarbeitungsstufe – verschiedene Biomassepreise zugeordnet: So unterscheiden sich beispielsweise die Preise für Hackschnitzel, Pellets, Briketts oder Stückholz aus Waldrestholz.

Ergebnisse

Biomasse allgemein und Holz im speziellen kann in verschiedensten Anwendungen eingesetzt werden, ist allerdings nur begrenzt verfügbar. Unter der Voraussetzung, den Endenergieverbrauch langfristig zu reduzieren und Biomasse nachhaltig bereit zu stellen, hat Bioenergie ihren kostenoptimalen Nutzen in Bereichen, in denen eine direkte Elektrifizierung nicht oder nur sehr eingeschränkt möglich ist. Insgesamt dominiert auch in 2050 der Holzeinsatz im Wärmebereich (Abbildung 5), allerdings in deutlich veränderten Anwendungsbereichen als sie heute etabliert ist.

◆ Im Wärmesektor wird die größte Menge an Biomasse insgesamt in Form von Hackschnitzeln aus Holzreststoffen und Miscanthus für Hochtemperatur-Industrieanwendungen genutzt. Daneben wird weiterhin Scheitholz, meist aus privaten Klein-(st-)wäldern, in Scheitholzfeuerungen und Pellets vor allem in hybriden System mit Wärmepumpen in Gebäuden eingesetzt.

◆ Für die Stromerzeugung spielt Holz perspektivisch nur eine sehr geringe Rolle: Zur flexiblen Bedarfsdeckung der Residuallast ist der Einsatz von Bio-

Euro/t CO₂ in 2050 mit linearem Anstieg) sorgt verglichen mit einem niedrigeren CO₂-Preis (hier 125 Euro/t) für ein schnelleres Verdrängen der fossilen Optionen und damit für eine schnellere Defossilisierung als die Klimaschutzziele bis 2040 vorgeben. Dennoch sorgt ein hoher CO₂-Preis langfristig für nicht mehr Biomasse im Energiesystem. Zum einen erfolgt zunächst eine Elektrifizierung der relativ einfachen zu elektrifizierenden Sektoren (Straßenverkehr, Wärmepumpen in Gebäuden), zum anderen ist für die schwerer zu defossilisierenden Bereiche die Limitierung des Bioenergieeinsatzes über die Biomasseverfügbarkeit gegeben.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Modellergebnisse zeigen eine starke Nachfrage nach Holz für das Gelingen der Energiewende und präzisieren die prioritären Einsatzbereiche. Die Nutzung von Holz in Mittel- und Hochtemperaturprozessen der Industrie kann demnach einen wichtigen Baustein der industriellen Wärmewende darstellen, während für andere Einsatzgebiete, wie z. B. die heute weit verbreiteten Holzheizsysteme im Gebäudebereich, deutlich günstigere strombasierte Alternativen erwartet werden können. Auch die wiederkehrende Diskussion um die Umrüstung von Kohlekraftwerken für die großskalige Strombereitstellung mit Holz führt zu Pfadabhängigkeiten, die einem optimalen Einsatz der begrenzten Biomasse zuwiderlaufen. Für die Steuerung der Energiewende müssen diese Prioritäten stärker in politischen Instrumenten verankert werden. Hierzu gehört beispielsweise eine

Tabelle 2 Modelloptimierte Allokation der Biomasse im Energiesystem 2050

Endenergie aus Biomasse in 2050 in	Referenzszenario Referenz moderat	Sz. 1 hoher CO ₂ -Preis	Sz. 2 Technologie-push	Sz. 3 nur erweiterte Reststoff-nutzung	Sz. 4 Max. Biomasse-verfügbarkeit
Wärme in PJ	1009	1009	892	470	1253
Anteil an Gesamt %	32,7	32,7	28,9	15,2	40,6
Strom in PJ	228	254	277	5	324
Anteil an Gesamt %	6,9	7,7	8,5	0,1	9,8
Verkehr in PJ	161	161	171	184	255
Anteil an Gesamt %	13,3	13,3	14,0	15,0	21,0
total in PJ	1398	1424	1340	659	1832

zielgerichtete Unterstützung von Forschung und Entwicklung für innovative Biomasetechnologien in der Mittel- und Hochtemperaturwärme.

Bei der Ergebnisinterpretation ist außerdem zu beachten, dass die Modellierung nur ausgewählte Holzsortimente berücksichtigt und sich auf den Wettbewerb im Energiesystem beschränkt ist. Die Analysen im SoBio-Projekt berücksichtigen neue Nutzungskonkurrenzen aufgrund aktueller Strategien, wie Holzbau, Torfersatz oder Chemiewende, aber auch Naturschutz nur eingeschränkt. Neuere Abschätzungen deuten an, dass die heimischen Holzpotenziale für die energetische Nutzung dadurch voraussichtlich um etwa 35 bis 50 % geringer sind und damit die Modellergebnisse den Beitrag zur energetischen Nutzung möglicherweise überschätzen. Diese zusätzlichen Erwartungen an den Beitrag von Holz für einen schnellen und effizienten Klimaschutz unterstreichen die Notwendigkeit, einen Wettbewerb auf Augenhöhe zwischen den verschiedenen Nutzungsoptionen zu etablieren und finanzielle Förderungen auf ein gleiches Maß zu bringen. Dies würde bedeuten, die Förderung der energetischen Holznutzung künftig auf Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zu beschränken.

Bei aller Klarheit der Ergebnisse von Optimierungsmodellen sollte nicht vergessen werden, dass die Energiewende nicht nur klimaneutral und kostenoptimal gestaltet sein sollte, sondern viele weitere Aspekte wie Biodiversitätsschutz, soziale Verträglichkeit der Lasten etc. beachtet werden müssen, um die Transformation der energetischen Holznutzung nachhaltig zu gestalten. Es ist auch sicherzustellen, dass die energetische Holznutzung nicht in Konkurrenz zu den LULUCF-Zielen treten darf, d. h. durch die Wiederherstellung von Wäldern und eine nachhaltige Waldbewirtschaftung muss gewährleistet werden, dass mehr CO₂ der Atmosphäre entzogen und als Kohlenstoff gebunden wird als über die Holzentnahmen und -nutzung wieder freigesetzt wird (EU 2023/839).

Literatur

Acatech (Hrsg.) (2022). Holzbasierte Bioökonomie. Nachhaltig, zirkulär, klimaresilient. Acatech Position. München 2022. Verfügbar unter: <https://www.acatech.de/publikation/holz-basierte-biooekonomie/>

Alecci, Scilia (2023). Environmental auditors approve green labels for products linked to deforestation and authoritarian regimes. ICJ 2023. Verfügbar unter: <https://www.icj.org/investigations/deforestation-inc/auditors-green-labels-sustainability-environmental-harm/>

Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks (2022). Erhebung des Schornsteinfegerhandwerks 2022. Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks - Zentralinnungsverband (ZIV). Sankt Augustin 2022. Verfügbar unter: <https://www.schornsteinfeger.de/erhebungen.aspx>

DBFZ (2021). Umrüstung von Kohlekraftwerken auf Biomasse. Positionspapier. Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH. Leipzig 2021.

DBFZ (2022). Holzheizkraftwerk und Holzvergaser Betreiberbefragung. Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH. Leipzig 2022.

Dena (Hrsg.) (2021). dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität. Deutsche Energie-Agentur GmbH. Berlin 2021.

DEPI (2023). Pelletfeuerungen in Deutschland. Deutsches Pelletinstitut GmbH. Berlin 2023. Verfügbar unter: <https://depi.de/p/Pelletfeuerungen-in-Deutschland-gUnN1PXtLxBvJ2oTLGjxPW>

Dieter, Matthias (2018). Klimaschutz durch Waldwirtschaft und Holznutzung. Wissenschaft erleben 2018/1. Johann Heinrich von Thünen-Institut. Braunschweig 2018.

Dotzauer, Martin (2023). Bioenergy-Technology-Database (BET.db) (0.1) [Data set]. Zenodo 2023. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.5281/zenodo.758603>

Dotzauer, Martin; Radtke, Kai Sven; Jordan,

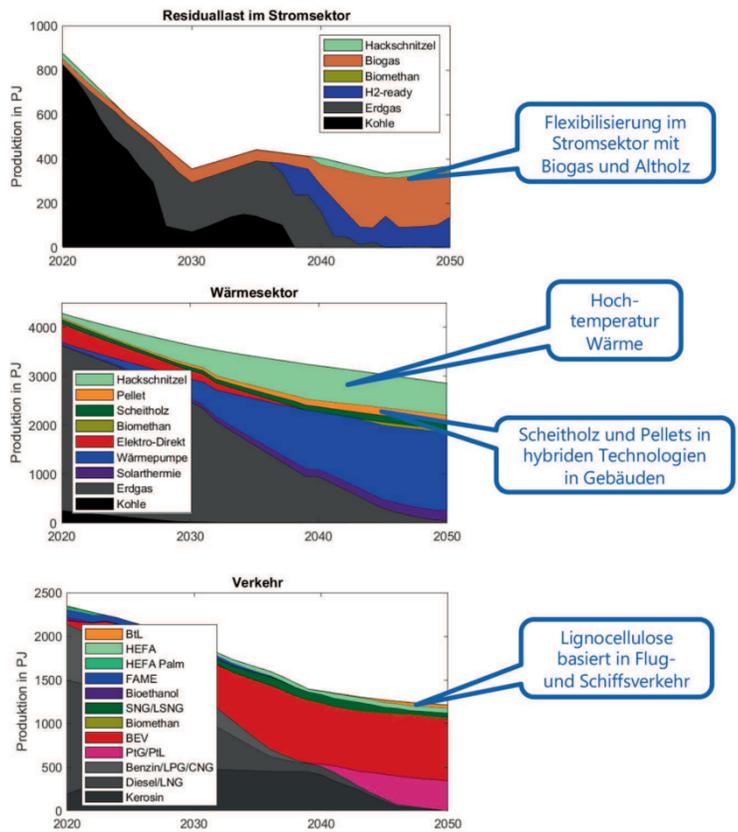


Abbildung 5 Beitrag der energetischen Holznutzung zu einer klimaneutralen Energieversorgung in Szenario (unterschiedliche Skalierung der y-Achse ist zu beachten)

Matthias; Thrän, Daniela (2023). Advanced SQL-Database for Bioenergy Technologies - a Catalogue for Bio-Resources, Conversion Technologies, Energy Carriers, and Supply Applications. SSRN 2023. Verfügbar unter: <https://ssrn.com/abstract=4419499>

Erstes Gesetz zur Änderung des Bundes-Klimaschutzgesetzes vom 18. August 2021

FNR (2022). Charta für Holz 2.0. Kennzahlenbericht 2021 Forst & Holz. Fachagentur Nachhaltige Rohstoffe e. V. (FNR) 2022. Verfügbar unter: https://www.charta-fuer-holz.de/fileadmin/charta-fuer-holz/dateien/service/mediathek/Web_Kennzahlenbericht_2021.pdf

Jordan, M.; Millinger, M.; Thrän, D (2022). Benopt-Heat: An economic optimization model to identify robust bioenergy technologies for the German heat transition, SoftwareX 18, art. 101032. SoftwareX 2022.

Jordan, Matthias; Meisel, Kathleen; Dotzauer, Martin; Schröder, Jörg; Cyffka, Karl-Friedrich; Dögnitz, Niels; Schmid, Christopher; Lenz, Volker; Naumann, Karin; Daniel-Gromke, Jaqueline; Costa de Paiva, Gabriel; Schindler, Harry; Esmaili Aliabadi, Daniel; Szarka, Nora; Thrän, Daniela. 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. SSRN 2023. Verfügbar unter: <https://ssrn.com/abstract=4449059>

Majer, Stefan; van Dam, Jinke; Fritsche, Uwe R.; Heukels, Bas; Harris, Zoe M.; Egnell, Gustaf (2023). Approaches to sustainability compliance and verification for forest biomass. IEA Bioenergy Task 45. IEA Bioenergy 2023. Verfügbar unter: <https://task45.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/sites/13/2023/05/IEA-Bioenergy-T45-project-report-compliance-and-verification.pdf>

Meisel, Kathleen; Jordan, Matthias (2023). SoBio-Szenarien einer optimalen Biomasse-nutzung im Energiesystem. Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH. Leipzig 2023. Verfügbar unter: <https://www.dbfz.de/sobio/das-projekt>

Meisel, Kathleen; Jordan, Matthias; Dotzauer, Martin; Schröder, Jörg; Lenz, Volker; Naumann, Karin; Cyffka, Karl-Friedrich; Dögnitz, Niels; Schindler, Harry; Daniel-Gromke, Jaqueline; de Paiva, Gabriel Cost; Schmid, Christopher; Szarka, Nora; Majer, Stefan; Müller-Langer, Franziska; Thrän, Daniela (under review): Quo vadis, biomass? Long term scenarios of an optimal energetic use of biomass for the German energy transition, submitted to International Journal of Energy Research.

Millinger, M.; Tafarte, P.; Jordan, M.; Musonda, F.; Chan, K.; Meisel, K.; Esmaili Aliabadi, D. (2022). A model for cost- and greenhouse

gas optimal material and energy allocation of biomass and hydrogen; SoftwareX 20 art. 101264. SoftwareX 2022.

Regulation (EU) 2023/839 of the European Parliament and of the Council of 19 April 2023 amending Regulation (EU) 2018/841

UBA (Hrsg.) (2022a). Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger. Bestimmung der verminderten Emissionen im Jahr 2021. CLIMATE CHANGE 50/2022. Umweltbundesamt (UBA). Dessau-Roßlau 2022. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/emissionsbilanz-erneuerbarer-energetraeger-2021>

UBA (Hrsg.) (2022b). Aktuelle Nutzung und Förderung der Holzenergie. Teilbericht zu den Projekten BioSINK und BioWISE. CLIMATE CHANGE 12/2022. Umweltbundesamt (UBA). Dessau-Roßlau 2022. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2023-01-05_cc_12-2022_aktuelle_nutzung_und_foerderung_der_holzenergie.pdf