

CLIMATE CHANGE

33/2024

Abschlussbericht

Auswirkungen der energetischen Nutzung forstlicher Biomasse in Deutschland auf deutsche und internationale LULUCF-Senken (BioSINK)

von:

Klaus Hennenberg, Mirjam Pfeiffer, Anke Benndorf, Hannes Böttcher, Judith Reise
Öko-Institut e.V., Darmstadt, Berlin

Udo Mantau
INFRO – Informationssysteme für Rohstoffe, Celle

Susanne Köppen, Horst Fehrenbach, Silvana Bürck
ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH, Berlin, Heidelberg

Herausgeber:
Umweltbundesamt

CLIMATE CHANGE 33/2024

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für
Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3720435020

FB001518

Abschlussbericht

Auswirkungen der energetischen Nutzung forstlicher Biomasse in Deutschland auf deutsche und internationale LULUCF-Senken (BioSINK)

von

Klaus Hennenberg, Mirjam Pfeiffer, Anke Benndorf, Hannes
Böttcher, Judith Reise

Öko-Institut e.V., Darmstadt, Berlin

Udo Mantau

INFRO – Informationssysteme für Rohstoffe, Celle

Susanne Köppen, Horst Fehrenbach, Silvana Bürck

ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg
gGmbH, Berlin, Heidelberg

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

Öko-Institut e.V.
Rheinstraße 95
64295 Darmstadt

Abschlussdatum:

September 2023

Redaktion:

Fachgebiet V 1.3 Erneuerbare Energien
Katja Hofmeier

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, August 2024

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

Kurzbeschreibung: Auswirkungen der energetischen Nutzung forstlicher Biomasse in Deutschland auf deutsche und internationale LULUCF-Senken (BioSINK)

Das Projekt BioSINK erforscht die Auswirkungen der Energieholznutzung auf die Kohlenstoffsenkenleistung des Waldes in Deutschland. Hierzu wurden mit dem Holzverwendungsmodell TRAW, dem Waldmodell FABio-Forest und der Treibhausgasbilanzierung für Energieholz mit dem Modell HoLCA ein Referenzszenario und drei Holzenergieszenarien berechnet. Eine Literaturrecherche zur Kohlenstoffspeicherung im Wald in Abhängigkeit zur Holzentnahme wurde durchgeführt. Zentrale Ergebnisse sind: (a) Die Energieholzverwendung steigt bis zum Jahr 2030 an, da sie als erneuerbare Wärmequelle angereizt wird. Danach sinkt sie aufgrund von Effizienzmaßnahmen in Gebäuden. Durch die steigende stoffliche Holznutzung, insbesondere im Bau, kann Mitte der 2030er Jahre die Nadelholznachfrage nicht mehr aus heimischem Nadelholz gedeckt werden (Annahme mittlerer oder starker natürlicher Störungen). (b) Die Laubholznachfrage kann über dem gesamten Modellierungszeitraum aus heimischem Laubholz gedeckt werden. Eine steigende Laubholzentnahme führt aber zu einer Verringerung der Senkenleistung der Wälder und steht so im Konflikt zu Zielen des natürlichen Klimaschutzes. (c) Zwar verschlechtern natürliche Störungen die Senkenleistung der Wälder, unabhängig von der Intensität der natürlichen Störungen verbessert aber eine verringerte Energieholzentnahme in den berechneten Szenarien die Senkenleistung. Ein Vorratsaufbau in Beständen mit geringen Risiken erscheint daher als eine robuste Strategie, um im LULUCF-Sektor Senkenziele zu erreichen. In instabilen Nadelbaumbeständen sind waldbauliche Maßnahmen zur Stabilisierung notwendig. (d) Es wird vorgeschlagen, in die Produkt-THG-Bilanz die direkten CO₂ Verbrennungsemissionen aus der Energieholznutzung aufzunehmen, anstatt sie mit Null zu bewerten. So ist es möglich, Effekte auf LULUCF-Senken zu berücksichtigen. Unter dieser Annahme führt die Energieholznutzung in Deutschland im Vergleich zum Energiemix zu deutlichen THG-Emissionen.

Abstract: Impacts of the energetic use of forest biomass in Germany on national and international LULUCF sinks (BioSINK)

The BioSINK project researches the effects of wood energy use on the carbon sink performance of German forests. For this purpose, a reference scenario and three wood energy scenarios were simulated using the wood utilisation model TRAW, the forest model FABio-Forest, and the greenhouse gas balancing for energy wood with the HoLCA model. A literature review on carbon sequestration in forests in relation to wood extraction was conducted. The main results are: (a) Due to the increasing material use of wood, particularly in construction, the demand for coniferous wood can no longer be satisfied by domestic coniferous timber from the middle of the 2030s onwards (assumption of medium or strong natural disturbances). (b) The demand for deciduous wood can be met from domestic deciduous timber over the entire modelling period. However, increasing deciduous wood extraction leads to a reduction in the sink capacity of forests and thus conflicts with natural climate protection goals. (c) Although natural disturbances impair the sink capacity of forests, reduced energy wood extraction improves the sink capacity in considered scenarios, irrespective of the intensity of the natural disturbances. Stock building in low-risk stands therefore appears to be a robust strategy for achieving sink targets in the LULUCF sector. In unstable conifer stands, silvicultural measures are necessary for stabilisation. (d) It is proposed to include the direct CO₂ emissions from the combustion of energy wood in the product GHG balance instead of setting them at zero. This makes it possible to consider effects on LULUCF sinks. Under this assumption, the use of wood for energy in Germany leads to significant GHG emissions compared to the energy mix.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	8
Tabellenverzeichnis	9
Abkürzungsverzeichnis.....	10
Zusammenfassung.....	12
Summary	18
1 Einleitung.....	24
1.1 Hintergrund.....	24
1.2 Zielsetzung des Projekts BioSINK.....	26
1.3 Einordnung der Projektergebnisse in Bezug zu politischen Entwicklungen	27
1.4 Produkte im Projekt BioSINK.....	27
2 Modellverbund.....	28
2.1 Überblick über den Modellverbund.....	28
2.2 Holzverwendungsmodellierung mit TRAW.....	29
2.3 Waldmodellierung mit FABio-Forest.....	31
2.3.1 Waldentwicklung und Klimaveränderung	33
2.3.2 Waldbewirtschaftung und Holzentnahme.....	34
2.4 Treibhausgasbilanzierung für Holzenergie mit HoLCA.....	36
2.5 Holzimporte und -exporte.....	37
3 Szenarienentwicklung	40
3.1 Überblick über die Szenarien	40
3.2 Referenzszenario.....	41
3.2.1 Energetische Holzverwendung im Referenzszenario.....	41
3.2.2 Stoffliche Holzverwendung im Referenzszenario	42
3.3 Holzenergie-Szenarien	43
4 Modellierungsergebnisse	46
4.1 Holzverwendung	46
4.1.1 Referenzszenario	46
4.1.1.1 Energetische Holzverwendung	46
4.1.1.2 Stoffliche Holzverwendung.....	48
4.1.1.3 Zusammenfassung stofflicher und energetischer Holzverwendung	49
4.1.2 Holzenergieszenarien im Vergleich zum Referenzszenario	50
4.2 Waldbewirtschaftung und Entwicklung der Waldbestände	54
4.2.1 Referenzszenario	54

4.2.2	Holzenergieszenarien im Vergleich zum Referenzszenario	59
4.3	Treibhausgasbilanzierung der Holzenergie.....	62
4.3.1	Weiterentwicklung der Produkt-Treibhausgasbilanz von Holzenergie	63
4.3.1.1	Nationales Treibhausgasinventar und Produkt-Treibhausgasbilanz	63
4.3.1.2	Zusammenhang zwischen Holzentnahme und der Veränderung der Senkenleistung auf der Waldfläche (CO ₂ -Speichersaldo).....	65
4.3.1.3	Weiterentwicklung der Produkt-THG-Bilanz nach der RED.....	67
4.3.2	Referenzszenario	69
4.3.3	Holzenergieszenarien im Vergleich zum Referenzszenario.....	73
5	Diskussion und Kernaussagen	76
5.1	Können nachgefragte Holzmengen nachhaltig aus dem Wald entnommen werden?.....	76
5.2	Welchen Einfluss hätte eine verstärkte energetische Holznutzung in Deutschland auf die entsprechenden nationalen und internationalen LULUCF-Senken?	77
5.3	Unter welchen Bedingungen stellt die Energieholznutzung eine Minderungsmaßnahme im Rahmen des Klimaschutzes dar?.....	78
5.4	Wie effektiv sind Einschränkungen der Holzenergienutzung, um die Kohlenstoffsenkenleistung der Wälder zu schützen?.....	80
5.5	Kernaussagen.....	81
6	Quellenverzeichnis	82

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Struktur des Modellverbunds und Treiber	28
Abbildung 2:	Ergebnisse des Modellverbunds.....	29
Abbildung 3:	Struktur des Holzverwendungsmodells TRAW	30
Abbildung 4:	Allgemeine Beschreibung der Arbeitsweise des Modells FABio-Forest.....	32
Abbildung 5:	Szenarienraum.....	40
Abbildung 6:	Entwicklung der bauwirtschaftlichen Marktsegmente	42
Abbildung 7:	Entwicklung der Szenarien zur Bestimmung der Energienutzung aus fester Biomasse.....	45
Abbildung 8:	Entwicklung des Energieholzverbrauchs nach Verwendergruppen im Referenzszenario.....	46
Abbildung 9:	Verwendung des Energieholzes in privaten Haushalten im Referenzszenario	47
Abbildung 10:	Entwicklung der Energieholzverwendung in Biomassefeuerungsanlagen nach Holzsortimenten	48
Abbildung 11:	Entwicklung und Fortschreibung der Verwendung von Holzrohwaren	49
Abbildung 12:	Entwicklung des Aufkommens an Holzrohstoffen nach Holzsortimenten im Referenzszenario	50
Abbildung 13:	Entwicklung der Energieholzverwendung nach Verwendern und Szenarien	51
Abbildung 14:	Summe der energetischen und stofflichen Holzverwendung nach Sortimenten und Szenarien	52
Abbildung 15:	Simulierte Holzentnahme und offenbleibende Nachfrage im Referenzszenario (Sensitivität „mittlere Störungen“).....	54
Abbildung 16:	Derbholzvorrat, Zuwachs und Totholz nach Artengruppen im Referenzszenario (mittlere Störung)	55
Abbildung 17:	Derbholzvorrat nach Durchmesserklassen für Nadel- und Laubbäume (mittlere Störung).....	57
Abbildung 18:	Treibhausgasbilanz der lebenden Bäume im Referenzszenario unter Annahme geringer, mittlerer und starker Störungen.....	58
Abbildung 19:	Vergleich Holzenergieszenarien zur Referenz für Derbholzvorrat, Zuwachs und Totholz, untergliedert nach Nadel- und Laubholz.....	59
Abbildung 20:	Vergleich Holzenergieszenarien zur Referenz für Derbholzvorrat nach Durchmesserklassen.....	60
Abbildung 21:	Treibhausgasbilanz der lebenden Biomasse der Waldfläche des Referenzszenarios und der Holzenergieszenarien	61
Abbildung 22:	Vergleich der Holzenergieszenarien zur Referenz für die Treibhausgasbilanz der lebenden Biomasse der Waldfläche (Mittelwert von 2022 – 2076)	62

Abbildung 23:	Sektoren des nationalen Treibhausgasinventars und Prozesskette für Wärme aus Hackschnitzel nach Produkt-Treibhausgasbilanzen	64
Abbildung 24:	CO ₂ -Speichersaldo in borealen und temperaten Wäldern für kurze, mittlere und lange Betrachtungszeiträume.....	66
Abbildung 25:	CO ₂ -Speichersaldo für Laub- und Nadelholz (lebende Biomasse) in Deutschland auf Basis von Modellergebnissen aus FABio-Forest.....	67
Abbildung 26:	Weiterentwicklungsvorschlag für die Produkt-THG-Bilanz nach der RED	68
Abbildung 27:	Schematische Darstellung der Elemente einer erweiterten Treibhausgasbilanz von Energieholz als Vorschlag zur Anpassung der Produkt-THG-Bilanz nach der RED.....	68
Abbildung 28:	THG-Emissionsfaktoren bei der Verwendung verschiedener Holzbrennstoffe in Einzelraumfeuerungsanlagen und Holzzentralheizungen in Haushalten	70
Abbildung 29:	Netto-Treibhausgasbilanz der Holzenergienutzung im Referenz-Szenario in Deutschland im Jahr 2020 unterteilt nach Holzbrennstoffen und Verwendern für drei Varianten der Berücksichtigung der CO ₂ -Verbrennungsemissionen.....	71
Abbildung 30:	Netto-Treibhausgasbilanz der Holzenergienutzung im Referenz-Szenario in Deutschland im Zeitverlauf unterteilt nach Holzbrennstoffen für drei Varianten der Berücksichtigung der CO ₂ -Verbrennungsemissionen	73
Abbildung 31:	Netto-THG-Emissionen des Referenzszenarios und der Holzenergieszenarien im Zeitverlauf	74
Abbildung 32:	Veränderung der Netto-THG-Bilanzen in den Holzenergieszenarien gegenüber dem Referenzszenario	75

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zusammenfassung der Holzenergienutzung nach Sektoren und Sortimenten (in Mio. t).....	37
Tabelle 2:	Anteil der Haushalte mit Holz-Einzelfeuerungsanlage (EZF) bzw. Holzzentralheizung (HZH)	44
Tabelle 3:	Summe der energetischen und stofflichen Holzverwendung in Mio. m ³ _{swe} nach Sortimenten und Szenarien	53
Tabelle 4:	Sonstiges Holz (inkl. Rinde) der energetischen und stofflichen Holzverwendung in Mio. m ³ _{swe} nach Sortimenten und Szenarien	53

Abkürzungsverzeichnis

BAU	Business as Usual (Waldmanagement)
BHD	Brusthöhendurchmesser
BImSchV	Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes
BioSINK	UBA-Projekt „Auswirkung der energetischen Nutzung forstlicher Biomasse in Deutschland auf deutsche und internationale LULUCF-Senken“
BioWISE	UBA-Projekt „Wirkmechanismen von Regelungen und Förderinstrumenten des Bundes und der Länder auf den Einsatz fester Biomasse in der Wärmezeugung“
BMA	Biomasseanlage
BWI	Bundeswaldinventur
CO₂-Äq.	CO ₂ Äquivalente
Destatis	Statistisches Bundesamt, Wiesbaden
ERR	Einschlagsrückrechnung
EZF	Holz-Einzelraumfeuerungsanlagen
FABio	Forestry and Agriculture Biomass Model
FWL	Feuerungswärmeleistung
GFA	Großfeuerungsanlagen (>1 MW)
gS	geringe Störungen
ha	Hektar
HE-ext	Szenario „Extensivierte Holzenergieverwendung“
HE-int	Szenario „Intensivierte Holzenergienutzung“
HE-red	Szenario „Reduzierte Holzenergieverwendung“
HoLCA	LCA-Modell für Stoffströme der Holzwirtschaft
HZH	Holz-Zentralheizungen
ifeu	Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH
INFRO	Informationssysteme für Rohstoffe
IPCC	The Intergovernmental Panel on Climate Change
KFA	Kleinfeuerungsanlagen (<1 MW)
KIS-2030	Klimaschutzinstrumente-Szenario 2030
KUP	Kurzumtriebsplantagen
LULUCF	Land Use, Land Use Change and Forestry
m.R.	mit Rinde
m³_{sew}	Kubikmeter Holz in Einheit „solid wood equivalent“
MMS	Mit-Maßnahmen-Szenario
mS	mittlere Störungen
o.R.	ohne Rinde
PHH	Private Haushalte

BAU	Business as Usual (Waldmanagement)
RED III	Erneuerbare-Energien-Richtlinie (<i>Renewable Energy Direktive</i>)
REF	Referenzszenario
SpS	CO ₂ -Speichersaldo
sS	starke Störungen
THG	Treibhausgas
TRAW	Total Resource Assessment of Wood
UBA	Umweltbundesamt, Dessau
Vfm	Vorratsfestmeter (Derbholz mit Rinde)
WZE	Waldzustandserhebungen

Zusammenfassung

Zielsetzung

Der vorliegende Bericht zum Projekt BioSINK hat das Ziel, die Auswirkungen der Holzenergienutzung auf die Kohlenstoffsinkenleistung des Waldes in Deutschland zu untersuchen, das Potenzial des Waldes zur Bereitstellung benötigter Holzmenngen abzuschätzen, und Treibhausgasbilanzen für Holzenergienutzung in verschiedenen Anwendungsbereichen zu erstellen. Bestehende und ggf. noch zu entwickelnde Förderinstrumente und Entwicklungen im Bereich der Holzenergienutzung und Waldbewirtschaftung werden adressiert, indem verschiedene Szenarien modelliert werden. So soll die Frage beantwortet werden, ob und unter welchen Bedingungen die Energieholznutzung eine Minderungsmaßnahme im Rahmen des Klimaschutzes darstellt, und unter welchen Umständen verstärkter Import forstlicher Biomasse erforderlich wird. Außerdem wird mithilfe von Holzenergienutzungsszenarien analysiert, wie effektiv Einschränkungen der Holzenergienutzung sind, um die Kohlenstoffsinkenleistung der Wälder in Deutschland zu schützen. Mögliche Auswirkungen klimatischer Unsicherheiten werden im Waldmodell mittels dreier Sensitivitäten für mittlere Zuwachsentensitäten und Mortalitätsrisiken abgeschätzt.

Eingesetzter Modellverbund im Projekt BioSINK

Im Projekt kommen das Holzverwendungsmodell TRAW (**T**otal **R**esource **A**ssessment of **W**ood), das Waldwachstumsmodell FABio-Forest (**F**orestry and **A**griculture **B**iomass **M**odel) und das Treibhausgasbilanzmodell HoLCA (**L**CA-Modell für Stoffströme in der **H**olzwirtschaft) zum Einsatz und werden als Modellverbund gekoppelt. Ausgang des Modellverbundes ist die Holzverwendungsmodellierung in TRAW. Die Holzverwendungsmodellierung kombiniert historische Trends der Holznutzung mit Annahmen zur zukünftigen ökonomischen und politischen Entwicklung. Aus dem in der Holzverwendungsmodellierung ermittelten Bedarf an Waldholz ergibt sich die Nachfrage nach Waldholz, die an FABio-Forest übergeben wird. In FABio-Forest können Bewirtschaftungsregeln eingestellt werden, die festlegen, wieviel Holz maximal pro Jahr entnommen werden darf. Hieraus ergibt sich, ob die Nachfrage nach Waldholz gesättigt werden kann oder ob Lücken offenbleiben, die ggf. anderweitig, z.B. durch Importe, geschlossen werden müssen. Zusätzlich liefert das Waldmodell Informationen zu Entwicklungen der Basalflächen nach Baumartengruppen, Zuwachs, Totholzvorräten, Bestandsstruktur, CO₂-Speicher im Wald und CO₂ Speicherleistung. Außerdem übergibt TRAW die Art und Mengen der verwendeten Holzprodukte an HoLCA, das seinerseits die THG-Emissionen entlang der Prozessketten für Holzprodukte und bei der Holzverbrennung bilanziert.

Holzverwendungsmodellierung mit TRAW

Die Holzverwendungsmodellierung mit TRAW startet mit der Modellierung von Holzprodukten bzw. Endwaren in Endwarenssektoren. Diese löst die Nachfrage nach Halbwaren aus, deren Produktion wiederum Rohmaterialien aus dem Wald oder aus Rest- und Recyclingstoffen erfordert. Die für die Modellierung nötige Kenntnis der Rohstoffzusammensetzung innerhalb der Wertschöpfungskette basiert auf dem Rohstoffmonitoring Holz. TRAW simuliert die energetische und stoffliche Nachfrage in Endverwendungssektoren und unterscheidet im Energiesektor zwischen Einzelfeuerungsanlagen und Holzzentralheizungen in Privathaushalten, Kleinf Feuerungsanlagen (KFA, <1 MW), und Großfeuerungsanlagen (GFA, >1 MW). Im stofflichen Nutzungsbereich differenziert TRAW nach den Sektoren Bau, Möbel, Verpackung, Papier, neue biobasierte Waren und sonstige Endwaren.

Waldmodellierung mit FABio-Forest

Die Waldmodellierung mit FABio-Forest basiert auf Daten der Bundeswaldinventur (BWI) und schreibt die Waldentwicklung einzelbaumbasiert mithilfe von Modulen für Waldwachstum, Einwuchs, Mortalität, Totholzentwicklung, Bodenkohlenstoff und Holzentnahme fort. Ausgabeparameter sind u.a. Vorräte je Baumartengruppe, Zuwächse, Durchmesserverteilungen, Holzentnahmemengen und Senkenleistung der Wälder. Die Waldbewirtschaftung in den simulierten Beständen der BWI-Trakte erfolgt regelbasiert mithilfe von Vorgaben zur Durchforstungs- und Zielstärkennutzungsintensität, zur Extraktionsrate von Holz und Ernteresten, sowie zu Baumartenanteilen in der Verjüngung. Waldbewirtschaftungstypen können differenziert nach Bundesland, Besitztyp und Waldtyp (Laub-, Nadel- und Mischwald) angesprochen werden. Als Standard sind die Bewirtschaftungstypen „Business as Usual“, „Intensivierung“, „Extensivierung“ und „Stilllegung“ hinterlegt. Die baumartenspezifischen Mortalitäts- und Zuwachsfunktionen sind für die mittleren Witterungsbedingungen im Zeitraum 2002 bis 2012 parametrisiert. Sie wurden für das Projekt BioSINK für die Zuwächse mithilfe von Daten aus der Kohlenstoffzwischeninventur (Treibhausgasinventur, TI-2017) und für die Mortalität mit jahresscharfen Daten aus der Waldzustandserhebung (WZE) bis zum Jahr 2021 angepasst. Um mögliche zukünftige klimabedingte Einflüsse auf Mortalität und Zuwachs abschätzen zu können, wurden drei Sensitivitäten für Zuwachs und Mortalität simuliert. In der Sensitivität „geringe Störungen“ (gS) verhalten sich Mortalität und Zuwachs wie im Mittel der Jahre 2013 bis 2017. Die Sensitivität „mittlere Störungen“ (mS) stützt sich auf die Mittelwerte der Jahre 2002 bis 2017, und für „starke Störungen“ (sS) verhält sich die Mortalität wie im Mittel der Jahre 2002 bis 2021 und der Zuwachs wie im Mittel 2002 bis 2017 multipliziert mit Faktor 0,9.

Treibhausgasbilanzierung für Holzenergie mit HoLCA

Das Stoffstrom- und Ökobilanzmodell HoLCA kann ausgehend vom Waldbau die verschiedenen Verarbeitungs- und Lieferketten zu den jeweiligen Holzprodukten bzw. -produktgruppen abbilden. Im Projekt BioSINK wird das Modul zur energetischen Holznutzung verwendet. Basierend auf den Stoffstromdaten der Holzverwendungsmodellierung ermittelt das Modell die primärenergiebezogenen THG-Emissionen der Energieholzerzeugung und -nutzung unter Verwendung von spezifischen Emissionsfaktoren für Anbau, Herstellung, Transport, Hilfsenergie und bei der Verbrennung anfallende Emissionen (inkl. CO₂-Verbrennungsemissionen). Zusätzlich wird die Substitution fossiler Rohstoffe durch Holzenergie berücksichtigt und mit den durch die Holzenergieerzeugung entstehenden Emissionen verrechnet, um die Gesamtemissionsbilanz zu erhalten.

Holzaußenhandel – ausgewählte Länderstudien

Da Holzimporte und -exporte mögliche negative soziale und Umweltauswirkungen in den Herkunftsländern haben können, wurden in Länderstudien für Polen, Tschechien, Kanada und USA die geltenden Vorschriften und gängige Praxis der Forstwirtschaft, Risikoabschätzung bzgl. Umweltauswirkungen und der Export von Energieholz analysiert. Hierzu wurden Experteninterviews sowie Internet- und Literaturrecherchen durchgeführt.

Betrachtete Holzenergieszenarien

Ausgehend von einem Referenzszenario (REF) für die stoffliche und energetische Holzverwendung werden im Projekt BioSINK drei weitere Szenarien zur zukünftigen Holzenergieverwendung abgeleitet: „Intensivierte Holzenergieverwendung“ (HE-int), „Reduzierte Holzenergieverwendung“ (HE-red), und „Extensivierte Holzenergieverwendung“ (HE-ext). Von 1990 bis 2020 verwendet das Referenzszenario für die energetische Holznutzung die Daten des Rohstoffmonitorings. Danach stützt es sich auf das Mit-Maßnahmen-Szenario der Bundesregierung, wobei

zwischen GFA, KFA, und Privathaushalten mit Holz-Zentralheizungen und Einzelraum-Feuerungsanlagen differenziert wird. Rohstoffanteile entsprechen bis zum Jahr 2020 den Ergebnissen des Rohstoffmonitorings Holz und werden als konstant fortgeschrieben. Die energetische Waldholznutzung ergibt sich damit aus dem unterstellten Szenarienverlauf. Die stoffliche Holzverwendung im Referenzszenario berücksichtigt den Bausektor mit Neubau und Modernisierung, die Holzverwendung im Möbelmarkt und Papiersektor, sowie sonstige Holzverwendungen. In den Holzenergieszenarien wird eine gegenüber dem Referenzszenario unveränderte stoffliche Nutzung angenommen und die Rohstoffzusammensetzung in der energetischen Verwendung beibehalten. In HE-ext wird ein Holzenergie-Nutzungsrückgang angenommen, der ein Erreichen der im Bundesklimaschutzgesetz geforderten THG-Minderung möglich macht und insbesondere auf einen Rückgang der Holzenergienutzung in privaten Haushalten setzt. Im Szenario HE-red fällt der Nutzungsrückgang an Holzenergie schwächer aus, es wird jedoch weniger Holzenergie genutzt als im Referenzszenario. In HE-int erhöht sich die Anzahl an privaten Holzcentralheizungen unter der Annahme eines 65 %-Ziel an erneuerbaren Energien im Gebäudeenergiegesetz.

Simulierte Entwicklung der Holzverwendung im Referenzszenario

Im Referenzszenario (REF) steigt der Energieholzverbrauch bis zum Jahr 2030 auf ein Maximum von 61,3 Mio. m^3_{swe} an und fällt danach bis zum Jahr 2050 auf 44,1 Mio. m^3_{swe} . Historisch wurde in Privathaushalten ein Verwendungsmaximum nach einem starken Anstieg während der 2000er Jahre im Jahr 2013 mit ca. 35 Mio. m^3_{swe} erreicht. Anschließend fiel der Verbrauch auf 27,0 Mio. m^3_{swe} im Jahr 2020. In REF sinkt diese Verwendung weiter auf 25,2 Mio. m^3_{swe} im Jahr 2030 und auf 20,3 Mio. m^3_{swe} im Jahr 2050. Mit 47,0% dominiert im Jahr 2020 und in der Fortschreibung bis 2050 Waldscheitholz die Verwendung in privaten Haushalten, gefolgt von Energieholzprodukten mit 19,0 %. GFA verwendeten im Jahr 2020 22,1 Mio. m^3_{swe} Holzrohstoffe, davon 53,1% Altholz. In KFA kamen im Jahr 2020 9,3 Mio. m^3_{swe} zum Einsatz. Nach einem leichten Anstieg bis zum Jahr 2030 wird für GFA eine deutliche Abnahme um 6,2 Mio. m^3_{swe} und um 1,3 Mio. m^3_{swe} für KFA modelliert. Die stoffliche Holzverwendung beträgt im Jahr 2020 69,3 Mio. m^3_{swe} , wovon mit 27,3 Mio. m^3_{swe} der größte Anteil auf den Bausektor entfällt. Bis zum Jahr 2050 wird in REF ein Wachstum bis auf 32,6 Mio. m^3_{swe} erwartet. Die verwendete Derbholzmenge im Baubereich steigt im gleichen Zeitraum von 20,5 auf 24,1 Mio. m^3_{swe} . Möbel und Papier sind weitgehend gesättigte Märkte, und der Markt für Holzverpackungen wächst nach 2020 nur noch begrenzt. In Summe ergibt sich im Jahr 2030 unter Einschluss von Kaskadennutzung von Rest- und Recyclinghölzern für die stoffliche und energetische Holzverwendung ein modellierter Wert von 135 Mio. m^3_{swe} , und im Jahr 2050 von 123 Mio. m^3_{swe} . Das verwendete Waldderholzvolumen wächst im Referenzszenario von 68,6 Mio. m^3_{swe} im Jahr 2020 auf 72,8 Mio. m^3_{swe} im Jahr 2050.

Simulierte Entwicklung der Holzverwendung in den Holzenergieszenarien

Gegenüber der Energieholzverwendung im REF von 61,3 Mio. m^3_{swe} im Jahr 2030 liegt sie im Szenario HE-int mit 62,1 Mio. m^3_{swe} leicht höher, während sie in den Szenarien HE-red und HE-ext nur 58,2 Mio. m^3_{swe} bzw. 54,6 Mio. m^3_{swe} beträgt. Bis zum Jahr 2050 nimmt die Energieholzverwendung in allen Szenarien kontinuierlich auf ca. 44,5 Mio. m^3_{swe} ab. Wichtige Gründe sind die steigende Energieeffizienz der Heizungsanlagen und eine aus Temperaturdaten (1950-2021) abgeleitete Trendentwicklung, die angesichts steigender Temperatur und sinkender Frost- und Eistage den Heizungsbedarf reduziert. Differenzen zwischen den Holzenergieszenarien ergeben sich allein aus der energetischen Nutzung, da die stoffliche Nutzung aus dem REF für alle HE-Szenarien übernommen wurde. Für die vier Szenarien wird die Nachfrage nach Waldholz als Summe aus stofflicher und energetischer Verwendung differenziert nach Stammholz, sonstigem Derbholz und Restholz an FABio-Forest übergeben.

Simulierte Waldentwicklung im Referenzszenario

Ab dem Jahr 2012 (Daten der BWI-3) wurde die Waldentwicklung über 65 Jahre bis zum Jahr 2076 fortgeschrieben. Im Referenzszenario kann in der Sensitivität „mittlere Störungen“ die **Holznachfrage** ab dem Jahr 2034 zu etwa 25 % nicht gedeckt werden. Dies verlangt entweder Holzimporte, Substitution knapper Rohwaren durch verfügbare, effizientere Nutzung, eine Veränderung der Holznachfrage oder andere Anpassungen.

Im Jahr 2076 beträgt der **Derbholzvorrat** 3.935 Mio. m³ (1.689 Mio. m³ Nadelholz, 2.245 Mio. m³ Laubholz). Die Vorräte von Laubholz steigen im Verlauf der Simulation, während die von Nadelholz, insbesondere Fichte und Kiefer, zurückgehen. Dies führt dazu, dass im Jahr 2076 Buche die Vorräte von Fichte um etwa 28 % und Eiche die von Kiefer um ca. 21 % übertrifft.

Fichte, Kiefer und Buche tragen am meisten zum **Gesamtzuwachs** der Waldbestände bei, wobei der Beitrag der Buche im Laufe der Zeit steigt und den rückläufigen Zuwachs der Kiefer bereits in den 2020er Jahren übertrifft. Bei einem mittleren Störungsregime ab 2022 beträgt der durchschnittliche Gesamtzuwachs ca. 98,0 Mio. m³ pro Jahr. Dabei steigt der Laubholzbeitrag zum Gesamtzuwachs von 37,2 % im Jahr 2022 bis zum Jahr 2076 auf 44,4 % an. Die Zuwächse im Nadelholz hingegen nehmen im Zeitverlauf von 61,0 Mio. m³ im Jahr 2022 auf 54,9 Mio. m³ im Jahr 2076 ab.

Unter Berücksichtigung hoher Mortalitäten zwischen 2018-2021 wächst der **Totholzvorrat** von 224,4 Mio. m³ im Jahr 2012 auf 381,5 Mio. m³ im Jahr 2021. Unter mittlerem Störungsregime nimmt das Totholz bis 2034 weiter moderat zu, danach bis 2045 leicht ab, und bleibt dann bis 2076 ca. konstant, mit einem Endwert von 454,6 Mio. m³ (67,0 % Nadel-, 33,0 % Laubholzanteil).

Nadelholz hat initial die höchsten **Vorräte im Durchmesserbereich** 30-40 cm, gefolgt von 40-50 cm und 20-30 cm. Beim Laubholz sind die Vorräte in den Klassen zwischen 20 und 60 cm relativ homogen verteilt. Unter mittleren Störungen nehmen Nadelholzvorräte bis 2034 oberhalb der Zielstärke¹ ab und bleiben danach konstant niedrig. Laubholzvorräte in Klassen > 20 cm steigen ab 2033 an, insbesondere im für Habitatbäume relevanten Durchmesserbereich > 60 cm.

Hohe Mortalität und veranschlagte Zuwachseinbußen zwischen 2018 und 2021 führen zu ca. 40 Mio. t CO₂-Freisetzung durch den Wald im Jahr 2021. Die zukünftige **Entwicklung der Waldsenke** hängt stark von der angenommenen Störungssensitivität ab und kann um mehr als 30 Mio. t CO₂ pro Jahr variieren. Laubbestände bleiben eine Senke, Nadelholzbestände sind bis in die 2030er eine Quelle und danach eine Nullsenke, d.h. die CO₂-Aufnahme entspricht etwa der CO₂-Freisetzung.

Simulierte Waldentwicklung im Vergleich Referenz vs. Holzenergieszenarien

Die variierende Holznachfrage in den Holzenergieszenarien beeinflusst die Laubholzvorratsentwicklung. Im HE-ext ist der Laubholzvorrat im Jahr 2076 um 100 Mio. m³ höher als im REF, im Szenario HE-red beträgt das Vorratsplus 40 Mio. m³. Im Szenario HE-int ist der Laubholzvorrat im Jahr 2076 20 Mio. m³ niedriger als im Referenzszenario. Die Vorratsunterschiede wirken sich auf den Gesamtzuwachs im Laubholz aus, der in HE-ext und HE-red gegenüber dem Referenzszenario erhöht und im Szenario HE-int erniedrigt ist. Durch den verringerten Laubholzeinschlag in den Szenarien HE-ext und HE-red verringert sich das erntebedingt anfallende Kronenrestholz, was zu einer leichten Abnahme des Laubholztotholzvorrats gegenüber dem Referenzszenario führt. Im Nadeltotholzvorrat verursachen veränderte Konkurrenzverhältnisse in den Beständen kleine Abweichungen vom Referenzszenario.

¹ Zielstärken bei Nadelbäumen: 45 cm bei Fichte und Kiefer, 50 cm bei Tanne, 60 cm bei Lärche und 80 cm bei Douglasie.

Die extensivierte Holzenergienutzung (HE-ext) führt bei durchmesserstarken Laubbäumen zu einem erheblichen Vorratsplus, doch auch schwache Durchmesserklassen profitieren. Im Szenario HE-red sind die Vorratzzugewinne geringer, während das Szenario HE-int insbesondere in den starken Durchmesserklassen zu Laubholzvorratsverlusten führt.

Die Störungsintensität hat einen starken Einfluss auf die Treibhausgasbilanz der lebenden Waldbiomasse und verursacht Unterschiede, die größer als die Differenzen zwischen den Holzenergieszenarien und dem Referenzszenario sind. Jedoch wirken Störungen in allen betrachteten Holzenergie-Szenarien in vergleichbarer Weise. Extensivierte und reduzierte Laubholznutzung erhöhen die Senkenleistung, während eine intensivierete Nutzung diese verringert. Die Intensität der Energieholzentnahme kann einen erheblichen Unterschied von mehreren Millionen t CO₂ in der jährlichen Speicherleistung ausmachen.

Weiterentwicklung der Treibhausbilanzierungsmethode von Holzenergie

Grundsätzlich muss zwischen zwei Methoden, dem nationalen Treibhausgasinventar gemäß der Methode des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) und der Produkt-Treibhausgasbilanzierung, unterschieden werden. Produkt-THG-Bilanzen kommen z.B. in der Erneuerbaren-Energien-Richtlinie (RED)², der Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung³ und daran orientiert in der UBA-Emissionsbilanz⁴ zum Einsatz (Kurz: Produkt-THG-Bilanz nach RED). Gemäß der IPCC-Methode werden beim nationalen Treibhausgasinventar für ein ganzes Land die THG-Emissionen zusammengestellt und jeweils genau einem der beteiligten Sektoren zugeordnet, um Doppelzählungen zu vermeiden. Die Produkt-THG-Bilanzierung erfolgt hingegen für ein einzelnes Produkt, und zwar sektor- und ländergrenzenübergreifend zum Vergleich ähnlicher Produkte.

Nach IPCC-Regeln werden CO₂-Emissionen aus der Holzverbrennung der Forstwirtschaft im LULUCF-Sektor bei der Holzentnahme zugeordnet, so dass bei der Verbrennung keine Emissionen berücksichtigt werden. Dies gilt auch für die Holzentnahme aus dem Holzproduktspeicher.

In der Produkt-THG-Bilanz nach der RED fehlen Emissionen aus der Holzernte und -verbrennung und die durch Holzernte veränderte Dynamik des Waldwachstums bzw. des Holzproduktspeichers. Wenn Produkt-THG-Bilanzen für eine Bewertung herangezogen werden sollen, ob und in welchem Umfang die Holzenergienutzung das nationale THG-Inventar verbessert, erscheint es notwendig, die genannte Lücke der Produkt-THG-Bilanz zu schließen.

Um die Gesamtsenkenleistung von Wäldern nach den IPCC-Regeln zu bestimmen, müssen Prozesse, die CO₂ speichern (Senken), gegen Prozesse bilanziert werden, die CO₂ freisetzen (Quellen). Die Summe von CO₂-Einbindung und CO₂-Freisetzung durch Zuwachs, Mortalität, Zersetzung und Holzentnahme verändert die netto gespeicherte CO₂-Menge im Wald, welche als Gesamtsenkenleistung definiert wird. Im Rahmen einer Literaturstudie wurden aus gepaarten Simulationsszenarien mit extensiver vs. intensiver Waldbewirtschaftung aus Senkenleistung (t CO₂) und Holzentnahme (m³) berechnet, wie stark sich die Senkenleistung pro entnommenem Kubikmeter Holz verändert. Das Verhältnis wird als CO₂-Speichersaldo in t CO₂ pro m³ angegeben. Dieser Faktor wird bereits in anderen Studien verwendet. Die Ergebnisse zeigten, dass boreale und temperate Wälder einen mittleren CO₂-Speichersaldo von 1,2 t CO₂/m³ aufweisen, jedoch mit erheblicher Varianz ($\pm 0,7$ t CO₂/m³). Der Speichersaldo setzt sich dabei aus zwei

² Renewable Energy Richtlinie: RED III (Directive (EU) 2023/2413; <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/2413/oj>) auf Grundlage der RED II (Directive (EU) 2018/2001; <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32018L2001&qid=1699610056216>)

³ https://www.gesetze-im-internet.de/biost-nachv_2021/

⁴ Mit der UBA-Emissionsbilanzierung wird die Treibhausgasminde rung durch Erneuerbare Energien für Deutschland bilanziert.

Aspekten zusammen: Zum einen aus der Holzentnahme selbst, wobei die CO₂-Emissionen durch das im Holz gespeicherte CO₂ bestimmt sind (Laubholz ca. 1,0 t CO₂/m³, Nadelholz ca. 0,7 t CO₂/m³). Zum anderen hat die intensivere Bewirtschaftung weitere Auswirkungen auf die Waldentwicklung, allerdings in einem deutlich geringeren Maße (0,4 t CO₂/m³; Wechselspiel von z.B. Freiwerden von zusätzlichem CO₂ beim Verrotten von Kronentopholz und Wurzeln, veränderte Wuchsdynamik der Bäume, etc.).

Um den CO₂-Speichersaldo für Nadel- und Laubholz in FABio-Forest zu modellieren, wurde ein starkes Extensivierungsszenario mit reduzierter Holzentnahme für beide Holzarten simuliert. Die Ergebnisse zeigen, dass der CO₂-Speichersaldo bei Nadelholz niedriger ist als bei Laubholz, hauptsächlich aufgrund der geringeren Dichte des Nadelholzes, und dass natürliche Störungen den CO₂-Speichersaldo kaum beeinflussen.

Die Produkt-THG-Bilanz nach der RED für Holzenergie bewertet per Definition die CO₂-Verbrennungsemissionen von Holz und die CO₂-Effekte im Wald mit Null. Die Ergebnisse dieses Projektes machen deutlich, dass die Produkt-THG-Bilanz nach der RED zumindest um die CO₂-Verbrennungsemissionen von Holz erweitert werden sollte, wenn Ergebnisse bei der Entscheidungsfindung über die Holzenergieverwendung zum Erreichen nationaler THG-Ziele verwendet werden soll. Eine so erweiterte Produkt-THG-Bilanz von Energieholz sollte alle THG-Emissionen entlang der Prozesskette, CO₂-Verbrennungsemissionen von Holz, nicht-CO₂-Emissionen bei der Holzverbrennung (CH₄, N₂O) und Substitutionseffekte berücksichtigen. Forschungsbedarf besteht auch hinsichtlich der Integration weiterer Effekte aus der Dynamik der Waldfläche in die Produkt-THG-Bilanzen, insbesondere für stoffliche Holznutzung.

Ergebnisse der Treibhausgasmodellierung im Referenzszenario und für die Holzenergieszenarien

Zur Berechnung der Treibhausgasemissionen im Modellverbund werden die Mengen der verschiedenen Holzsortimente mit spezifischen Emissionsfaktoren multipliziert, die sämtliche Aspekte des Lebenszyklus der Bioenergieträger abdecken, einschließlich Anbau, Produktion, direkter Emissionen und Hilfsenergie, sowie CO₂-Verbrennungsemissionen von Holz.

So berechnete THG-Emissionen für Holzenergiepfade für Haushalte zeigt, dass Emissionen entlang der Prozesskette und von Nicht-CO₂-Emissionen bei der Verbrennung zwischen 2 bis 7 g CO₂/MJ liegen. Dabei schneiden Holzzentralheizungen besser ab als Einzelraumfeuerungsanlagen. Dem gegenüber stehen direkte CO₂-Verbrennungsemissionen von ca. 100 g CO₂/MJ. Wird letzteres – wie in der Produkt-THG-Bilanz nach der RED – nicht berücksichtigt, ergibt das Delta aus erzeugten Emissionen der Holzenergie und substituierten Emissionen des Energiemixes im Jahr 2020 eine THG-Minderung von -20 Mio. t CO₂-Äq. Bis zum Jahr 2050 geht die THG-Minderung aber auf null zurück, da der Energiemix dekarbonisiert wird und so die Substitutionswirkung entfällt. Werden die direkten CO₂-Emissionen – wie oben beschrieben – in der THG-Bilanz berücksichtigt, ist die Holzenergienutzung im Jahr 2030 in Deutschland eine Quelle von ca. 40 Mio. t CO₂-Äq., die bis zum Jahr 2050 auf ca. 38 Mio. t CO₂-Äq. abnimmt.

Auch der Vergleich der Emissionen aus den Holzenergieszenarien mit dem Referenzszenario zeigt, dass die Berücksichtigung der CO₂-Verbrennungsemissionen von Holz die Ergebnisse sehr stark beeinflusst und die Netto-THG-Bilanz der Holzenergienutzung im Zeitverlauf zunehmend verschlechtert. Die Einbeziehung der CO₂-Verbrennungsemissionen von Holz in die Produkt-THG-Bilanz von Energieholz macht dadurch sichtbar, dass eine verringerte Holzenergienutzung zu einer deutlichen THG-Minderung führt.

Summary

Objective

This final report within the BioSINK project aims to highlight the effects of wood energy use on the carbon sink capacity of forests in Germany, to analyze the potential of forests to provide the required wood quantities, and to create greenhouse gas balances for the use of wood energy in various areas of application. Existing and possibly yet to be developed funding schemes and developments in energy wood use and forest management are addressed by modeling different scenarios for future wood energy use. This paper aims to answer under which conditions, if any, the use of energy wood represents a greenhouse gas reduction measure in the context of climate protection, and under which circumstances increased imports of forest biomass are required. By applying different wood energy use scenarios, the authors also analyze how effective various restrictions on wood energy use are in protecting the carbon sink capacity of German forests. Possible effects of climatic uncertainties are considered in the forest model by simulating three sensitivities for mean growth intensities and mortality risks.

Model framework used for the BioSINK project

In the project, the wood use model TRAW (Total Resource Assessment of Wood), the forest growth model FABio Forest (Forestry and Agriculture Biomass Model), and the greenhouse gas balance model HoLCA (Live Cycle Assessment model for material flows in the wood industry) are used and coupled within a modeling framework. The model framework is centered on the wood usage model that determines the wood demand for a range of wood assortments based on different wood energy use scenarios. To accomplish this goal, historical trends are combined with assumptions about future economic and political developments. The demand for forest wood results from the wood requirement determined by the wood use model and is communicated to the forest model. In addition, the wood use model informs the greenhouse gas model on the type and quantities of used wood products. Based on this information, the greenhouse gas balance model quantifies the GHG emissions along the process chains. Moreover, the greenhouse gas balance model accounts for changes in the sink capacity of the forest area that results from the removal of wood. Adjustable management rules in the forest model constrain the maximum annual wood removal and therefore influence whether the demand for forest wood can be satisfied, or whether deficits remain that may be closed in other ways, e.g., through imports. In addition, the forest model tracks the development of basal areas of tree species groups, growth, deadwood stocks, stand structure, CO₂ storage in the forest and CO₂ sink strength.

Wood use modeling with TRAW

Wood use modeling with TRAW starts with the end products and traces these back to the semi-finished and raw materials sector, and consecutively the required extraction of raw materials from forests, waste, and recycling materials. In TRAW, the demand for wood products in the end-use-sector entails a demand for semi-finished products, whose production in turn requires raw materials. The knowledge of the raw material composition within the value chain is based on the raw material monitoring of wood. TRAW simulates the energy and material demand in end-use sectors and, within the energy sector, differentiates between individual combustion systems and wood-fired central heating systems in private households, and small-scale and large-scale combustion plants. For the material use of wood, TRAW differentiates between the following sectors: construction, furniture, packaging, paper, new bio-based goods, and other end products.

Forest modeling with FABio Forest

FABio Forest is built on data from the Federal Forest Inventory (BWI) and simulates forest development based on individual trees using modules for growth, ingrowth, mortality, dead wood dynamics, soil carbon, and wood removal. Output variables include stocks differentiated by tree species groups, growth increments, tree diameter distribution, wood extraction quantities, and forest carbon sink capacity. Forest management in the simulated stands of the BWI tracts is prescribed by rules and specifications for thinning and target harvest diameters, thinning and harvesting intensity, wood extraction rates, handling of harvest residues, and the proportions of tree species contributing to sapling recruitment. Forest management can be specified according to federal state, type of ownership (private vs. public), and forest type (deciduous, coniferous, and mixed forest). Implemented default management types are “Business as Usual”, “Intensification”, “Extensification” and “Usage Abandonment”. The tree species-specific mortality and growth functions are parameterized based on the average climate conditions during the period 2002-2012 and were adjusted for the years between 2013-2017 using data from the interim greenhouse gas inventory (TI-2017, for growth rates) and annual data on mortality from the forest condition survey (WZE, i.e., “Waldzustandserhebung”) up to the year 2021. To assess possible future climate-related influences on mortality and growth, three sensitivities for altered growth and mortality were simulated. In the sensitivity “low disturbances” (gS), mortality and growth are equal to the average of the period 2013-2017. The sensitivity “medium disturbances” (mS) is based on the average values for the period 2002-2017, and for “severe disturbances” (sS) mortality equals the average of the period 2002-2021, while growth increment is set as 0.9 times the average for 2002-2017.

Greenhouse gas balancing of wood energy usage with HoLCA

The material flow and life cycle assessment model HoLCA tracks the various processing and supply chains for the respective wood products or product groups based on silviculture. In the BioSINK project, the module for the energetic use of wood is used. Based on the material flow data from wood use modeling, the model determines the primary energy-related GHG emissions from the production and use of energy wood using specific emission factors for cultivation, manufacturing, transport, auxiliary energy and emissions arising from combustion (including CO₂ combustion emissions). In addition, the substitution of fossil raw materials with wood energy is considered and offset against the emissions resulting from wood energy production in order to obtain the overall emissions balance.

Consideration of foreign timber trade: studies for selected countries

Given that wood imports and exports can have negative social and environmental impacts in foreign countries, country studies for Poland, the Czech Republic, Canada and the USA analyzed the respective regulations and common practices in forestry, risk assessment regarding environmental impacts, and the export of energy wood for these countries. The country studies are based on expert interviews as well as internet and literature research.

Wood energy scenarios considered in BioSINK

The BioSINK project is centered on a reference scenario (REF) describing the material and energetic use of wood, from which three further scenarios for future wood energy utilization are derived: an intensification, a reduction and an extensification scenario. From 1990 to 2020, the reference scenario describes the energetic use of wood based on raw material monitoring data. For the future, it follows the federal government’s ‘with measures scenario’ (“Mit-Maßnahmen-Szenario”, MMS), whereby large combustion plants, small combustion plants, and private households with wood-fueled central heating systems and individual room combustion systems are distinguished. Until 2020, raw material shares correspond to the results of the raw material

monitoring of wood, and afterwards are assumed as constant for all wood energy uses. The energetic use of forest wood results from the assumed evolution of each scenario. The material use of wood in the reference scenario considers the construction sector including new buildings and modernization, the use of wood in the furniture and paper sector, as well as other wood uses. In the wood energy scenarios, the material use is assumed to be equal to the reference scenario, and the raw material shares for wood energy use are retained. In the wood energy extensification scenario, a decline in wood energy use is assumed allowing to achieve the GHG emission reduction required by the Federal Climate Protection Act. In particular, the extensification relies on a decrease in wood energy use in private households while assuming an increase in the number of small combustion plants. In the reduction scenario, the usage decline is less pronounced, but less energy wood is used than in the reference scenario. In the intensification scenario, the number of private wood central heating systems increases, assuming a 65 % renewable energy target in the Building Energy Act.

Simulated development of wood use in the reference scenario

Energy wood consumption in the reference scenario increases to a maximum of 61.3 million m^3_{swe} by 2030 and then drops to 44.1 million m^3_{swe} by 2050. In private households, after a strong increase during the 2000s, the maximum use was reached in 2013 at around 35 million m^3_{swe} . Consumption then decreases from 27.0 million m^3_{swe} in 2020 to 25.2 million m^3_{swe} in 2030, and consecutively declines to 20.3 million m^3_{swe} by 2050. Private users predominantly use forest logs in 2020 (47.0 % of total private energy wood use) and up to 2050, followed by energy wood products (19.0 % share of total). In 2020, large combustion plants (LCP) used 22.12 million m^3_{swe} of wood raw materials, of which 53.1 % was waste wood. Small combustion plants (SCP) used 9.32 million m^3_{swe} . After an increase up to 2030, a decrease of 6.2 million m^3_{swe} is modeled for LCP, and 1.3 million m^3_{swe} for SCP. The construction sector accounts for the largest share of wood material use, with 27.3 million m^3_{swe} in 2020 and an expected growth of at least 32.6 million m^3_{swe} . The furniture and paper sector are largely saturated markets, and limited growth is predicted for the wood packaging market after 2020. In total, including residual and recycled wood usage cascades for material and energy wood, TRAW simulates 135 million m^3_{swe} requirement in 2030, and 123 million m^3_{swe} in 2050. In the reference scenario, the volume of required forest wood increases from 68.6 million m^3_{swe} in 2020 to 72.8 million m^3_{swe} in 2050.

Simulated development of wood use in the wood energy scenarios

In the intensification scenario, energy wood use in 2030 amounts to 62.1 million m^3_{swe} , while in the reduction and extensification scenarios it only reaches 58.2 million m^3_{swe} and 54.6 million m^3_{swe} , respectively. In all scenarios, the use of energy wood will continuously decrease to approx. 44.5 million m^3_{swe} in 2050. Important reasons for this development are the increasing energy efficiency and an assumed temperature derived from a trend extrapolation of historical weather data. The rising temperature and falling frost and ice days reduce the need for heating. Differences between the wood energy scenarios result solely from deviating use of energy wood, as the material use from the reference scenario was adopted for all scenarios. The sum of material and energy wood use for the four scenarios is differentiated into the assortments stem wood, other merchantable wood, and residual wood to determine forest wood demand in FABio Forest.

Simulated forest development in the reference scenario

Starting in 2012 (initialization with data from BWI-3), forest growth and development was simulated for 65 years up to 2076. In the reference scenario with the sensitivity “medium disturbances”, the **demand for coniferous wood** cannot be satisfied from 2034 onwards, with an aver-

age annual deficit of 25 %. This result highlights the need for additional wood imports, substitution of scarce raw materials with available, more efficient utilization, an adaptation of the wood demand or other adjustments.

In 2076, the simulated **stock of merchantable wood** amounts to 3,935 million m³ (1,689 million m³ of needleleaf, 2,245 million m³ of broadleaf stock). Broadleaf stocks increase over the course of the simulation, while needleleaf stocks, particularly spruce and pine, decline. In 2076, this results in beech and oak stocks that exceed those of spruce and pine by approximately 28 % and 21 %, respectively.

The majority contribution to the **overall growth rate** is provided by spruce, pine, and beech, with beech's contribution increasing over time and already exceeding the declining overall growth rate of pine in the 2020s. With a medium disturbance regime from 2022 onwards, the average total annual growth rate is approx. 98.0 million m³ per year. The broadleaf contribution to the overall growth rate increases from 37.2 % in 2022 to 44.4 % by 2076. The growth rate of needleleaf trees, however, decreases over time from 61.0 million m³ in 2022 to 54.9 million m³ in 2076.

Due to high mortalities between 2018-2021, the simulated **deadwood stock** increases from 224.4 million m³ in 2012 to 381.5 million m³ in 2021. Assuming a medium disturbance regime, deadwood moderately keeps increasing until 2034, then decreases slightly until 2045, and afterwards remains approximately constant until 2076, with a final value of 454.6 million m³ (67.0 % coniferous, 33.0 % broadleaf share).

Needleleaf trees initially display **highest stock reserves in the diameter range** between 30-40 cm, followed by 40-50 cm and 20-30 cm. For broadleaf trees, stocks are relatively homogeneously distributed in the diameter classes between 20 and 60 cm. Under moderate disturbances, needleleaf stocks will decrease in the target harvest diameter range⁵ until 2034 and remain approximately constant thereafter. Broadleaf stocks in classes > 20 cm will continue to increase after 2033, especially in diameter classes > 60 cm, which are relevant as habitat trees.

High mortality and estimated growth declines between 2018 and 2021 lead to a simulated CO₂ release of approx. 40 million metric tons from forest in 2021. The future development of **the forest GHG sink** depends heavily on assumed disturbance sensitivities and can differ by more than 30 million t CO₂ per year between sensitivities. While broadleaf stands are always a sink, needleleaf stands are a source until the 2030s and then a zero sink, i.e., overall CO₂ uptake from needleleaf stands approximately corresponds to CO₂ release.

Simulated forest development: comparison of reference vs. wood energy scenarios

The varying demand for energy wood in the different wood energy scenarios influences the development of broadleaf stocks. In the extensification scenario (HE-ext), the broadleaf stock in 2076 is 100 million m³ higher than in the reference scenario; in the reduction scenario (HE-red), the surplus in broadleaf stocks is 40 million m³. In the intensification scenario (HE-int), the broadleaf stock in 2076 is 20 million m³ less than in the reference scenario. The differences in stocks also affect the overall growth rates of broadleaf trees, which is augmented in the HE-ext and HE-red scenarios compared to the reference scenario and reduced in the HE-int scenario. Due to the reduced felling of broadleaf trees in HE-ext and HE-red, the amount of residual crown wood resulting from harvesting is reduced, which leads to a small loss in the stock of broadleaf

⁵ Target diameters of needleleaf: 45 cm for spruce and pine, 50 cm for fir, 60 cm for larch and 80 cm for douglas fir.

deadwood compared to the reference scenario. In the needleleaf deadwood stock, changing competition conditions in the stands cause small deviations from the reference scenario.

The extensification of wood energy use (HE-ext) leads to a significant stock increase in large-diameter broadleaf trees, but small diameter classes also benefit. In the reduction scenario (HE-red), the stock gains are smaller, while the intensification scenario (HE-int) results in losses of broadleaf stocks, particularly in the large diameter classes. When comparing the greenhouse gas balance of living biomass in the German forest for different wood energy scenarios while also considering various disturbance influences, disturbance intensity has a strong influence on the sink performance. This effect is greater than the differences between the wood energy scenarios and the reference scenario. However, disturbances act in a similar way in all considered wood energy scenarios. The extensification and reduction of broadleaf wood use increase the sink capacity, while the intensification of broadleaf wood use reduces it. The results show that the intensity of energy wood extraction can cause a significant difference of several million tons of CO₂ for the annual sink capacity of forests.

Improving the greenhouse gas accounting of wood energy use

A fundamental distinction between two methods – the national greenhouse gas inventory according to the method used by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), and product greenhouse gas balancing – is required. Product GHG balances are used, for example, in the Renewable Energy Directive (RED), the Biomass Electricity Sustainability Ordinance and, based on this, in the UBA emissions balance (in short: product GHG balance according to RED). In accordance with the IPCC method, the GHG emissions for an entire country are compiled in the national greenhouse gas inventory and assigned to exactly one of the sectors involved in order to avoid double counting. Product GHG balancing, on the other hand, is carried out for a single product across sectors and countries to compare similar products.

According to IPCC rules, CO₂ emissions from wood burning are allocated to forestry in the LULUCF sector upon wood removal. Therefore, emissions are not accounted for during combustion. This also applies to the removal of wood from the wood product storage.

The product GHG balance according to the RED does not include emissions from wood harvesting and combustion and the dynamics of forest growth and wood product storage changed by wood harvesting. If product GHG balances are to be used to assess whether and to what extent wood energy improves the national GHG inventory, it appears necessary to close the abovementioned gap in the product GHG balance.

To determine the total carbon sink capacity of forests in accordance with the IPCC rules, processes that store CO₂ (sink) must be balanced against processes that release CO₂ (source). The sum of CO₂ storage and release through growth, mortality, decomposition, and wood removal changes the net amount of CO₂ stored in the forest, which is defined as total sink capacity. As part of a literature study, paired simulation scenarios with extensive vs. intensive forest management were used to calculate how much the sink performance changes per cubic meter of removed wood based on sink performance (t CO₂) and wood removal (m³). The resulting ratio is termed the CO₂ storage balance with the unit “t CO₂ per m³”. This factor is already used in other studies. The results showed that boreal and temperate forests have a mean CO₂ storage balance of 1.2 t CO₂/m³, but with considerable variation (±0,7 t CO₂/m³). The storage balance is made up of two aspects: Firstly, from the wood removal itself, whereby the CO₂ emissions are determined by the CO₂ stored in the wood (broadleaf wood approx. 1.0 t CO₂/m³, needleleaf approx.

0.7 t CO₂/m³). On the other hand, more intensive management has further effects on forest development, however, to a much lesser extent (about 0.4 t CO₂/m³; interplay of e.g. release of additional CO₂ during rotting of crown top wood and roots, changed growth dynamics of the trees, etc.).

To model the CO₂ storage balance for broadleaf and needleleaf wood in FABio-Forest, a strong extensification scenario with reduced wood extraction was simulated for both types of wood. The results show that the CO₂ storage balance of needleleaf wood is lower than that of broadleaf wood, mainly due to the lower density of needleleaf wood, and that natural disturbances have little effect on the CO₂ storage balance.

By definition, the product GHG balance according to the RED for wood energy values the CO₂ combustion emissions of wood and the CO₂ effects in the forest at zero. The results of this project show that the product GHG balance according to the RED should at least be extended to include the CO₂ combustion emissions of wood if results are to be used in decision-making on the use of wood energy to achieve national GHG targets. Such an extended product GHG balance of energy wood should consider all GHG emissions along the process chain, CO₂ and non-CO₂ (CH₄, N₂O) emissions from wood combustion, and substitution effects. There is also a need for research on integrating further effects resulting from the dynamics of the forest area into the product GHG balances, especially for the material use of wood.

Greenhouse gas modeling results for the reference scenario and the wood energy scenarios

To calculate greenhouse gas emissions in the model framework, the quantities of the different wood assortments were multiplied by specific emission factors that cover all aspects of the life cycle of the bioenergy sources, including cultivation, production, direct emissions and auxiliary energy, as well as CO₂ emissions from wood combustion.

GHG emissions for wood energy paths for households show that emissions along the process chain and from non-CO₂ emissions during combustion range from 2 to 7 g CO₂/MJ. Central wood heating systems perform better than single-room combustion systems. This contrasts with direct CO₂ combustion emissions of approximately 100 g CO₂/MJ. If the latter is not taken into account – as in the product GHG balance according to the RED – the delta of emissions generated by wood energy and substituted emissions of the energy mix in 2020 results in a GHG reduction of -20 million t CO₂ eq. However, by 2050, the GHG reduction will be zero, as the energy mix will be decarbonized and the substitution effect will no longer apply. If the direct CO₂ emissions – as highlighted above – are included in the GHG balance, wood energy use in Germany in 2030 is estimated to contribute approximately 40 million tons of CO₂ eq. to emissions, which decreases to approximately 38 million tons of CO₂ eq. by 2050.

Comparison of the emissions from the wood energy scenarios with the reference scenario also shows that the consideration of CO₂ emissions from wood combustion has a very strong influence on the results and increasingly worsens the net GHG balance of wood energy use over time. Including CO₂ emissions from wood combustion in the product GHG balance of energy wood clearly shows that reduced wood energy use leads to a significant reduction of GHG emissions.

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Die **Klima- und Biodiversitätskrise** stellt die Gesellschaft vor existenzielle Herausforderungen. Der Wald nimmt global wie auch national eine Schlüsselrolle in diesen miteinander verbundenen Krisen ein. Er steht auch in Deutschland unter vielfältigem Druck.

Durch Photosynthese nehmen Pflanzen CO₂ aus der Atmosphäre auf und fixieren den enthaltenen Kohlenstoff in Biomasse. So entstehen flächenbezogene Kohlenstoffvorräte in verschiedenen Pools wie lebender Biomasse, toter Biomasse und Bodenkohlenstoff. Für die effektive Wirkung solcher **natürlichen Senken** auf das Klima ist es wichtig, eine hohe Dauerhaftigkeit der Kohlenstofffestlegung zu erreichen. Die Speicherung von Kohlenstoff in Pflanzen, Boden und Holzprodukten ist allerdings **nur bedingt dauerhaft**, denn die Kohlenstoffpools stehen in einem dynamischen Fließgleichgewicht aus Zu- und Abflüssen. Dabei haben verschiedene natürliche und anthropogene Prozesse einen wichtigen Einfluss darauf, ob Bäume im Wald und der Waldboden als Nettosenke oder -quelle für Kohlenstoff fungieren.

Die Höhe von Risiken für natürliche Kohlenstoffspeicher in Deutschland steht in einem engen Zusammenhang mit der **Intensität der Bewirtschaftung** (Fokus dieses Berichts) sowie **Änderungen in der Landnutzung** (nicht in diesem Bericht betrachtet). Werden durch intensivierete Holznutzung Wälder stark beansprucht, verringert sich der mittlere Kohlenstoffgehalt der Waldflächen, und die Bäume werden daran gehindert, höhere Kohlenstoffvorräte zu akkumulieren.

Natürliche Störungen wie Stürme, Feuer, Dürreperioden (abiotische Störungen) und Insektenkatastrophen oder Pathogene (biotische Störungen) stellen einen weiteren Risikofaktor für die langfristige Aufnahme und Speicherung von Kohlenstoff in Biomasse und Böden dar. Allein in den drei Jahren 2018 bis 2020 sind 285.000 ha an Waldbeständen in Deutschland durch Sturm, gefolgt von extremer Trockenheit und Borkenkäferbefall, geschädigt worden bzw. abgestorben (Bolte et al. 2021). Für den Zeitraum 2018 bis 2022 nennt das BMEL sogar eine wiederaufzuforstende Waldfläche von 450.000 ha.⁶ Zudem muss eine Fläche von 2,85 Mio. ha in den nächsten Jahrzehnten umgebaut werden, da auf dieser nicht-standortheimische Fichtenbestände stocken, die als nicht ausreichend an den Klimawandel angepasst gelten (Bolte et al. 2021).

Ökosysteme wie Wälder, die als natürliche Senken fungieren, haben neben der Aufnahme und Speicherung von Kohlenstoff eine Vielzahl weiterer Funktionen. Sie dienen verschiedensten Arten als **Lebensraum**, tragen wesentlich zur **Grundwasserneubildung** bei, bilden dynamische **Wasserreservoirs**, aber stellen auch **Biomasse** bereit und bilden unverzichtbare **Erholungsgebiete** für uns Menschen. Eine Steuerung der Senkenleistung muss unter Betrachtung und Berücksichtigung aller anderen Ökosystemfunktionen erfolgen. Nur so kann langfristig auch die Resilienz der natürlichen Senken gegenüber einem sich immer schneller ändernden Klima sichergestellt werden.

Die **aktuelle Entwicklung** im Sektor LULUCF (Land Use, Land Use Change and Forestry), dem der Wald zugerechnet wird und in dem die THG-Emissionen der Landnutzung⁷ und auch CO₂-Einlagerungen berichtet werden, ist dramatisch. Während die Netto-Kohlenstoffeinlagerung im Wald abnimmt (von über -80 Mio. t CO₂ in den 1990er Jahren auf ca. -41 Mio. t CO₂ im Jahr 2021), bestehen weiterhin hohe THG-Emissionen aus organischen Böden unter Acker- und

⁶ <https://www.bmel.de/DE/themen/wald/wald-in-deutschland/wald-trockenheit-klimawandel.html> (zuletzt geprüft am 03.11.2023).

⁷ Im Sektor Landwirtschaft werden zusätzliche Emissionen berichtet, insbesondere aus der Tierhaltung und der Stickstoffdüngung.

Grünland von über 40 Mio. t CO₂ Äquivalenten. Für die Jahre 2020 und 2021 zeigen die aktuellsten Berichtszahlen eine **Netto-Quelle des gesamten LULUCF-Sektors von ca. +4 Mio. t CO₂ Äquivalenten** aus (Umweltbundesamt (UBA) 2023).

Das **Bundes-Klimaschutzgesetz** (KSG) vom Juni 2021 schreibt erstmals verbindliche Ziele für eine Netto-Kohlenstoffeinbindung (auch bezeichnet als Senkenleistung) durch den LULUCF-Sektor vor. Bis zum Jahr 2030 sind Netto-Kohlenstoffeinbindung von -25 Mio. t CO₂, 2040 dann -35 Mio. t CO₂ und 2045 -40 Mio. t CO₂ pro Jahr zu erreichen. Zusätzlich wurde durch die Verabschiedung der Novellierung der LULUCF-Verordnung ((EU) 2018/841) im April 2023 ein **EU-weites Ziel der Senkenerhöhung auf -310 Mio. t CO₂-Äq. im Jahr 2030** gesetzt (European Commission (EC) 2023). Dieses wird auf national verbindliche Ziele heruntergebrochen. Für Deutschland ist ein Senkenziel von -30,8 Mio. t CO₂-Äq. für das Jahr 2030 festgelegt, bzw. eine Verbesserung der Senke im Vergleich zu den Jahren 2016-2018 um mindestens -3,7 Mio. t CO₂-Äq.

Im März 2023 beschloss die Bundesregierung das **Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz** (ANK)⁸, dessen Ziel es ist, den Zustand von Ökosystemen und deren Klimaschutzleistung deutlich zu verbessern. In diesem Programm werden insgesamt 4 Milliarden EUR zur Verfügung gestellt, die über einen Zeitraum von drei Jahren zwischen 2023 bis 2025 in 10 aus über 60 einzelnen Maßnahmen bestehenden Handlungsfeldern investiert werden. Darunter befinden sich auch vier Maßnahmen, die direkt den Wald betreffen. Konkret sind dies 1) Biodiversitätsfördernde Mehrung der Waldfläche, 2) Schaffung artenreicher und klimaresilienter Laubmischwälder durch Wiederherstellung und Waldumbau, 3) Finanzielle Anreize für zusätzliche Klimaschutz- und Biodiversitätsleistungen im Wald und 4) Schutz von alten, naturnahen Buchenwäldern.

Holzbiomasse aus dem Wald wird in Deutschland in vielen Bereichen eingesetzt. In den Jahren 2013 bis 2017 wurden zwischen 66,4 bis 72,9 Mio. m³ an Holz eingeschlagen (Jochem et al. 2023b). Dies entsprach einer Nutzung von etwa 75 % des Zuwachses an Holzvolumen im Wald. In den Extremjahren 2018 bis 2022 stieg die Holzentnahme aufgrund von natürlichen Störungen stark an (73,7 bis 82,2 Mio. m³). Eine Auswertung der Zuwächse im Zuge der vierten Bundeswaldinventur steht aber noch aus. Die energetische Nutzung in Form von Scheitholz, Hackschnitzeln und Pellets betrug 2016 etwa 50 % des Gesamtholzaufkommens (Hennenberg et al. 2022). Dies schließt auch Altholz und industrielles Restholz ein, macht aber deutlich, dass die energetische Verwendung ein dominierender Faktor der Holznutzung ist. Im Jahr 2018 wurden 28,2 Mio. m³ **Brennholz in Privathaushalten** verbraucht (Hennenberg et al. 2022). Das mengenmäßig wichtigste Brennholzsortiment war Waldscheitholz, auf das 18,2 Mio. m³ (64,5 %) vom gesamten Brennholzverbrauch entfielen. Vor allem Laubholz wird zum überwiegenden Teil als Brennholz eingesetzt.

Mit dem **Gebäudeenergiegesetz**⁹ wird der **Umstieg auf erneuerbare Energien** beim Heizen und bei der Warmwasserbereitung gesetzlich verankert und so die Dekarbonisierung des Wärmebereichs eingeleitet und schrittweise umgesetzt. Angestrebt wird, dass beim Einbau neuer Heizungen vermehrt auf erneuerbare Energie gesetzt wird. Unklar ist, wie das GEG auf den Einbau neuer **Biomasseheizungen** und die Nachfrage nach Holzbrennstoffen wirken wird.

Zurzeit entwickelt die Bundesregierung außerdem die **Nationale Biomassestrategie** (NABIS), mit der Biomasseströme, inklusive Holzbiomasse, zielgerichtet gelenkt werden sollen, um sicherzustellen, dass Biomasse bestmöglich eingesetzt wird. Für ein **Monitoring** der Wirkung

⁸ <https://www.bmu.de/natuerlicher-klimaschutz>

⁹ <https://www.gesetze-im-internet.de/geg/>

der Biomassenutzung für die Erreichung von Klimaschutzziele können neben der THG-Bericht-erstattung (s. o.) auch Produkt-Treibhausgas-(THG)-Bilanzen der stofflichen und energetische Holznutzung dienen. Eine Holznutzung ist aus Sicht der Atmosphäre aber nur dann sinnvoll, wenn die THG-Emissionen des Holzprodukts inklusive Veränderungen der Kohlenstoffpools im Wald geringer sind, als die THG-Emissionen ersetzter CO₂-intensiver Stoffe oder fossiler Energiequellen. Dies ist besonders bei der Produkt-THG-Bilanz für die direkte Nutzung als Energieholz von Bedeutung, da bei dieser relativ wenig fossile THG-Emissionen eingespart werden (**Substitutionseffekt**) und die Kohlenstoffspeicherung in Holzprodukten entfällt.

1.2 Zielsetzung des Projekts BioSINK

Mit dem Projekt BioSINK soll geprüft werden, welche Auswirkungen die aktuelle Holzenergienutzung in Deutschland auf die Senkenleistung des Waldes hat und welche Veränderungen aufgrund bestehender Förderinstrumente zu erwarten sind.

Im UBA-Bericht „Aktuelle Nutzung und Förderung der Holzenergie“ (Hennenberg et al. 2022) als Teilbericht zu den Projekten BioSINK und BioWISE¹⁰ wurden Daten zu Nutzungsströmen von Holz und zum Außenhandel sowie zu Regelungen, Förderinstrumente und sonstiger politischer Strategien, die die Nutzungsströme von festen Brennstoffen maßgeblich beeinflussen, zusammengestellt. Die folgenden Fragestellungen standen dabei im Fokus:

- ▶ Wie wirken sich die bestehenden Förderinstrumente und zusätzliche die Holzenergienutzung verstärkende Entwicklungen auf den Energieholzbezug aus?
- ▶ Unter welchen Umständen muss mit einem verstärkten Import forstlicher Biomasse zur energetischen Nutzung in Deutschland gerechnet werden?

Im vorliegenden Bericht werden die **Auswirkungen der Holzenergienutzung auf die Senkenleistung des Waldes** in Deutschland analysiert und als ein zentrales Element in der THG-Bilanzierung berücksichtigt. Auch Effekte durch Holzenergieimporte werden betrachtet. Daten und Ergebnisse aus Hennenberg et al. (2022) sind eine wichtige Grundlage für die Szenarientwicklung in diesem Bericht. Dies betrifft insbesondere Informationen zu Gesetzen und Fördermaßnahmen, die Anreize zur energetischen Holznutzung setzen, sowie die historische Holznutzung, die die Grundlage für Trendfortschreibungen bildet, und im Ergebnisteil zusammen mit den Modellergebnissen dargestellt wird. Durch die **Modellierung von Szenarien** in Abhängigkeit von Förderinstrumenten und Annahmen zur Waldbewirtschaftung wird den folgenden Fragen nachgegangen:

- ▶ Können nachgefragte Holzmengen nachhaltig aus dem Wald entnommen werden?
- ▶ Welchen Einfluss hätte eine verstärkte energetische Nutzung in Deutschland auf die entsprechenden nationalen und internationalen LULUCF-Senken?
- ▶ Unter welchen Bedingungen stellt die Energieholznutzung eine Minderungsmaßnahme im Rahmen des Klimaschutzes dar?
- ▶ Wie effektiv sind Einschränkungen der Holzenergienutzung, um die Kohlenstoffsinkenleistung der Wälder zu schützen?

Die im vorliegenden Bericht vorgestellten Ergebnisse ermöglichen einen Einblick in die Wirkung der deutschen Holzenergienutzung auf LULUCF-Senken, woraus sich Empfehlungen für die

¹⁰ UBA-Projekt „Wirkmechanismen von Regelungen und Förderinstrumenten des Bundes und der Länder auf den Einsatz fester Biomasse in der Wärmeerzeugung (BioWISE)“ (FKZ 3720 43 504 0, Köppen et al. 2024).

Entwicklung von Förderinstrumenten ableiten lassen. Diese sollen helfen, im Spannungsfeld zwischen Senkenleistungen der Waldfläche und Holzprodukten, Emissionen entlang der Prozesskette und möglichen Substitutionseffekten den Beitrag der Holzenergienutzung zum Erreichen von Klimaschutzziele zu optimieren.

1.3 Einordnung der Projektergebnisse in Bezug zu politischen Entwicklungen

Die Festlegungen zu den Szenarienannahmen in dieser Studie erfolgte Anfang des Jahres 2023. Da aktuell das politische Umfeld zum Klimaschutz sehr dynamisch ist, wurden im Jahr 2023 z.T. andere politische Entscheidungen getroffen, als in den Szenarien angenommen wurden. Hier ist insbesondere das Gebäudeenergiegesetz (GEG) zu nennen, bei dem die Holzenergieverwendung weniger stark als erwartet eingeschränkt wurde. Auch die wirtschaftliche Entwicklung ist sehr dynamisch. So wirken sich stark gestiegene Zinssätze dämpfend auf die Bauaktivität aus und politische Zielsetzungen im Neubau – und damit Annahmen in der Bauholzverwendung in dieser Studie – werden voraussichtlich nicht zeitnah erreicht.

Derartige Herausforderungen treten bei Arbeiten mit Szenarien häufig auf, stellen aber nicht den grundsätzlichen Wert dieser oder vergleichbarer Studien in Frage. Alle Annahmen und Ergebnisse werden transparent dargestellt und es so den Leserinnen und Lesern ermöglicht, veränderte Rahmenbedingungen bei der Ergebnisinterpretation zu berücksichtigen.

1.4 Produkte im Projekt BioSINK

Im Projekt BioSINK sind – neben diesem Abschlussbericht – die folgenden Produkte zu nennen:

- ▶ UBA-Bericht „Aktuelle Nutzung und Förderung der Holzenergie“ als Teilbericht zu den Projekten BioSINK und BioWISE (Hennenberg et al. 2022)
- ▶ Artikel im Journal *Global Change Biology Bioenergy* „Closing an open balance: The impact of increased tree harvest on forest carbon“ (Soimakallio et al. 2022)
- ▶ Artikel in der Zeitschrift *AFZ-DerWald* „Trägt die Energienutzung von Waldholz zum Klimaschutz bei?“ (Hennenberg et al. 2023)
- ▶ In (Pfeiffer et al. 2023) wurden Beschreibungen zum Modellverbundes (Kap. 2) und die Ergebnisse zum Referenzszenario (Kap. 4) bereits vorab veröffentlicht. Über den vorliegenden Bericht hinausgehende Beschreibungen zu Modellentwicklungen und zu Ergebnissen des Referenzszenarios können in dieser Veröffentlichung nachgelesen werden.

Zudem werden in einem Anhangsdokument zu diesem Abschlussbericht Detailinformationen zu Arbeiten im Projekt BioSINK zusammengestellt. In diesem Dokument wird mit z.B. „Anhang B“ auf ein Kapitel im Anhangsdokument verwiesen.

2 Modellverbund

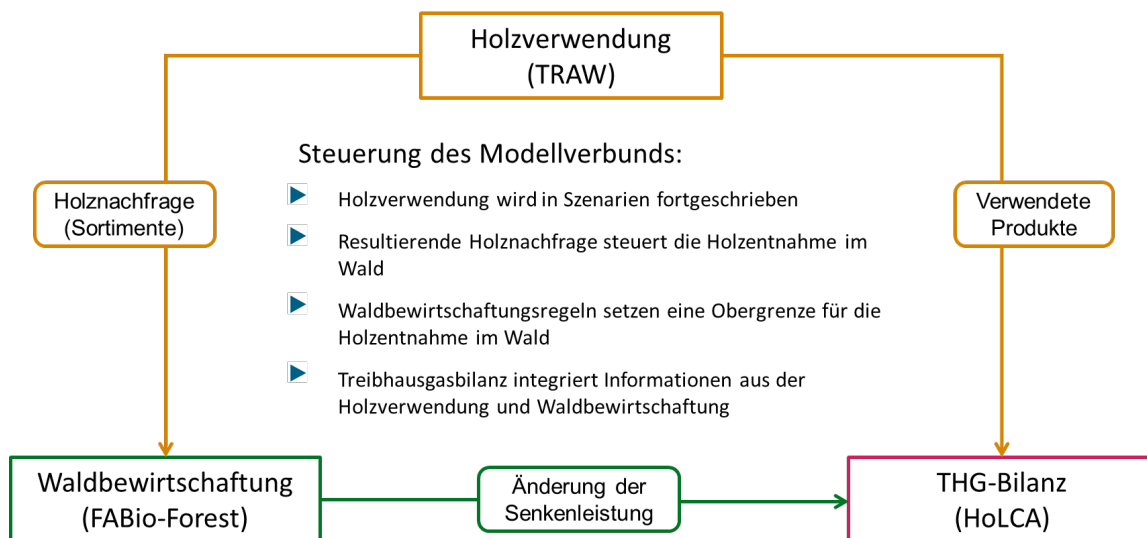
2.1 Überblick über den Modellverbund

Der Modellverbund, der im Projekt BioSINK eingesetzt wurde, setzt sich aus drei Modellen zusammen:

- ▶ Das Holzverwendungsmodell TRAW (**T**otal **R**esource **A**ssessment of **W**ood) modelliert die zukünftige stoffliche und energetische Holzverwendung in Deutschland (siehe Kap. 2.2).
- ▶ Das Waldmodell FABio-Forest (**F**orestry and **A**griculture **B**iomass Model) simuliert Entwicklungen auf der Waldfläche in Deutschland (siehe Kap. 2.3).
- ▶ Das Treibhausgasbilanzmodell HoLCA (**L**CA-Modell für Stoffströme der **H**olzwirtschaft) bilanziert die Treibhausgasemissionen, die entlang der Prozesskette von Holzprodukten entstehen (siehe Kap. 2.4).

Für die Entwicklung von Szenarien nimmt die Holzverwendungsmodellierung eine zentrale Rolle ein. Ausgehend von historischen Trends der Holzverwendung wird in TRAW auf Basis ökonomischer und politischer Annahmen die zukünftige Verwendung von Holzprodukten in Deutschland für Endwarenspektoren (z.B. Energie, Bau) fortgeschrieben. Aus der Endwarennachfrage werden die dafür eingesetzten Zwischenprodukte (Halbwaren) abgeleitet. Anschließend werden aus der Menge der eingesetzten Halbwaren (z.B. Pellets, Spanplatten) die verwendeten Mengen an Holzrohstoffen bestimmt. TRAW unterscheidet dabei nach Waldholz und Rest- und Recyclingholz. Die Nachfrage nach Waldholz wird als Treiber für die Waldbewirtschaftung an FABio-Forest übergeben. Dabei wird nach Stammholz, das in der Sägeindustrie verarbeitet wird, sonstigem Derbholz (Rundholz)¹¹, genutztem Waldrestholz sowie Rinde unterschieden (Abbildung 1, Abbildung 2).

Abbildung 1: Struktur des Modellverbunds und Treiber



Quelle: Eigene Darstellung. TRAW = Total Resource Assessment of Wood, FABio = Forestry and Agriculture Biomass Model; HoLCA = LCA-Modell für Stoffströme der Holzwirtschaft.

¹¹ Derbholz hat einen Durchmesser größer 7 cm. Derbholz, das in der Sägeindustrie verwendet wird, wird als Stammholz bezeichnet. Derbholz, das außerhalb der Sägeindustrie verwendet wird, wird als Rundholz geführt. Waldrestholz hat einen Durchmesser kleiner 7 cm.

Die aus TRAW kommende Holznachfrage steuert in FABio-Forest die Holzentnahme im Wald (Abbildung 1). Im Waldmodell einstellbare Bewirtschaftungsregeln definieren dabei eine Obergrenze für die maximal mögliche Holzentnahme. Wird mehr Holz nachgefragt, als entnommen werden darf, wird die Differenz als Lücke ausgewiesen, die z.B. durch Holzimporte gedeckt werden kann. In diesem Bericht werden vor allem Ergebnisse zur Entwicklung der Holzentnahme, der Baumartengruppen nach Basalfläche, des Holzvorrats, des Zuwachses, der Totholzvorräte, der Bestandesstruktur (repräsentiert durch Volumenverteilung über die Durchmesserklassen), sowie der im Wald gespeicherte Menge an CO₂ und die CO₂-Speicherleistung dargestellt (Abbildung 2).

Die Treibhausgasbilanz für Holzprodukte, die in HoLCA abgebildet wird, beschränkt sich in diesem Projekt auf die Nutzung von Holzenergie in Gegenüberstellung zu fossilen Vergleichsprodukten. Die in Deutschland verwendeten Mengen an Energieholz werden als Input-Daten aus der Holzverwendungsmodellierung übernommen (vgl. Abbildung 1) und die THG-Emissionen entlang der Prozesskette bilanziert. Zudem werden die CO₂-Verbrennungsemissionen von Holzenergie in die THG-Bilanz einbezogen (vgl. Kap. 4.3.1). Als Ergebnisse werden THG-Bilanzen für einzelne Energieholzprodukte und als Summe für die Energieholznutzung in Deutschland ausgegeben (Abbildung 2).

Abbildung 2: Ergebnisse des Modellverbunds

Holzverwendung (TRAW)	Waldbewirtschaftung (FABio-Forest)	THG-Bilanz (HoLCA)
<ul style="list-style-type: none"> - Verwendete Holzprodukte (stofflich und energetisch) - Holzaufkommen: Derbholz (Laub und Nadel), Resthölzer (primär und sekundär), Recyclingholz 	<ul style="list-style-type: none"> - Holzentnahme - Zuwachs - Verteilung der Baumartengruppen - Bestandesstruktur (Durchmesserklassen) - Holzvorrat (lebende Biomasse, Totholz) - Gespeichertes CO₂, Senkenleistung 	<ul style="list-style-type: none"> - THG-Bilanz der Holzenergieprodukte inkl. der CO₂-Verbrennungsemissionen von Holz - Substitution - Treibhausgasminderung

Quelle: Eigene Darstellung. TRAW = Total Resource Assessment of Wood, FABio = Forestry and Agriculture Biomass Model; HoLCA = LCA-Modell für Stoffströme der Holzwirtschaft.

Der Modellverbund im Projekt BioSINK verwendet zwischen den Projektpartnern abgestimmte Annahmen und Datensätze und ermöglicht eine gekoppelte Modellierung der Holzverwendung, der Waldentwicklung und der Treibhausgasbilanzierung von Holzenergie. So sind die Ergebnisse zur Holznachfrage aus den Szenarien zur Holzverwendung direkt inhaltlich mit der Modellierung der Waldentwicklung verknüpft. Die Treibhausgasbilanz für Holzenergie bezieht sich auf die verwendeten Holzproduktmengen und integriert mögliche Auswirkungen der Holzentnahme auf die CO₂-Speicherung auf der Waldfläche.

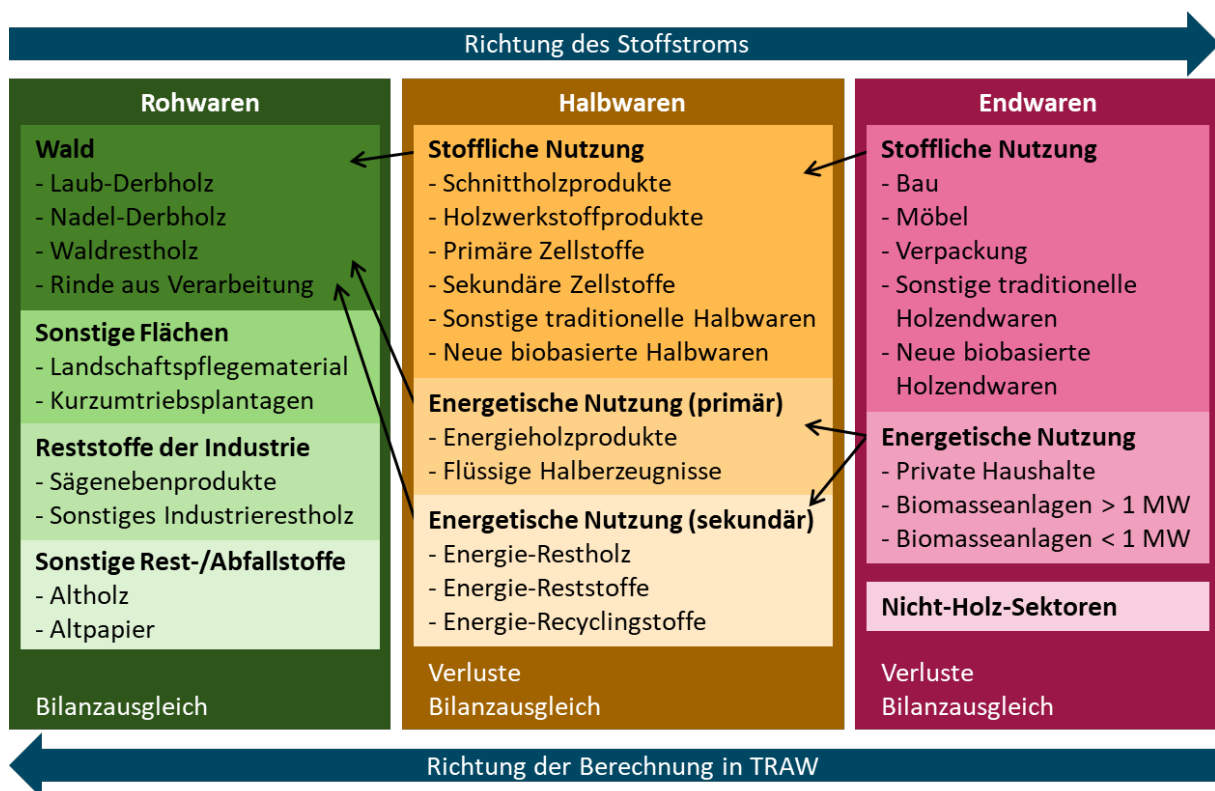
Szenarien zu unterschiedlichen Holzverwendungsintensitäten ermöglichen so Aussagen darüber, wie sich eine Zu- oder Abnahme der Waldenergieholznutzung auf die Waldentwicklung und auf Treibhausgasemissionen auswirkt. Zudem können für den Wald mögliche Auswirkungen des Klimawandels in Form steigender natürlicher Störungen mithilfe von Sensitivitäten für jährlichen Zuwachs und Mortalität analysiert werden.

2.2 Holzverwendungsmodellierung mit TRAW

Die Wertschöpfungskette der Holznutzung beginnt mit der Rohstoffverwendung in Form von Wald-, Rest- und Recyclingholz, setzt sich in der Produktion von Halbwaren (z. B. Schnittholz,

Platten, Zellstoff) und Energieholz fort, und endet schließlich in der Verwendung von Holzprodukten in den Endwarenssektoren (z. B. Bau, Möbel, Energie). Die Wirkungskette verläuft dem entgegengesetzt: Abhängig davon, wie sich die Verwendung von Holzprodukten in den Endwarenssektoren entwickelt, löst dies eine Nachfrage nach Halbwaren aus. Die Produktion von Halbwaren und Energieholz erfordert ihrerseits den Einsatz von Rohwaren. Das Holzverwendungsmodell TRAW folgt dem Verlauf der Nachfrage und modelliert damit die Wirkungskette ausgehend von der Ebene der Endwaren. Private, staatliche und industrielle Verwender von Holzprodukten lösen durch ihre Nachfrage die Produktion von Endwaren aus. Für die Endwarenerzeugung werden Halbwaren benötigt, die ihrerseits aus Holzrohwaren gefertigt werden. Wesentliche Voraussetzung für die Vorgehensweise in TRAW ist die Kenntnis der Rohstoffzusammensetzung auf allen Ebenen der Wertschöpfungskette. Die Grundlagen dafür wurden weitgehend im Rohstoffmonitoring Holz geschaffen.¹² Abbildung 3 fasst den Modellierungsansatz in TRAW zusammen und weist die Marktsektoren aus, die dabei grundsätzlich Berücksichtigung finden.

Abbildung 3: Struktur des Holzverwendungsmodells TRAW



Quelle: Eigene Darstellung. TRAW = Total Resource Assessment of Wood. Pfeile symbolisieren die Holznachfrage aus dem Wald.

Die Holzverwendung in Deutschland ist das Ergebnis der stofflichen und energetischen Nachfrage in Endverwendungssektoren. Im Holzverwendungsmodell TRAW werden folgende Sektoren abgebildet:

► Energetische Verwendung:

- Für **private Haushalte** werden die Anzahl der Einzelfeuerungsanlagen und Holzzentralheizungen sowie die verwendete Menge an Holz abgebildet.

¹² Siehe Mantau et al. (2018b), Mantau et al. (2018c) und Mantau (2023) sowie weitere Quellen in Pfeiffer et al. (2023).

- Als **Biomasseanlagen** werden größere Anlagen außerhalb der privaten Haushalte zusammengefasst. Diese werden in Kleinf Feuerungsanlagen (<1 MW Feuerungswärmeleistung, FWL) und Großfeuerungsanlagen (>1 MW FWL) unterteilt.
- ▶ Stoffliche Verwendung:
 - Der **Bausektor** deckt den Neubau der Gebäudegruppen Wohnbau (Eigenheime, Mehrfamilienhäuser) und Nichtwohnbau (industrielle, wohnähnliche und landwirtschaftliche Betriebsgebäude) ab. Hinzu kommt die Modernisierung in bestehenden Wohn- und Nichtwohngebäuden und der Tiefbau.
 - Der **Möbelsektor** umfasst unterschiedliche Möbel, die aus Vollholz oder Holzwerkstoffen (Platten, Furnier, etc.) hergestellt werden.
 - Im **Verpackungssektor** werden unterschiedliche Verpackungsmaterialien aus Holz (z.B. Paletten, Kisten, etc.) eingesetzt. Verpackungspapiere werden dem Papiersektor zugeordnet. Die Treiber können jedoch ähnlich sein.
 - Der **Papiersektor** teilt sich in die Segmente Druckpapiere, Zeitungspapiere, Verpackungspapiere und Hygienepapiere auf. In diesem Bereich wird auf die Zellstoffproduktion fokussiert, die für die Waldholzentnahme von Bedeutung ist.
 - Unter der Gruppe „**Neue biobasierte Waren**“ werden Produkte zusammengefasst, die in Bioraffinerien oder mithilfe anderer, meist chemischer, Prozesse gewonnen werden. Ihre quantitative Bedeutung ist derzeit gering, aber ihr werden große Entwicklungspotenziale zugeschrieben.
 - Unter der Gruppe „**Sonstige Endwaren**“ werden Produkte zusammengefasst, die den genannten Sektoren nicht zugeordnet werden können. Als Beispiele sind Holzspielzeug, Bleistifte, Campingbesteck oder Armaturenblechverkleidungen zu nennen. Da diese Produkte mengenmäßig eine sehr untergeordnete Rolle spielen und zudem eine Datengrundlage fehlt, werden sie im Projekt BioSINK nicht modelliert bzw. als Teil der Datenlücke zwischen End- und Halbwerten ausgewiesen.

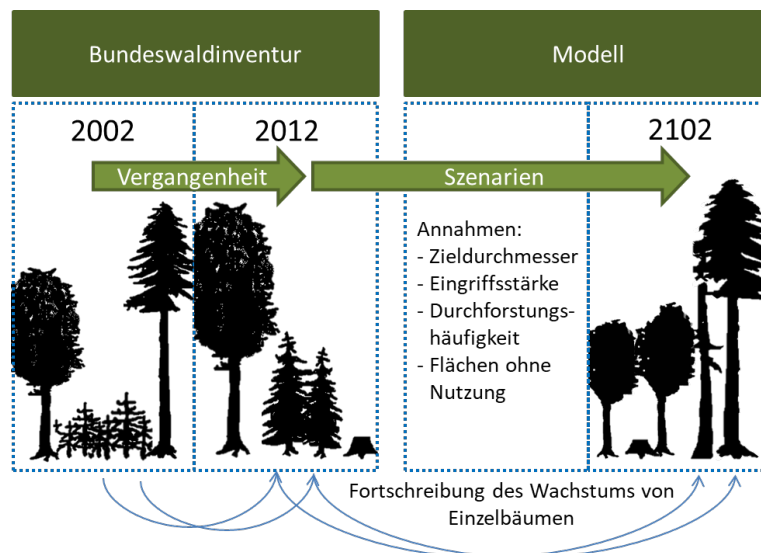
2.3 Waldmodellierung mit FABio-Forest

Das Öko-Institut entwickelt seit 2015 den FABio-Modellverbund (Forestry and Agriculture Biomass Model). Er besteht aus drei Teilmodellen: FABio-Land (LULUCF), FABio-Forest (Wald) und dem Agrarmodell LiSE (Landwirtschaft). Diese Modelle nutzen Methoden der Systemdynamik- und Szenarienmodellierung, um die Produktion und Nutzung von Biomasse in der Land- und Forstwirtschaft und deren Auswirkungen auf Umweltindikatoren zu beschreiben.

Das Waldsimulationsmodell FABio-Forest wird im Detail in Böttcher et al. (2018a) dargestellt, und aktuelle Weiterentwicklungen der im Projekt BioSINK verwendeten Modellversion 2.1 werden in Pfeiffer et al. (2023) beschrieben. Es basiert auf Daten der Bundeswaldinventur (BWI) und beschreibt das Wachstum einzelner durch die Inventuren erfasster Bäume mithilfe eines distanzunabhängigen Einzelbaumwachstumsmodells. Dabei wird die Entwicklung und Dynamik der Bäume mit Zustandsvariablen wie Baumart, Alter, Durchmesser, Höhe, etc. in Abhängigkeit artabhängiger Eigenschaften im Modell beschrieben und mittels Wachstumsfunktionen fortgeschrieben (Abbildung 4). Die in FABio-Forest abgebildeten Prozesse lassen sich in die folgenden Sub-Modelle untergliedern¹³:

¹³ Siehe Details unter www.waldvision.de (zuletzt geprüft am 03.11.2023).

Abbildung 4: Allgemeine Beschreibung der Arbeitsweise des Modells FABio-Forest



Quelle: Eigene Darstellung in Böttcher et al. (2018b).

- ▶ **Waldwachstumsmodell:** Zuwachs einzelner Bäume in Abhängigkeit von Baumart¹⁴, Durchmesser, Höhe, Konkurrenz und Standortbedingungen sowie von einfachen Annahmen zu Auswirkungen des Klimawandels in Form von steigenden natürlichen Störungen (Kap. 2.3.1).
- ▶ **Einwuchsmodell:** Einwuchs von Baumarten aus dem im Bestand vorhandenen Artenpool sowie zufällig hinzukommenden bzw. gezielt geförderten weiteren Baumarten. Eine Überprägung durch Durchforstung ist möglich.
- ▶ **Mortalitätsmodell:** Sterblichkeit einzelner Bäume in Abhängigkeit von Baumart, Durchmesser, Alter, Konkurrenz, Standortbedingungen und Baumartenvielfalt, sowie von Annahmen zu natürlichen Störungen als Auswirkung des Klimawandels (Kap. 2.3.1).
- ▶ **Totholzmodell:** Entwicklung des Totholzvorrates (ergibt sich aus dem Input durch Erntereste und natürliche Mortalität und dem Output durch Holzersetzung im Zeitverlauf).
- ▶ **Boden-Kohlenstoff-Modell:** Simulation des Kohlenstoffabbaus in Streu und Boden über die Zeit in Abhängigkeit von Klima und Streuqualität.
- ▶ **Holzentnahme-Modell¹⁵:** Im Holzverwendungsmodell TRAW wird die jährliche Nachfrage nach Waldholz modelliert. In FABio-Forest wird diese Nachfrage genutzt, um die Holzentnahme im Wald zu steuern (Kap. 2.3.2).

Als Indikatoren bzw. Ausgabevariablen werden in FABio momentan berechnet: Zuwachs der Bestände und Entwicklung des Holzvorrats, CO₂-Speicherleistung¹⁶ (lebende Biomasse, Boden-

¹⁴ FABio Wald simuliert 24 Arten bzw. Artengruppen. Für die meisten Auswertungen werden die Arten zu neun Baumartengruppen aggregiert: Fichte, Kiefer, Tanne, Douglasie und Lärche, Buche, Eiche, sonstige langlebige Laubbäume und sonstige kurzlebige Laubbäume.

¹⁵ In dem Fall, dass FABio-Forest nicht in einem Modellverbund integriert ist, kann intern im Holzprodukte-Modell das geerntete Holz in Verwendungsklassen eingeteilt und die Kohlenstoffvorräte in Holzprodukten errechnet werden.

¹⁶ Die verwendeten Berechnungsmethoden genügen den IPCC-Anforderungen im LULUCF-Sektor.

kohlenstoff, Totholz und Holzprodukte), Bestandsstruktur (Baumarten- und Durchmesserverteilung), Totholzvorrat nach Artengruppen, sowie Holzentnahme nach Baumarten und Sortimenten basierend auf Derbholzholz-Durchmesserklassen und anfallendem Kronenrestholz.

Die Waldentwicklung in Deutschland hängt vor allem von den biotischen und abiotischen Bedingungen auf Bestandesebene, von klimatischen Veränderungen und von der gewählten Art der Waldbewirtschaftung ab. Auf entsprechende Parametrisierungen in FABio-Forest wird in den folgenden Kapiteln eingegangen.

2.3.1 Waldentwicklung und Klimaveränderung

In FABio-Forest wird die Entwicklung des Waldes an jeder der simulierten Traktecken¹⁷ durch die folgenden Submodelle beschrieben:

- ▶ **Waldwachstumsmodell:** Das Kernstück des Waldwachstumsmodells ist die Zuwachsfunktion, die auf jeden Einzelbaum in einem 1 ha Plot angewendet wird (Böttcher et al. 2018a, dort Kap. 3.2). Der Grundflächenzuwachs eines Baums wird in Abhängigkeit von seinem Durchmesser und seiner Höhe, der Summe der Grundfläche der jeweils stärkeren Bäume im Plot (Konkurrenz), der bestehenden Bestandesgrundfläche des Plots, der Anzahl der Bäume im Bestand und der Bonität des Plots (standortabhängige Wüchsigkeit; siehe Details in Böttcher et al. 2018a) modelliert. Auf Basis der Entwicklung zwischen BWI-2 und BWI-3 wurde der Zuwachs in FABio-Forest individuell für 24 Baumartengruppen parametrisiert. Je nach Bedingungen wächst der betrachtete Baum stärker oder schwächer zu.
- ▶ **Mortalitätsmodell** (siehe Details in Pfeiffer et al. 2023): FABio-Forest nutzt eine Mortalitätsfunktion, die in jedem Jahr für jeden Baum die Wahrscheinlichkeit errechnet, abzusterben. Eine durch einen Zufallsgenerator gezogene Zahl wird mit der durch die Mortalitätsfunktion bestimmten Absterbewahrscheinlichkeit verglichen und bestimmt jährlich für jeden Baum, ob er abstirbt. Die Mortalitätsfunktion berücksichtigt das Alter und den Brusthöhendurchmesser des Baums, die Grundfläche der jeweils stärkeren Bäume (Konkurrenz), die Bonität des Standorts, und die Baumartenvielfalt der Fläche. Junge und ältere Bäume haben ein höheres Mortalitätsrisiko als mittelalte Individuen. Gleichzeitig steigt die Mortalität mit steigender Konkurrenz.

Die Parametrisierung der baumartspezifischen Mortalitäts- und Zuwachsfunktionen basiert auf dem mittleren Zuwachs unter den mittleren Witterungsbedingungen im Zeitraum 2002 bis 2012 (s.o.). Wetterextreme wie die Trockenperioden in den Extremjahren 2018 bis 2020 können mit der bestehenden Mortalitäts- und Zuwachsfunktion nicht direkt abgebildet werden, da Klimadaten wie Strahlungsbilanz, Temperatur, Niederschlag und klimatische Wasserbilanz aufgrund fehlender Datengrundlage in den BWI-Plots bisher nicht als Eingangsparameter in der Zuwachsfunktion nutzbar sind. FABio-Forest nutzt derzeit folgende Ansätze, um dennoch Sensitivitäten zu Klimaveränderungen in Form steigender natürlicher Störungen berücksichtigen zu können.

- ▶ **Sensitivität der Mortalität** (siehe Details in Pfeiffer et al. 2023): Die jährlichen Waldzustandserhebungen (WZE) erfassen die Mortalität von Bäumen als einen Parameter. Daher ermöglichen es die Daten der WZE-Zeitreihe, die mittlere Mortalität in der Periode 2002-2012 (BWI-2 bis BWI-3) mit der Mortalität in anderen Perioden zu vergleichen. So stieg z.B. die Mortalität für Fichte von 2,04 % (Mittel 2002-2012) um den Faktor 4,40 auf 8,98 % in der Periode 2018-2021 an. So werden Anpassungsfaktoren für Baumartengruppen und unterschiedliche Perioden aus der WZE abgeleitet (Pfeiffer et al. 2023, dort Anhang 7.1.2.4).

¹⁷ In der Bundeswaldinventur wird ein Erhebungsfläche als Trakt bezeichnet. In dem Trakt werden an vier Traktecken Daten erhoben (Riedel et al. 2017).

Die Anpassungsfaktoren spiegeln klimabedingte, unterschiedlich extreme Bedingungen wider. In FABio-Forest können die Faktoren für unterschiedliche Mortalitätsperioden ausgewählt und das Ergebnis der Basismortalitätsfunktion mit diesen Faktoren skaliert werden. Auf diese Weise lassen sich Sensitivitäten für die Waldentwicklung und Kohlenstoffspeicherung abschätzen, die sich durch klimabedingt zeitlich variierende Mortalität ergeben.

- **Sensitivität des Zuwachses auf Klimaveränderungen** (siehe Details in Pfeiffer et al. 2023): In FABio-Forest wurde die Zuwachsfunktion für Baumarten anhand von Daten aus der Referenzperiode 2002-2012 parametrisiert. Ermittelte Zuwächse beziehen sich so auf die Bedingungen in der Referenzperiode (Basis-Parametrisierung als Mittelwert der Referenzperiode). In der im Projekt BioSINK verwendeten FABio-Forest-Modellversion kann als ein vereinfachter Ansatz¹⁸ für Sensitivitätsanalysen eingestellt werden, dass der ermittelte Zuwachs über einen manuellen Faktor jahresscharf erhöht oder verringert wird. Für Jahreszuwächse, die besser als das Mittel der Referenzperiode sind, wird der mit der Basis-Parametrisierung errechnete Zuwachs durch Multiplikation mit einem Faktor >1 angepasst, bei schlechteren Zuwächsen mit einem Faktor <1. Dabei wird nicht zwischen Durchmesserklassen unterschieden. Durch die Möglichkeit zur Zuwachsskalierung können jahresscharf Annahmen zur Mortalität mit Annahmen zum Zuwachs abgestimmt werden (z.B. Mortalität wie in 2018-2021 mit 50 % des Zuwachses; Mortalität wie in 2002-2012 mit 100 % des Zuwachses).

In FABio-Forest werden die Waldbestände vom Jahr 2013 bis zum Jahr 2021 fortgeschrieben. Hierzu werden berichtete Daten aus der Treibhausgasinventur (TI-2017)¹⁹, zum Holzeinschlag (Jochem et al. 2022) und zur Mortalität der Baumartengruppen (Waldzustandserhebung²⁰) herangezogen und Einschätzungen zur Veränderung der Zuwächse der Baumartengruppen getroffen (siehe Details in Pfeiffer et al. 2023). Für die Fortschreibung ab dem Jahr 2022 werden die folgenden drei Sensitivitäten unterschieden:

- **Geringe Störungen (gS)**: Mortalität und Zuwachs verhalten sich wie der Mittelwert der Jahre 2013 bis 2017.
- **Mittlere Störungen (mS)**: Mortalität und Zuwachs verhalten sich wie der Mittelwert der Jahre 2002 bis 2017.
- **Starke Störungen (sS)**: Mortalität verhält sich wie der Mittelwert der Jahre 2002 bis 2021 und der Zuwachs wie der Mittelwert der Jahre 2002-2017 multipliziert mit dem Faktor 0,9.

Diese Einstellungen werden für eine Sensitivität jeweils für alle Jahre im Zeitraum 2022 bis 2076 als konstant angenommen. So spannen die Sensitivitäten einen Korridor möglicher Störungsniveaus auf, die klimatische Zustände widerspiegeln. Der Simulationszeitraum von 65 Jahren bis zum Jahr 2076 wurde gewählt, da er hinreichend lang ist, um längerfristige Trends der Waldentwicklung abbilden zu können, und gleichzeitig vom Rechenaufwand realisierbar war.

2.3.2 Waldbewirtschaftung und Holzentnahme

In FABio-Forest können Annahmen zur Waldbewirtschaftung eingestellt werden. Wichtige Stellgrößen sind die Durchforstungsintensität (Baumdurchmesser, Eingriffsstärke), die Intensität

¹⁸ Im Waldklimafond-Projekt „Waldentwicklung als Folge von Veränderung der Holznachfrage, Klimaveränderung, natürlichen Störungen und Politikanforderungen - Eine Analyse der Reaktionsmöglichkeiten von Forst- und Holzwirtschaft“ (DIFENS, FZK: 2220WK32A4) wird eine Anbindung der Zuwachsfunktion in FABio-Forest an Klimaparameter erarbeitet.

¹⁹ <https://bwi.info/> (zuletzt geprüft am 03.11.2023).

²⁰ <https://wo-apps.thuenen.de/apps/wze/> (Datenabruf: 20.12.2022).

der Zielstärkennutzung (Zieldurchmesser, Eingriffsstärke), die Extraktionsrate (Verbleib von Holz und Ernteresten im Wald) und die Baumartenanteile beim Jungwuchs (siehe Böttcher et al. 2018b). Vier Waldbewirtschaftungstypen sind in FABio als Standard hinterlegt, die differenziert nach Bundesland, Privat- bzw. Staats-/Körperschaftswald und Waldtyp (Laub-, Nadel- oder Mischwald) ausgewählt werden können:

- ▶ **Business as Usual (BAU):** Der Waldbewirtschaftungstyp BAU schreibt die gängige Praxis in der Forstwirtschaft in Deutschland fort. Dazu lehnen sich die Einstellungen zu Zieldurchmessern und Nutzungsintensitäten an das WEHAM Basisszenario an (BMEL 2016; siehe Böttcher et al. 2018b). Zielstärkennutzung und Nutzungsintensität betragen im Mittel für Nadelbäume 54 cm und 76 %, und für Laubbäume 59 cm und 79 %. Zielstärkendurchmesser und Nutzungsintensität variieren abhängig von Bestandstyp, Bundesland, und Besitzttyp (Privatwald und Nichtprivatwald). Durchforstung erfolgt für Bäume ab 7 cm BHD bis maximal 80 % des Zielstärkendurchmessers, und zwar alle 7-11 Jahre bei einer Durchforstungsintensität für Nadelbäume von 20 % des Vorrats und bei Laubbäumen von 10 % des Vorrats (weichlaubdominierte Bestände: 5 % des Vorrats).
- ▶ **Intensivierung:** Ausgehend von BAU wird die Nutzung intensiviert. Der jährliche Zuwachs wird vollständig abgeschöpft, die Durchforstungsintensität wird erhöht und Nadelbäume werden gegenüber Laubbäumen gefördert (mittlere Zieldurchmesser und Nutzungsintensität bei Nadelbäumen von 56 cm und 100 % und bei Laubbäumen von 63 cm und 100 %).
- ▶ **Extensivierung:** Gegenüber dem BAU wird die Nutzung herabgefahren. Die Zieldurchmesser werden um ca. 20 % erhöht (Nadelbäume 64 cm, Laubbäume 71 cm) und die Einschlagsintensität wird angepasst (Nadelbäume 92 %, Laubbäume 75 %). Die Durchforstungsintensität wird verringert und Laubbäume werden gegenüber Nadelbäumen gefördert.
- ▶ **Nutzungsaufgabe:** Alle Waldbewirtschaftungsmaßnahmen werden eingestellt.

In den BioSINK-Szenarien gelten für Laubbaum-dominierte Bestände der Waldbewirtschaftungstyp BAU und für Nadelbaum-dominierte Bestände der Waldbewirtschaftungstyp Intensivierung, aber ohne Förderung von Nadelbäumen gegenüber Laubbäumen²¹. Für das simulierte Subset „8A“ an BWI-Datenpunkten (8er-Grid mit jeweils bis zu 4 Traktecken, entspricht 36.692 simulierten Datenpunkten) wurde für 6 % der Datenpunkte eine Null-Nutzung (Schutzgebietsstatus) simuliert. Der gewählte Waldbewirtschaftungstyp legt durch seine Vorgaben implizit jährlich eine Obergrenze für die maximale Holzentnahme fest. Sie ist dadurch bestimmt, welche und wie viele Bäume gemäß den Einstellungen des Waldbewirtschaftungstyps entnommen werden dürfen. In FABio-Forest ist eine hierarchische Entnahmelogik implementiert, die Sonderpflfemaßnahmen (Schadholzentnahme), Durchforstung, und Zielstärkennutzung berücksichtigt (siehe Pfeiffer et al. 2023). Dieser Entnahmelogik folgend wird die Menge an Waldholz, die im Holzverwendungsmodell TRAW nachgefragt wird, aus dem Wald entnommen. Übersteigt die Waldholznachfrage die maximal möglich Holzentnahme, so wird die nicht gestillte Nachfrage als Defizit ausgewiesen, das dann beispielsweise über Importe abgedeckt werden muss.

²¹ Diese Hybrid-Version zweier unterschiedlicher Waldbewirtschaftungsintensitäten abhängig vom Bestandstyp wurde gewählt, da die intensive kommerzielle Nutzung des Nadelholzes in Historie und Fortschreibung eine der Nutzung entsprechend intensive Bewirtschaftung voraussetzt, um die Nachfrage so lange wie möglich abdecken zu können. Beim Laubholz war hingegen die Bewirtschaftung nach BAU ausreichend, um die Nachfrage über die gesamte Simulationsperiode stets befriedigen zu können.

2.4 Treibhausgasbilanzierung für Holzenergie mit HoLCA

Die Treibhausgasbilanzierung (THG-Bilanz) steht am Ende des Modellverbundes und bezieht ihre Inputdaten aus den Mengenströmen an Energieholz aus TRAW. Zudem wird die entgangene Speicherleistung auf der Waldfläche berücksichtigt (siehe Details in Kapitel 4.3.1). Im Projekt BioSINK erfolgt die Treibhausgasbilanzierung ausschließlich für den Mengenstrom der energetischen Holznutzung. Die Berechnung der deutschlandweit netto eingesparten THG-Emissionen durch die Nutzung von Holzenergie folgt den Prinzipien der Ökobilanzierung.

Die Berechnung selbst erfolgt mit dem Stoffstrom- und Ökobilanz-Modell HoLCA (LCA-Modell für Stoffströme der Holzwirtschaft), welches im Rahmen des UBA-Projekts BIOMASSEKASKADEN (Fehrenbach et al. 2017) entwickelt wurde. Es bildet die gesamte in Deutschland verwendete Holzmenge ab. Ausgehend vom Waldbau enthält es die verschiedenen Verarbeitungs- und Lieferketten zu den jeweiligen Holzprodukten, bzw. -produktgruppen. Für dieses Projekt wird das Modul der energetischen Holznutzung verwendet.

Die Bilanzierung der THG-Emissionen und -einsparungen, die mit der energetischen Holznutzung in Zusammenhang stehen, erfolgt in mehreren Schritten:

- ▶ Den Input bilden zunächst die **Stoffstromdaten der Holzverwendungsmodellierung** (siehe Kapitel 2.2), die in Haushalte sowie Biomasseanlagen größer, bzw. kleiner, 1 MW unterteilt sind. Die in den verschiedenen Kategorien verwendeten Holzmengen liegen zunächst als m^3_{swe} vor und werden in Energieeinheiten umgerechnet (siehe Umrechnungsfaktoren in Anhang C.2).
- ▶ Im nächsten Schritt werden die **THG-Emissionen der Energieholzerzeugung** und -nutzung berechnet. Dazu werden die Mengenströme der einzelnen Sortimente mit den jeweils spezifischen Emissionsfaktoren für Anbau, Herstellung, Transport, Hilfsenergie sowie den direkten, bei der Verbrennung erzeugten Emissionen multipliziert. Für Restholz und Abfallstoffe wie Landschaftspflegeholz oder Altholz fallen keine Anbauemissionen an. Damit ergeben sich die Gesamt-THG-Emissionen der Holzenergienutzung in Deutschland, bezogen auf die Primärenergie.
- ▶ Ein Teil der **entgangenen Senkenleistung** im Wald wird in Form von CO_2 -Verbrennungsemissionen mit einberechnet (s. Kapitel 4.3.1).
- ▶ Für die **Substitution fossiler Rohstoffe** durch die Holzenergie wird die Nutzung der Primärenergie anhand technologiespezifischer Wirkungs-, bzw. Nutzungsgrade auf die Endenergie umgerechnet. Diese wird jeweils wiederum mit den Emissionsfaktoren für Strom und Wärme multipliziert, so dass sich die THG-Emissionen der ersetzten fossilen Energie ergeben.
- ▶ Als letzter Schritt erfolgt die **Verrechnung** der durch die Holzenergienutzung erzeugten Emissionen mit den substituierten Emissionen zu den netto vermiedenen Emissionen (THG-Minderung).

Die meisten Hintergrunddaten, wie Emissionsfaktoren, Nutzungs- bzw. Wirkungsgrade sowie die Substitutionsfaktoren wurden der Emissionsbilanz entnommen (Lauf et al. 2021) und sind im Anhang C.2 aufgelistet.

2.5 Holzimporte und -exporte

Holzimporte und -exporte werden in der Holzverwendungsmodellierung in TRAW als Fortschreibung historische Werte abgebildet, zu denen an dieser Stelle Hintergrundinformationen zusammengefasst werden. Die Summe der verwendeten Holzenergieprodukte im Inland betrug im Jahr 2020 21,999 Mio. t. Die Inlandsproduktion war mit 21,375 Mio. t nur geringfügig kleiner. Dies ist trotz Importen in Höhe von 2,566 Mio. t ein so geringer Unterschied, weil gleichzeitig 2,186 Mio. t exportiert wurden und der Saldo folglich -0,381 Mio. t (1,7 % der Verwendung) betrug. Im Bereich der Holzpellets ist Deutschland Nettoexporteur in etwa gleicher Größenordnung (0,511 Mio. t). Für das Sortiment Altholz ist zu berücksichtigen, dass es Altholz zur energetischen (ca. 83 %) und stofflichen (ca. 17 %) Nutzung enthält.²²

Tabelle 1: Zusammenfassung der Holzenergienutzung nach Sektoren und Sortimenten (in Mio. t)

in Mio. t in 2020	Produktion	Export	Import	Saldo (Export-Import)	Inlandsverwendung
Brennholz	9,779	0,190	0,206	-0,015	9,794
Holzpellets	2,755	0,801	0,289	0,511	2,243
Holzbriketts	0,806	0,050	0,259	-0,209	1,015
Altholz	8,035	1,144	1,812	-0,668	8,946
Summe	21,375	2,186	2,566	-0,381	21,999
Holzkohle	0,040	0,032	0,165	-0,133	0,173

Quelle: Eigene Berechnungen nach Statistischem Bundesamt und vorläufige Ergebnisse des Rohstoffmonitorings¹².

Die folgenden Ausführungen geben eine Übersicht zu Handelsströmen der mengenmäßig bedeutenden stofflichen Nutzungen (siehe Details in Mantau 2023):

- ▶ Die Schnittholzindustrie importierte 2020 5,567 Mio. m³ und exportierte 10,347 Mio. m³ Schnittholz. Der Handelssaldo (Überschuss) von 4,780 Mio. m³ Schnittholz entsprach 18,8 % der Schnittholzproduktion (25,450 Mio. m³).
- ▶ Die Holz- und Zellstoffindustrie importierte 2020 14,285 Mio. m^{3_{swe}} und exportierte 2,922 Mio. m^{3_{swe}} Holz- und Zellstoff. Die Holz- und Zellstoffindustrie handelt in Tonnen. Zur Vergleichbarkeit wurden die Werte in Festmeteräquivalente umgerechnet. Der Handelssaldo (Defizit) von 11,363 Mio. m^{3_{swe}} Holz- und Zellstoff entsprach etwa der doppelten Menge der Produktion (5,234 Mio. m^{3_{swe}}).
- ▶ Die Plattenindustrie importierte 2020 3,823 Mio. m^{3_{swe}} und exportierte 5,040 Mio. m^{3_{swe}} Plattenwerkstoffe. Zur Vergleichbarkeit wurden die, zum Teil verdichteten, Kubikmeter Platten in Festmeteräquivalente umgerechnet. Der Handelssaldo (Überschuss) von 1,217 Mio. m^{3_{swe}} Platten entsprach etwa 10,5 % der Produktion (5,234 Mio. m^{3_{swe}}).

Die Ursachen der unterschiedlichen Handelsstrukturen sind sehr vielfältig und haben insbesondere beim Zellstoff historische Gründe. Näheres hierzu findet sich in der Publikation zum Rohstoffmonitoring Holz¹².

²² Eine ausführliche Darstellung zum Außenhandel mit Brennholz findet sich in Hennenberg et al. (2022).

²³ swe = Festmeteräquivalent aus dem Englischen „solid wood equivalent“ abgeleitet.

Exkurs: Länderstudien

Ausgehend von Ergebnissen in Hennenberg et al. (2022) wurden vier Länder ausgewählt, um mögliche negative Umweltauswirkungen sowie Auswirkungen auf soziale Aspekte von Energieholzimporten nach Deutschland vertieft zu analysieren. Ausgewählt wurden mit **Kanada** und **USA** zwei Länder in Nordamerika und mit **Polen** und **Tschechien** zwei Nachbarländer Deutschlands. Auswahlkriterien waren vor allem die Höhe an Potenzialen für steigende Holzimporte aus Ländern in- und außerhalb von Europa. Die Analysen fokussierten auf drei Themenfelder:

- ▶ Geltende Vorschriften und gängige Praxis der Forstwirtschaft,
- ▶ Risikoabschätzung bzgl. der Umweltauswirkungen einer gesteigerten Energieholz-Entnahme, und
- ▶ Export von Energieholz.

Die Analysen starteten mit zwei Expert*innen Interviews und wurden durch punktuelle Internet- und Literaturrecherchen ergänzt (siehe Details in Anhang E).

Im Hinblick auf die geltenden **Vorschriften** zeigte sich, dass in allen untersuchten Ländern Regelungen zur **nachhaltigen Forstwirtschaft** implementiert sind und diese Regelungen in der forstwirtschaftlichen Praxis angewandt und meist auch überprüft werden. Dabei reichen die Anforderungen von ertragskundlichen Kriterien über umweltbezogenen Kriterien (Bodenschutz, Wasserhaushalt) bis hin zu Naturschutzkriterien (Schutzgebiete, Anforderungen an den Artenschutz). In allen vier Ländern werden die Anforderungen an die Waldbewirtschaftung in der Fläche anhand von Bewirtschaftungsplänen umgesetzt, und es gibt i.d.R. weitere naturschutzfachliche Anforderungen (z.B. Schutzgebiete, Artenschutzprogramme etc.). Als Nachweissysteme sind für Kanada ein generelles Monitoringsystem für Entnahmemengen (inkl. Sanktionssystem bei Verstößen) und ein Zertifizierungssystem für Holzenergie zu nennen. In den USA sollen zertifizierte Sägewerke sicherstellen, dass für geliefertes Holz die gute fachliche Praxis bei der Waldbewirtschaftung eingehalten wird. In Tschechien gibt es die gute fachliche Praxis der Waldbewirtschaftung. Für Polen wird von den interviewten Experten ein fehlendes Monitoring bemängelt. Es ist aber zu betonen, dass das Einhalten der guten fachlichen Praxis in einem Land nicht direkt gleichgesetzt werden kann mit ausreichenden Umwelt- und Naturschutzstandards. So ist z.B. in allen untersuchten Ländern eine Kahlschlagwirtschaft möglich oder die übliche Bewirtschaftungsform. Dies ist aus der deutschen Perspektive generell kritisch zu sehen. So wird z.B. im Bundesnaturschutzgesetz als Ziel bei der forstlichen Nutzung des Waldes genannt, naturnahe Wälder aufzubauen und diese ohne Kahlschläge nachhaltig zu bewirtschaften (BNatSchG §5 Abs. 3).

Für die vier Beispielländer werden mehr oder weniger hohe Risiken durch eine gesteigerte Energieholzentnahme für die Umwelt und die Natur benannt:

- ▶ **Kanada:** Trotz einer relativ naturschutzorientierten Ausrichtung der forstlichen Praxis wurden in Kanada in den letzten Jahrzehnten aus Umweltsicht deutliche negative Entwicklungen beobachtet wie der Verlust alter Waldbestände (z.B. auf Grund der expandierenden Öl- und Gasindustrie sowie der Holz- und Papierindustrie), der Verlust von Kohlenstoffspeicher auf der Waldfläche aufgrund von Käferkalamitäten und Waldbränden und der Rückgang typischer borealer Baumarten. Effekte einer steigenden Holzernte aufgrund der Nachfrage nach Energieholz wird aktuell wissenschaftlich untersucht. Kritisch ist vor allem die Erschließung alter Wälder zu sehen.

- ▶ **USA:** Die Auswirkung der heutigen Forstwirtschaft auf Umwelt und Natur wird von den interviewten Experten sehr konträr von gering bis sehr hoch eingeschätzt. Es ist aber festzuhalten, dass nur noch 5 % der Waldfläche Primärwald sind und dass insbesondere im Südosten Wälder z.T. mit sehr kurzen Umtriebszeiten bewirtschaftet werden. Gerade der Einschlag von Sumpfwäldern für die energetische Holznutzung stellen ein deutliches Risiko für den Verlust von Ökosystemdienstleistungen dar.
- ▶ **Polen:** Die aktuelle forstliche Praxis ist sehr produktionsorientiert und führt zu einer geringen Diversität in der Altersstruktur mit überdurchschnittlich vielen jungen Beständen und geringen Totholzvorräten. Die derzeitige Waldbewirtschaftung stellt u.a. Risiken für den Naturschutz in Natura 2000 Waldhabitaten dar. Eine nochmalige Steigerung der Energieholznachfrage würde die bereits bestehenden negativen Auswirkungen der Waldbewirtschaftung auf die Biodiversität, Bodenerosion oder verringerte Senkenleistung auf der Waldfläche verschärfen.
- ▶ **Tschechien:** Die Böden der Wälder sind häufig versauert, hohe Anteile der Waldfläche sind mit Nadelbäumen bestockt und die bestehende bzw. historische Waldbewirtschaftung hat sich ungünstig auf die Biodiversität ausgewirkt (z.B. niedrigere Totholz mengen). Generell bestehen hohe Risiken für eine weitere Degradierung der Wälder, wie sich bei Trockenheit und Käferkalamitäten in den Jahren 2018 bis 2020 zeigte. Ein erhöhte Holzentnahme wird von den Experten als Risiko für den Zustand des tschechischen Waldes bewertet.

In den USA haben schon heute Exporte von Energieholz deutliche negative Auswirkungen auf die Umwelt und führen auch zu sozialen Belastungen. Bei steigenden Exporten nach Deutschland kann eine Verschärfung der Probleme erwartet werden. Auch in Polen ist bei einem steigenden Export von Energieholz nach Deutschland mit negativen Auswirkungen auf Umwelt und Natur zu rechnen. Derartige Effekte sind auch in Tschechien möglich, aber laut Experten nicht eindeutig. In Kanada spielen Energieholzexporte hingegen eine untergeordnete Rolle und mögliche Anstiege werden weniger kritisch gesehen.

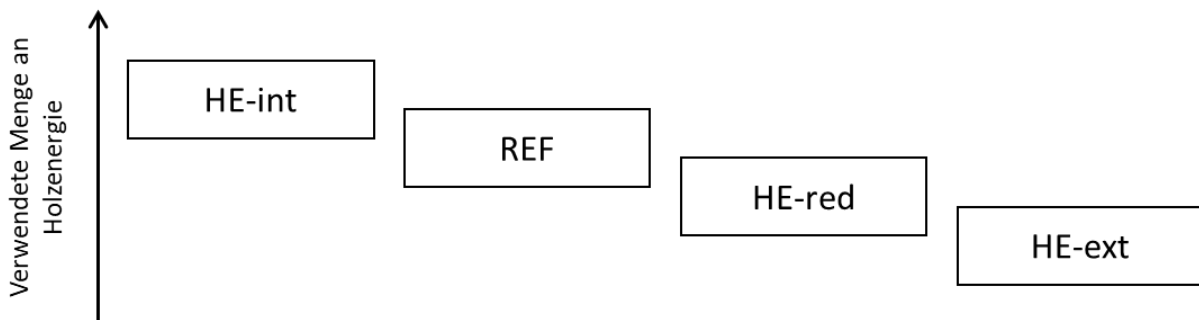
3 Szenarienentwicklung

3.1 Überblick über die Szenarien

Im Modellverbund des Projekts BioSINK steuert die Modellierung der Holzverwendung in TRAW die Waldbewirtschaftung in FABio-Forest sowie die THG-Bilanzierung in HoLCA (siehe Kap. 2). Entsprechend werden die Szenarien in dieser Studie auf Ebene der Holzverwendung ausgestaltet (vgl. Abbildung 5, siehe dazu auch Hinweise in Kap. 1.3):

- ▶ **REF** („Referenzszenario“): Für die stoffliche und energetische Holzverwendung wird ein Referenzszenario entwickelt, das aus zu erwartenden Trends abgeleitet wird (Kap. 3.2 und Pfeiffer et al. 2023).
- ▶ Aufbauend auf dem Referenzszenario werden die folgenden „Holzenergie-Szenarien“ (**HE**) entwickelt. Die stoffliche Holzverwendung wird dabei identisch wie im REF abgebildet (Kap. 3.3):
 - **HE-int** („Intensivierte Holzenergieverwendung“)
 - **HE-red** („Reduzierte Holzenergieverwendung“)
 - **HE-ext** („Extensivierte Holzenergieverwendung“)

Abbildung 5: Szenarienraum



Quelle: Eigene Darstellung. Siehe Abkürzungen im Text. REF lehnt sich an die Entwicklung im Mit-Maßnahmen-Szenario an (MMS im Projektionsbericht der Bundesregierung, BReg 2021). Alle drei Szenarien zur Energieholzverwendung bauen auf REF auf. HE-int bildet eine mögliche Intensivierung auf Basis der Ergebnisse aus dem Projekt BioWISE ab (Köppen et al. 2024). HE-ext bezieht sich auf die Abnahme der Energieholznutzung im Szenario KIS-2030 (Repenning et al. 2023), und HE-red stellt einen mittleren Entwicklungspfad zwischen REF und HE-ext dar.

Zusätzlich zum Referenzszenario und den Holzenergieszenarien wird ein exploratives Szenario mit einer sehr starken Reduktion der Holzentnahme angenommen (starke Reduktion der Holzentnahme, **sRedEnt**). Es wird angenommen, dass gegenüber dem Referenzszenario die Nadelholzentnahme konstant um 2,5 Mio. m³ und die Laubholzentnahme um 4 Mio. m³ niedriger liegt. Dieses Szenario wird dazu verwendet, um im Kap. 4.3.1.2.2 Auswirkungen der Holzentnahme auf die Senkenleistung der Wälder zu analysieren.

3.2 Referenzszenario

Eine detaillierte Beschreibung zur Parametrisierung des Referenzszenarios im Holzverwendungsmodell TRAW findet sich in Pfeiffer et al. (2023). An dieser Stelle wird ein zusammenfassender Überblick gegeben.

3.2.1 Energetische Holzverwendung im Referenzszenario

Das Referenzszenario geht für den Zeitraum 1990 bis 2020 von der Datengrundlage des Rohstoffmonitorings¹² aus. Die künftige Entwicklung der energetischen Nutzung von fester Biomasse stützt sich auf die Ergebnisse des Mit-Maßnahmen-Szenarios (MMS im Projektionsbericht der Bundesregierung, BReg 2021). Für Großfeuerungsanlagen (GFA, BMA >1 MW) wird die Summe aus Energiewirtschaft und Industrie angenommen und für Kleinfeuerungsanlagen (KFA, BMA <1 MW) die Entwicklung des GHD-Bereichs. Für Private Haushalte (PHH) wird die Holzenergienachfrage im Holzverwendungsmodell TRAW getrennt nach Holz-Zentralheizungen (HZH) und Holz-Einzelraum-Feuerungsanlagen (EZF) abgebildet.

In TRAW wird die Energieholzverwendung in privaten Haushalten ausgehend von der Anzahl der Feuerungsstätten und der durchschnittlichen Holzverwendung pro Haushalt im Rohstoffmonitoring Holz¹² fortgeschrieben. Der Anteil der HZH betrug laut Mikrozensus im Jahr 2018 2,7 %.²⁴ Entsprechend der Entwicklung im MMS steigt dieser Anteil bis Mitte der 2030er Jahr auf 3,4 % und geht danach bis 2050 auf 3,1 % zurück (siehe Details in Pfeiffer et al. 2023).

Für die EZF hat sich durch die Verschärfung der BImSchV die Anlagenzahl von 15,2 % EZF im Jahr 2018 auf 11,6 % EZF im Jahr 2020 reduziert. Dies entspricht einer Abnahme der Anlagenzahl um 23,7 %. Der Wohnungsbestand in Deutschland in Wohn- und Nichtwohngebäuden betrug im Jahr 2020 42,8 Mio. Wohneinheiten (Statistisches Bundesamt, Wohnungsfortschreibung²⁵), wovon 91,8 % (Mikrozensus 2018²⁴) als bewohnt galten. Entsprechend wird von einer Basis von 39,3 Mio. Wohneinheiten ausgegangen. Im Referenzszenario wird für 2021 bis 2030 ein weiterer geringfügiger Rückgang auf 10,4 % EZF angenommen. Danach wird im Referenzszenario bis zum Jahr 2050 erwartet, dass der Bestand weitgehend stabil bleibt (10,0 % EZF siehe Details in Pfeiffer et al. 2023).

Für die durchschnittliche Holzverwendung wurde als Ausgangswert der Mittelwert der letzten Erhebungen angenommen. Dieser beträgt für EZF 3,95 m³/a und für HZH 9,00 m³/a (Jochem et al. 2023a). Die jährlichen Verbräuche werden im Zeitablauf ausgehend von diesen Werten über Reduktionsfaktoren an den zu erwartenden Effizienzgewinn und sinkenden Temperatureinfluss angepasst.

Die Rohstoffanteile (Scheitholz, Altholz, Holzpellets, Holzhackschnitzel etc.) stammen aus dem aktuellen Rohstoffmonitoring Holz¹². Sie werden für alle Holzenergieverwendungen bis zum Jahr 2050 als konstant unterstellt. Der Grund für diese Annahme ist, dass die Rohstoffzusammensetzung stabilisierende Abhängigkeiten aufweist: Bei privaten Haushalten bewegt sich z.B. die Eigennutzung mit dem Anfall an Holz und nicht mit dem Markt. Auch wären größere Anteilsverschiebungen zwischen Waldholz und Pellets erst bei deutlich stärkeren Anteilsverschiebungen zwischen EZF und HZH zu erwarten als im Referenzszenario angenommen. Großfeuerungsanlagen werden aus Kostengründen weiterhin bevorzugt auf Altholz zugreifen, die Papierindustrie wird wie bisher Schwarzlauge einsetzen, und Kleinfeuerungsanlagen werden aufgrund ihrer Heterogenität einen breiten Rohstoffmix einsetzen (z. B. kommunaler Waldbesitz, Restholz im

²⁴ <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Wohnen/Publikationen/Downloads-Wohnen/wohnen-in-deutschland-5122125189005.html>

²⁵ <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Wohnen/Publikationen/Downloads-Wohnen/fortschreibung-wohnungsbestand-pdf-5312301.html>

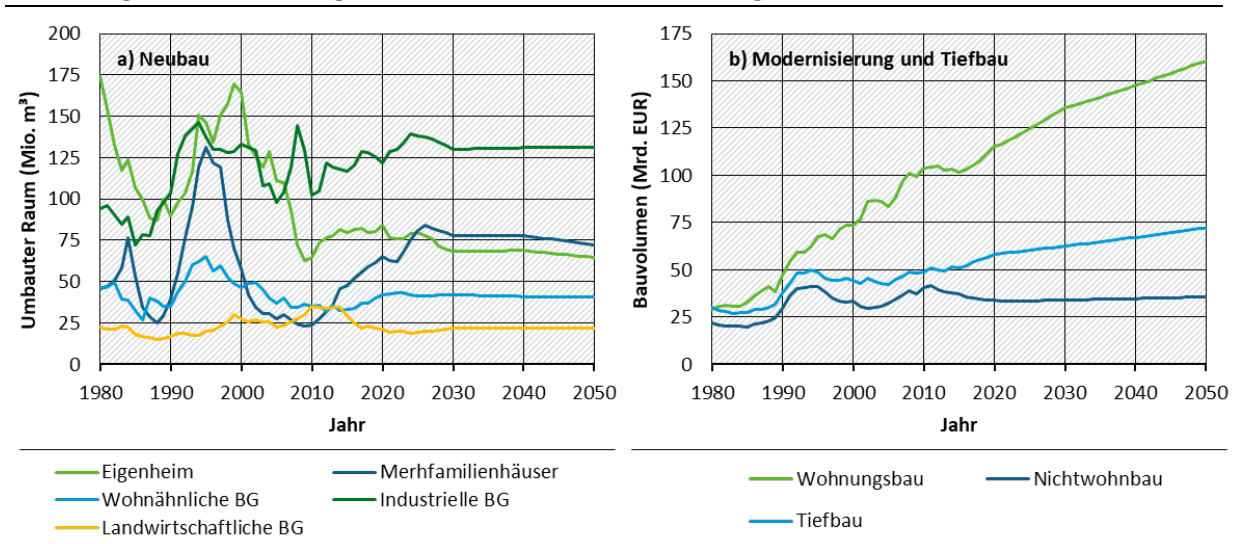
Handwerk). Nennenswerte Veränderungen dürften erst bei starken Holzverknappungen auftreten.

3.2.2 Stoffliche Holzverwendung im Referenzszenario

Die Holznachfrage des Bausektors im Neubau ergibt sich aus Bauaktivitäten im Bereich der Gebäudegruppen Wohnbau (Eigenheime, Mehrfamilienhäuser) und Nichtwohnbau (industrielle, wohnähnliche und landwirtschaftliche Betriebsgebäude).²⁶ Die Berechnungen erfolgen über die Baufertigstellungen des umbauten Raumes (Abbildung 6a), Holzbauquoten und Holzeinsatzfaktoren nach Gebäudearten und überwiegend verwendeten Baustoffen (Holzbau und andere Baustoffe). Die Holzmengen pro Einheit (z. B. m³ Holz pro 1.000 m³ umbautem Raum für Eigenheime in Holzbauweise) stammen aus der Studie KlimaBau (Mantau et al. 2018a). Die Holzbauquoten wurden für alle Gebäudearten bis 2021 aktualisiert²⁷ und danach als konstant unterstellt.

Unter dem Begriff „Modernisierung“ werden im Baubereich alle „Baumaßnahmen an bestehenden Gebäuden“ zusammengefasst, also Baumaßnahmen, die nicht zum Neubau gehören. Auch Anbauten und Reparaturen fallen darunter. Bezogen auf das Bauvolumen des Hochbaus in Deutschland, also Neubau und Modernisierung, hatte das Modernisierungsvolumen im Jahr 2021 im Wohnungsbau einen Anteil von 69,1 % und im Nichtwohnbau von 55,9 % (Gornig et al. 2022). Das Bauvolumen (100 %) enthält neben dem Hochbau (82,6 %) auch den Tiefbau (17,4 %).

Abbildung 6: Entwicklung der bauwirtschaftlichen Marktsegmente



Quelle: Pfeiffer et al. (2023). Grundlagen: Statistisches Bundesamt, Bautätigkeitsstatistik, Fachserie 5, Reihe 1, Genesis. Gornig et al. (2022) bis zum Jahr 2024 und Trendfortschreibung. BG = Betriebsgebäude, Wohnungsbau = Eigenheime und Mehrfamilienhäuser; Nichtwohnbau = landwirtschaftliche BG, wohnähnliche BG und industrielle BG.

Für die Entwicklung im Referenzszenario wird im Wohnungsbau unterstellt, dass das Trendwachstum des realen Bauvolumens vom Jahr 2000 bis zum Jahr 2020 bis 2030 anhält (Abbildung 6 b). Ab dem Jahr 2031 führen Sättigungseffekte zu einem reduzierten Trendwachstums

²⁶ Eine Darstellung baustatistischer Begriffe finden sich in Pfeiffer et al. (2023, Anhang 7.4.).

²⁷ Statistisches Bundesamt: Baugenehmigungen und Baufertigstellungen nach überwiegend verwendetem Baustoff (2007-2021; <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Bauen/Publicationen/Downloads-Bautaetigkeit/baugenehmigungen-baustoff-pdf-5311107.html>)

mit einer halbierten Zuwachsrate. Entsprechend wird im Nichtwohnbau und im Tiefbau vorgegangen (Abbildung 6 b). Im Hochbau des Nichtwohnbaus weist das Modernisierungsvolumen aktuell geringere Wachstumsraten auf (Steigungsmaß 0,241). Im Referenzszenario wird angenommen, dass sich dies fortsetzt. Im Tiefbau ist das Trendwachstum mit einem Steigungsmaß von 0,719 höher als in der Modernisierung des Nichtwohnbaus, aber geringer als im Wohnungsbau (Steigungsmaß 1,706). Dies wird im Referenzszenario konstant gehalten.

Zur Holzverwendung im **Möbelmarkt** liegen aktuelle Analysen zur Holzverwendung vor (Mantau et al. in press.). Im **Verpackungssektor** baut die Modellierung auf den WEHAM-Szenarien auf (Glaser et al. 2017). Entsprechend der Fortschreibung der volkswirtschaftlichen Sektoren (siehe Details in Pfeiffer et al. 2023) und demografischer Entwicklungen wurden Entwicklungsverläufe abgeleitet. Im Möbelsektor stellen die Entwicklungen der privaten Verwendung und des Außenhandels signifikante Treiber dar. Im Bereich der Holzverpackungen wurde basierend auf der Export- und Haushaltsentwicklung der Jahre 2000 bis 2020 eine empirisch begründete Schätzung erstellt.

Der **Papiersektor** wird in die Segmente Druckpapiere, Zeitungspapiere, Verpackungspapiere und Hygienepapiere aufgeteilt. Für die Holzverwendung in Deutschland ist der Holzeinsatz bei der Produktion von Holz- und Zellstoff von Bedeutung. Die Waldholzentnahme ist für den Papiersektor von geringerer Relevanz, da die Altpapiereinsatzquote bei ca. 75 % und die der Primärzellstoffe also entsprechend bei ca. 25 % liegt. Die Produktion von Holz- und Zellstoff in Deutschland verläuft sehr stabil. Im Referenzszenario wird die Nachfrage nach Holz- und Zellstoff in Anlehnung an demografische und volkswirtschaftliche Entwicklungen fortgeschrieben. Die Rohstoffanteile ergeben sich bis 2020 aus dem Rohstoffmonitoring¹² und werden im Referenzszenario konstant gehalten.

Sonstige Holzverwendungen reichen von Holzspielzeug, Bleistiften, und Holzbesteck bis hin zu Armaturenblechverkleidungen. Aufwand und Bedeutung einer Modellierung dieser Bereiche stehen in keinem sinnvollen Verhältnis. Dies betrifft auch mögliche neue biobasierte Produkte²⁸.

3.3 Holzenergie-Szenarien

Aufbauend auf dem Referenzszenario werden drei Holzenergieszenarien entwickelt. Unterschiede zwischen den drei Holzenergie-Szenarien ergeben sich aus den Mengen an verwendetem Energieholz. Dabei wird wie im Referenzszenario unterschieden nach: Holz-Zentralheizungen (HZH) und Holz-Einzelraumfeuerungsanlagen (EZF) in privaten Haushalten (PHH), Großfeuerungsanlagen (GFA) und Kleinfeuerungsanlagen (KFA, vgl. Kap. 3.2.1). Die Rohstoffzusammensetzung der energetischen Holzverwendung wird analog zum Referenzszenario beibehalten. Auch die stoffliche Holzverwendung entspricht dem Referenzszenario.

Für die Entwicklung der Holzenergie-Szenarien ist die Bestimmung der Mengen an festen Biomassebrennstoffen und der verwendeten Sortimente von großer Bedeutung. Sie resultiert aus den folgenden Annahmen, die für die Holzenergieszenarien getroffen werden:

► **Extensivierte Holzenergieverwendung (HE-ext):**

Das Szenario KIS-2030 (Repenning et al. 2023) stellt für Deutschland ein Zielszenario dar, das die im Bundesklimaschutzgesetz geforderten THG-Minderungen in allen Sektoren erreicht. Für das Szenario HE-ext wird in TRAW die Holzenergieverwendung in Anlehnung an die Annahmen in KIS-2030 parametrisiert. Dabei geht die Holzenergienutzung insbesondere in EZF und HZH deutlich zurück, da z.B. die Anzahl an EZF abnimmt und HZH effizienter

²⁸ Im laufenden Waldklimafond-Projekt DIFENS (FZK: 2220WK32B4) finden vertiefte Analysen zu neuen biobasierten Produkten im Rahmen einer Delphi-Studie statt.

werden. Im Gegenzug werden vor allem KFA (z.B. Nahwärmenetze) ausgebaut (vgl. Abbildung 7 d und Tabelle 2). In KIS-2030 wird Biomasse zudem vermehrt in Industrieprozessen, die Kohlenstoff benötigen (z.B. Stahlproduktion), eingesetzt.

► **Reduzierte Holzenergieverwendung (HE-red):**

Mit HE-red wird ein Szenario parametrisiert, bei dem die reduzierte Holzenergienutzung ein Niveau erreicht, das zwischen den Szenarien HE-ext und REF liegt (vgl. Abbildung 7 c und Tabelle 2). Dazu wird angenommen, dass er Rückgang an HZH weniger stark ausfällt als im Szenario HE-ext, und KFA weniger stark ausgebaut werden.

► **Intensivierte Holzenergieverwendung (HE-int):**

Im UBA-Projekt BioWISE (Köppen et al. 2024) wird als Sensitivität analysiert, wie stark sich die im Gebäudeenergiegesetz verankerte 65 % Erneuerbare-Energien-Regelung (mit Wirkung ab 2024) auf die Holznachfrage auswirken wird. Angelehnt an diese Analyse wird im Szenario HE-int gegenüber dem Referenzszenario die Anzahl an HZH erhöht (Tabelle 2), so dass die Holzenergieverwendung in privaten Haushalten steigt. Für EZF, GFA und KFA werden die Einstellungen aus dem Referenzszenario übernommen (vgl. Abbildung 7 a und Tabelle 2). Zu berücksichtigen ist, dass mögliche verstärkte Holzenergienutzungen im Zuge des finalen GEG und der Umsetzung der kommunalen Wärmeplanung nicht berücksichtigt sind, da hierzu bei der Festlegung der Szenarien noch keine Information vorlag bzw. Entwürfe nur geringe Impulse für die Holzenergienutzung erwarten ließen.

Der Anteil der privaten Haushalte, die eine Holz-Einzelfeuerungsanlage bzw. eine Holzzentralheizung betreiben, passt sich der Entwicklung der Szenarien zur Energienutzung an. Dabei wird eine moderat steigende Entwicklung des Anteils der HZH angenommen. Die Entwicklung der EZF verringert sich entsprechend der Erfordernisse zur Erreichung des Gesamtverlaufs.

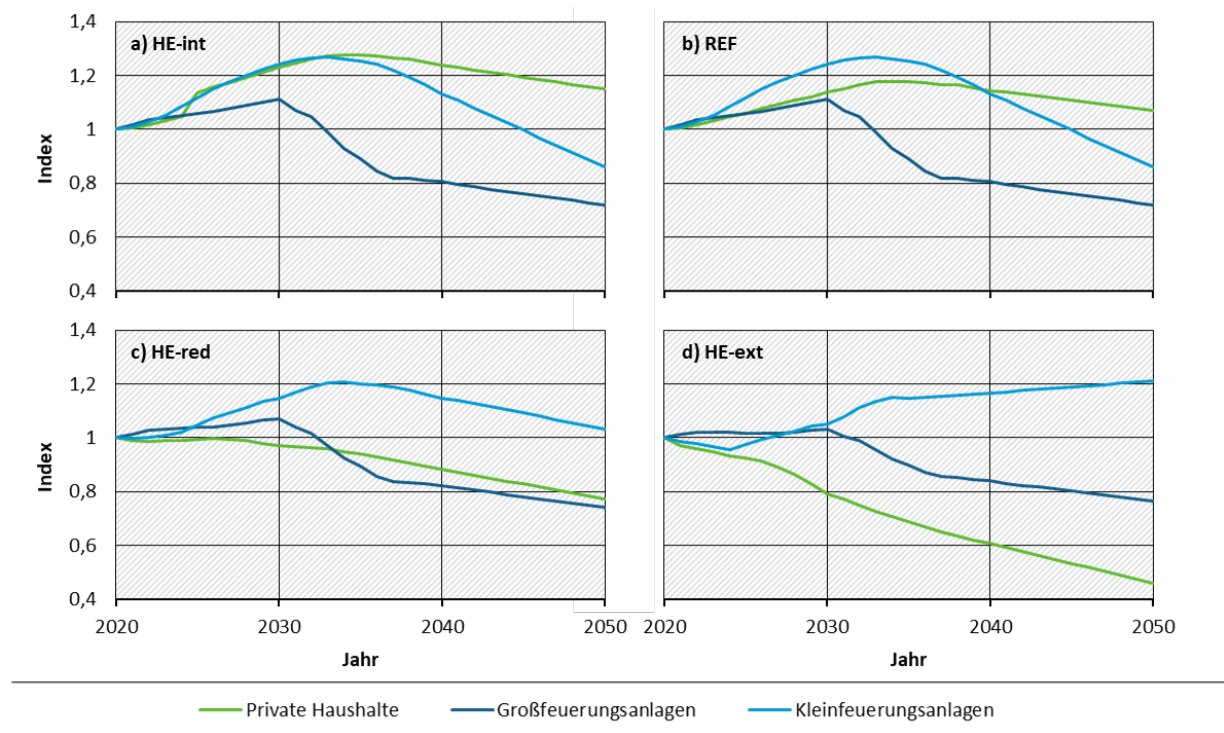
Tabelle 2: Anteil der Haushalte mit Holz-Einzelfeuerungsanlage (EZF) bzw. Holzzentralheizung (HZH)

Anlage	Holz-Einzelfeuerungsanlage (EZF)				Holz-Zentralheizung (HZH)			
	HE-int	REF	HE-red	HE-ext	HE-int	REF	HE-red	HE-ext
Jahr / Referenz								
2020	11,6	11,6	11,6	11,6	2,9	2,9	2,9	2,9
2030	10,4	10,4	9,5	8,2	3,7	3,3	3,3	3,3
2040	10,2	10,2	8,9	7,3	3,8	3,3	3,3	3,3
2050	10,0	10,0	8,7	7,2	3,5	3,1	3,1	3,1

Quelle: 2020 in Jochem et al. (2022); ab 2021 eigene Annahmen, INFRO.

Bei den Holzenergieszenarien handelt es sich um Zielszenarien, die sich auf bestehende Arbeiten in Repenning et al. (2023) und Köppen et al. (2024) beziehen. Für die Modellsteuerung in TRAW werden die angestrebten Energieverbräuche in Terajoule (TJ) in Änderungsfaktoren umgewandelt (2020 = 1,000). Die folgende Abbildung 7 zeigt in welcher Weise sie auf die Energieholzverwendung ab 2020 einwirken. Für die privaten Haushalte fließen die Angaben in Tabelle 2 ein. Für GFA und KFA werden im Szenario HE-ext die Angaben aus KIS-2030 (Repenning et al. 2023) zur festen Biomasse übernommen. Im Szenario HE-red liegt die Energieholzverwendung für GFA und KFA zwischen REF und HE-ext.

Abbildung 7: Entwicklung der Szenarien zur Bestimmung der Energienutzung aus fester Biomasse



Quelle: Eigenen Berechnungen und Darstellung, INFRO. REF = Referenzszenario, HE-int = Intensivierte Holzenergieverwendung, HE-red = Reduzierte Holzenergieverwendung, HE-ext = Extensivierte Holzenergieverwendung. Dargestellt sind normierte Werte (siehe Text).

4 Modellierungsergebnisse

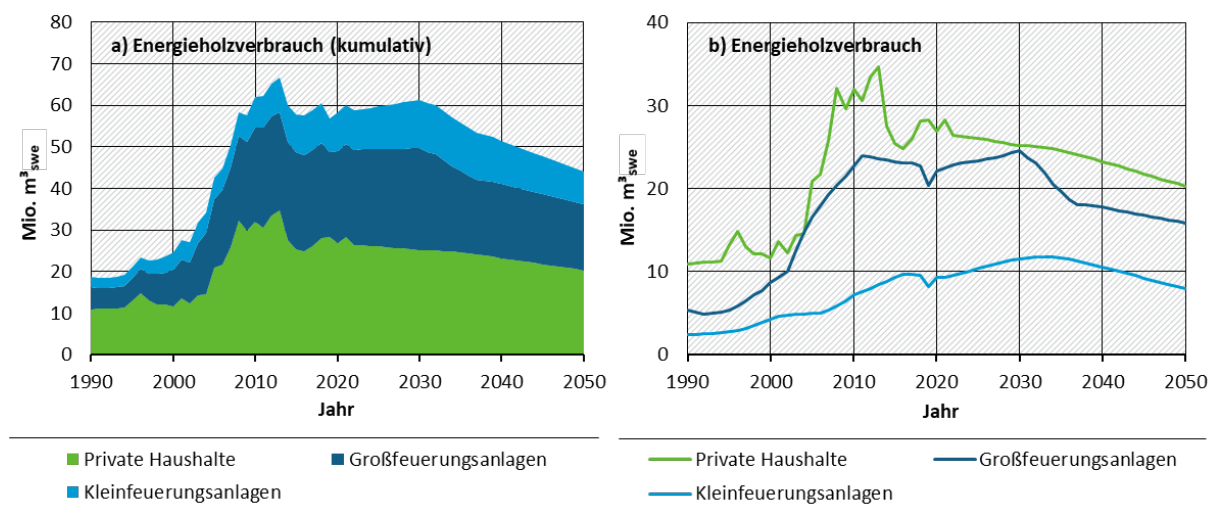
4.1 Holzverwendung

4.1.1 Referenzszenario

4.1.1.1 Energetische Holzverwendung

In Abbildung 8 wird zusammenfassend dargestellt, wie sich die historische Energieholzverwendung zwischen den Jahren 1990 und 2020 entwickelte, sowie der weitere Verlauf im Referenzszenario für die Jahre 2021 bis 2050. Im Referenzszenario weist die Energieholzverwendung bis 2030 insgesamt einen leichten Anstieg bis auf 61,3 Mio. m³_{swe} auf. Entsprechend der Szenarien des Projektionsberichtes zur Entwicklung der Energieverwendung geht die Energieholzverwendung in allen Bereichen zurück. Gegenüber dem Basisjahr 2020 (58,3 Mio. m³_{swe}) beträgt der Rückgang 14,2 Mio. m³_{swe} (-24,3 %). Bis zum Jahr 2050 fällt die Energieholzverwendung absolut auf 44,1 Mio. m³_{swe} (siehe Details in Pfeiffer et al. 2023).

Abbildung 8: Entwicklung des Energieholzverbrauchs nach Verwendungsgruppen im Referenzszenario

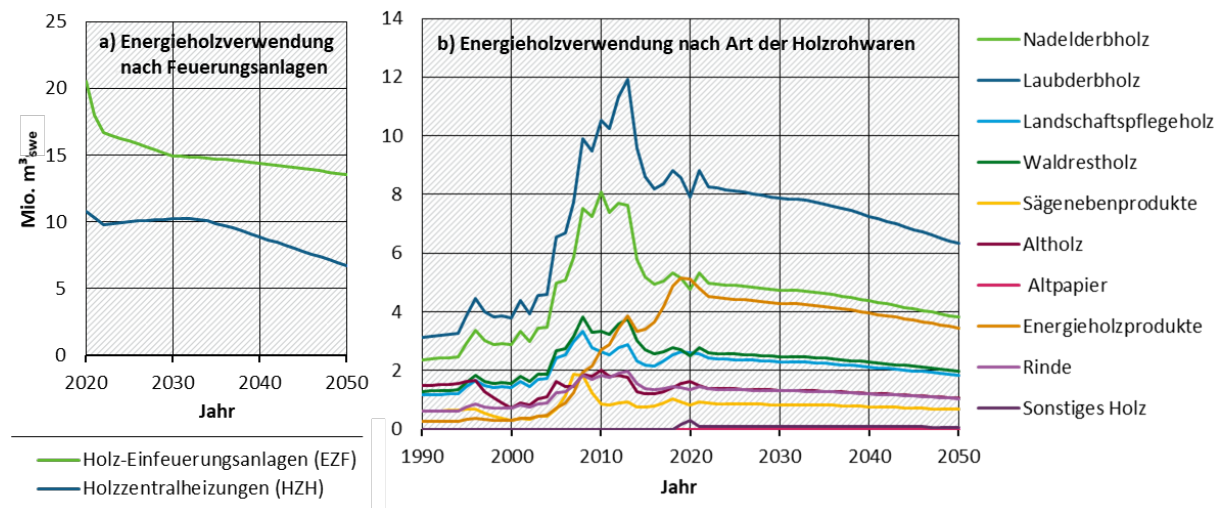


Quelle: eigene Darstellung, INFRO (siehe Details in Pfeiffer et al. 2023). Das Startjahr der Holzentnahmeszenarien-Modellierung ist 2021.

Abbildung 9 zeigt die Entwicklung der Energieholzverwendung in den **privaten Haushalten**. Im historischen Verlauf kam es in den 2000er-Jahren zu einem starken Anstieg der Energieholzverwendung mit einem Maximum im Jahr 2013 (siehe auch Abbildung 8). Ab dem Jahr 2022 wirkt sich vor allem die Fortschreibung über die Modellannahmen des MMS aus dem Projektionsbericht 2021 für feste Biomasse aus.²⁹ Entsprechend geht der Verbrauch von 27,0 Mio. m³_{swe} im Jahr 2020 auf 25,2 Mio. m³_{swe} im Jahr 2030 zurück. Bis zum Jahr 2050 nimmt die Nutzung um weitere 4,9 Mio. m³_{swe} auf 20,3 Mio. m³_{swe} ab. Der Rückgang in Abbildung 9 bezieht sich auf die Holzverwendung. Neben der Anlagenzahl wird diese auch vom Temperatureinfluss und der Effizienzsteigerung beeinflusst.

²⁹ Hier ist hervorzuheben, dass im Projektionsbericht 2021 noch keine Annahmen zur Wirkung z.B. des Gebäudeenergiegesetz (GEG) berücksichtigt sind.

Abbildung 9: Verwendung des Energieholzes in privaten Haushalten im Referenzszenario



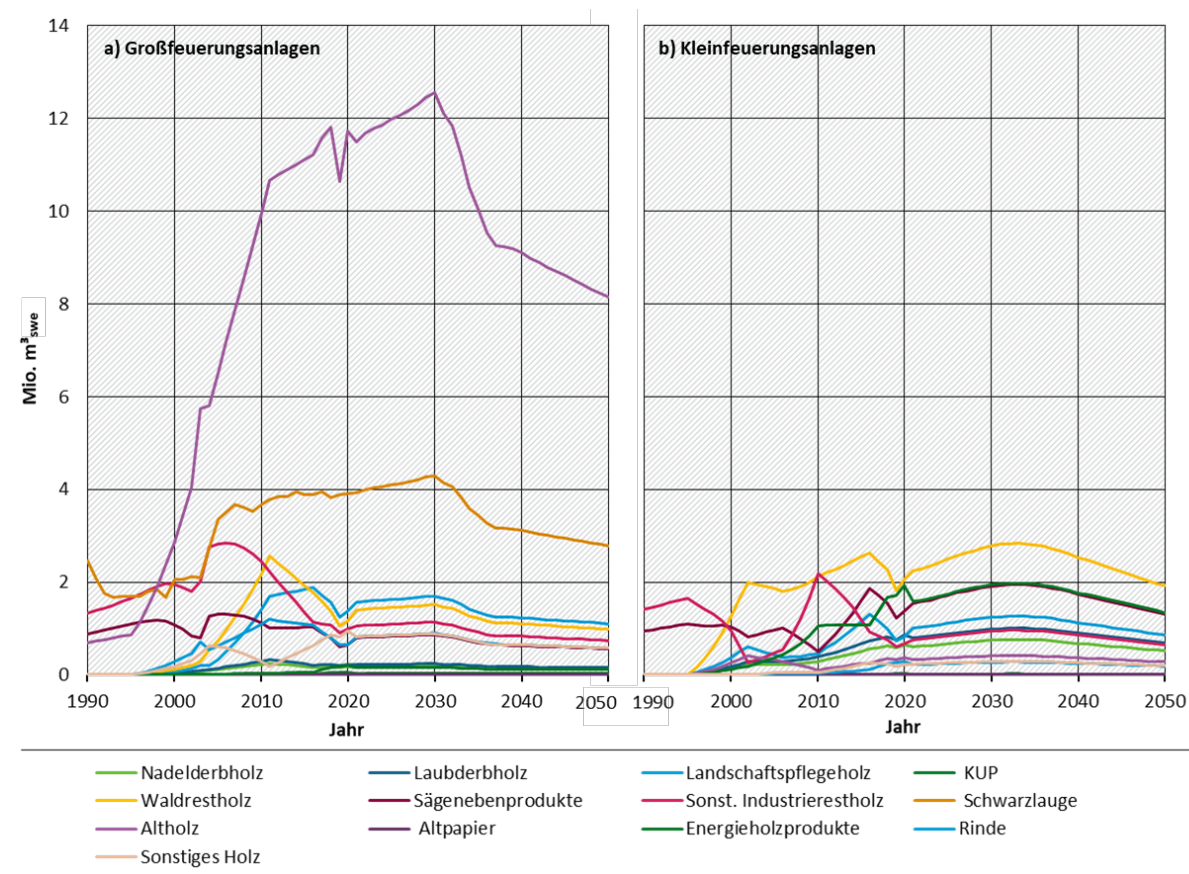
Quelle: eigene Darstellung, INFRO (siehe Details in Pfeiffer et al. 2023). Das Startjahr der Holzentnahmeszenarien-Modellierung ist 2021.

In privaten Haushalten wurde im Jahr 2020 zu 47,0 % Waldscheitholz (davon 62 % Laubholz, 38 % Nadelholz) eingesetzt. Auf Energieholzprodukte (Pellets, Holzbriketts) entfielen 19,0 %, und auf die übrigen Sortimente 33 %. Unter der Annahme, dass die Anteile der eingesetzten Holzsortimente in Zukunft konstant bleiben (vgl. 3.2.1), entwickelt sich die Verwendung von Energieholz in privaten Haushalten entsprechend der Darstellung in Abbildung 9 b. Im Referenzszenario sinkt die Verwendung in privaten Haushalten somit in allen Sortimenten bis zum Jahr 2035 geringfügig und danach stärker. Letzteres ist zu deutlichen Anteilen eine Folge des ab dem Jahr 2035 erwarteten Nachfragerückgangs nach fester Biomasse im MMS für HZH, sowie der angenommenen Einfluss durch Temperatureffekte und Effizienz (siehe Details in Pfeiffer et al. 2023).

Die Holzenergieverwendung von Großfeuerungsanlagen (GFA, BMA >1 MW) und Kleinfeuerungsanlagen (KFA, BMA <1 MW) unterscheidet sich sehr deutlich bezüglich Energieholzvolumina und eingesetzter Sortimente (Abbildung 10). Im Jahr 2020 verwendeten GFA 22,1 Mio. m³_{swe} Holzrohstoffe und dabei überwiegend Altholz (53,1 %). KFA verwendeten mit Mio. 9,3 m³_{swe} knapp halb so viel Energieholz wie GFA. Zudem streut die Sortimentsstruktur in KFA breiter, wobei vor allem Waldrestholz, Sägenebenprodukte und Energieholzprodukte zum Einsatz kamen.

Gegenüber dem Jahr 2020 steigt die Holzverwendung bis zum Jahr 2030 für GFA und KFA leicht an. Bis zum Jahr 2050 wird aber eine Abnahme für GFA um 6,2 Mio. m³_{swe} (-29,2 %) und für KFA um 1,3 Mio. m³_{swe} (-14,9 %) modelliert. Die Verteilung der Sortimente im Jahr 2020 wird als konstant bis zum Jahr 2050 unterstellt (Abbildung 10, siehe Details in Pfeiffer et al. 2023).

Abbildung 10: Entwicklung der Energieholzverwendung in Biomassefeuerungsanlagen nach Holzsortimenten



Quelle: eigene Darstellung, INFRO (siehe Details in Pfeiffer et al. 2023). KUP = Holz aus Kurzumtriebsplantagen. Großfeuerungsanlagen = Biomasseanlagen > 1 MW, Kleinfeuerungsanlagen = Biomasseanlagen < 1 MW. Das Startjahr der Holzentnahmeszenarien-Modellierung ist 2021.

4.1.1.2 Stoffliche Holzverwendung

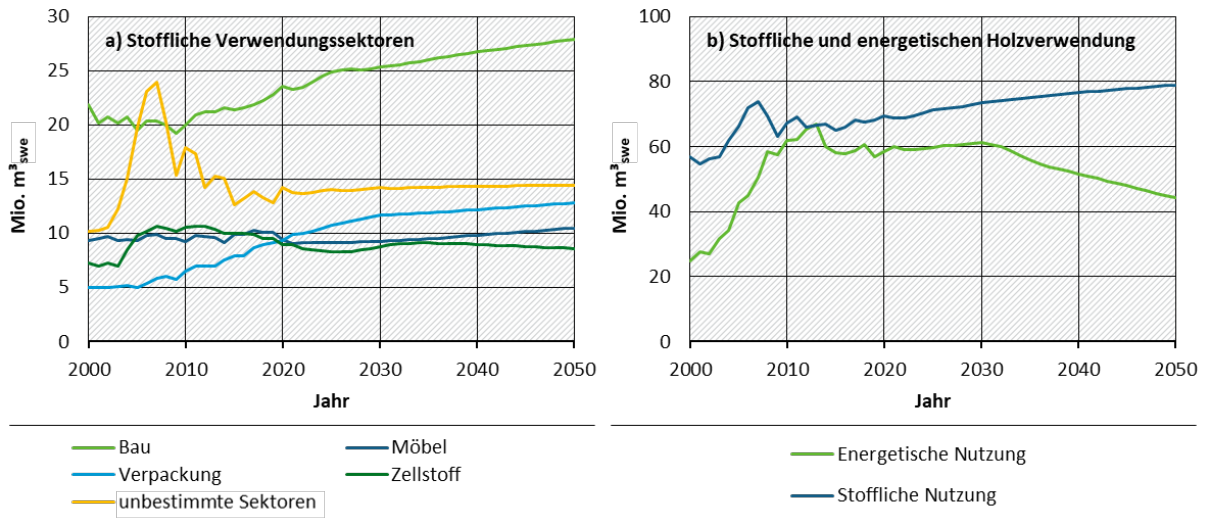
Für die Modellierung der stofflichen Verwendung wurden bis zum Jahr 2027 verfügbare konjunkturelle Rahmendaten genutzt. Der erforderliche Zeitraum bis 2050 wurde für das Referenzszenario mit langfristig verfügbaren Datengrundlagen fortgeschrieben. Allerdings sind diese im wirtschaftlichen Umfeld für einen so langen Zeitraum nur begrenzt verfügbar. Daher wurden sie für dieses Projekt durch eigene Berechnungen für die volkswirtschaftlichen Sektoren eigens geschaffen (z.B. Differenzierung des Bruttoinlandsprodukts nach Verbrauch, Investition und Außenhandel; siehe Details in Pfeiffer et al. 2023).

Marktanalysen auf der Grundlage von Halbwerten sind rechentechnisch einfacher und reichten in der Vergangenheit für die meisten Fragestellungen aus. Die Nachfrage war aber schon immer von Endwaren getrieben. Auch lassen sich viele aktuelle Fragestellungen der Bioökonomie und des zirkulären Wirtschaftens ohne die Einbeziehung von Endwaren nicht beantworten. Daher wird die Dynamik der künftigen stofflichen Holzverwendung im Folgenden über die Entwicklung der Endverwendungssektoren ermittelt.

Im Referenzszenario konzentrieren sich die Ergebnisse auf die Holzverwendung in den Sektoren Bau, Möbel, Holzverpackungen und Papierprodukte (Abbildung 11 a). Der größte Anteil der Holzverwendung findet sich im Bausektor. Im Endwarenbereich mischen sich Materialien, sodass sich in Holzprodukten auch Nichtholzmaterialien befinden. Ohne diese entfielen im Jahr

2020 mit 23,6 Mio. m³_{swe} etwa so viel an Holzmenge auf den Bausektor wie auf die übrigen drei Verwendungsbereiche zusammen. Außerdem wird für den Bausektor selbst bei moderaten Wachstumsannahmen im Referenzszenario ein erkennbares Wachstum bis auf ca. 27,9 Mio. m³_{swe} erwartet, während Möbel und Papier eher gesättigte Märkte sind und auch der Markt für Holzverpackungen nur noch begrenzt wächst Abbildung 11.

Abbildung 11: Entwicklung und Fortschreibung der Verwendung von Holzrohwaren



Quelle: eigene Darstellung, INFRO. Das Startjahr der Holzentnahmeszenarien-Modellierung ist 2021.

Die Entwicklungen in den großen Verwendungssektoren Bau, Möbel, Verpackung und Zellstoff sind im Rohstoffmonitoring Holz gut erfasst. Die Verwendung von Holz in zahlreiche Nischenmärkte sowie der Außenhandel im Endwarenbereich werden aber unvollständig ermittelt und damit die Endwarennutzung unterschätzt. Die inländische Produktion von Holzhalbwaren wird aber verlässlicher erfasst. Das Delta zwischen der im Inland verfügbaren Menge an Halbwaren und der Halbwarenmenge, die für die erfassten Endwaren in den großen Verwendungssektoren benötigt werden, ermöglicht es, die Menge an Holzrohwaren unbestimmter Sektoren abzuschätzen (siehe Details in Pfeiffer et al. 2023, dort Kap. 4.1.2.5). Die Holzverwendung in den unbestimmten Sektoren ergibt sich aus der Differenz von ermittelten Halbwaren in Endwarenssektoren und der inländischen Produktion von Halbwaren.

Grundlage der Berechnung der Waldholzverwendung bleibt die Holzverwendung für Halbwaren. Ein Delta zwischen den beiden Berechnungsmethoden kann sowohl durch nicht erfasste Verwendungen entstehen als auch durch Außenhandelsbeziehungen oder Kalamitäten (siehe Details in Pfeiffer et al. 2023).

4.1.1.3 Zusammenfassung stofflicher und energetischer Holzverwendung

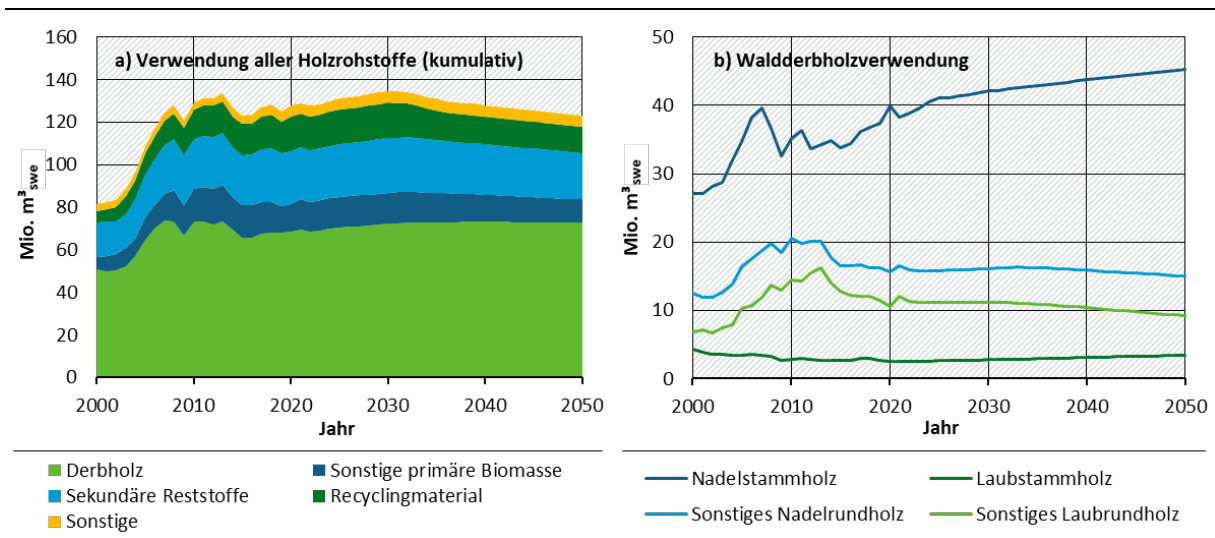
In Summe ergibt sich im Jahr 2030 für die stoffliche und energetische Holzverwendung ein modellierter Wert von 135 Mio. m³_{swe} und im Jahr 2050 von 123 Mio. m³_{swe} (Abbildung 11). Die Summe schließt Kaskadennutzungen von Rest- und Recyclinghölzern mit ein. Man erkennt auch, dass die relativ stabile Menge verwendeten Holzes das Ergebnis einer Zunahme der stofflichen und einer Abnahme der energetischen Verwendung ist. Ergebnisse zu Flüssen der Holzrohstoffe in Endwarenssektoren sind exemplarisch für das Jahr 2020 als Sankey-Diagramm in Anhang D dargestellt.

Abbildung 12a zeigt die Verwendung aller Holzwaren nach Warengruppen. Das verwendete Waldderbholzvolumen wächst im Referenzszenario von 68,6 Mio. m³_{swe} im Jahr 2020 auf

72,8 Mio. m³_{swe} im Jahr 2050 (Abbildung 12), was vor allem aus der erwarteten steigenden Nachfrage im Baubereich resultiert. Das verwendete Rest- und Recyclingholzvolumen geht im Referenzszenario von 40,7 Mio. m³_{swe} im Jahr 2020 auf 33,9 Mio. m³_{swe} im Jahr 2050 zurück. Dies ist vor allem auf den Rückgang der Holzenergienachfrage zurückzuführen. Sollte die Entwicklung so verlaufen, wie im Referenzszenario unterstellt, werden also in der Zukunft mehr Rest- und Recyclinghölzer für die stoffliche Nutzung zur Verfügung stehen. Verschiebungen zwischen den Holzrohstoffsortimenten waren nicht Gegenstand dieser Untersuchung.

Abbildung 12 b zeigt die Entwicklung der Waldderbholzverwendung nach Sortimenten. Diese Ergebnisse werden zur Ermittlung der Waldholzentnahme in einer Übergabemaske aufbereitet und an FABio-Forest übergeben, um die Holzentnahme bei der Waldmodellierung zu steuern (siehe Details in Pfeiffer et al. 2023).

Abbildung 12: Entwicklung des Aufkommens an Holzrohstoffen nach Holzsortimenten im Referenzszenario



Quelle: eigene Darstellung, INFRO. Derbhholz: Laub- und Nadelholz über 7 cm Durchmesser; sonstige primäre Biomasse: Waldrestholz, Landschaftspflegematerial, Kurzumtriebsholz, Rinde; Sekundäre Reststoffe: Sägenebenprodukte, sonstiges Industrierestholz, Schwarzlaube; Recyclingmaterial: Altholz; Sonstige = nicht näher bestimmbar / zuzuordnen. Das Startjahr der Holzentnahmeszenarien-Modellierung ist 2021.

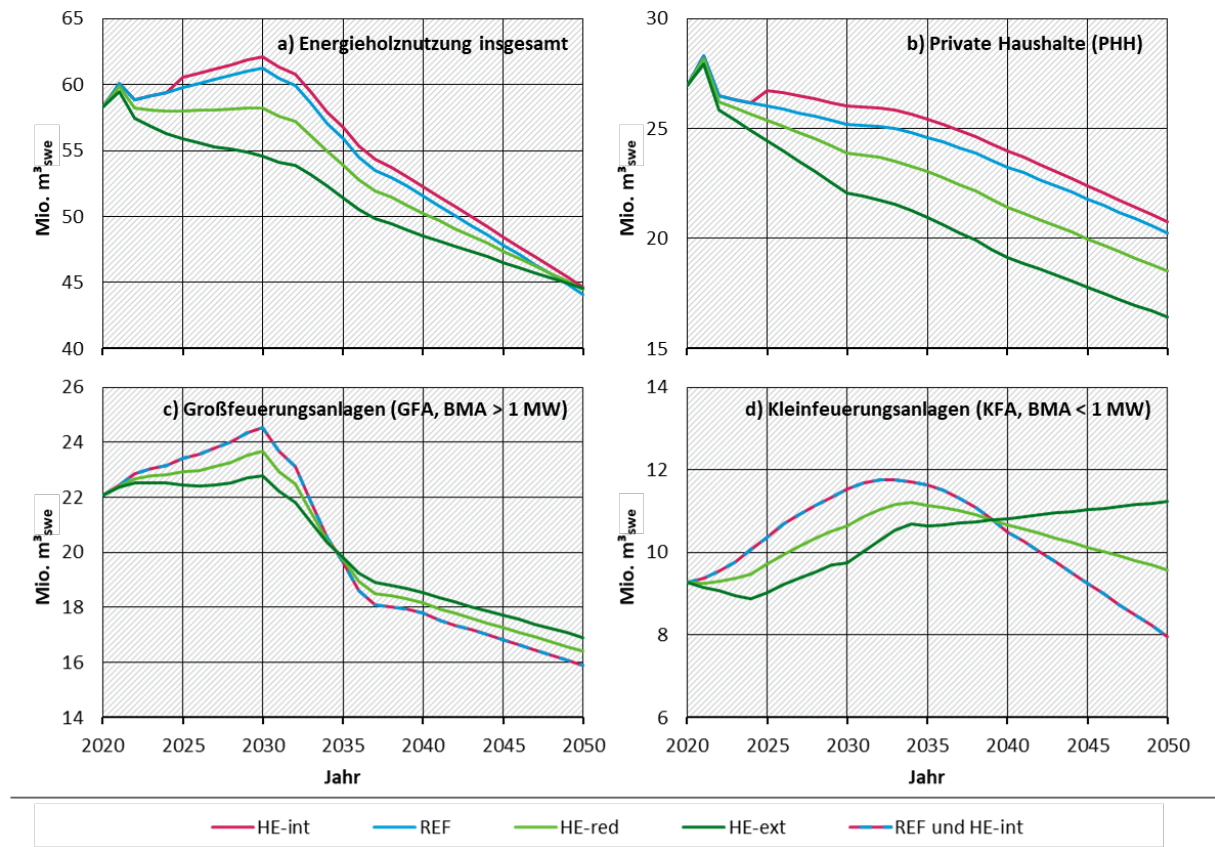
4.1.2 Holzenergieszenarien im Vergleich zum Referenzszenario

Abbildung 13 zeigt die Entwicklung der Energieholzverwendung in Mio. m³_{swe} nach Verwendern und Szenarien. Die Entwicklungen schließen Primär-, Rest- und Recyclingholz ein. Im Szenario HE-int wird nur bei privaten Haushalten von einer intensivierten Energieholznachfrage ausgegangen. Somit ist es für Biomassefeuerungsanlagen mit dem Referenzszenario identisch.

Das Maximum der Energieholzverwendung wird im Szenario HE-int mit 62,1 Mio. m³_{swe} im Jahr 2030 erreicht. In den Szenarien HE-red und HE-ext liegt die Energieholzverwendung mit 58,2 Mio. m³_{swe} bzw. 54,6 Mio. m³_{swe} im Jahr 2030 deutlich niedriger als im Referenzszenario. Bis zum Jahr 2050 nimmt in allen Szenarien die Energieholzverwendung kontinuierlich auf ca. 44,5 Mio. m³_{swe} ab (Abbildung 13 a). Dieses Muster resultiert aus gegenläufigen Entwicklungen bei den Verwendern. Über den gesamten Zeitverlauf ist bei den privaten Haushalten der Energieholzverbrauch im Szenario HE-ext am niedrigsten, gefolgt von den Szenarien HE-red, REF, und HE-int mit den höchsten Energieholzverbräuchen. Für GFA und insbesondere für KFA ist dies nur bis zum Jahr 2035 bzw. 2040 ebenfalls der Fall. Danach kehren sich die Verhältnisse um

und der Energieholzverbrauch in GFA und KFA ist in den Szenarien HE-int und REF am kleinsten, gefolgt vom Szenario HE-red und maximalen Werten im Szenario HE-ext (Abbildung 13 b, c und d).

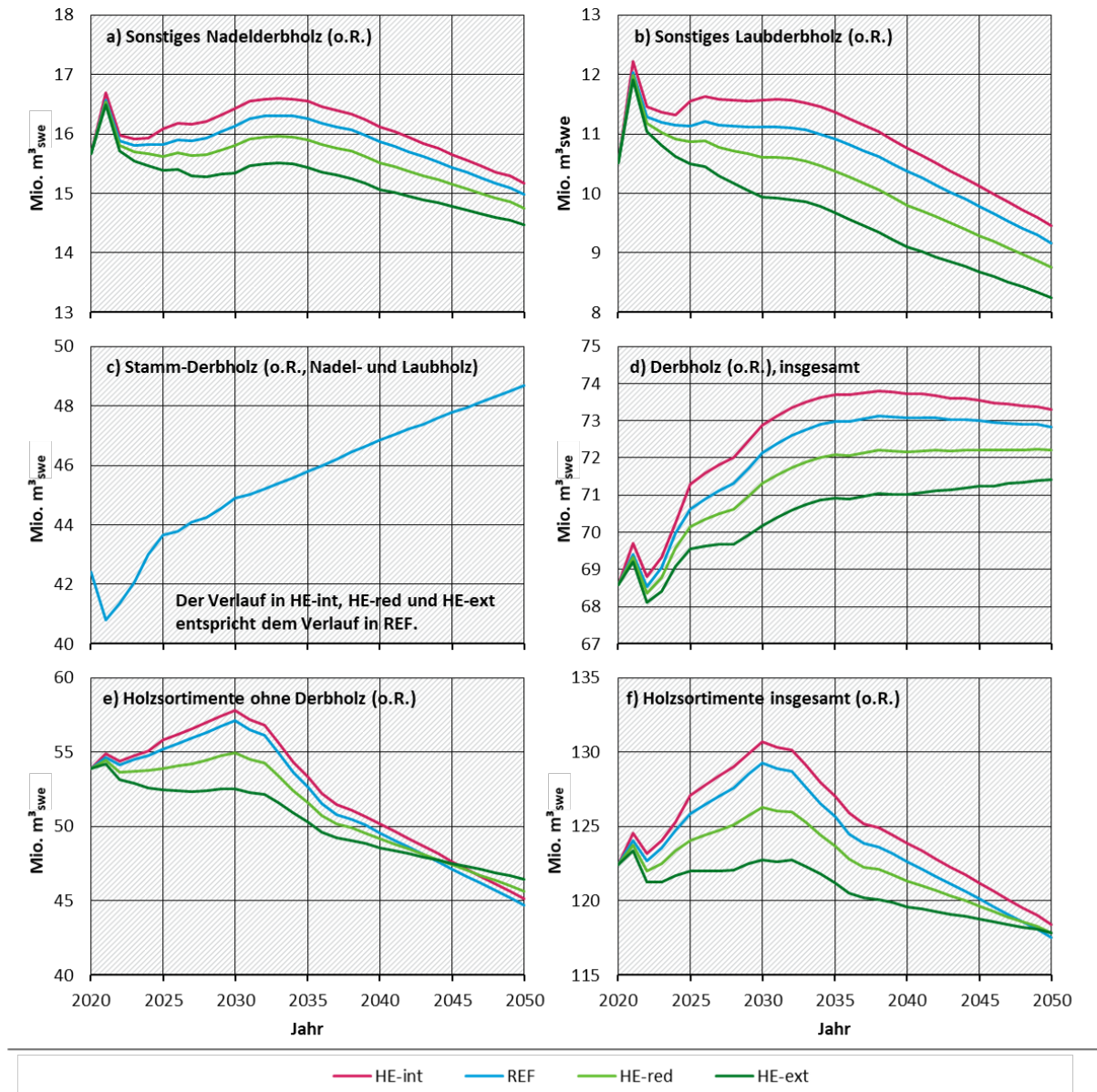
Abbildung 13: Entwicklung der Energieholzverwendung nach Verwendern und Szenarien



Quelle: eigene Darstellung, INFRO. Das Startjahr der Holzentnahmeszenarien-Modellierung ist 2021.

Für die Übergabe an die Waldholzmodellierung werden die energetischen Holzverwendungen der vier Szenarien jeweils mit der stofflichen Verwendung des Referenzszenarios zusammengefasst. Abbildung 14 weist die Summe der energetischen und stofflichen Holzverwendungen aus. Die Ausgabe erfolgt nach Holzsortimenten. Die stofflichen Verwendungen, die ganze Stämme verarbeiten (z.B. Sägewerke, Sperrholz), werden in TRAW definitionsgemäß als Stamm-Derbholz ausgewiesen. Stamm-Derbholz unterscheidet sich nicht zwischen den Szenarien. Sonstiges Derbholz wird stofflich vor allem in der Holzwerkstoff- und in der Zellstoffindustrie zerspant oder zerfasert genutzt. Das gesamte energetisch genutztes Derbholz zählt in TRAW ebenfalls zum sonstigen Derbholz. Zusätzlich werden Holzsortimente ohne Derbholz (Restholz, Recyclingholz, Rinde) ausgewiesen.

Abbildung 14: Summe der energetischen und stofflichen Holzverwendung nach Sortimenten und Szenarien



Quelle: eigene Darstellung, INFRO. REF = Referenzszenario, HE-int = Intensivierte Holzenergieverwendung, HE-red = Reduzierte Holzenergieverwendung, HE-ext = Extensivierte Holzenergieverwendung, o.R. = ohne Rinde. Das Startjahr der Holzentnahmeszenarien-Modellierung ist 2021.

Abbildung 14 a und b zeigt die Summe des entnommenen sonstigen Nadel- und Laubderbholzes für stoffliche und energetische Nutzungen. Unterschiede zwischen den Holzenergieszenarien resultieren allein aus den Annahmen zur Holzenergienutzung, da die stoffliche Nutzung aus dem REF übernommen wurde. Abbildung 14 c bildet die Summe des verwendeten Stamm-Derbholzes ab. Für dieses stofflich genutztes Sortiment unterscheidet sich die Summe nicht zwischen den Holzenergieszenarien (s.o.) und steigt stetig an (siehe Kap. 4.1.1.2). Die Summe aus Stammholz und sonstigem Derbholz ist in Abbildung 14 d aufgetragen. Unterschiede zwischen den Holzenergieszenarien entsprechen den Differenzen für sonstiges Nadel- und Laubderbholz in Abbildung 14 a und b. Die unterschiedliche Nachfrage nach Holzenergie führt in den dargestellten Szenarien zu Differenzen von bis zu 2,7 Mio. m³_{swe} an Derbholz im Jahr 2030 und 1,9 Mio. m³_{swe}

im Jahr 2050. Zur Holzverwendung insgesamt zählen zudem alle sonstigen Holzsortimente ohne Derbholz (Abbildung 14 e; Tabelle 3).

Der starke Verwendungsrückgang bei sonstigen Holzsortimenten resultiert aus der angenommenen Entwicklung von Biomassefeuerungsanlagen, insbesondere Großfeuerungsanlagen und deren Hauptsortiment Altholz. Eine daraus folgende stärkere Verwendung in kreislauforientierten stofflichen Verwendungen war nicht Teil dieser Untersuchung. Die Skalierung der Y-Achse in Abbildung 14 erfolgte mit dem Ziel, die Abweichungen zwischen den Szenarien herauszustellen. In Bezug zur Gesamtmenge sind die Unterschiede jedoch relativ begrenzt und schwanken in einer Spanne zwischen 68 und 74 Mio. m³_{swe}, also um 6 Mio. m³_{swe}. Die folgende Tabelle 3 gibt die obigen Grafiken nochmals in Zahlenform wieder.

Tabelle 3: Summe der energetischen und stofflichen Holzverwendung in Mio. m³_{swe} nach Sortimenten und Szenarien

Sortiment	Sonstiges Nadelderholz				Sonstige Laubderbholz				Stamm-Derbholz			
	HE-int	REF	HE-red	HE-ext	HE-int	REF	HE-red	HE-ext	HE-int	REF	HE-red	HE-ext
Jahr												
2020	15,7	15,7	15,7	15,7	10,5	10,5	10,5	10,5	42,4	42,4	42,4	42,4
2030	16,4	16,1	15,8	15,3	11,6	11,1	10,6	9,9	44,9	44,9	44,9	44,9
2040	16,1	15,9	15,5	15,1	10,8	10,4	9,8	9,1	46,8	46,8	46,8	46,8
2050	15,2	15,0	14,8	14,5	9,5	9,2	8,8	8,3	48,7	48,7	48,7	48,7

Sortiment	Waldderbholz o.R.				Sonstiges Holz (inkl. Rinde)				Insgesamt			
	HE-int	REF	HE-red	HE-ext	HE-int	REF	HE-red	HE-ext	HE-int	REF	HE-red	HE-ext
Jahr												
2020	68,6	68,6	68,6	68,6	53,9	53,9	53,9	53,9	122,5	122,5	122,5	122,5
2030	72,9	72,1	71,3	70,2	57,8	57,1	55,0	52,5	130,7	129,3	126,3	122,7
2040	73,7	73,1	72,2	71,0	50,2	49,6	49,2	48,6	123,9	122,6	121,3	119,6
2050	73,3	72,8	72,2	71,4	45,1	44,7	45,6	46,5	118,4	117,5	117,8	117,9

Quelle: eigene Darstellung. Die Übergabe zur Holznachfrage von TRAW an FABio-Forest HoLCA sind in Anhang B zusammengestellt. HE-int = Intensivierte Holzenergieverwendung, HE-red = Reduzierte Holzenergieverwendung, HE-ext = Extensivierte Holzenergieverwendung, o.R. = ohne Rinde, Derbholz = Laub- und Nadelholz über 7 cm Durchmesser, sonstiges Holz siehe Tabelle 4.

Tabelle 4: Sonstiges Holz (inkl. Rinde) der energetischen und stofflichen Holzverwendung in Mio. m³_{swe} nach Sortimenten und Szenarien

Sortiment	Sonstige primäre Biomasse				Sekundäre Reststoffe				Recyclingmaterial			
	HE-int	REF	HE-red	HE-ext	HE-int	REF	HE-red	HE-ext	HE-int	REF	HE-red	HE-ext
Jahr												
2020	13,0	13,0	13,0	13,0	24,8	24,8	24,8	24,8	16,1	16,1	16,1	16,1
2030	15,1	14,7	13,9	13,0	26,0	25,8	25,0	24,0	16,7	16,6	16,1	15,5
2040	13,0	12,7	12,4	12,0	23,9	23,7	23,5	23,2	13,2	13,2	13,3	13,4
2050	11,0	10,8	11,0	11,2	22,0	21,8	22,3	22,7	12,1	12,1	12,3	12,5

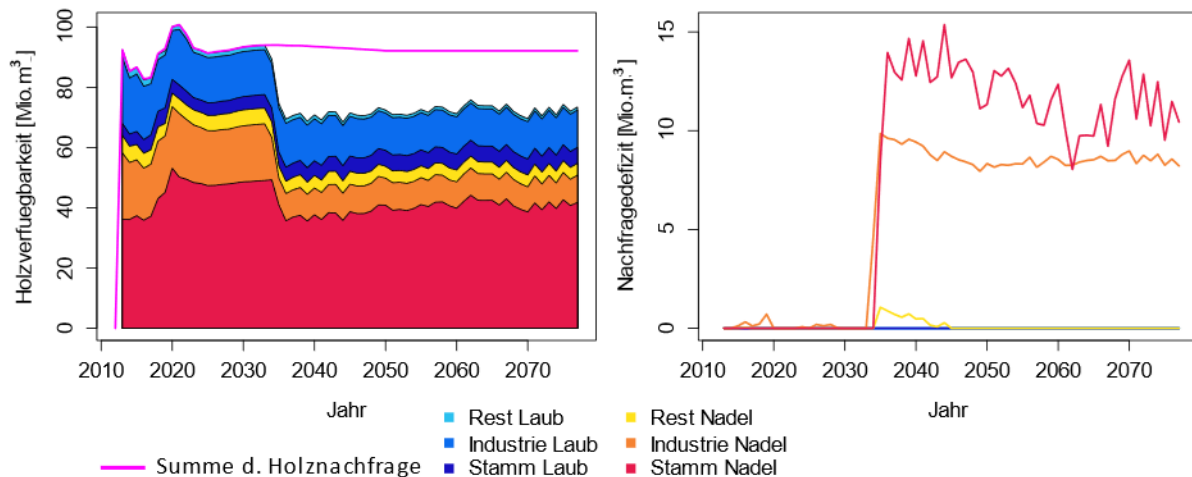
Quelle: eigene Darstellung. HE-int = Intensivierte Holzenergieverwendung, HE-red = Reduzierte Holzenergieverwendung, HE-ext = Extensivierte Holzenergieverwendung. Sonstige primäre Biomasse: Waldrestholz, Landschaftspflegematerial, Kurzumtriebsholz, Rinde, sonstige (nicht näher bestimmbar / zuzuordnen); Sekundäre Reststoffe: Sägenebenprodukte, sonstiges Industrierestholz, Schwarzlauge; Recyclingmaterial: Altholz.

4.2 Waldbewirtschaftung und Entwicklung der Waldbestände

4.2.1 Referenzszenario

Zur Waldentwicklung im Referenzszenario findet sich eine detaillierte Ergebnisdarstellung für die folgenden Aspekte in Pfeiffer et al. (2023): Entwicklung der Holzentnahme, der Baumartengruppen nach Basalfläche, des Holzvorrats, des Zuwachses, der Totholzvorräte, der Bestandesstruktur (basierend auf Durchmesserklassen), sowie der im Wald gespeicherten Menge an CO₂ und die CO₂-Speicherleistung.³⁰ Untersucht wurde dort auch, wie sich Annahmen zu variierenden Mortalitäten und Zuwächsen, wie sie zukünftig durch das Auftreten klimabedingter Störungen zu erwarten sind, auf die genannten Aspekte auswirken (Sensitivitätsanalyse). Die im vorliegenden Bericht gezeigten Ergebnisse zur Waldentwicklung konzentrieren sich vorwiegend auf die Ergebnisse der Sensitivität „mittlere Störungen“.

Abbildung 15: Simulierte Holzentnahme und offenbleibende Nachfrage im Referenzszenario (Sensitivität „mittlere Störungen“)



Quelle: Pfeiffer et al. (2023). Angaben sind ohne Rinde. Das Startjahr der Holzentnahmeszenarien-Modellierung ist 2021.

Wie aus Abbildung 15 ersichtlich wird, kann die Nachfrage nach Nadelderbholz in der Sensitivität „mittlere Störungen“ ab Mitte der 2030er nicht mehr vollständig durch die Waldholzentnahme abgedeckt werden. Dies betrifft sowohl die Nachfrage nach Stammholz als auch nach Industrieholz. Ab dem Jahr 2035 wird durch Ernte nur noch so viel entnommen, wie pro Jahr in die hiebsreifen Durchmesserklassen einwächst. Abbildung 16 zeigt die für das Referenzszenario simulierten Entwicklungen des Derbholz-Vorrates, des Zuwachses und des Totholzvorrates.

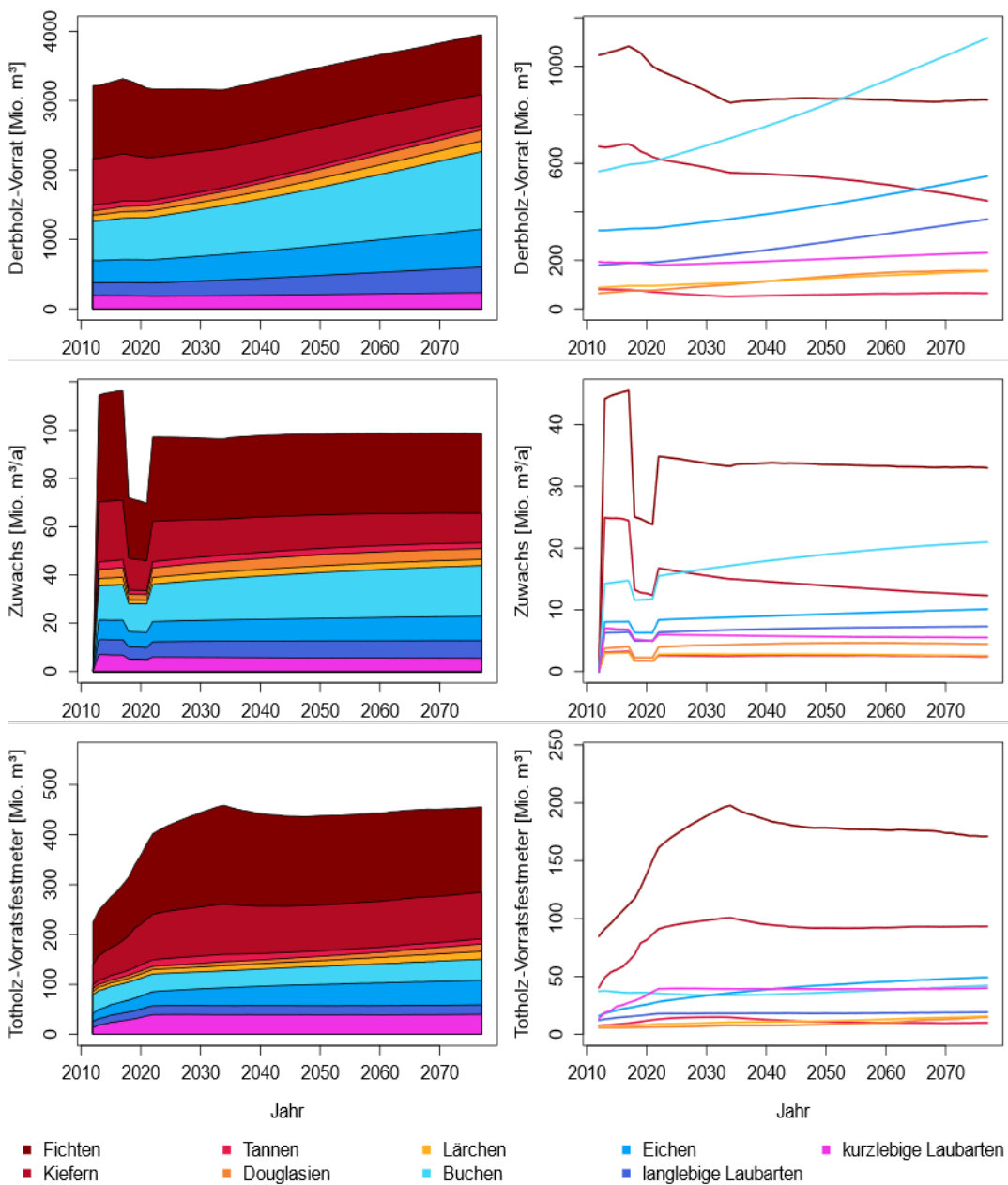
Im Jahr 2076³¹ beläuft sich der verfügbare Derbholzvorrat im Lebendbestand auf 3.935 Mio. m³ (Erntefestmeter ohne Rinde; im Mittel auf die simulierte Gesamtwaldfläche 381 m³/ha), wovon 1.689 Mio. m³ auf Nadelholz (im Mittel auf die simulierte Gesamtwaldfläche 164 m³/ha) und 2.245 Mio. m³ auf Laubholz entfallen (im Mittel auf die simulierte Gesamtwaldfläche 217 m³/ha; Abbildung 16). Beim Nadelholz stellen zu Simulationsbeginn im Jahr 2012 Fichte gefolgt von Kiefer die höchsten Vorräte (1.046 Mio. m³ und 6.69 Mio. m³), und beim Laubholz dominieren Buche (567 Mio. m³) und Eiche (323 Mio. m³) den Vorrat. Im Simulationsverlauf steigen die Vorräte beim Laubholz über die Zeit an, während beim Nadelholz der Gesamtvorrat bis 2076, insbe-

³⁰ Die Abbildungen sind zudem in Anhang B zusammengestellt.

³¹ Die gewählte Laufzeit in FABio-Forest beträgt 65 Jahre ausgehend vom Startjahr 2012.

sondere durch den Vorratseinbruch bei Fichte und Kiefer, zurückgeht. Für die vier nach Gesamtvorrat am häufigsten auftretenden Hauptbaumarten in Deutschland übersteigen als Folge die Vorräte der Buche im Jahr 2076 mit 1.106 Mio. m³ die der Fichte um ca. 28 %, während die Vorräte der Eichen mit 542 Mio. m³ gegen über denen der Kiefer um knapp 21 % höher liegen. Beim Nadelholz ist lediglich bei den Nebenbaumarten Douglasie und Lärche ein Vorratsanstieg zwischen 2021 und 2076 zu verzeichnen (Anstieg von 76 auf 158 Mio. m³ bei Douglasie bzw. von 95 auf 154 Mio. m³ bei Lärche). Diese Zunahme reicht jedoch nicht aus, um die Verluste bei Fichte und Kiefer zu kompensieren (Abbildung 16).

Abbildung 16: Derbholzvorrat, Zuwachs und Totholz nach Artengruppen im Referenzszenario (mittlere Störung)

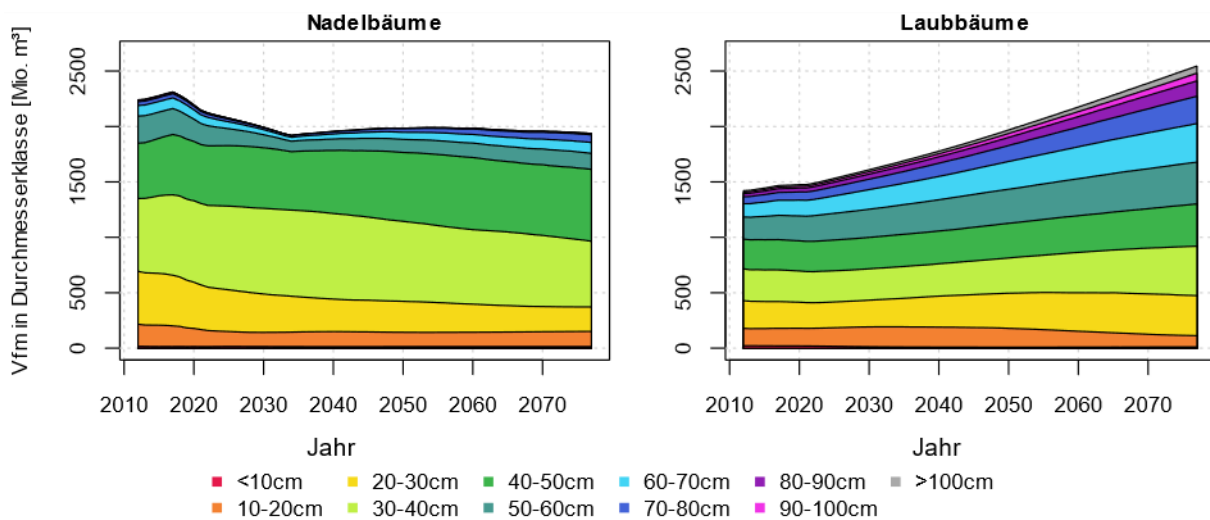


Quelle: Pfeiffer et al. (2023). Derbholz-Vorrat: ohne Rinde; Zuwachs und Totholz mit Rinde; a = Jahr. Angaben zum Derbholzvorrat ohne Rinde und zum Zuwachs und Totholz mit Rinde, a = Jahr. Für abgestorbene Bäume wird angenommen, dass das Stammholz ($\varnothing > 20$ cm) zu 90 %, das Industrieholz ($\varnothing 10-20$ cm) zu 50 % und das Restholz ($\varnothing < 10$ cm) zu 10 % entnommen wird. Das Startjahr der Holzentnahmeszenarien-Modellierung ist 2021.

Der Gesamtwuchs einer Artengruppe ergibt sich aus der artspezifischen Zuwachsleistung je Baumaltersklasse und der Anzahl an vorhandenen Bäumen. Den größten Beitrag zum Gesamtwuchs leisten somit Fichte, Kiefer und Buche, wobei der Beitrag der Buche im Zeitverlauf ansteigt und den sinkenden Zuwachs der Kiefer bereits in den 2020er Jahren übertrifft (Abbildung 16). Bei Annahme eines mittleren Störungsregimes ab 2022 beträgt der durchschnittliche Gesamtwuchs $98,0 \pm 0,8$ Mio. m^3 pro Jahr und steigt im Zeitverlauf nur geringfügig an. Laubholz trägt im Jahr 2022 mit $36,2$ Mio. m^3 (37,2 %) zum Gesamtwuchs bei. Dieser Beitrag erhöht sich bis zum Jahr 2076 beim Laubholz auf $43,8$ Mio. m^3 (44,4 %). Es ist somit ein Anstieg der Zuwächse im Laubholzbereich zu verzeichnen, während die Zuwächse im Nadelholz über die Zeit von $61,0$ Mio. m^3 (62,8 %) im Jahr 2022 auf $54,9$ Mio. m^3 (55,6 %) im Jahr 2076 abnehmen (Abbildung 16).

Totholz im Wald stellt aus Naturschutzsicht z.B. für viele spezialisierte xylobionte Arten einen wichtigen Lebensraum dar (Reise et al. 2017). Zudem ist im Totholz Kohlenstoff gespeichert, der – je nach Baumart und Durchmesser – im Laufe bis zu mehrere Jahrzehnte zersetzt wird. Im Startjahr 2012 liegt ein Totholzvorrat von $224,4$ Mio. m^3 vor, der bis zum Jahr 2021 auf $381,5$ Mio. m^3 ansteigt (Abbildung 16). Ins Totholz gehen in FABio-Forest neben ungenutztem Derbholz auch Kronenrestholz und Rinde ein. Im Startwert von 2012 werden derzeit Kronenrestholz und Rinde noch nicht berücksichtigt, da die zur Kalibrierung genutzten Daten der Bundeswaldinventur (BWI) nur den Derbholz-Anteil heranziehen. So ist der Anstieg zum einen methodisch bedingt durch die zusätzliche Berücksichtigung des Nicht-Derbholzes im Totholz-Pool. Zum anderen kommt Totholz aufgrund der Berücksichtigung der jahresscharfen Mortalitäten und den damit einhergehenden hohen Mortalitäten insbesondere beim Nadelholz zwischen 2018 und 2021 hinzu. Zwar wird ein Teil des Totholzes der Nutzung zugeführt (siehe Erläuterung in Abbildung 16), doch ist dieser Anteil zeitlich konstant, wodurch die im Wald verbleibende Totholzmenge proportional mit der anfallenden Gesamtmenge ansteigt. Nach 2021 verflacht sich der Anstieg im Totholz, da für die Fortschreibung geringere Mortalitäten als im Zeitraum 2018-2021 angenommen werden (vgl. Kap. 2.3.1). Bis zum Jahr 2034 steigt die Totholzmenge zunächst weiter an, nimmt dann mit Einbruch der Nadelholzversorgung (siehe Abbildung 15) bis 2045 leicht ab, und verbleibt danach bis 2076 auf nahezu konstantem Niveau. Ab 2034 kann die Nadelholznachfrage nicht mehr vollständig bedient werden, da Nadelholz-Altbestände abgeschöpft sind und der jährliche Zuwachs an Nadelholz unter der Nachfrage liegt. Durch die ab 2034 insgesamt geringere Entnahme fällt weniger im Wald verbleibendes Kronenrestholz und Rinde an. Außerdem werden die mortalitätsanfälligen ältesten Durchmesserklassen, die überproportional viel Totholzvolumen pro Baum liefern, im Rahmen der zulässigen Bewirtschaftung maximal abgeschöpft, so dass insgesamt weniger Totholz anfällt. Der Gesamtotholzvorrat im Jahr 2076 beträgt unter Annahme eines mittleren Störungsregimes $454,6$ Mio. m^3 , wovon $304,5$ Mio. m^3 (67,0 %) auf Nadel- und $150,1$ Mio. m^3 (33,0 %) auf Laubholz entfallen (Abbildung 16).

Abbildung 17: Derbholzvorrat nach Durchmesserklassen für Nadel- und Laubbäume (mittlere Störung)



Quelle: Pfeiffer et al. (2023). Vfm = Vorratsfestmeter (mit Rinde). Das Startjahr der Holzentnahmeszenarien-Modellierung ist 2021.

Die Vorratsentwicklung der Bestände getrennt nach Nadel- und Laubholz und differenziert nach Durchmesserklassen ist in Abbildung 17 dargestellt. Zum Beginn der Simulationsperiode liegen die höchsten Bestandsvorräte beim Nadelholz im Durchmesserbereich 30-40 cm (656,2 Mio. m³ im Jahr 2012) vor, gefolgt von den Durchmesserklassen 40-50 cm (499,2 Mio. m³) und 20-30 cm (478,2 Mio. m³). Beim Laubholz ist die Verteilung nach Durchmesserklassen vom Durchmesserbereich 20-30 cm bis zum Durchmesserbereich 50-60 cm relativ homogen und bewegt sich zwischen 200,1 und 286,5 Mio. m³ pro Durchmesserklasse. Deutlich geringere Vorräte finden sich bei den Laubbäumen in den Durchmesserklassen >60 cm, sowie den Durchmesserklassen <20 cm.

In der Sensitivität „mittlere Störungen“ nimmt der Gesamtvorrat im Nadelholzbestand bis zum Jahr 2034 ab, wobei eine überproportionale Abnahme in den Durchmesserklassen >50 cm zu verzeichnen ist. Dies kommt durch den hohen Ernteeinschlag von Bäumen im Bereich der Zielstärkennutzung zustande (Abbildung 17). Ab dem Jahr 2034 bleibt der Gesamtvorrat im Nadelholz in etwa konstant, mit einer leichten Vorratszunahme in den Durchmesserklassen >40 cm und bei gleichzeitiger Vorratsabnahme in den Durchmesserklassen 20-30 cm und 30-40 cm.

Beim Laubholz steigt der Vorrat zwischen den Jahren 2033 und 2076 in allen Durchmesserklassen >20 cm an (Abbildung 17). Hervorzuheben ist bei den Laubbäumen insbesondere der Anstieg der Vorräte in den Durchmesserklassen >60 cm, da sie vermehrt Habitate wie Höhlen, Rindentaschen, Totholzbereiche und Wasserstellen als Lebensraum für seltene und gefährdete Arten bieten (Reise et al. 2017, Luick et al. 2021).

Die Abnahme an Vorrat in den schwachen Durchmesserklassen sowohl beim Nadel- als auch beim Laubholz ist ein Indiz für die fortschreitende Entwicklung der Bestände hin zu älteren Stadien und ggf. ein Hinweis darauf, rechtzeitig die Bestandsverjüngung und Etablierung neuer Jungbestände im Blick zu haben.

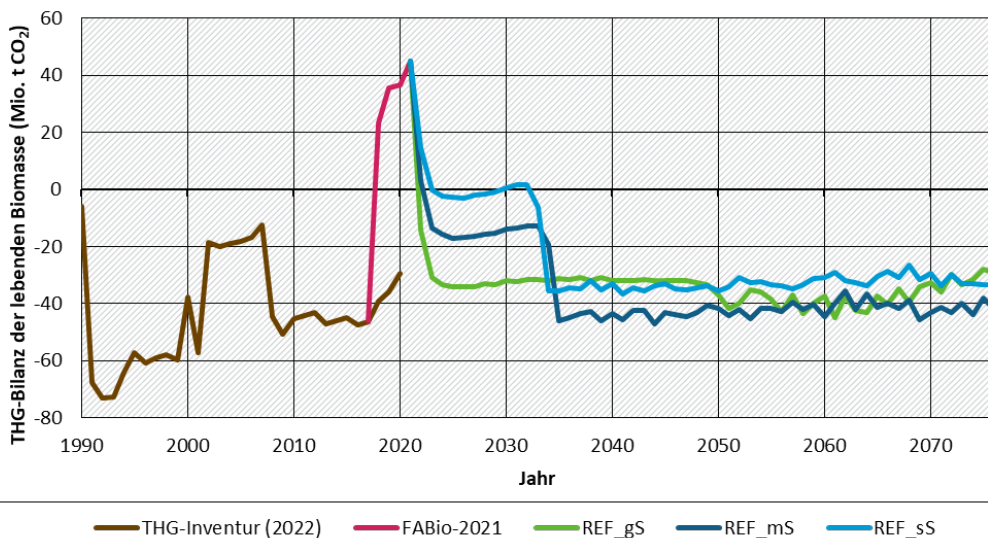
Im Hinblick auf die THG-Bilanz der lebenden Biomasse (Abbildung 18) führen die an die WZE angelehnten Mortalitätsfaktoren sowie die getroffenen Annahmen zur Zuwachsreduktionen bei Laub- und Nadelbäumen zwischen 2018 und 2021 dazu, dass der Kohlenstoffspeicher in der

lebenden Biomasse in Wäldern in Deutschland abnimmt. Im Jahr 2021 werden durch Holzentnahme und Mortalität 40 Mio. t CO₂ mehr freigesetzt als festgelegt wird. So wird die lebende Biomasse zu einer deutlichen Quelle (Abbildung 18). Wie sich die Senkenleistung der lebenden Biomasse im Wald ab dem Jahr 2022 weiterentwickelt, hängt stark davon ab, von welcher Störungssensitivität für künftige Entwicklungen ausgegangen wird. So variiert die Größe der Senke zwischen den Sensitivitäten „geringe Störungen“ und „starke Störungen im kommenden Jahrzehnt um mehr als 30 Mio. t CO₂ Speicherleistung pro Jahr (Abbildung 18). Ein weiterer bedeutender Einflussfaktor für die Senkenleistung liegt in der Holzentnahmeintensität (siehe Details in Anhang B.1 und vgl. Ergebnisse der Holzenergieszenarien in Kap. 4.1.2 und Analysen in Kap. 4.3.1.2):

- ▶ Beim Laubholz wird über den gesamten Simulationszeitraum weniger Holz entnommen als nachwächst. So sind Laubbaumbestände eine Senke. Annahmen zur Intensität natürlicher Störungen verändern dies nur leicht.
- ▶ Die Nadelholzentnahme liegt deutlich über der Zuwachsrate der Nadelbaumbestände. Der Nadelholzvorrat nimmt ab, bis der Vorrat in älteren Nadelbaumbeständen abgeschöpft ist. Das ist bei geringen Störungen ab dem Jahr 2050, bei mittleren Störungen ab dem Jahr 2034 und bei starken Störungen ab dem Jahr 2033 der Fall. So wird in dem genannten Zeitraum mehr Nadelholz entnommen als nachwächst und Nadelbaumbestände sind eine Quelle.
- ▶ Nach Abschöpfen der älteren Nadelbaumbestände wird etwa so viel Nadelholz entnommen wie nachwächst, die THG-Bilanz der Nadelbaumbestände ist nahe Null.

Die THG-Bilanz der lebenden Bäume in Abbildung 18 setzt sich aus den beschriebenen Effekten für Nadel- und Laubbaumbestände zusammen: die Senke der Laubbaumbestände kompensiert die Quelle der Nadelbaumbestände. Die Effekte natürlicher Störungen treten deutlich zu Tage, werden aber stark überprägt, sobald die älteren Nadelbaumbestände abgeschöpft sind (Abbildung 18).

Abbildung 18: Treibhausgasbilanz der lebenden Bäume im Referenzszenario unter Annahme geringer, mittlerer und starker Störungen



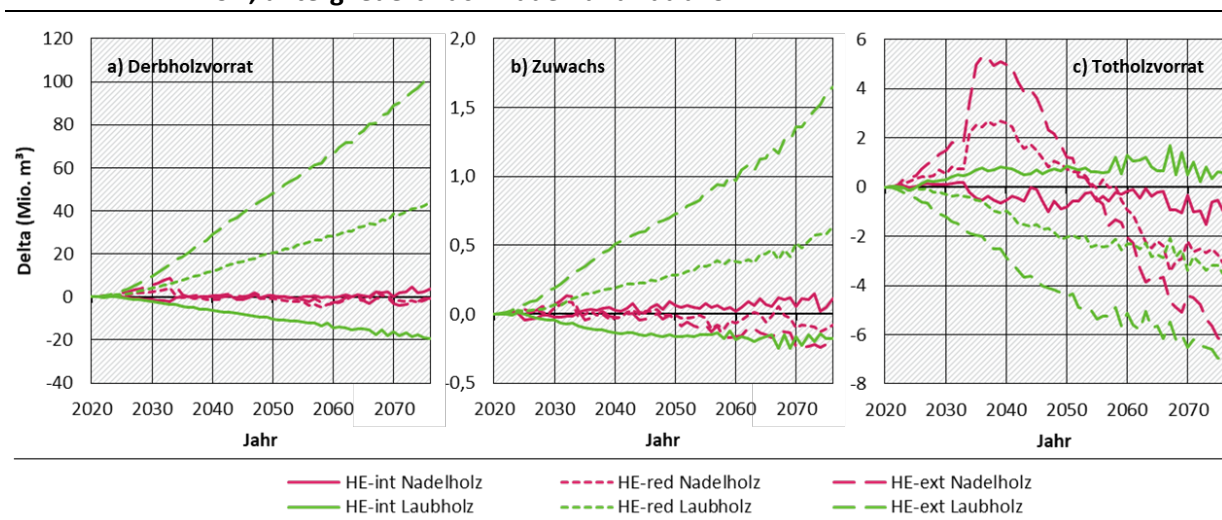
Quelle: Eigene Berechnungen und Darstellung in FABio-Forest, Öko-Institut (Pfeiffer et al. 2023). Deutsches Treibhausgasinventar und zugehörige CRF-Tabellen (Umweltbundesamt (UBA) 2022). REF = Referenzszenario, gS = geringe Störungen, mS = mittlere Störungen, sS = starke Störungen. Zu FABio-2021 siehe Text und Pfeiffer et al. (2023). Das Startjahr der Holzentnahmeszenarien-Modellierung ist 2021.

4.2.2 Holzenergieszenarien im Vergleich zum Referenzszenario

Die variierende Holznachfrage in den verschiedenen Holzenergieszenarien wirkt sich auf die Dynamik der Laubholzentwicklung aus (Abbildung 19). Eine extensivierte Holzenergienutzung (HE-ext) führt zu einem verstärkten Vorratsaufbau in den Laubholzbeständen (Abbildung 19 a). Bis zum Jahr 2076 werden durch im Szenario HE-ext im Vergleich zum Referenzszenario mehr als 100 Mio. m³ an zusätzlichem Laubholzvorrat aufgebaut. Bei einer reduzierten Holzenergienutzung (HE-red) ergibt sich noch ein Plus von mehr als 40 Mio. m³ im Jahr 2076, während eine intensivierete Holzenergienutzung (HE-int) zu einem kontinuierlichen Vorratsabbau führt und im Jahr 2076 in einem Vorratsdefizit von ca. 20 Mio. m³ relativ zum Referenzszenario resultiert. Die gegenüber dem Referenzszenario erhöhten bzw. verringerten Laubholzvorräte wirken sich zudem auf die jährliche Gesamtzuwachsleistung der Laubholzbestände in Deutschland aus (Abbildung 19 b). Im Falle einer extensivierten (HE-ext) bzw. reduzierten Holzenergienutzung (HE-red) erhöht sich, bedingt durch den verstärkten Vorratsaufbau, auch die jährliche Zuwachsleistung im Laubholz, bzw. verringert sich im Falle einer Intensivierung (HE-int). Hingegen ergeben sich beim Nadelholz beim Vorratsaufbau und bei der Veränderung des landesweiten jährlichen Zuwachses in den Holzenergieszenarien nur geringfügige Abweichungen gegenüber dem Referenzszenario. Der Zuwachs im Nadelholz verringert sich im Szenario HE-ext geringfügig, was vermutlich durch eine Verschiebung der Konkurrenzverhältnisse zugunsten der Laubhölzer zustande kommt.

Da in den Szenarien HE-ext und HE-red insgesamt weniger Laubholz eingeschlagen wird als im Referenzszenario, erniedrigt sich auch die Menge an erntebedingt anfallendem ungenutztem Kronenrestholz. Dadurch verkleinert sich der Laubholzanteil des Totholzpool (Abbildung 19 c). Eine verstärkte Laubholzentnahme im Szenario HE-int führt hingegen zu einer leichten Erhöhung des Laubholz-Totholzpool. Die Abweichungen im Totholzpool des Nadelholzes ergeben sich überwiegend durch verschobene Konkurrenzverhältnisse zwischen Laub- und Nadelholz in den Beständen und daraus resultierenden Unterschieden in der Mortalität beim Nadelholz.

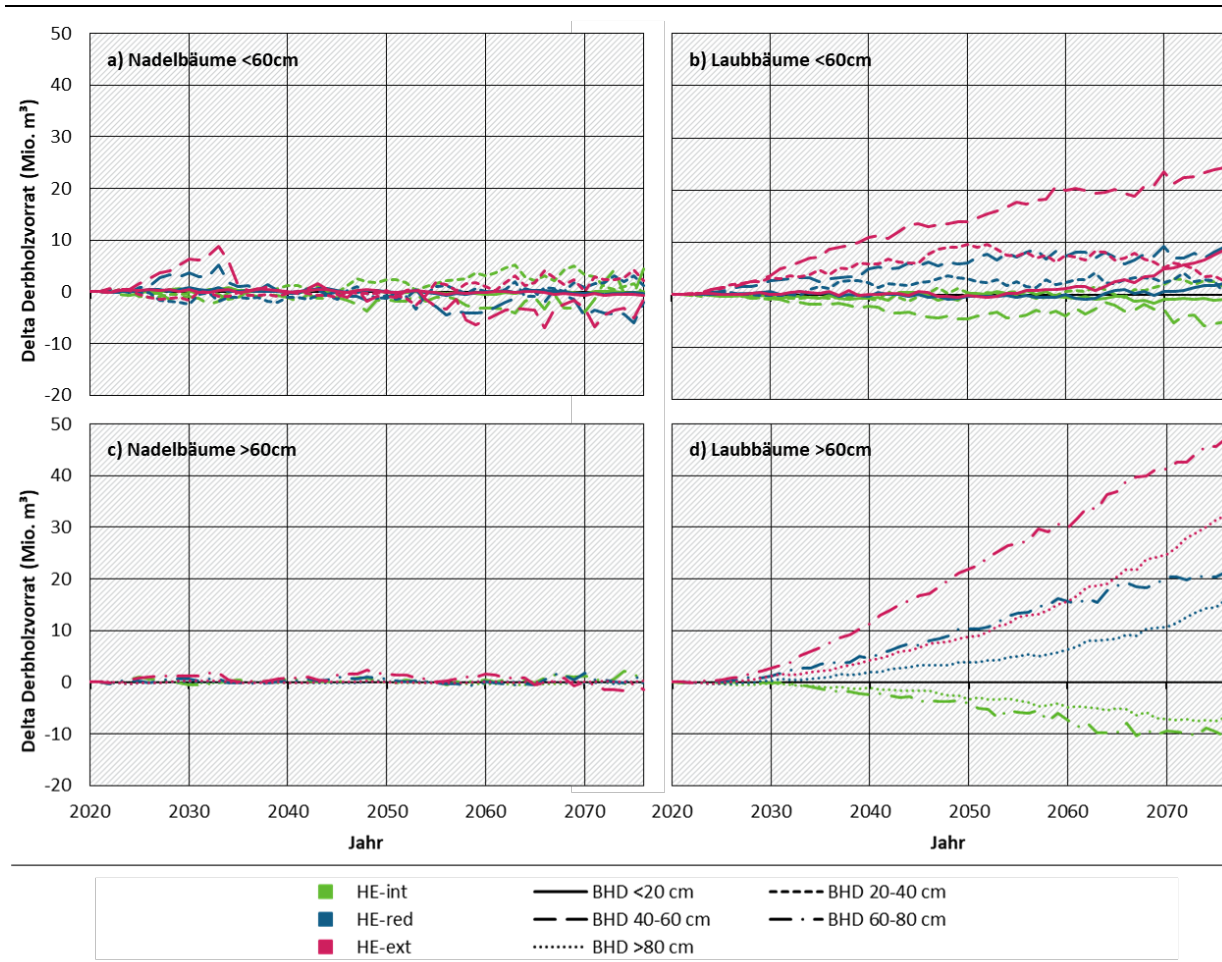
Abbildung 19: Vergleich Holzenergieszenarien zur Referenz für Derbholzvorrat, Zuwachs und Totholz, untergliedert nach Nadel- und Laubholz



Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung in FABio Forest, Öko-Institut. HE-int = Intensivierte Holzenergieverwendung, HE-red = Reduzierte Holzenergieverwendung, HE-ext = Extensivierte Holzenergieverwendung. Delta: Differenz aus Holzenergieszenarien und Referenzszenario (z.B. Delta HE-int = HE-int - REF). Derbholzvorrat ohne Rinde, Zuwachs und Totholzpool beinhalten Rinde. Das Startjahr der Holzentnahmeszenarien-Modellierung ist 2021.

Abbildung 20 stellt den Vergleich der Derbholzvorräte von Nadel- und Laubholzbeständen differenziert nach Durchmesserklassen dar. Beim Nadelholz zeigen sich in den Durchmesserklassen <60 cm (Abbildung 20 a) nur geringfügige Abweichungen vom Referenzszenario, und bei den Durchmesserklassen >60 cm gibt es beim Nadelholz praktisch keinen Unterschied zwischen den Szenarien (Abbildung 20 c). Dies entspricht den Erwartungen, da die veränderte Nachfrage nach Energieholz nur das Laubholz betrifft, während die stoffliche Nachfrage nach Nadelholz zwischen den Szenarien konstant bleibt (siehe Kapitel 3.3).

Abbildung 20: Vergleich Holzenergieszenarien zur Referenz für Derbholzvorrat nach Durchmesserklassen



Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung in FABio Forest, Öko-Institut. HE-int = Intensivierte Holzenergieverwendung, HE-red = Reduzierte Holzenergieverwendung, HE-ext = Extensivierte Holzenergieverwendung, BHD = Brusthöhendurchmesser. Delta: Differenz aus Holzenergieszenarien und Referenzszenario (z.B. Delta HE-int = HE-int - REF). Alle Angaben beziehen sich auf Derbholz ohne Rinde. Das Startjahr der Holzentnahmeszenarien-Modellierung ist 2021.

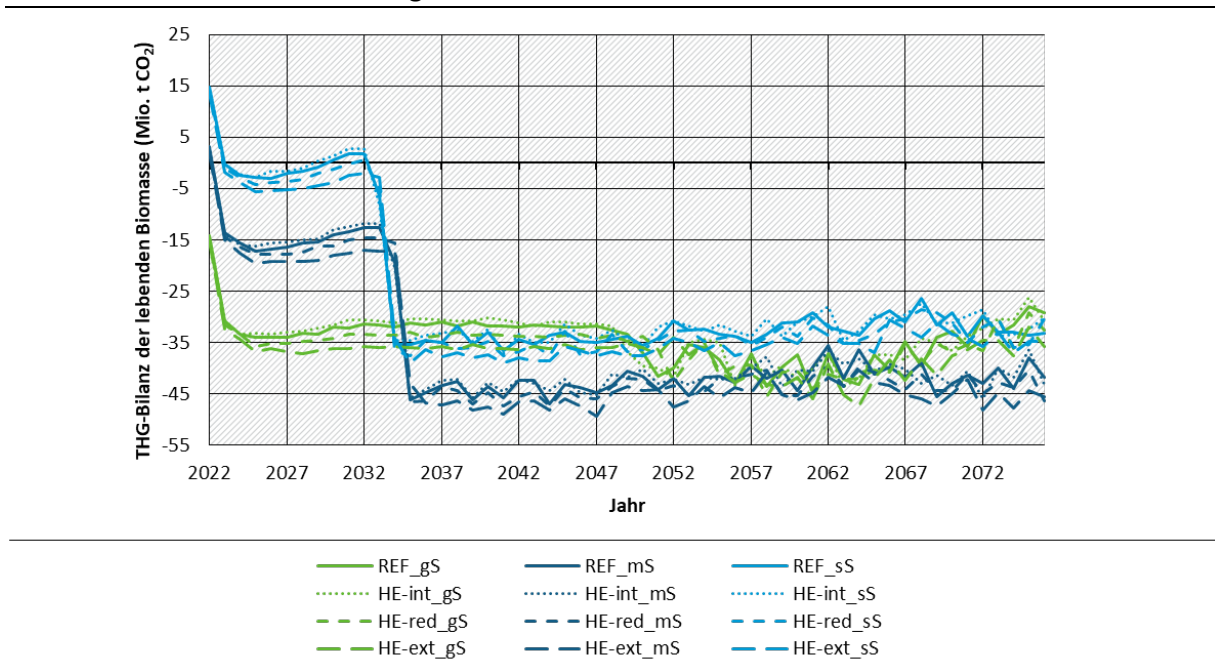
Beim Laubholz führt die extensivierte Holzenergienutzung (HE-ext) sowohl bei den durchmesserstarken Laubbäumen als auch bei den Durchmesserklassen < 60 cm zu einem Vorratsanstieg (Abbildung 20 b und d). Im Bereich der gemäß Zielstärkennutzung hiebsreifen Laubbäume ($\varnothing > 60$ cm) beträgt das Vorratsplus in der Durchmesserklasse 60-80 cm im Jahr 2076 fast 50 Mio. m^3 , und in der Durchmesserklasse >80 cm mehr als 30 Mio. m^3 (Abbildung 20 d). Ein signifikantes Vorratsplus von ca. 25 Mio. m^3 im Jahr 2076 in der Durchmesserklasse 40-60 cm zeigt, dass auch Durchmesserklassen unterhalb der Zielstärkennutzung von einer Extensivierung profitieren (Abbildung 20 b). Im Szenario HE-red sind die Vorratszugewinne nur noch ca. halb so groß wie im Szenario HE-ext, da die reduzierte Laubholzentnahme nur halb so groß ist wie im

Szenario HE-ext. Dem gegenüber stehen Laubholz-Vorratsverluste im Szenario HE-int, die sich bereits ab dem Durchmesserbereich >40 cm bemerkbar machen. Im Szenario HE-int ist für die Durchmesserklasse zwischen 60-80 cm mit ca. 10 Mio. m³ an Laubholz im Jahr 2076 die stärkste Vorratsreduktion gegenüber dem Referenzszenario zu verzeichnen, gefolgt von der Durchmesserklasse >80 cm (Abbildung 20 d).

Abbildung 21 vergleicht die Treibhausgasbilanz der lebenden Biomasse im Wald in Deutschland für verschiedene Holzenergieszenarien unter Annahme verschiedener Störungseinflüsse. Die folgenden Punkte werden deutlich:

- ▶ Die Annahmen zur Störungsintensität haben einen starken Einfluss auf die Senkenleistung des Referenzszenarios und der Holzenergieszenarios. Dieser Effekt ist höher als die Unterschiede zwischen dem Referenzszenario und den Holzenergieszenarios.
- ▶ Die Holzenergieszenarios folgen dem generellen Verlauf des Referenzszenarios bzw. den Störungsvarianten (vgl. Abbildung 18).
- ▶ Die extensivierte (HE-ext) und reduzierte (HE-red) Laubholznutzung erhöhen die Senkenleistung, die intensivierte Laubholznutzung (HE-int) verringert sie.

Abbildung 21: Treibhausgasbilanz der lebenden Biomasse der Waldfläche des Referenzszenarios und der Holzenergieszenarios



Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung in FABio Forest, Öko-Institut. Siehe Details zur THG-Bilanz der lebenden Biomasse der Waldfläche in Pfeiffer et al. (2023).

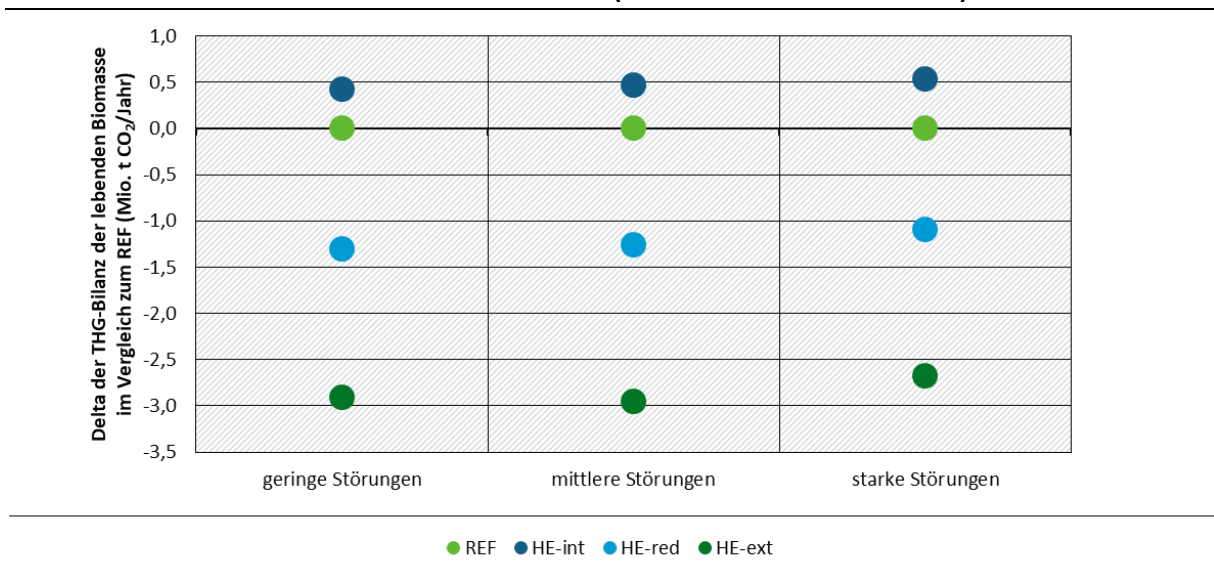
Der zuletzt genannte Zusammenhang wird deutlicher sichtbar, wenn die Differenz der Holzenergieszenarios zum Referenzszenario als Mittelwert von 2022-2076 aufgetragen wird. So zeigt Abbildung 22, dass die Intensität der Energieholzentnahme einen Unterschied von mehreren Millionen t CO₂ in der Speicherleistung ausmachen kann. In den Sensitivitäten „geringe“ und „mittlere Störungen“ führt eine extensivierte Holzenergienutzung (HE-ext) gegenüber dem Referenzszenario im Mittel zu einer jährlichen Erhöhung der Speicherleistung von knapp

3 Mio. t CO₂. In der Sensitivität „starke Störungen“ sind es immerhin noch ca. 2.7 Mio. t CO₂ an zusätzlicher Speicherleistung pro Jahr. Im Szenario HE-red fällt der Zugewinn an jährlicher Speicherleistung geringer aus und liegt, je nach Störungssensitivität, zwischen ca. 1,0 und 1,4 Mio. t CO₂ pro Jahr. Die simulierte intensivierete Holzenergienutzung (HE-int) führt verglichen zum Referenzszenario zu einem Verlust an Speicherleistung, der sich im Mittel zwischen ca. 0,4 Mio. t CO₂ („geringe Störungen“) und etwas über 0,5 Mio. t CO₂ (starke Störungen“) pro Jahr bewegt.

Zusammenfassend zeigt dieser Vergleich der Holzenergieszenarien mit dem Referenzszenario:

- ▶ Die Intensität der Holzenergieverwendung verändert die Senkenleistung der Wälder deutlich.
- ▶ Die Intensität der natürlichen Störungen beeinflusst diesen Effekt nur in geringem Maße, da sie auf das Referenzszenario und die Holzenergieszenarien in ähnlicher Weise wirken.

Abbildung 22: Vergleich der Holzenergieszenarien zur Referenz für die Treibhausgasbilanz der lebenden Biomasse der Waldfläche (Mittelwert von 2022 – 2076)



Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung in FABio Forest, Öko-Institut. Das Delta bezieht sich jeweils auf das Referenzszenario unter einer Störungsannahme (z.B. HE-int (geringe Störung) – REF (geringe Störung)). Die Berechnung mittleren THG-Bilanz erfolgt auf Basis der Ergebnisse in Abbildung 21. REF = Referenzszenario, HE-int = Intensivierte Holzenergieverwendung, HE-red = Reduzierte Holzenergieverwendung, HE-ext = Extensivierte Holzenergieverwendung.

4.3 Treibhausgasbilanzierung der Holzenergie

In Kap. 4.3.1 werden Analysen vorgestellt, die in einen Vorschlag zur Weiterentwicklung der Produkt-Treibhausgasbilanz von Energieholz führen. Darauf aufbauend werden die THG-Emissionen und THG-Einsparungen der heutigen und zukünftigen Holzenergienutzung für das Referenzszenario (Kap. 4.3.2) und die Holzenergieszenarien (Kap. 4.3.3) dargestellt. Die Produkt-THG-Bilanz speist sich dabei aus den Mengenströmen der Holzverwendungsmodellierung und wendet die weiterentwickelte Produkt-THG-Bilanz an.

4.3.1 Weiterentwicklung der Produkt-Treibhausgasbilanz von Holzenergie

4.3.1.1 Nationales Treibhausgasinventar und Produkt-Treibhausgasbilanz

Bei der Bilanzierung von Treibhausgasen sind zwei grundsätzliche methodische Ansätze zu unterscheiden:

- ▶ Das **Nationale Treibhausgasinventar** hat zum Ziel, die Treibhausgasemissionen eines Landes zusammenzustellen. Es folgt der Methode zur Berichterstattung des IPCC³² (IPCC 2006). Anfallende THG-Emissionen werden dabei einem Sektor zugewiesen (siehe Abbildung 23). Sind an einer Emission zwei oder mehrere Sektoren beteiligt, wird die gesamte Emission einem der beteiligten Sektoren zugewiesen, um Doppelzählungen zu vermeiden. Emissionen, die in einem anderen Land anfallen, werden nicht berücksichtigt. Das nationale THG-Inventar bildet die historische Entwicklung der THG-Emissionen nach Sektor und als Summe aller Sektoren ab.
- ▶ Die **Produkt-Treibhausgasbilanz** verfolgt das Ziel, alle THG-Emissionen, die mit einem Produkt zusammenhängen, zu bilanzieren. Dazu werden entlang der Prozesskette, die den Lebensweg eines Produkts beschreibt, alle THG-Emissionen zusammengerechnet. Die THG-Emissionen können in unterschiedlichen Sektoren und Ländern anfallen, und es werden THG-Emissionen von Vorketten und Nebenketten (z.B. THG-Emissionen der Stromerzeugung) berücksichtigt. Zur Bewertung werden häufig Produkt-THG-Bilanzen von zwei Produkten mit gleichem Nutzen verglichen. Auch die Berechnungsmethode zum Nachweis der THG-Einsparung in der Erneuerbaren-Energien-Richtlinie (RED)³³ beruht auf den Prinzipien von Produkt-THG-Bilanzen. Daran orientiert sich z.B. die UBA-Emissionsbilanzierung erneuerbarer Energieträger, in der jährlich die durch den Einsatz erneuerbarer Energien eingesparten THG-Emissionen für Deutschland berechnet werden (Lauf et al. 2021). Der Nachweis von THG-Einsparungen ist ein zentrales Nachhaltigkeitskriterium für die energetische Nutzung von Biomasse, welches in Deutschland z.B. über die Biomasse-Strom-Nachhaltigkeitsverordnung³⁴ umgesetzt wird. Die Ausführungen zur Ergänzung von Produkt-THG-Bilanzen in den folgenden Abschnitten beziehen sich auf solche, die im Rahmen der RED, ihrer Umsetzung wie in der Biomasse-Strom-Nachhaltigkeitsverordnung und daran orientiert der UBA-Emissionsbilanz zum Einsatz kommen. Die THG-Bilanz in Kombination mit Flächen-bezogenen Nachhaltigkeitskriterien der RED dient zudem als Entscheidungsgrundlage für den Erwerb von Zertifikaten für die verpflichtende Teilnahme der Betreiber emissionshandelspflichtiger Anlagen am Europäischen Emissionshandelssystem.³⁵ Zur Vereinfachung des Leseflusses wird im Folgenden für die THG-Bilanz der RED und daran angelehnte Ansätze der Begriff „Produkt-THG-Bilanzen nach der RED“ verwendet.

Die Holzentnahme im Wald verringert den Kohlenstoffgehalt der Waldfläche (Sektor LULUCF) und damit die Treibhausgasbilanz der Wälder. Eine anschließende Verbrennung setzt das im Holz gebundene CO₂ frei (z.B. Sektor Gebäude). Bei der CO₂-Emission aus der Holzverbrennung sind also zwei Sektoren beteiligt. Um Doppelzählungen zu vermeiden, wird nach den IPCC-Regeln die CO₂-Emission aus der Holzverbrennung nur einem Sektor, nämlich der Forstwirtschaft

³² The Intergovernmental Panel on Climate Change (<https://www.ipcc.ch/>)

³³ Renewable Energy Directive: RED III (Directive (EU) 2023/2413; <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/2413/oj>) auf Grundlage der RED II (Directive (EU) 2018/2001; <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32018L2001&qid=1699610056216>)

³⁴ https://www.gesetze-im-internet.de/biost-nachv_2021/

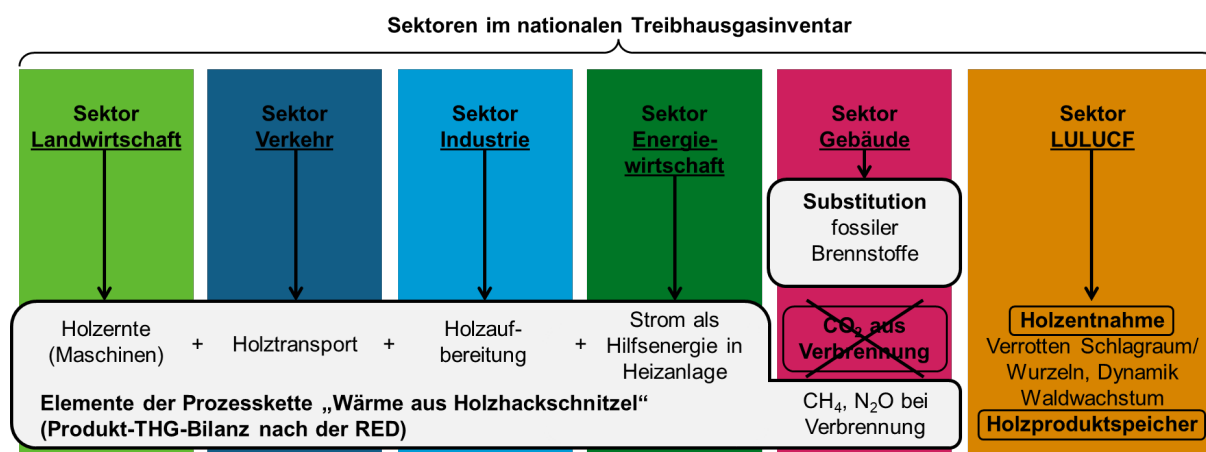
³⁵ Siehe z.B. unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/der-europaeische-emissionshandel#teilnehmer-prinzip-und-umsetzung-des-europaischen-emissionshandels>

im LULUCF-Sektor, zugeordnet. Da die Holzentnahme aus dem Wald bereits als CO₂-Emission verbucht ist, wird bei der Holzverbrennung keine weitere CO₂-Emission berücksichtigt. Das Gleiche gilt auch für die Holzentnahme aus dem Holzproduktspeicher, so dass nach IPCC die CO₂-Emissionen der Verbrennung von z.B. Altholz im Holzproduktspeicher und nicht im Gebäude- oder Energiesektor bilanziert werden.³⁶

In der Produkt-THG-Bilanzen nach der RED wird das Produkt "Wärme aus Holzenergie" mit dem Produkt „Wärme aus fossilen Energieträgern“ verglichen. Aus dem Vergleich der Produkt-THG-Bilanzen wird abgeleitet, ob Holzenergie emissionsseitig ausreichend Vorteile gegenüber dem Einsatz fossiler Energieträger zur Wärmebereitstellung hat. Die Ergebnisse fließen u.a. in Handlungsempfehlungen ein mit dem Ziel, das nationale THG-Inventar zu verbessern. Dies ist aber nur dann konsistent, wenn die Produkt-THG-Bilanz die gleichen Aspekte berücksichtigt, wie das nationale THG-Inventar, da es sonst zu Widersprüchen bzw. einem Versatz zwischen beiden Logiken kommen kann.

Am Beispiel des Produkts „Wärme aus Holzhackschnitzeln“ (Abbildung 23) wird deutlich, dass die Produkt-THG-Bilanzen nach der RED nicht alle Aspekte abdecken, die in das nationale THG-Inventar eingehen. Produkt-THG-Bilanzen nach der RED berücksichtigen THG-Emissionen, die für einzelne Schritte der Prozesskette wie Maschineneinsatz bei der Holzernte, Holztransport, Holzaufbereitung und Hilfsenergie anfallen. Die CO₂-Emissionen, die durch die Holzentnahme und -verbrennung auftreten, fehlen in der Produkt-THG-Bilanz nach der RED bzw. werden gleich Null gesetzt.

Abbildung 23: Sektoren des nationalen Treibhausgasinventars und Prozesskette für Wärme aus Hackschnitzeln nach Produkt-Treibhausgasbilanzen



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Hennenberg und Böttcher (2023). LULUCF = *land use, land use change and forestry*. RED = Erneuerbare-Energien-Richtlinie³³ (siehe Erläuterungen zur Produkt-THG-Bilanzen nach der RED im Text). Nach den Regeln des IPCC (IPCC 2006) werden THG-Emissionen aus Holzentnahme aus dem Wald oder aus dem Holzproduktspeicher und anschließender Verbrennung im LULUCF-Sektor berichtet, um Doppelzählungen zu vermeiden.

Ebenfalls fehlen in der Produkt-THG-Bilanz nach der RED CO₂-Emissionen aus weiteren Prozessen, die im Zuge der Waldbewirtschaftung auf der Waldfläche ablaufen. Dazu zählen z.B. das Verrotten von Schlagraum und Wurzeln der geernteten Bäume, auch mit Auswirkungen auf den Bodenkohlenstoff, und eine veränderte Dynamik des Waldwachstums, denn junge Bäume zeigen

³⁶ Bei einer stofflichen Nutzung von Holz wird auch die Holzentnahme im Wald als CO₂-Emission gewertet. Der Anteil des Holzes, der stofflich genutzt wird, wird im Holzproduktspeicher als CO₂-Festlegung gutgeschrieben. Das gleiche gilt für die Holzentnahme aus dem Holzproduktspeicher (=CO₂-Emission) und der Wiederverwertung von Anteilen dieses Holzes (CO₂-Gutschrift im Holzproduktspeicher).

meist höhere Zuwachsraten als ältere Bäume. Ein Baumartenwechsel z.B. im Zuge eines Umbaus hin zu klimaresilienten Beständen kann auch die CO₂-Einbindung in Abhängigkeit der gewählten Baumarten verändern.

4.3.1.2 Zusammenhang zwischen Holzentnahme und der Veränderung der Senkenleistung auf der Waldfläche (CO₂-Speichersaldo)

Der folgende methodische Ansatz findet sich bereits in Arbeiten von Pingoud et al. (2016), Hennenberg et al. (2019), Fehrenbach et al. (2022) und Soimakallio et al. (2022)³⁷. Bäume speichern durch ihren Zuwachs CO₂. Dadurch steigt der CO₂-Speicher der Waldfläche an. Sterben Bäume ab, werden sie zu Totholz. Im Zersetzungsprozess wird ein kleiner Anteil des zuvor in lebender Biomasse gebundenen CO₂ im Boden als Humus gespeichert. Der Großteil wird hingegen wieder freigesetzt, wodurch sich der CO₂-Speicher der Waldfläche verringert. Je nach Totholztyp dauert die Zersetzung mehrere Jahrzehnte.³⁸ Wird Holz im Zuge der Waldbewirtschaftung entnommen, reduziert dies ebenfalls den CO₂-Speicher der Waldfläche, aber direkt vollständig zum Zeitpunkt der Holzentnahme. Die Bilanz aus CO₂-Einbindung und Freisetzung durch Zuwachs, natürlicher Mortalität und Holzentnahme führt Netto zu einer Zu- oder Abnahme des CO₂-Speichers auf der Waldfläche. Diese Veränderung des CO₂-Speichers wird als Senkenleistung bezeichnet. Sie kann positiv sein, d.h. die Einbindung von CO₂ überwiegt (Senke), oder sie kann negativ sein, d.h. die CO₂-Freisetzung dominiert (Quelle).

Die Senkenleistung ist ein zentraler Fokus im Projekt BioSINK: zum einen wurde ihre Höhe basierend auf einer Literaturstudie abgeschätzt (Kap. 4.3.1.2.1), zum anderen werden Modellergebnissen des Waldmodells FABio-Forest ausgewertet (Kap. 4.3.1.2.2).

4.3.1.2.1 Literaturstudie

Die Literaturstudie zur Senkenleistung von Wäldern wurde zusammen mit finnischen Kollegen durchgeführt (Soimakallio et al. 2022). Im Zentrum stand die Frage, wie stark sich die Senkenleistung der Waldfläche in Abhängigkeit von der Bewirtschaftungsintensität verändert.

Insgesamt wurden 45 internationale Waldsimulationsstudien zu borealen und temperaten Wäldern ausgewertet. Für die Analyse wurden Szenarienpaare aus einem Szenario mit einer intensiven Waldbewirtschaftung und einem Szenario mit einer extensiven Waldbewirtschaftung gebildet. Für beide Szenarien wurden jeweils die Senkenleistung (t CO₂) und die Holzentnahme (m³) aus der Studie entnommen. Mit diesen vier Werten wurde ein Parameter, der CO₂-Speichersaldo³⁹, errechnet:

$$\text{CO}_2\text{-Speichersaldo} = \frac{\text{Senkenleistung}_{\text{Szenario}_{\text{intensiv}}} - \text{Senkenleistung}_{\text{Szenario}_{\text{extensiv}}}}{\text{Holzentnahme}_{\text{Szenario}_{\text{intensiv}}} - \text{Holzentnahme}_{\text{Szenario}_{\text{extensiv}}}}$$

mit der Einheit t CO₂/m³ (siehe Berechnungsbeispiel in Anhang C.1).

Der CO₂-Speichersaldo gibt somit an, wie stark sich die Senkenleistung pro entnommenen m³ Holz verändert. In Abstimmung mit dem UBA wird diese Methode in Kap. 4.3.1.2.2 auf Modellergebnisse im Projekt BioSINK angewandt.

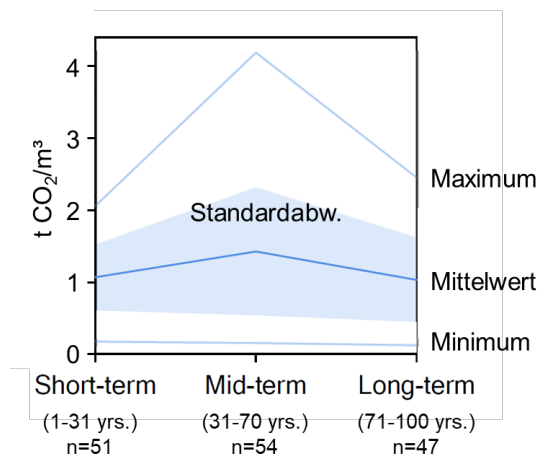
³⁷ Die Veröffentlichung in Soimakallio et al. 2022 wurde mit Arbeiten aus dem Projekt BioSINK unterstützt.

³⁸ Siehe WebTotholzcalculator der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA) unter <https://www.nw-fva.de/Web-Totholzcalculator/TotholzVerbleib>. Beispiel: Liegendes Buchentotholz ist nach 20 Jahren vollständig verrottet. Stehendes Buchentotholz ist nach 20 Jahren zu ca. 30 % verrottet. Liegendes Fichtentotholz ist nach 20 Jahren zu etwa 75 % verrottet. Bei stehendem Fichtentotholz sind nach 20 Jahren nur etwa 15 % verrottet. Liegendes Eichtotholz verrottet in 20 Jahren zu etwa 50 %. Stehendes Eichtotholz ist nach 20 Jahren nur zu 13 % verrottet.

³⁹ Siehe weitere Details in Hennenberg et al. (2023), <https://co2-speichersaldo.de> und <https://blog.oeko.de/red-iii-methodik-in-der-treibhausgasbilanz-fuer-energieholz-fehlt-ein-wichtiger-aspekt-der-ipcc-regeln/>

Für boreale und temperate Wälder konnte ein mittlerer CO₂-Speichersaldo von 1,2 t CO₂/m³ (Standardabweichung ±0,7 t CO₂/m³) anhand von 154 Szenarienpaaren aus 45 internationalen Simulationsstudien ermittelt werden (Abbildung 24, Soimakallio et al. 2022). Auch wenn die Ergebnisse durch eine deutliche Spannweite geprägt sind, ist aber hervorzuheben, dass eine steigende Holzentnahme in allen Szenarienpaaren mit einer Abnahme der Senkenleistung einhergeht. In keinem Fall führte eine Intensivierung der Waldbewirtschaftung zu einer Steigerung der Senkenleistung. Der Effekt resultiert z.T. aus der Holzentnahme selbst. Hier sind die CO₂-Emissionen bekannt: Im Holz von Buche, Eiche und langlebigen Laubbaumarten sind etwa 1,0 t CO₂/m³ und in Nadelbäumen und kurzlebigen Laubbaumarten etwa 0,7 t CO₂/m³ gespeichert. Dieser Unterschied liegt an der Holzdichte der Baumarten. Hinzu kommen weitere Auswirkungen der intensiveren Bewirtschaftung auf die Waldentwicklung. Insbesondere wird zusätzliches CO₂ beim Verrotten von Kronentopholz und Wurzeln frei, und die intensivere Bewirtschaftung hält den Holzvorräte auf einem niedrigeren Niveau. In Summe können so auch jüngere, schneller wachsende Bäume die Kohlenstoffverluste nicht ausgleichen. Im Mittel können den Aspekten der Walddynamik CO₂-Emissionen in einer Größenordnung von 0,4 t CO₂/m³, aber mit einer deutlichen Spannweite (s.o. und Abbildung 24), zugewiesen werden.

Abbildung 24: CO₂-Speichersaldo in borealen und temperaten Wäldern für kurze, mittlere und lange Betrachtungszeiträume



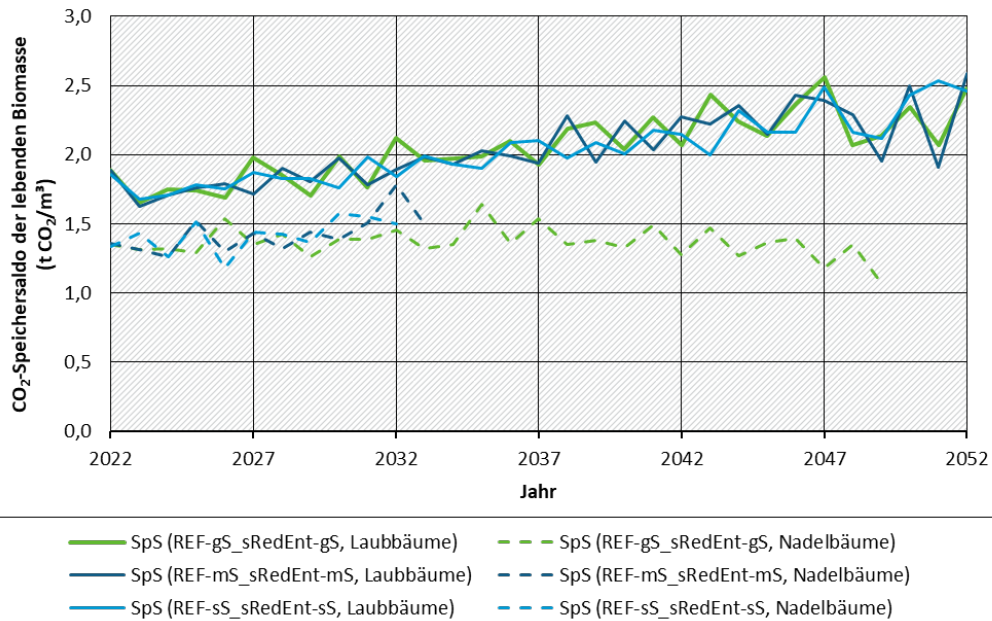
Quelle: Soimakallio et al. (2022). Die Umrechnung von tC/tC in t CO₂/m³ erfolgte unter Annahme eines C-Gehalts von 0,2 tC/m³.

4.3.1.2.2 Auswertung von Modellergebnissen

Im Rahmen des Modellverbundes wurde die Analyse zum CO₂-Speichersaldo auch auf FABio-Forest-Szenarien angewandt. Dazu wurde eine starke Reduzierung der Holzentnahme (sRedEnt) simuliert, bei dem die Holzentnahme im Zeitverlauf für Nadelholz um 2,5 Mio. m³/Jahr und für Laubholz um 4 Mio. m³/Jahr gegenüber den Referenzszenario verringert wurde. Zudem wurden Varianten mit geringen, mittleren und starken natürlichen Störungen modelliert (Pfeiffer et al. 2023, und siehe Details in Anhang C.1). In Abbildung 25 ist zu erkennen, dass der CO₂-Speichersaldo für Nadelholz niedriger liegt als für Laubholz. Dies liegt daran, dass im Nadelholz durch die geringere Dichte je Volumen weniger CO₂ gebunden ist. Zudem zeigt sich, dass der CO₂-Speichersaldo kaum durch die Annahmen zu natürlichen Störungen beeinflusst wird.

Auch für die Holzenergieszenarien wurde gegenüber dem Referenzszenario der CO₂-Speichersaldo bestimmt. Es berechnen sich Werte, die in der gleichen Größenordnung wie in Abbildung 25 liegen (siehe Details in Anhang C1).

Abbildung 25: CO₂-Speichersaldo für Laub- und Nadelholz (lebende Biomasse) in Deutschland auf Basis von Modellergebnissen aus FABio-Forest



Quelle: Pfeiffer et al. (2023). SpS = CO₂-Speichersaldo, REF = Referenzszenario, sRedEnt = starke Reduktion der Holzentnahme (starke Reduktion der Holzentnahme: -2,5 Mio. m³ Nadelholz, -4,0 Mio. m³ Laubholz), gS/mS/sS = geringe/mittlere/starke Störungen, Beispiel: SpS (REF-gS_sRedEnt-gS) berechnet den jährlichen CO₂-Speichersaldo auf Basis des REF-gS und des sRedEntREF-gS. Berechnungen für Nadelholz ist nur bis zum Zeitpunkt möglich, bis zu dem die Nadelholznachfrage gedeckt wird. Siehe Ausgangsdaten in Anhang C.1.

4.3.1.3 Weiterentwicklung der Produkt-THG-Bilanz nach der RED

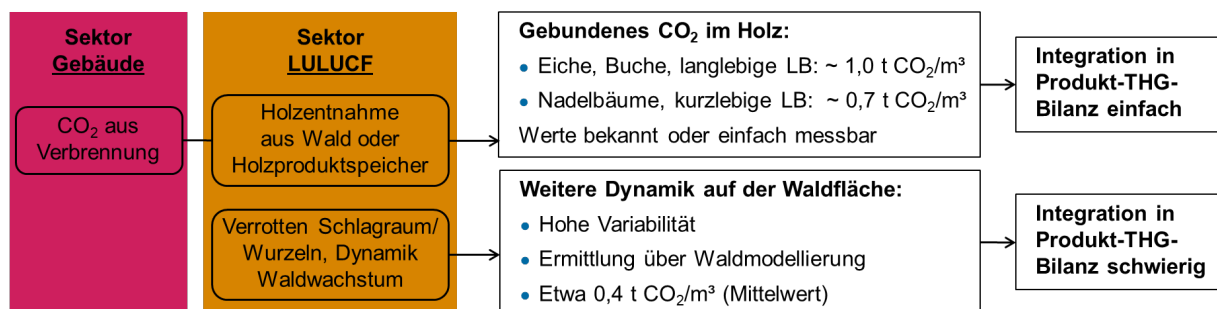
Die Betrachtungen in Kap. 4.3.1.1 und 4.3.1.2 zeigen, dass es nicht mit den Aspekten der IPCC-Methode übereinstimmt und wissenschaftlich nicht haltbar ist, die direkten CO₂-Emissionen bei der Holzverbrennung und CO₂-Effekte im Wald in der Produkt-THG-Bilanz mit Null zu bewerten. Dies gilt in gleicher Weise für die energetische Nutzung von Altholz (siehe Kap. 4.3.1.1). Somit ist die Methode zur THG-Bilanz von Holzenergie nach der RED unvollständig. Daher sollten THG-Bilanzen, die mit dieser Art der Bilanzierung erstellt wurden, nicht zur Entscheidungsfindung verwendet werden, wenn abgewogen werden soll, ob Holzenergie vorteilhaft gegenüber fossiler Energie ist, bzw. ob sie zum Erreichen nationaler THG-Ziele beitragen kann.

Zudem zeigen die Betrachtungen in Kap. 4.3.1.2, dass die bestehende Lücke der Produkt-THG-Bilanz nach der RED in zwei Aspekte untergliedert werden kann (siehe Abbildung 26):

- Effekte durch die Holzentnahme selbst: Diese werden durch die Menge an im Holz gebundenem CO₂ beschrieben. Diese Größe ist bekannt oder kann einfach ermittelt werden. So können die direkten CO₂-Emissionen bei der Verbrennung von Holz sehr einfach als Faktor in die Methode bestehender Produkt-THG-Bilanzen integriert werden. Die Menge an im Holz gebundenem CO₂ pro Energieeinheit beträgt laut UBA (2022) 102 g/MJ. Je nach Baumart und Feuchtegehalt kann dieser Wert schwanken. Aktuell wird der Faktor in Produkt-THG-Bilanzen nach der RED gleich Null gesetzt.

- Effekte durch die Dynamik der Waldentwicklung: Im Gegensatz zur im Holz gebundenen CO₂-Menge müssen CO₂-Emissionen bzw. Einbindungen, die mit der Dynamik der Waldentwicklung zusammenhängen (siehe Details in Kap. 4.3.1.2), über eine Modellierung von Waldbeständen ermittelt werden. Dies ist einerseits aufwendig, andererseits ist es methodisch schwierig, Ergebnisse einer Waldmodellierung in eine Produkt-THG-Bilanz zu integrieren (z.B. zeitverzögerte Effekte nach der Holzentnahme). Hinzu kommt, dass für Effekte eine deutliche bestandsabhängige Variabilität besteht. Aus diesen Gründen wird vorgeschlagen, die durch Holzentnahme resultierende veränderte Dynamik auf der Waldfläche nicht in eine erweiterte Produkt-THG-Bilanz aufzunehmen. Dies erscheint auch deshalb vertretbar, da zu erwartende Effekte kleiner ausfallen als durch die Holzentnahme selbst (siehe Abbildung 26).

Abbildung 26: Weiterentwicklungsvorschlag für die Produkt-THG-Bilanz nach der RED

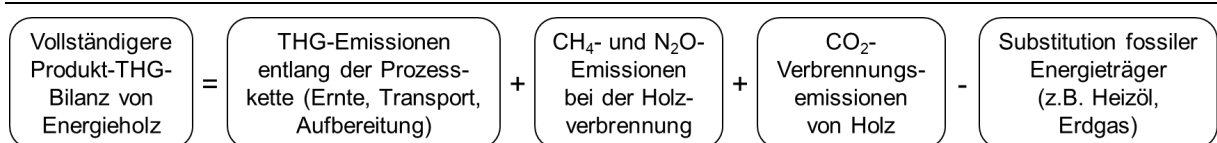


Quelle: Eigene Darstellung.

Es ist festzuhalten, dass der Bedarf besteht, die Produkt-THG-Bilanz nach der RED mindestens um die direkten CO₂-Emissionen aus Holzenergie zu erweitern (siehe auch Rüter 2023 und SRU⁴⁰). Eine erweiterte THG-Bilanzmethode von Energieholz sollte demnach die folgenden Elemente berücksichtigen:

1. Alle THG-Emissionen entlang der Prozesskette (in Produkt-THG-Bilanz nach der RED enthalten)
2. CH₄- und N₂O-Emissionen, die bei der Holzverbrennung freigesetzt werden (in Produkt-THG-Bilanz nach der RED enthalten)
3. CO₂-Verbrennungsemissionen, die bei der Holzverbrennung freigesetzt werden (Ergänzung der Produkt-THG-Bilanz nach der RED, aktuell explizit gleich Null gesetzt)
4. Die Substitutionswirkung durch den Ersatz fossilbasierter Produkte durch die Holzprodukte (in Produkt-THG-Bilanz nach der RED enthalten).

Abbildung 27: Schematische Darstellung der Elemente einer erweiterten Treibhausgasbilanz von Energieholz als Vorschlag zur Anpassung der Produkt-THG-Bilanz nach der RED



Quelle: In Anlehnung an Hennenberg et al. (2023). Bei einer stofflichen Nutzung ist die Speicherung von CO₂ im Holzprodukt in Abhängigkeit von der Lebensdauer als Faktor zu ergänzen.

⁴⁰ Kurzstellungnahme des Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) zu den Eckpunkten der Nationalen Biomassestrategie (https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/04_Stellungnahmen/2020_2024/2022_12_NABIS.html)

Wie in Kap. 4.3.1.2 dargestellt, lassen sich die Effekte der Holzentnahme selbst auf den Waldspeicher über die Größe „im Holz gebundene CO₂-Menge“ klar in Produkt-THG-Bilanzen abdecken. Demgegenüber besteht Forschungsbedarf, ob und wie die weiteren Effekte aus der Dynamik auf der Waldfläche in solchen integriert werden könnten, da diese Effekte aufwändig modelliert werden müssten. Es ist jedoch denkbar, aus zahlreichen Modellläufen für unterschiedliche Bestände und in unterschiedlichen Ländern Standardwerte abzuleiten, ähnlich wie es für die Emissionen für verschiedene Energieträger in der RED der Fall ist. Hier ist die Arbeit in Soimakallio et al. (2022) als ein erster Einstieg in dieses Thema zu sehen.

Die Produkt-THG-Bilanz nach RED bezieht sich auf die energetische Holznutzung. Eine Erweiterung auf die stoffliche Holznutzung würde verlangen, dass zusätzlich die Kohlenstoffeinlagerung im Holzprodukt in die THG-Bilanzmethode aufgenommen wird. Da die CO₂-Speicherung in Holzprodukten auch modellgestützt abgebildet wird, bestehen hier ähnliche Herausforderungen wie bei der Waldmodellierung (z.B. Ansätze in Rüter 2023 und Fehrenbach et al. 2022).

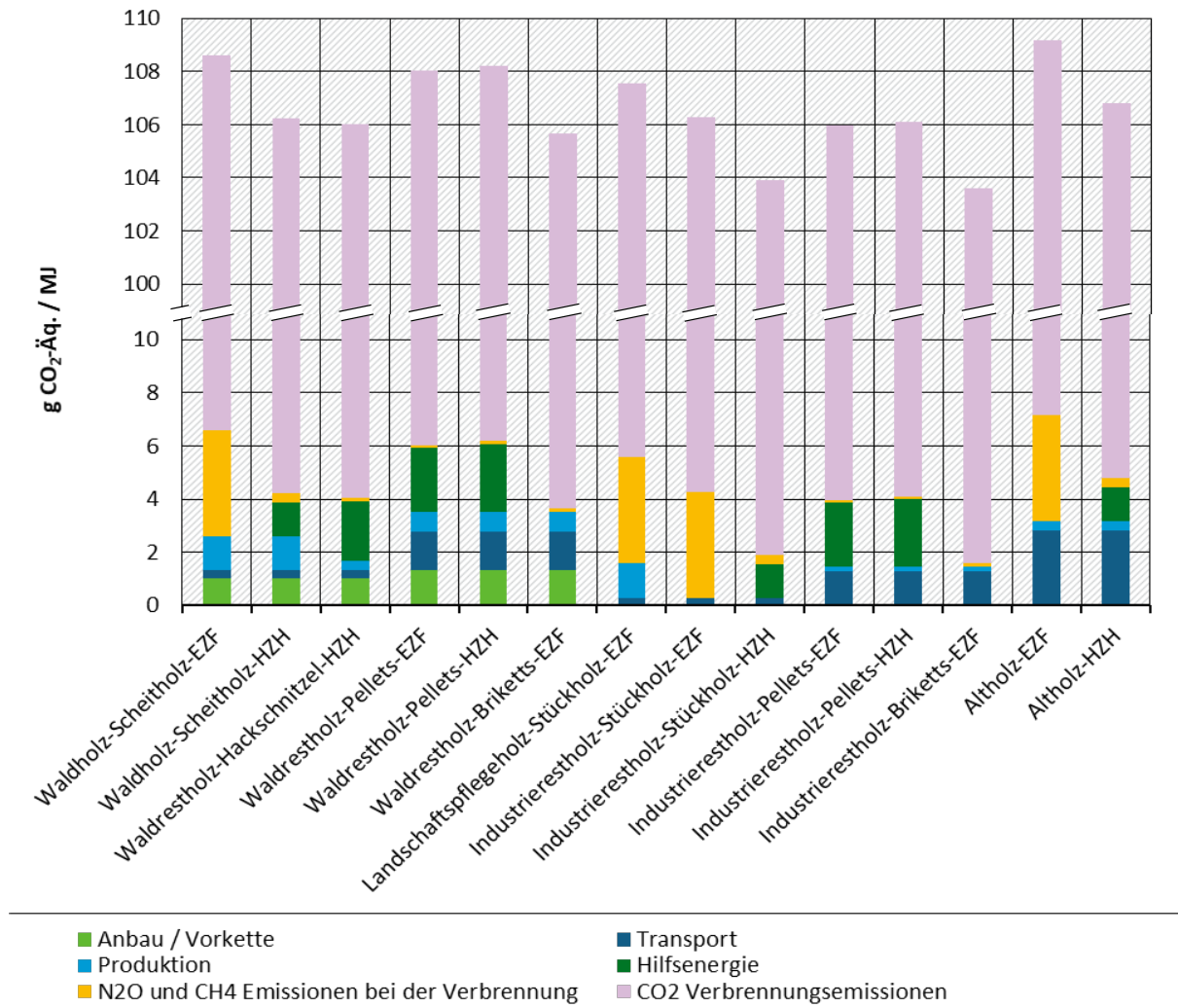
4.3.2 Referenzszenario

Die Berechnung der Treibhausgasemissionen bildet den dritten Teil im Modellverbund. Dazu werden die Mengenströme der einzelnen Holzsortimente (siehe Kap. 4.1.1.1) mit den technologiespezifischen Emissionsfaktoren (siehe Anhang C.2) multipliziert. Die Emissionsfaktoren erfassen den gesamten Lebensweg der einzelnen Bioenergieträger und unterteilen sich in Elemente der Prozesskette (Anbau, Transport etc.) und direkte Emissionen bei der Verbrennung (vgl. Abbildung 23, Abbildung 27 und Anhang C.2). Die direkten Emissionen werden noch einmal unterschieden in CO₂-Verbrennungsemissionen sowie andere Emissionen bei der Holzverbrennung (CH₄, N₂O, siehe Abbildung 27). Auch für die substituierte fossile Wärme- und Stromenergie wurden Emissionsfaktoren zusammengestellt, die jeweils den gesamten Lebensweg abbilden (Anhang C.2). Die durch Ernte entgangene Senkenleistung im Wald wird z.T. in Form der im Holz gespeicherten CO₂ Menge, die als CO₂-Verbrennungsemission (s.o.) freigesetzt wird, mitberücksichtigt (s. Kapitel 4.3.1).

In Abbildung 28 sind beispielhaft für Haushalte die THG-Emissionsfaktoren bezogen auf die Energieeinheit 1 MJ eingesetztem Holzbrennstoff dargestellt. Es werden sowohl die Beiträge der einzelnen Lebenswegabschnitte an den Gesamtemissionen als auch die Unterschiede zwischen den Holzbrennstoffen sichtbar.

Klar zu erkennen sind in Abbildung 28 die sehr hohen CO₂-Verbrennungsemissionen von Holz. Sie liegen bei allen Holzenergiepfaden um etwa das 20-fache höher als die übrigen THG-Emissionen. Einzelraumfeuerungsanlagen beschickt mit Scheitholz, Stückholz oder Altholz zeigen hohe direkte CH₄- und N₂O-Emissionen als Ergebnis einer schlechten Verbrennung von Holz. Diese entfallen bei der Nutzung von Hackschnitzeln oder Pellets weitgehend, dafür treten vor allem bei Pellets hohe THG-Emissionen aus dem Einsatz von Hilfsenergie auf. Auch für Biomasseanlagen sind die CO₂-Verbrennungsemissionen um das 13-fache höher als die übrigen THG-Emissionen (siehe Anhang C.2).

Abbildung 28: THG-Emissionsfaktoren bei der Verwendung verschiedener Holzbrennstoffe in Einzelraumfeuerungsanlagen und Holzcentralheizungen in Haushalten

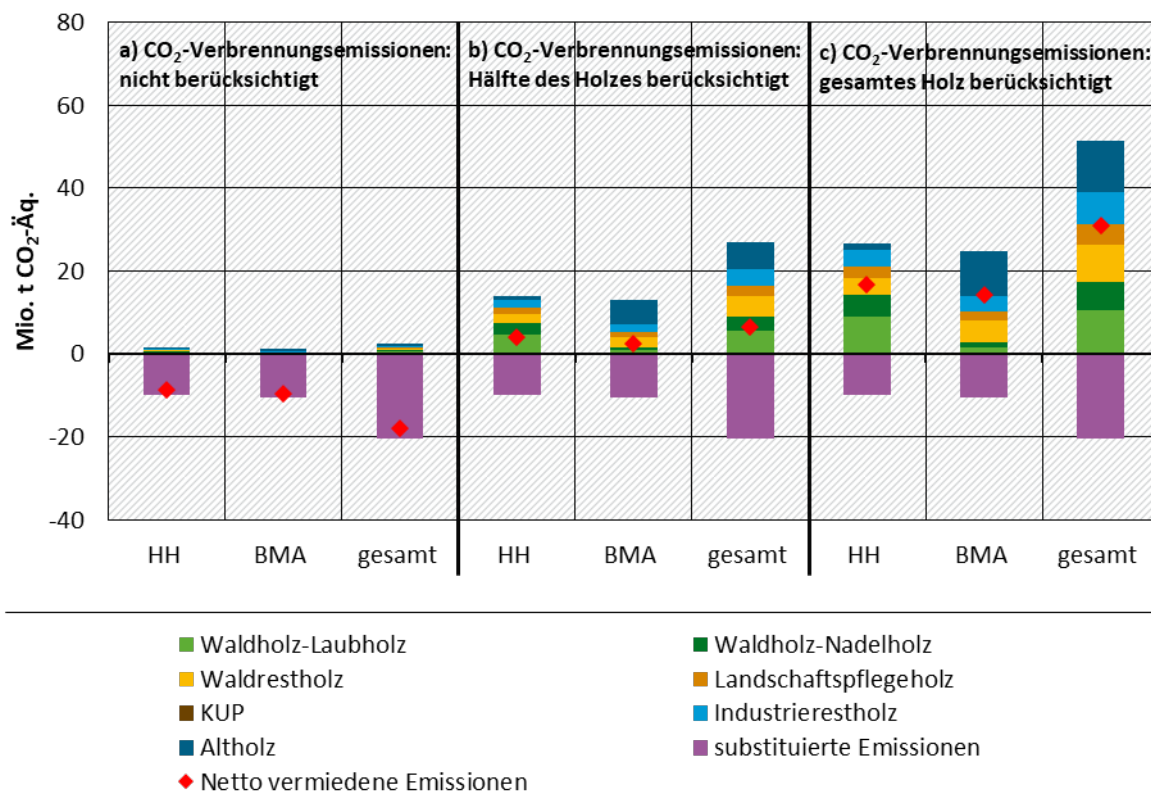


Quelle: eigene Darstellung, ifeu. EZF = Einzelf Feuerungsanlagen, HZH = Holzcentralheizungen.

Wie in Kap. 4.3.1 herausgearbeitet ist es aus wissenschaftlicher Sicht sinnvoll, die CO₂-Verbrennungsemissionen aus Holz in der Produkt-THG-Bilanz nach der RED zu berücksichtigen, um den Effekt einer Holzentnahme auf den CO₂-Speicher des Waldes, bzw. auf den Holzproduktspeicher konsistent abzudecken. Damit wäre aus Emissionssicht eine stoffliche Nutzung (mit einem Verbleib des CO₂ im Speicher) so lange bessergestellt als die unmittelbare energetische Nutzung, bis eine weitere stoffliche Nutzung am Ende eines Lebensweges mehr Emissionen verursacht (beispielsweise durch eine Aufbereitung des Altholzes) als durch die Substitution fossiler Energieträger eingespart werden kann. Erst in diesem Fall würde sich eine energetische Nutzung aus THG-Sicht lohnen. Dies gilt vor dem Hintergrund, dass Durchforstungs-, Schad- und Altholz grundsätzlich stofflich verwertet werden kann. Abgesehen von dieser wissenschaftlich konsistenten Vorgehensweise kann es jedoch aus politischer Sicht Gründe geben, Teile der Holzsortimente von dieser Emissionslast zu befreien – wie beispielsweise Schadholz oder schwer belastetes Altholz. Um die Bandbreite der Ergebnisse unterschiedlicher Vorgehensweisen aufzuzeigen, werden bei der folgenden deutschlandweiten THG-Bilanzierung von Holzenergie drei Varianten berechnet:

- ▶ **CO₂-Verbrennungsemissionen von Holz nicht berücksichtigt:**
Die Veränderung der CO₂-Speicher im Wald und die Veränderung des Holzproduktspeichers werden nicht berücksichtigt. Dies entspricht der Produkt-THG-Bilanz nach der RED im Status Quo.
- ▶ **CO₂-Verbrennungsemissionen für die Hälfte des Holzes berücksichtigt:**
Diese Variante stellt den Übergang zwischen den beiden Extrema dar (keine Berücksichtigung, bzw. volle Berücksichtigung). Wie oben dargestellt, kann es politisch motivierte Gründe geben, bestimmte Holzsortimente bei ihrer energetischen Verwendung von der Emissionslast zu befreien. Da der genaue Anteil dieses Holzes nicht bekannt ist, wird hier exemplarisch, im Sinne einer Sensitivitätsanalyse, für die Hälfte des Holzes angenommen, dass es von den CO₂-Verbrennungsemissionen befreit ist.
- ▶ **CO₂-Verbrennungsemissionen für das gesamte Holz berücksichtigt:**
Die Veränderung der CO₂-Speicher im Wald und die Veränderung des Holzproduktspeichers werden für alle Holzsortimente berücksichtigt. Wie in Kapitel 4.3.1.3 vorgeschlagen, wird hierzu als Näherungswert das im Holz gespeicherte CO₂ verwendet. Es wird für kein Holzsortiment eine Befreiung angenommen (siehe auch Kap. 4.3.1.2).

Abbildung 29: Netto-Treibhausgasbilanz der Holzenergienutzung im Referenz-Szenario in Deutschland im Jahr 2020 unterteilt nach Holzbrennstoffen und Verwendern für drei Varianten der Berücksichtigung der CO₂-Verbrennungsemissionen



Quelle: eigene Berechnungen und Darstellung, ifeu. HH = private Haushalte, BMA = Biomasseanlagen, KUP = Kurzumtriebsplantagen, gesamt = Summe aus HH und BMA.

Abbildung 29 verdeutlicht für das Jahr 2020 die Berechnungsweise der Netto-THG-Bilanz der Holzenergienutzung: Es werden Emissionen für die Holzenergiebereitstellung und die Holzverbrennung als positive Werte aufgetragen sowie die dadurch substituierten Emissionen als nega-

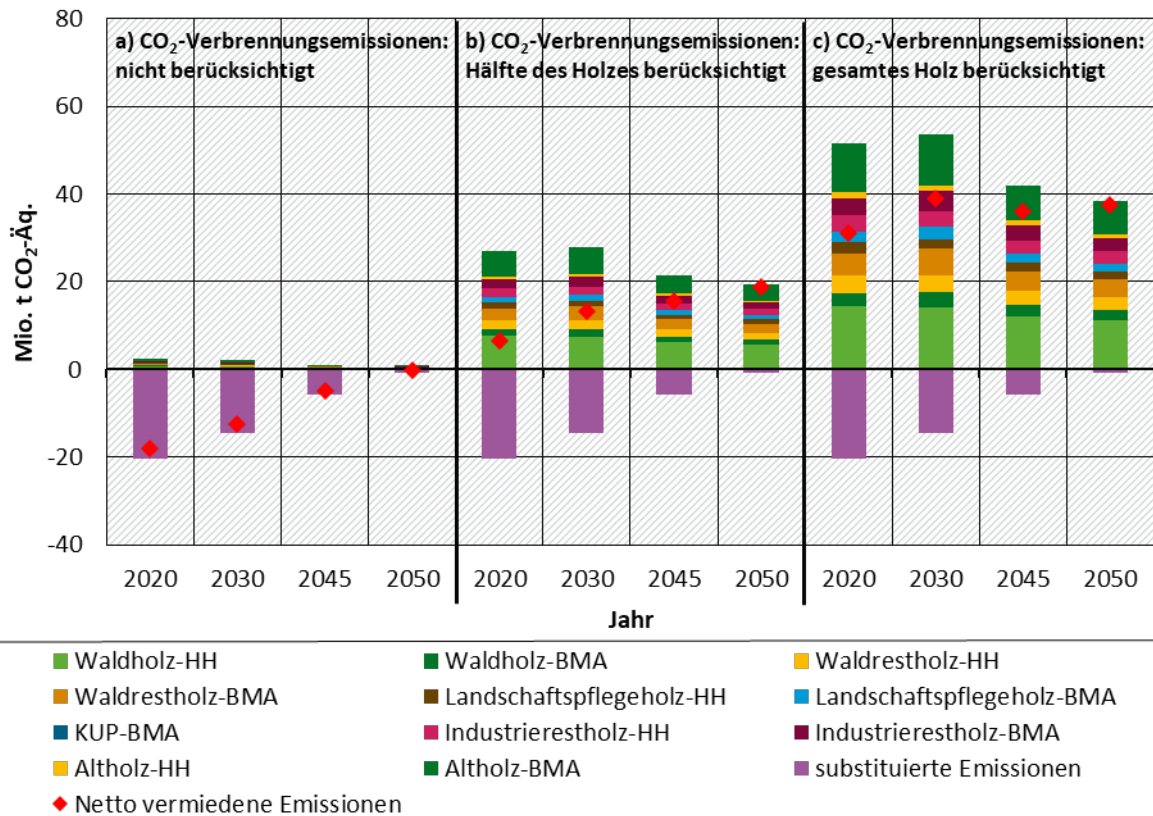
tive Werte. Aus der Summe dieser Werte ergibt sich die Netto-THG-Bilanz der Holzenergienutzung (rote Rauten in Abbildung 29). Die dargestellten Emissionen und Emissionseinsparungen bzw. die Netto-THG-Bilanz bezieht sich auf die Holzverbrennung in Deutschland, und zwar in Haushalten (HH) und Biomasseanlagen (BMA) sowie deren Summe (gesamt). Diese Darstellung erfolgt für die drei Varianten zu Annahmen der CO₂-Verbrennungsemissionen.

Wie schon für die THG-Emissionsfaktoren zu sehen ist (Abbildung 28), beeinflussen die CO₂-Verbrennungsemissionen das Ergebnis der Netto-THG-Bilanz sehr stark: Werden sie nicht berücksichtigt, können in den Haushalten und Biomasseanlagen durch die Substitution fossiler Energie deutliche Netto-THG-Einsparungen erreicht werden. In Summe beläuft sich bei diesem unvollständigen Berechnungsansatz die THG-Minderung durch Holzenergie auf ca. -18 Mio. t CO₂-Äq. (Abbildung 28 a). Auch wenn die Emissionen lediglich bei der Hälfte des Holzes berücksichtigt werden (Abbildung 28 b), können keine Netto-THG-Einsparungen erreicht werden. Werden die CO₂-Verbrennungsemissionen bei allen Holzbrennstoffen berücksichtigt, kommt es durch die Holzverbrennung deutschlandweit zu Netto-THG-Emissionen von 31 Mio. t CO₂-Äq. (Abbildung 28 c).

Abbildung 30 zeigt die Netto-THG-Bilanz der gesamten Holzenergienutzung in Deutschland im Zeitverlauf. Auch hier werden, wie in Abbildung 29, die drei Varianten zur Berücksichtigung der CO₂-Verbrennungsemissionen dargestellt. Im Zeitverlauf können nur dann Netto-THG-Einsparungen durch Holzenergienutzung erreicht werden, wenn die CO₂-Verbrennungsemissionen aus der Energieholznutzung nicht in die Netto-THG-Bilanz einbezogen werden. Die Darstellung des Zeitverlaufes zeigt außerdem, dass die CO₂-Verbrennungsemissionen in Zukunft durch die Defossilisierung des Energiesystems immer relevanter werden. So ist im Jahr 2050 keinerlei Substitutionswirkung durch die Energieholznutzung mehr zu erwarten, da keine fossilen Energieträger mehr genutzt werden. Die auftretenden Emissionen setzen sich aus (sehr kleinen) Restemissionen des Energiesystems, den CH₄- und N₂O-Emissionen aus der Holzverbrennung, sowie CO₂-Verbrennungsemissionen von Holz zusammen. Letztere dominieren im Jahr 2050 die Ergebnisse bei Weitem.

Insgesamt entwickeln sich die Netto-THG-Emissionen analog zur Entwicklung der Holzverwendung (s. Kapitel 4.1.1.1): Der gesamte Energieholzverbrauch und damit die Netto-THG-Emissionen steigen bis 2030 an und gehen danach zurück. Dies ist besonders in der Variante zu erkennen, bei der alle CO₂-Verbrennungsemissionen für Holz in die Berechnung einfließen (Abbildung 30).

Abbildung 30: Netto-Treibhausgasbilanz der Holzenergienutzung im Referenz-Szenario in Deutschland im Zeitverlauf unterteilt nach Holzbrennstoffen für drei Varianten der Berücksichtigung der CO₂-Verbrennungsemissionen



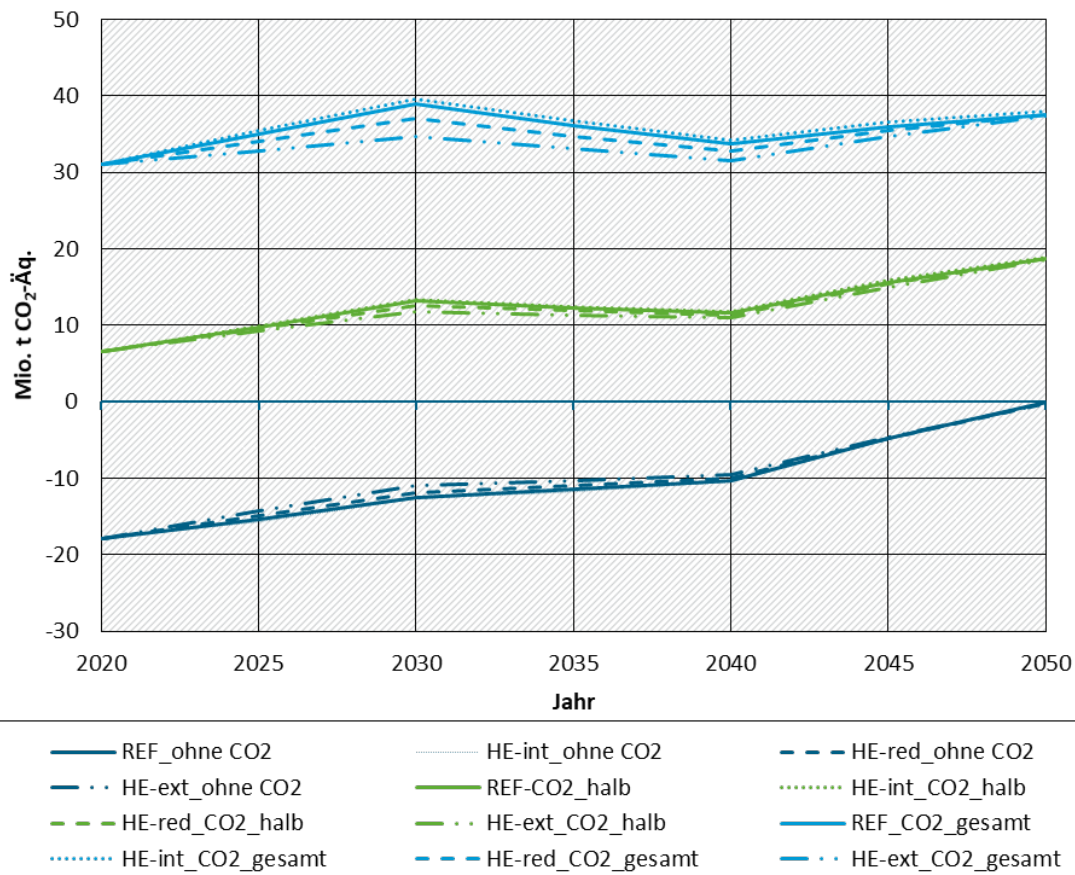
Quelle: eigene Berechnung und Darstellung, ifeu. HH = private Haushalte, BMA = Biomasseanlagen, KUP = Kurzumtriebsplantagen.

4.3.3 Holzenergieszenarien im Vergleich zum Referenzszenario

Für die Holzenergieszenarien und das Referenzszenario sind die Ergebnisse der Netto-THG-Bilanz der Holzenergienutzung in Deutschland im Zeitverlauf in Abbildung 31 dargestellt. Für die drei Varianten zur Berücksichtigung der CO₂-Verbrennungsemissionen im Referenzszenario entsprechen die drei durchgezogenen Linien dem Verlauf der roten Rauten in Abbildung 30. In gleicher Weise wurde für die Holzenergieszenarien die Netto-THG-Bilanz der Holzenergienutzung in Deutschland berechnet und in Abbildung 31 als gestrichelte Linien aufgetragen.

Auch in dieser Darstellung zeigt sich, dass die Berücksichtigung der CO₂-Verbrennungsemissionen die Ergebnisse sehr stark beeinflusst und im Zeitverlauf die Defossilisierung die Netto-THG-Bilanz der Holzenergienutzung verschlechtert. Auch ist das Maximum an Holzenergienutzung im Jahr 2030 zu erkennen. Unterschiede zwischen den Holzenergieszenarien treten zwar zu Tage, sie sind aber durch diese Effekte stark überprägt.

Abbildung 31: Netto-THG-Emissionen des Referenzszenarios und der Holzenergieszenarios im Zeitverlauf

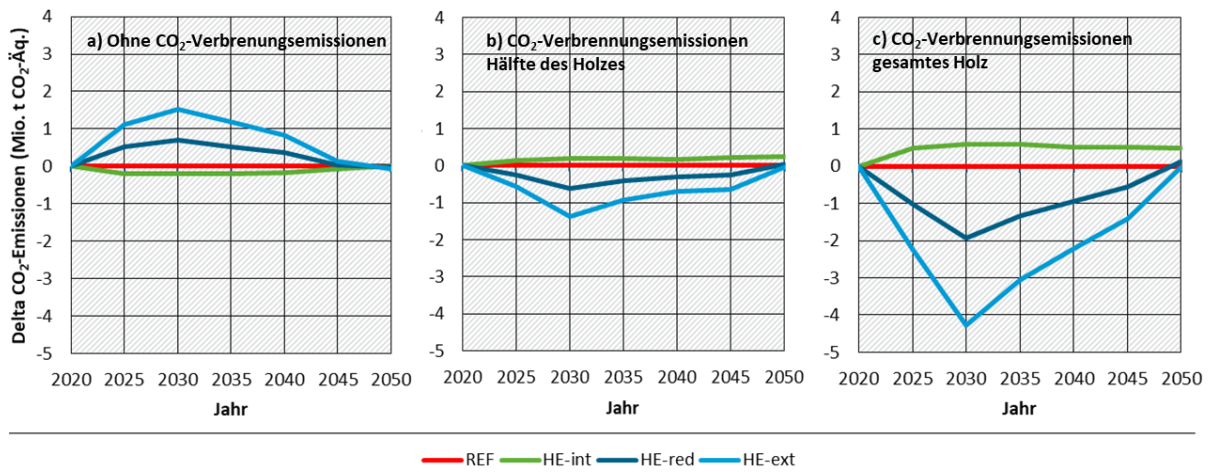


Quelle: eigene Berechnung und Darstellung, ifeu. REF= Referenzszenario, HE-int = Intensivierte Holzenergieverwendung, HE-red = Reduzierte Holzenergieverwendung, HE-ext = Extensivierte Holzenergieverwendung. Siehe Beschreibungen zu den Varianten „ohne CO₂“, „CO₂ halb“ und „CO₂ gesamt“ im Text.

Um die Unterschiede zwischen den Szenarien sichtbar zu machen, werden die Ergebnisse der Holzenergieszenarien als Differenz zum Referenzszenario in Abbildung 32 dargestellt. Wie bereits in den oberen Abbildungen zu sehen, ist der Unterschied zwischen den Holzenergieszenarien im Jahr 2030 am größten, da sich zu diesem Zeitpunkt die Holznutzung zwischen den Holzenergieszenarien am stärksten unterscheidet (vgl. Abbildung 13 a in Kap. 4.1.1.1). Im Jahr 2050 sind die Unterschiede in der Holzenergienutzung gering und entsprechend auch die Unterschiede in der Netto-THG-Bilanz. Hervorzuheben sind die folgenden Ergebnisse:

- ▶ Werden die CO₂-Verbrennungsemissionen nicht berücksichtigt, kann mit der intensiveren Holzenergieverwendung (HE-int, Abbildung 32 a) im Jahr 2030 im Vergleich zum Referenzszenario eine THG-Minderung von -0,2 Mio. t CO₂-Äq. erreicht werden. Die reduzierte Holzenergieverwendung (HE-red) resultiert bei dieser unvollständigen THG-Bilanzierung in erhöhten THG-Emissionen von 0,69 Mio. t CO₂-Äq., und die extensivere Holzenergieverwendung von 1,52 Mio. t CO₂-Äq.
- ▶ Werden hingegen die CO₂-Verbrennungsemissionen vollständig berücksichtigt, dreht sich das Bild ins Gegenteil (Abbildung 32 c). Die intensivere Holzenergieverwendung (HE-int) führt im Jahr 2030 zu erhöhten THG-Emissionen von 0,6 Mio. t CO₂-Äq. und die reduzierte bzw. die extensivierte Holzenergieverwendung zu deutlichen THG-Minderungen (HE-red: -1,94 Mio. t CO₂-Äq. und HE-ext: -4,28 Mio. t CO₂-Äq.).

Abbildung 32: Veränderung der Netto-THG-Bilanzen in den Holzenergieszenarien gegenüber dem Referenzszenario



Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung, IFEU. REF= Referenzszenario, HE-int = Intensivierte Holzenergieverwendung, HE-red = Reduzierte Holzenergieverwendung, HE-ext = Extensivierte Holzenergieverwendung. Delta: Differenz aus Holzenergieszenarien und Referenzszenario (z.B. Delta HE-int = HE-int - REF).

5 Diskussion und Kernaussagen

Im Projekt BioSINK wurden das Holzverwendungsmodell TRAW, das Waldmodell Fabio-Forest und die nachgeschaltete Treibhausgasbilanzierung für Energieholz mit dem Modell HoLCA als Modellverbund zum Einsatz gebracht. So wurde zum ersten Mal für Deutschland die direkte Auswirkung der Holznachfrage auf die Waldentwicklung modelliert und mit THG-Bilanzen flankiert. Mit den Ergebnissen aus Referenz- und Holzenergieszenarien sowie weiteren Analysen können die folgenden Fragestellungen im Projekt BioSINK beantwortet werden.

5.1 Können nachgefragte Holzmen gen nachhaltig aus dem Wald entnommen werden?

Als Grundlage der Holzverwendungsszenarien wird in TRAW die Entwicklung der Endwarenspektoren modelliert. Der Holzeinsatz entlang der Wertschöpfungskette wird anhand der Einsatzmengen an Halbwaren für Fertigwaren und Rohwaren für Halbwaren zurückgerechnet. Mit diesem methodischen Ansatz wird sichergestellt, dass Änderungen der Holzverwendung passgenau in der Holznachfrage abgebildet werden. Wenn Endwarenbereiche mit hohem Massivholzanteil (z.B. Eigenheime) sich verändern, schlägt sich das entsprechend in der Holznachfrage nieder. Dies hängt nicht nur von der allgemeinen Wirtschaftsentwicklung, sondern auch von politischen Entscheidungen ab.

Unter dieser Voraussetzung und den unterstellten Entwicklungsverläufen der einzelnen Sektoren sind folgende generelle Muster zu erkennen:

- ▶ Bis in die 2030er Jahre steigen sowohl die stoffliche als auch die energetische Verwendung von Derbholz an. Ausgehend von einer Derbholzverwendung von ca. 69 Mio. m³ Anfang der 2020er Jahre liegt der Anstieg – je nach Intensität der Nutzung von Holzenergie – zwischen 2 und 5 Mio. m³.
- ▶ Ab Mitte der 2030er Jahre steigt die Verwendung im stofflichen Bereich weiter an, die Verwendung im energetischen Bereich hingegen sinkt. Mit diesem gegenläufigen Effekt stellt sich eine stabile Verwendung von Derbholz auf einem höheren Niveau zwischen 71 und 74 Mio. m³ ein.
- ▶ Die Derbholzverwendung für eine energetische Nutzung liegt bis zum Jahr 2030 bei 14,7 Mio. m³ und geht bis 2050, vor allem als Folge geringerer Scheitholzverwendung in privaten Haushalten, auf 11,6 Mio. m³ zurück. Die Annahmen in den Holzenergieszenarien führen bei der Derbholzverwendung zu einem Korridor von ca. 3 Mio. m³ im Jahr 2030 und ca. 2 Mio. m³ im Jahr 2050.
- ▶ Rest- und Abfallholz werden zu deutlichen Anteilen energetisch genutzt. Ausgehend von knapp 55 Mio. m³ Anfang der 2020er Jahre spannen die Holzenergieszenarien für diese Holzsortimente im Jahr 2030 ein Korridor von ca. 53 bis 58 Mio. m³ auf. Bis zum Jahr 2050 nimmt die Verwendung von Rest- und Abfallholz auf ca. 45 bis 47 Mio. m³ ab.

Der Rückgang der Holzenergienutzung ab Mitte der 2030er Jahre resultiert aus verringerten Wärmebedarfen z.B. im Gebäudesektor aufgrund von Effizienzsteigerungen und anzunehmenden mildereren Wintern. Diese Entwicklung liegt bereits im Referenzszenario vor und setzt sich in den Holzenergieszenarien fort. In den Szenarienannahmen wurde z.B. von einer Begrenzung der Holzenergienutzung bei neuen Heizanlagen im Rahmen des Gebäudeenergiegesetzes⁹ ausgegangen, die nun aber nach Abschluss dieser Studie politisch weniger stark ausgestaltet wurde und sich vorwiegend auf die technische Anforderung einer automatischen Beschickung der

Feuerungsanlage beschränkt. Vor diesem Hintergrund ist zu erwarten, dass die zukünftige Energieholzverwendung sich im oberen Bereich des aufgespannten Korridors der Holzenergieszenarien entwickeln wird.

Die Nachfrage nach Laubholz aus dem Wald in Deutschland kann über den gesamten Modellierungszeitraum bis zum Jahr 2076 gedeckt werden. Dies ist auch der Fall, wenn als Sensitivität starke natürliche Störungen angenommen werden. Für die Nachfrage nach Nadelholz tritt hingegen bereits bei einem mittleren Niveau natürlicher Störungen Mitte der 2030er Jahre eine Lücke im Wald in Deutschland auf, da Altbestände abgeschöpft sind und der jährliche Zuwachs nicht ausreicht, um die Nadelholznachfrage komplett zu decken.

Die Ergebnisse zeigen, dass erhebliche Veränderungen in der Holzverwendung insgesamt und in deren Rohstoffzusammensetzung bevorstehen. In der Modellierung sind unterschiedliche Entwicklungen der Verwendungsbereiche berücksichtigt. Ebenfalls Effizienzgewinne oder Substitutionsprozesse sind Teil der Problemlösung im Modell. Der Rohstoffeinsatz erfolgt auf der Grundlage der Rohstoffzusammensetzung der Verwendungsbereiche des Jahres 2020, und diese Zusammensetzung wurde im Zeitablauf nicht verändert. Insbesondere die Knappheit von Nadelholz kann zu Verhaltensanpassungen von Anbietern und Nachfragenden führen, die in Mengenanpassungen in der Nutzung und in Substitutionsprozessen zwischen den Holzrohstoffen resultieren können. Der Handlungsspielraum der Akteure ist aber begrenzt, da die verringerte energetische Verwendung von Rest- und Abfallholz nur eingeschränkt die steigende Nachfrage nach Derbholz aus dem Wald zur stofflichen Nutzung ersetzen kann. Auch ist zu erwarten, dass eine Versorgungslücke sich nicht automatisch in zusätzliche Importe niederschlägt, da der Binnenmarkt viele Reaktionsmöglichkeiten hat. Hierzu gehören u.a. Substitutionsprozesse zwischen Rohwaren (Holz und andere), Effizienzsteigerungen, Änderungen von Nachfragestruktur und Mengenanpassungen. Steigende Importe könnten eine Versorgungslücke z.B. von Nadelholz nur dann decken, wenn die Knappheitssituation in potenziellen Exportländern, sowie deren nachfragenden Importländern, weniger Versorgungsprobleme hätten.

Das Aufkommen von Rest- und Recyclingholz hängt direkt von der stofflichen Nutzung ab. Bei der energetischen Nutzung bleibt lediglich Asche als Reststoff. Da die stoffliche Verwendung entsprechend der Szenarienannahmen zwischen 2020 und 2050 um knapp 14 % wächst, steigt mit ihr in einem etwa gleichen Umfang auch die Verfügbarkeit von Rest- und Recyclingstoffen. Eine genaue Entsprechung ist nicht gegeben, da sich die eingesetzten Rohwaren und Technologien im Zeitverlauf verändern. Die Mengen sind nicht automatisch der energetischen Verwendung zuzurechnen. Im Rahmen der Rohwarenverknappung und der Zielsetzung zirkulären Wirtschaftens hängt der Anteil stofflicher oder energetischer Verwendung von künftigen Technologien und Marktbedingungen ab.

5.2 Welchen Einfluss hätte eine verstärkte energetische Holznutzung in Deutschland auf die entsprechenden nationalen und internationalen LULUCF-Senken?

Waldenergieholz stammt zu ca. 40 % aus Nadel- und zu ca. 60 % aus Laubholz. In den Holzenergieszenarien führt die steigende bzw. abnehmende Holzenergienachfrage zu einer entsprechend veränderten Holzentnahme im Wald. Für Nadel- und Laubholz bewirkt eine verringerte Holzentnahme einen Anstieg der Senkenleistung, und eine erhöhte Holzentnahme führt zu einer Abnahme der Senkenleistung. Dies zeigt sich sowohl in den im Projekt durchgeführten Szenarienanalysen mithilfe der Waldmodellierung sowie in der Literaturstudie für boreale und temperate Wälder (Soimakallio et al. 2022). Die Relation zwischen Holzentnahme und Senkenleistung, sprich: der CO₂-Speichersaldo, liegt bei etwa 1,2 t CO₂/m³ (±0,7 t CO₂/m³). Analysen für den

Wald in Deutschland zeigen, dass stärkere natürliche Störungen – und damit das vermehrte Auftreten von Schadh Holz – diesen Effekt nicht bzw. nur in einem geringen Maß aufheben. Der Grund ist, dass eine vermehrte Schadh Holzentnahme vitale Bäume schont, die aufgrund der verstärkten Bedarfsdeckung durch Schadh Holz weniger eingeschlagen werden müssen und stattdessen im Wald verbleiben und weiterwachsen können. Am CO₂-Speichersaldo hat die Holzentnahme selbst den größten Anteil. Dieser Anteil kann über den Kohlenstoffgehalt im Holz verlässlich bestimmt werden. Die Variabilität im CO₂-Speichersaldo resultiert aus Unterschieden in der Ausgangssituation der Waldbestände, aber auch aus Unterschieden in der Methodik der Waldmodelle (Soimakallio et al. 2022).

In Summe zeigen die Ergebnisse, dass eine verstärkte energetische Nutzung insbesondere von Waldholz national und international einen negativen Effekt auf die Kohlenstoffsenkenleistung des Waldes und damit des LULUCF-Sektors hat. Wird der CO₂-Verlust auf der Waldfläche in THG-Bilanzen über die direkten CO₂-Verbrennungsemissionen von Energieholz berücksichtigt und nicht gleich Null gesetzt, fällt die THG-Bilanz von Waldenergieholz schlechter aus als von fossilen Energieträgern.

Netto-Importe an Energieholz liegen in Deutschland auf einem niedrigen Niveau von 1-2 % der Gesamtenergieholzverwendung. Sollte die Holzenergieverwendung in Deutschland ansteigen, können Reaktionsmöglichkeiten im Binnenmarkt diesen Anstieg abpuffern (z.B. weniger stoffliche Restholznutzung), es kann mehr Holz aus inländischen Wäldern entnommen werden mit der Folge einer abnehmenden Senkenleistung im Inland, oder Importe an Energieholz können ansteigen. Ein verstärkter Import von Waldenergieholz würde sich entsprechend negativ auf die Waldsenke im Herkunftsland auswirken und so CO₂-Emissionen ins Ausland verlagern. Hinzu kommt als Risiko, dass mit der Entnahme von Waldenergieholz in Exportländern mit weiteren negativen Auswirkungen auf Umwelt und Natur zu rechnen ist (siehe Länderstudien in Kap. 2.5). Die Nadelholzlücke ab Mitte der 2030er Jahre resultiert aus der hohen stofflichen Holzverwendung. Die genannten Zusammenhänge gelten im Grundzug auch hier, sie sollten aber für diese Waldholzsortimente in den Herkunftsländern verifiziert werden.

In dieser Studie wurde der CO₂-Speichersaldo als Mittelwert für ganz Deutschland bzw. für andere Länder/Regionen berechnet. So bleiben Fragen zur Auswirkung der Holzentnahme auf die Speicherleistung von Waldbeständen auf einer kleinräumigeren Skala unberührt und sollten in Folgeprojekten analysiert werden.

5.3 Unter welchen Bedingungen stellt die Energieholznutzung eine Minderungsmaßnahme im Rahmen des Klimaschutzes dar?

Die Treibhausgasemissionen von Holzenergie werden mit Produkt-THG-Bilanzen wie z.B. in der Erneuerbaren-Energien-Richtlinie auf EU-Ebene, der Biomassestrom-Nachhaltigkeitsverordnung und daran orientiert der UBA-Emissionsbilanz für Deutschland bewertet. Ein Vergleich mit der Methodik des nationalen Treibhausgasinventars nach IPCC zeigt, dass die verbreitete Praxis in Produkt-THG-Bilanzen die CO₂-Verbrennungsemissionen aus Holz gleich Null zu setzen, auf der Annahme eines geschlossenen Kohlenstoffkreislaufs beruht. Dass diese Annahme wissenschaftlich nicht haltbar ist, wird durch eine Literaturstudie zu Waldszenarien (Soimakallio et al. 2022) und Modellierungsarbeiten in FABio-Forest in diesem Projekt sowie durch weitere Quellen gestützt (Rüter 2023 und SRU⁴⁰). Mit einer Produkt-THG-Bilanz, die die direkten CO₂-Emissionen aus der Holzverbrennung einrechnet, ist es möglich, eine Bewertung von THG-Emissionen aus der Energieholznutzung zu erstellen, die als konservative Annäherung den Veränderungen in Kohlenstoffpools im Wald und in Holzprodukten gerecht wird. Eine entsprechende Weiterentwicklung der Produkt-THG-Bilanzierung nach der RED für die Holzenergienutzung ist geeignet,

um die Entscheidungsfindung zu unterstützen, welche Holzenergieverwendung zum Erreichen nationaler THG-Ziele beitragen kann.

Werden in die durchgeführten Produkt-THG-Bilanzen für Energieholz in Deutschland die CO₂-Verbrennungsemissionen eingerechnet, führt eine Erhöhung der Holzenergienutzung zu deutlich höheren THG-Emissionen. Eine Verringerung der Holzenergienutzung ergibt dagegen eine entsprechend deutliche THG-Minderung. Mit einer steigenden Defossilisierung und damit einhergehenden abnehmenden Substitutionseffekten im Zeitverlauf wird dieser Effekt zukünftig immer deutlicher, so dass die Ergebnisse der Produkt-THG-Bilanzierung im Jahr 2050 von den CO₂-Verbrennungsemissionen dominiert werden. Aus Sicht der vergleichenden THG-Bilanz, inklusive der Berücksichtigung der direkten CO₂-Verbrennungsemissionen aus Holz, ist Energieholz als Minderungsmaßnahme im Rahmen des Klimaschutzes zu hinterfragen.

Diese Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung der Kohlenstoffspeicherung im Holz als einen möglichen Beitrag zum Erreichen der Klimaschutzziele in Deutschland. Dies betrifft nicht nur Waldholz, sondern auch Rest- und Abfallholz. Anstatt Holz zu verbrennen und dabei den Kohlenstoff als CO₂ freizusetzen, sollte der Kohlenstoff möglichst weiter gespeichert werden. Es ist also nicht nur ein Ausstieg aus fossilen Energieträgern, sondern auch aus Holzenergie zugunsten anderer Erneuerbare Energiesysteme wie dem Betrieb von Wärmepumpen mit Wind- und Solarstrom sinnvoll. Als Speicheroptionen für Holz sind grundsätzlich zwei Optionen zu nennen:

- ▶ Holz verbleibt weiter im Wald und erhöht dort die Kohlenstoffspeicher. Für einen Vorratsaufbau eignen sich insbesondere ökologisch stabile, klimaresiliente Laubmischwälder oder auch standortangepasste Nadelbaumbestände (Wissenschaftlicher Beirat für Waldpolitik beim BMEL 2021). Dies gilt vor allem für Wälder in denen die Holzernte zu großen Anteilen als Energieholz genutzt wird.
- ▶ Geerntetes Holz wird in stofflichen Holzprodukten gespeichert. Je langlebiger Holzprodukte sind, desto höher und sicherer ist der positive Effekt für den Klimaschutz. Hier ist der Ausbau der Kaskadennutzung ein wichtiger Ansatz, wie er verstärkt in der novellierten Erneuerbaren Energien-Richtlinie (RED III)³³ und auch im Eckpunktepapier der Nationalen Biomassestrategie (NABIS) gefordert wird. Hinzu kommt, dass mit der stofflichen Holznutzung durch den Ersatz klimaschädlicher Prozesse und Rohstoffe höhere Substitutionseffekte erwartet werden können als bei der energetischen Nutzung (z.B. Fehrenbach et al. 2022). Dies war aber nicht Gegenstand dieses Projekts und sollte in Folgeprojekten thematisiert werden.

Es ist aber auch zu betonen, dass nicht jede stoffliche Holznutzung aus THG-Sicht gegenüber einer energetischen Nutzung von Vorteil ist. Beispielsweise kann es mit hohen Aufwendungen und THG-Emissionen verbunden sein, belastetes Abfallholz weiter stofflich zu nutzen. Auch kann es sinnvoll sein, in Wärmepumpen-Nahwärmenetzen für die Spitzenlast einen Energieholzkessel zu betreiben, insbesondere wenn in den Spitzenlastzeiten hohe Stromnachfragen bestehen und (zum gegebenen Zeitpunkt) höhere Anteile an Kohlestrom im Strommix enthalten sind. Weiterer Forschungsbedarf besteht dazu, welche Holzsortimente aus Klimaschutzsicht einer stofflichen Nutzung zugeführt werden sollten und welche nicht. Dabei sollten auch die Dauerhaftigkeit von Kohlenstoffspeicher berücksichtigt sowie ökonomische Aspekte analysiert werden, um Folgekosten und ggf. nötige Förderungen zu bemessen.

5.4 Wie effektiv sind Einschränkungen der Holzenergienutzung, um die Kohlenstoffsinkenleistung der Wälder zu schützen?

Eine Senkenleistung im Wald bedeutet Vorratsaufbau und die Entwicklung älterer Waldbestände. Es besteht die Befürchtung, dass mit dieser Entwicklung die Risiken für Verluste des Kohlenstoffspeichers durch natürliche Störungen steigen (z.B. Bolte et al. 2021). In diesem Projekt wurden unterschiedlich starke natürliche Störungen im Wald simuliert. Der negative Effekt auf die Senkenleistung ist sehr hoch. Allerdings verbessert eine verringerte Holzentnahme relativ immer die Senkenleistung, und zwar unabhängig vom angenommenen Störungsniveau. Eine Extensivierung erscheint daher als eine robuste Strategie, um im LULUCF-Sektor Senkenziele zu erreichen. Hinzu kommt, dass natürliche Störungen vorrangig Nadelbaumbestände beeinträchtigen. In Laubbaumbeständen sind verringerte Senkenleistungen oder Vorratsabnahmen bei starken natürlichen Störungen hingegen geringer als bei Nadelbäumen. Dies stützt die Strategie, fehlbestockte Nadelbaumbestände hin zu Laubmischwäldern umzubauen und in bestehenden, ökologisch stabilen bzw. klimaresilienten Beständen den Vorrat aufzubauen (siehe Ziele des Aktionsprogramm Nationaler Klimaschutz, ANK). In der vorliegenden Modellierungsstudie wurde aber kein aktiver Waldumbau analysiert, sondern lediglich eine verstärkte Nadelholzentnahme als ein Element des Waldumbaus abgebildet. In Folgestudien sollte z.B. betrachtet werden, wie die Etablierung klimastabiler Bestände mit welchen Baumarten aussehen kann, in welchem Zeithorizont sich Bestandesstrukturen verändern, und sich dies auf die THG-Bilanz der Waldfläche und der geernteten Sortimente auswirkt.

Um diese aus Klimaschutzsicht sinnvolle Entwicklung anzustoßen, ist eine Reduktion der Waldenergieholznutzung ein effektiverer Ansatz, da der überwiegende Anteil der Laubholzernte mit über 70% aktuell direkt als Energieholz verwendet wird (Jochem et al. 2023b). Parallel zum Klimaschutz sind zudem positive Auswirkungen auf die Biodiversität zu erwarten, da mit einem höheren Anteil an älteren Laubbäumen das Angebot an Habitatstrukturen wie verschiedenen Totholztypen, Rindentaschen oder Bruthöhlen ansteigt (Reise et al. 2017).

Im aktuellen politischen Raum besteht aber die Problematik konträrer politischer Instrumente. So schränken z.B. das Gebäude-Energiegesetz (GEG) und die RED III eine steigende Waldenergieholznutzung nicht ein, sondern führen voraussichtlich zu einer Zunahme. Die Ausgestaltung dieser und weiterer Politikinstrumente (siehe Überblick in Köppen et al. 2024) fußt auf der hier als kritisch eingestuften, aber weithin getroffenen Annahme, dass die Nutzung von Waldenergieholz CO₂-neutral ist. Diese Annahme führt dazu, dass sich Waldenergieholz damit als eine kostengünstige Option darstellt, um gesteckte Ziele zu erreichen (siehe Details in Köppen et al. 2024). Andererseits betont das Eckpunktepapier zur ausstehenden Nationalen Biomassestrategie (NABIS) die Notwendigkeit zur Lenkung der Biomasseströme unter Beachtung der Ernährungssicherheit, des Klimaschutzes, der Biodiversität, des Umweltschutzes und der Energie- und Rohstoffversorgungssicherheit, und durch die ambitionierten LULUCF-Ziele des Bundes-Klimaschutzgesetzes (KSG) besteht der Bedarf, die Waldsenke zu erhalten und möglichst auszubauen. Dies wird aktiv durch das ANK und durch auf das ANK aufbauende Instrumente gefördert. Der Erfolg dieser Instrumente ist aber nur möglich, wenn die Nutzung von Waldenergieholz zurückgeht. Hier besteht Forschungs- und politischer Handlungsbedarf, um die Frage zu beantworten, welche bestehenden Instrumente die Zielsetzungen im KSG und in der anstehenden NABIS unterstützen, welche Instrumente für Fehlanreize verantwortlich sind, und wie letztere behoben werden können.

5.5 Kernaussagen

Zusammenfassend lassen sich anhand der Ergebnisse im Projekt BioSINK die folgenden Kernaussagen treffen:

- ▶ Die Energieholzverwendung wird bis zum Jahr 2030 ansteigen, da Holzenergie als erneuerbare Wärmequelle angereizt wird, und danach als Effekt von Effizienzmaßnahmen und Temperaturanstieg in den Gebäuden sinken.
- ▶ Durch die steigende stoffliche Holznutzung, insbesondere im Bau, kann Mitte der 2030er Jahre die Nadelholznachfrage nicht mehr aus heimischem Nadelholz gedeckt werden (Annahme mittlerer oder starker natürlicher Störungen).
- ▶ Die Laubholznachfrage kann über den gesamten Modellierungszeitraum aus heimischem Laubholz gedeckt werden. Eine steigende Laubholzentnahme führt aber zu einer Verringerung der Senkenleistung der Wälder und steht so im Konflikt zu Zielen des natürlichen Klimaschutzes.
- ▶ Die Holzentnahme führt in temperaten und borealen Wäldern zu CO₂-Emissionen in der Größenordnung von 1,2 (±0,7) t CO₂/m³. Dieser Effekt ist für die inländische LULUCF-Senke und bei Holzimporten ebenso für die LULUCF-Senke im Herkunftsland relevant.
- ▶ Natürliche Störungen können die Senkenleistung des Waldes stark verschlechtern. Risiken sind aber in instabilen Nadelbaumbeständen deutlich höher als in stabilen Laubmischwäldern. Dies unterstreicht die Notwendigkeit waldbaulicher Maßnahmen zur Stabilisierung instabiler Waldbestände.
- ▶ Unabhängig vom angenommenen Niveau der natürlichen Störungen verbessert eine verringerte Holzentnahme in den betrachteten Szenarien die Senkenleistung im Wald. Ein Vorratsaufbau in Beständen mit geringen Risiken erscheint daher als eine robuste Strategie, um im LULUCF-Sektor Senkenziele zu erreichen.
- ▶ Bei der Bewertung von THG-Emissionen aus der Energieholznutzung ist es sinnvoll, Effekte auf LULUCF-Senken zu berücksichtigen. Dies kann erreicht werden, wenn die direkten CO₂-Emissionen aus der Holzverbrennung in der Produkt-Treibhausgasbilanzierung eingerechnet werden, anstatt sie – wie in der RED – gleich Null zu setzen.
- ▶ Bei Berücksichtigung der CO₂-Verbrennungsemissionen führt eine Erhöhung der Holzenergienutzung in Deutschland zu deutlich höheren und eine Verringerung zu deutlich niedrigeren THG-Emissionen. Im Zeitverlauf nehmen zudem Substitutionseffekte (Defossilisierung) ab, und die Produkt-THG-Bilanz im Jahr 2050 wird von den CO₂-Verbrennungsemissionen dominiert.
- ▶ Eine erweiterte Produkt-Treibhausgasbilanzierung nach der RED für die Holzenergienutzung ist sinnvoll, um für jede einzelne Holzenergieverwendung entscheiden zu können, ob sie zum Erreichen nationaler THG-Ziele beitragen kann.

6 Quellenverzeichnis

- BMEL (2016): Wald und Rohholzpotenzial der nächsten 40 Jahre - Ausgewählte Ergebnisse der Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung 2013 bis 2052. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Berlin. https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/Wald-Rohholzpotential-40Jahre.pdf?__blob=publicationFile&v=3 (21.6.2024).
- Bolte, A.; Höhl, M.; Hennig, P.; Schad, T.; Kroiher, F.; Seintsch, B.; Englert, H.; Rosenkranz, L. (2021): Zukunftsaufgabe Waldanpassung. In: AFZ DerWald, 4/2021, S. 12–16.
- Böttcher, H.; Hennenberg, K.; Winger, C. (2018a): FABio-Waldmodell. Modellbeschreibung Version 0.54 Stand Nov. 2017. Öko-Institut, Berlin. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/FABio-Wald-Modellbeschreibung.pdf> (21.06.2024).
- Böttcher, H.; Hennenberg, Klaus Josef; Winger, Christian (2018b): Waldvision Deutschland - Beschreibung von Methoden, Annahmen und Ergebnissen. Öko-Institut. Berlin. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Waldvision-Methoden-und-Ergebnisse.pdf> (21.06.2024).
- Bundesregierung (BReg) (2021): Projektionsbericht 2021 für Deutschland gemäß Artikel 18 der Verordnung (EU) 2018/1999 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 über das Governance-System für die Energieunion und für den Klimaschutz, zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 663/2009 und (EG) Nr. 715/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates sowie §10 (2) des Bundes-Klimaschutzgesetzes. Bundesregierung (BReg). Berlin. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/372/dokumente/projektionsbericht_2021_uba_website.pdf (21.06.2024).
- European Commission (EC) (2023): REGULATION (EU) 2023/839 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 19 April 2023 amending Regulation (EU) 2018/841 as regards the scope, simplifying the reporting and compliance rules, and setting out the targets of the Member States for 2030, and Regulation (EU) 2018/1999 as regards improvement in monitoring, reporting, tracking of progress and review. European Commission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R0839> (21.06.2024).
- Fehrenbach, H.; Köppen, S.; Kauertz, B.; Detzel, A.; Wellenreuther, F.; Breitmayer, E.; Essel, R.; Carus, M.; Kay, S.; Wern, B.; Baur, F.; Bienge, K.; von Geibler, J. (2017): Biomassekaskaden - Mehr Ressourceneffizienz durch stoffliche Kaskadennutzung von Biomasse - von der Theorie zur Praxis. Kurzfassung. Texte 53/2017, Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-06-13_texte_53-2017_biokaskaden_kurzfassung.pdf (21.06.2024).
- Fehrenbach, H.; Bischoff, M.; Böttcher, Hannes; Reise, Judith; Hennenberg, Klaus Josef (2022): The missing limb: Including impacts of biomass extraction on forest carbon stocks in greenhouse gas balances of wood use. In: Forests 13, 365, S. 1–14. <https://doi.org/10.3390/f13030365> (21.07.2024).
- Glaserapp, S.; Döring, P.; Blanke, C.; Mantau, U. (2017): Entwicklung von Holzverwendungsszenarien. Abschlussbericht. WEHAM - AP 3.2. Zentrum Holzwirtschaft, Ökonomie der Forst- und Holzwirtschaft, Hamburg. https://www.weham-szenarien.de/fileadmin/weham/Ergebnisse/Glaserapp_Doering_Blanke_Mantau_2017_Entwicklung_von_Holzverwendungsszenarien_WEHAM_Projekt_.pdf (21.06.2024).
- Gornig, M.; Michelsen, C.; Révész, H. (2022): Strukturdaten zur Produktion und Beschäftigung im Baugewerbe – Berechnungen für das Jahr 2021. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung Berlin (DIW Berlin), Berlin. https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/programme/zb/Auftragsforschung/1Wertschoepfung/2008/StrukturdatenBaugewerbe/Downloads/DL_Strukturdaten_Endbericht2021.pdf;jsessionid=A59103DDA94D5F4004C1646EA22FFBC0.live21323?__blob=publicationFile&v=3 (21.06.2024).
- Hennenberg, K.; Böttcher, H. (2023): Biomasse und Klimaschutz. Öko-Institut, Berlin, Darmstadt. https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Biomasse-und-Klimaschutz_BMWK.pdf (21.06.2024).

Hennenberg, K.; Böttcher, H.; Braungardt, S.; Köhler, B.; Reise, J.; Köppen, S.; Bischoff, M.; Fehrenbach, H.; Pehnt, M.; Werle, M.; Mantau, U. (2022): Aktuelle Nutzung und Förderung der Holzenergie - Teilbericht zu den Projekten BioSINK und BioWISE. Climate Change 12/2022, 2. korrigierte Fassung (April 2024), Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2023-01-05_cc_12-2022_aktuelle_nutzung_und_foerderung_der_holzenergie.pdf (21.06.2024).

Hennenberg, K.; Böttcher, H.; Wiegmann, K.; Reise, J.; Fehrenbach, H. (2019): Kohlenstoffspeicherung in Wald und Holzprodukten. In: AFZ-DerWald, 17/2019, S. 36–39. https://co2-speichersaldo.de/media/Hennenberg_Oekobilanz_sl.pdf (21.06.2024).

Hennenberg, K.; Bürck, S.; Fehrenbach, H.; Pfeiffer, M.; Köppen, S. (2023): Trägt die Energienutzung von Waldholz zum Klimaschutz bei? In: AFZ DerWald, 3/2023, S. 31–34. https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Hennenberg-et-al_2023_Traegt_die_Energienutzung_von_Waldholz_zum_Klimaschutz_bei_Energieholz_07_2022_MKG.pdf (21.06.2024).

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2006): 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Unter Mitarbeit von S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara und K. Tanabe. Japan. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/> (21.06.2024).

Jochem, D.; Morland, C.; Glasenapp, S.; Weimar, H. (2023a): Energetischer Holzverbrauch der privaten Haushalte. Abschlussbericht. Texte, 15/2023, Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_15-2023_energetischer_holzverbrauch_der_privaten_haushalte.pdf (21.06.2024).

Jochem, D.; Weimar, H.; Dieter, M. (2022): Holzeinschlag steigt im Jahr 2021 auf 84,2 Mio. m³. In: Holz-Zentralblatt, 148(41), S. 713–714. https://literatur.thuenen.de/diqbib_extern/dn065561.pdf (21.06.2024).

Jochem, D.; Weimar, H.; Dieter, M. (2023b): Holzeinschlag im Jahr 2022 erreicht 80,7 Mio. m³. Die energetische Verwendung von Rohholz ist annähernd konstant, während die stoffliche Nutzung etwas abnimmt. In: Holz-Zentralblatt, 149(40), S. 675–676. https://literatur.thuenen.de/diqbib_extern/dn067101.pdf (21.06.2024).

Köppen, S.; Stange, H.; Blömer, S.; Ortner, S.; Weiß, U.; Werle, M.; Beermann, Y.; Pehnt, M.; Hennenberg, K.; Köhler, B.; Braungardt, S. (2024): Wirkmechanismen von Regelungen und Förderinstrumenten des Bundes und der Länder auf den Einsatz fester Biomasse in der Wärmezeugung. Endbericht. Texte 48/2024, Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/48_2024_texte_wirkmechanismen.pdf (21.06.2024).

Lauf, T.; Memmler, M.; Schneider, S. (2021): Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger. Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2020. Climate Change 71/2021, Umweltbundesamt (UBA). Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2021-12-13_climate-change_71-2021_emissionsbilanz_erneuerbarer_energien_2020_bf_korr-01-2022.pdf (21.06.2024).

Luick, R.; Hennenberg, K.; Leuschner, C.; Grossmann, M.; Jedicke, E.; Schoof, N.; Waldenspuhl, T. (2021): Urwälder, Natur- und Wirtschaftswälder im Kontext von Biodiversitäts- und Klimaschutz - Teil 1: Funktionen für die biologische Vielfalt und als Kohlenstoffspeicher. In: Naturschutz und Landschaftsplanung 53 (12), S. 12–25. <https://www.nul-online.de/artikel.dll?AID=7004896> (21.06.2024).

Mantau, U. (2023): Holzrohstoffbilanzierung - Kreislaufwirtschaft und Kaskadennutzung. 20 Jahre Rohstoffmonitoring Holz. Schriftenreihe nachwachsende Rohstoffe, Band 40, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), Gülzow-Prützen. https://www.fnr.de/fileadmin/Projekte/2024/Mediathek/FNR_Brosch_Rohstoffmonitoring_Holz_2024.pdf (21.06.2024).

Mantau, U.; Blank, C.; Döring, P. (2018a): Strukturbericht zum Holzeinsatz im Baubereich – Verwendung der Holzprodukte nach Baubereichen und Bauteilen. Teilbericht des WKF-Projektes KlimaBau. Hamburg. <https://www.fnr.de/ftp/pdf/berichte/22WB403201.pdf> (21.06.2024).

Mantau, U.; Döring, P.; Weimar, H.; Glasenapp, S. (2018b): Rohstoffmonitoring Holz – Mengenmäßige Erfassung und Bilanzierung der Holzverwendung in Deutschland. Schriftenreihe nachwachsende Rohstoffe, Band 38, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), Gülzow-Prüzen. https://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/Rohstoffmonitoring_SR38_Final_Web_20180612.pdf (21.06.2024).

Mantau, U.; Döring, P.; Weimar, H.; Glasenapp, S.; Jochem, D.; Zimmermann, K. (2018c): Rohstoffmonitoring Holz – Erwartungen und Möglichkeiten. Kurzfassung. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), Gülzow-Prüzen. https://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/Broschuere_Kurzfassung_Rohstoffmonitoring_Web.pdf (21.06.2024).

Mantau, U.; Hiller, D.; Gieseking, L.; Blanke, C. (in press.): Holzverwendung im Möbelbereich – Verwendung von Massivholz und Holzwerkstoffen nach Möbelgruppen. FNR FKZ 22015918. Celle.

Pfeiffer, M.; Hennenberg, K.; Böttcher, H.; Reise, J.; Mantau, U. (2023): Referenzszenario der Holzverwendung und der Waldentwicklung im UBA-Projekt BioSINK. Öko-Institut. Öko-Institut Working Paper 4/2023, Öko-Institut, Berlin. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/WP-Referenzszenario-BioSINK.pdf> (21.06.2024).

Pingoud, K.; Ekholm, T.; Soimakallio, S.; Helin, T. (2016): Carbon balance indicator for forest bioenergy scenarios. In: GCB Bioenergy, 8 (1), S. 171–182. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12253> (21.06.2024).

Reise, J.; Hennenberg, K.; Winter, S.; Winger, C.; Höltermann, A. (2017): Analyse und Diskussion naturschutzfachlich bedeutsamer Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur. BfN-Skript 427, Bundesamt für Naturschutz, Bonn. https://bf.n.bsz-bw.de/frontdoor/deliver/index/docId/327/file/Skript_427.pdf (21.06.2024).

Repenning, J.; Harthan, R.; Blanck, R.; Böttcher, H.; Braungardt, S.; Bürger, V. et al. (2023): Klimaschutzinstrumente-Szenario 2030 (KIS-2030) zur Erreichung der Klimaschutzziele 2030. Teilbericht. Climate Change, 30/2023, Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/2023_07_04_climate_change_30_2023_klimaschutzinstrumente.pdf (21.06.2024).

Riedel, T.; Hennig, P.; Kroiher, F.; Polley, H.; Schmitz, F.; Schwitzgebel, F. (2017): Die dritte Bundeswaldinventur (BWI 2012). Inventur- und Auswertemethoden. Thünen Institut, Institut für Waldökosysteme, Eberswalde. https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn060229.pdf (21.06.2024).

Rüter, S. (2023): Abschätzung von Substitutionspotentialen der Holznutzung und ihre Bedeutung im Kontext der Treibhausgas-Berichterstattung. Thünen Working Paper 214, Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig. https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn066391.pdf (21.06.2024).

Soimakallio, S.; Böttcher, H.; Niemi, J.; Mosley, F.; Turunen, S.; Hennenberg, K.J., Reise, J., Fehrenbach, H. (2022): Closing an open balance: The impact of increased tree harvest on forest carbon. In: GCB Bioenergy, 14 (8), S. 989-1000. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12981> (21.06.2024).

Umweltbundesamt (UBA) (2022): Kohlendioxid-Emissionsfaktoren für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen (1990 – 2020). Korrigierter Endstand: 15.01.2022 (Excel-Tabelle). Umweltbundesamt (UBA). Dessau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/co2_ef_liste_2022_brennstoffe_und_industrie_final.xlsx (21.06.2024).

Umweltbundesamt (UBA) (2022): Nationaler Inventarbericht. Detaillierte Berichtstabellen CRF 2021. Umweltbundesamt (UBA), Dessau-Roßlau. https://cdr.eionet.europa.eu/de/eu/mmr/art07_inventory/ghg_inventory/envyefchw (21.06.2024).

Umweltbundesamt (UBA) (2023): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2023. Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2021. Climate Change 28/2023, Umweltbundesamt (UBA). https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/28_2023_cc_berichterstattung_unter_der_klimarahmenkonvention.pdf (21.06.2024).

Wissenschaftlicher Beirat für Waldpolitik (2021): Die Anpassung von Wäldern und Waldwirtschaft an den Klimawandel. Gutachten des Wissenschaftlichen Beirates für Waldpolitik. Wissenschaftlicher Beirat für Waldpolitik beim Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Berlin.

https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Ministerium/Beiraete/waldpolitik/gutachten-wbw-anpassung-klimawandel.pdf?__blob=publicationFile&v=2 (21.06.2024).