



INSTITUT FÜR ENERGIE-
UND UMWELTFORSCHUNG
HEIDELBERG

Waldentwicklung als Folge von Veränderung der Holznachfrage, Klimaveränderung, natürlichen Störungen und Politikanforderungen - Eine Analyse der Reaktionsmöglichkeiten von Forst- und Holzwirtschaft (DIFENS)

Teilvorhaben 3: Ökobilanzierung und Wirkungsanalyse der
Holznutzungsszenarien
SACHBERICHT



Gefördert aus Mitteln des
Projekträger: Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR)
FKZ Nr. 2220WK32C4
Laufzeit: 01.12.2021 – 30.11.2024

Horst Fehrenbach, Viviann Bolte, Susanne Köppen, Stefanie Theis

Heidelberg 2025



Inhalt

Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	8
Abkürzungen	9
1 Einführung	11
1.1 Projektzusammenhang	11
1.2 Gesamtziel des Vorhabens DIFENS	12
1.3 Ziel des Arbeitspakets 3 Ökobilanzierung	14
2 Methodik	16
2.1 Grundsätzliches zu Ökobilanzierung im Vorhaben DIFENS	16
2.1.1 Bilanzierungsansatz und Systemraumtiefe	16
2.1.2 Räumlicher und zeitlicher Bilanzrahmen	17
2.1.3 Differenzierte Systemblöcke	18
2.1.4 Wirkungskategorien	18
2.2 Stoffstrom- und Ökobilanzmodell HoLCA	19
2.2.1 Module des Stoffstrommodells	19
2.2.1.1 Waldbau	19
2.2.1.2 Sägewirtschaft	20
2.2.1.3 Herstellung Schnittholzprodukte	20
2.2.1.4 Herstellung Holzwerkstoffe	21
2.2.1.5 Papier/Pappe/Karton sowie Zellstoffindustrie	21
2.2.1.6 Chemikalienproduktion	21
2.2.1.7 Nutzung	21
2.2.1.8 Erfassung Altholz	21
2.2.1.9 Energetische Nutzung von Holz	22
2.2.2 Beschreibung des Vorgehens der Berechnung für DIFENS (HoLCA 2.0)	22
2.3 Berücksichtigung von Kohlenstoffspeichern	23
2.3.1 Ansätze zur Berücksichtigung von Änderungen der CO ₂ -Speicherleistung des Waldes	23
2.3.1.1 Verwendung der Emissionen bzw. Senken aus den Inventarberichten	23
2.3.1.2 CO ₂ -Speichersaldo	24
2.3.1.3 Verwendung der direkten CO ₂ -Emissionen der Holzverbrennung	25

Inhalt

2.3.1.4	Ergebnisse der Modellierungen in Teilprojekt 2	26
2.3.2	Methodische Ansätze zur Berücksichtigung von Speichereffekten in Holzprodukten	27
2.3.2.1	Internationale Leitlinien (IPCC)	27
2.3.2.2	Internationale und europäische Normen (ISO, EN)	29
2.3.2.3	Europäische Verordnung (RED II, Richtlinie (EU) 2018/2001)	30
2.3.2.4	PEF-Leitfaden	30
2.3.2.5	Weitere Ansätze aus der Literatur	31
2.3.3	Gewählte Ansätze für DIFENS	32
2.3.3.1	Ansatz für den CO ₂ -Speicher im Wald	32
2.3.3.2	Ansatz für den CO ₂ -Speicher in Produkten	33
2.4	Substitutionseffekte	34
2.4.1	Wie wird Substitution einbezogen?	34
2.4.2	Basisansatz auf Halbwarenebene	35
2.4.3	Verwendete Emissions- und Äquivalenzfaktoren	36
2.4.4	Detailliertere Beispielbetrachtung von Substitutionspaaren	37
3	Beschreibung des Holzstoffstroms	39
3.1	Übersicht	39
3.2	Stoffstrom von Waldholz	40
3.3	Sekundäre Stoffströme	41
4	Bilanzergebnisse der Szenarien	43
4.1	Bilanzen der Holzwirtschaft (Block A)	43
4.1.1	Treibhausgasemissionen	43
4.1.2	Versauerung	44
4.1.3	Feinstaub	44
4.1.4	Flächenbelegung - Hemerobie	45
4.2	Bilanzen mit Substitutionsrechnungen (Block B)	47
4.2.1	Annahme: Vollständige Substitution	47
4.2.2	Substitution gemäß Grundansatz	48
4.2.3	Vergleich der Halbwarenebene mit der von Fertigwaren	50
4.2.3.1	Beispiel: Hallenkonstruktion – Holz vs. Stahl	51
4.2.3.2	Beispiel: Fenster – Holz vs. Aluminium	51

Inhalt

4.2.3.3	Diskussion	52
4.3	Kohlenstoffbilanzen (Block C)	53
4.3.1	CO ₂ -Speicher im Wald nach den Ergebnissen aus DIFENS Teilprojekt 2	53
4.3.2	CO ₂ -Last durch die Entnahme von Waldholz zur Energienutzung	53
4.3.3	CO ₂ -Speicher in Produkten	53
4.4	Gesamtschau – Blöcke A, B und C	55
5	Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen	58
	Literaturverzeichnis	60

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Die drei Teilsysteme (Blöcke) der Ökobilanzierung des Holzstoffstroms;	18
Abbildung 2:	Oberfläche des Umberto-Netzes von HoLCA 2.0 in der Software Umberto 11 in Sankey-Darstellung	20
Abbildung 3:	Zeitreihen der Treibhausgasemissionen (Summe aus CO ₂ , CH ₄ und N ₂ O in [Millionen CO ₂ -Äquivalenten]) im LULUCF-Sektor seit 1990, unterschieden nach Landnutzungskategorien (Werte 1990 – 2023 aus NID 2025); positiv: Quelle; negativ: Senke; Quelle: Thünen-Institut (Gensior et al. 2025)	24
Abbildung 4:	THG-Bilanz der lebenden Bäume im Basisszenario und Anbindung an die THG-Berichterstattung; aus Sachbericht von Teilbvorhaben 2 (Pfeiffer et al. 2025).	27
Abbildung 5:	Zeitabhängiger Gewichtungsfaktor auf der Grundlage des kumulativen Strahlungsantriebs und ausgedrückt als globales Erwärmungspotenzial (GWP _{bio}) für verschiedene (5, 10, 20, 40, 60 und 80 a) temporäre Lagerungszeiten von Kohlenstoff in geernteten Holzprodukten (nachgedruckt aus (Helin et al. 2016)).	31
Abbildung 6:	Vereinfachtes Blockfließschema der betrachteten Holzstoffströme	40
Abbildung 7:	Aus dem Wald entnommene Holzkatgoren und deren mengenmäßige Entwicklung von 2020 bis 2050 gemäß dem Basisszenario aus dem Teilvorhaben 1 (Mantau 2025).	40
Abbildung 8:	Rohholzkategorien umgerechnet in die den Verwendungen zugeordneten Halbwarensektoren und deren mengenmäßige Entwicklung von 2020 bis 2050 gemäß dem Basisszenario aus dem Teilvorhaben 1 (Mantau 2025).	41
Abbildung 9:	Aufkommen und Verwendung von Altholz; mengenmäßige Entwicklung von 2020 bis 2050 gemäß dem Basisszenario aus dem Teilvorhaben 1 (Mantau 2025).	42
Abbildung 10:	Treibhausgasemissionen durch die Holzwirtschaft (Block A) in den Jahren 2020, 2030, 2040, 2050; linke Seite unter Annahme, die Energiewende findet nicht statt; rechte Seite unter der Annahme, die Energiewende findet statt.	43
Abbildung 11:	Versauerungspotenzial durch die Holzwirtschaft (Block A) in den Jahren 2020, 2030, 2040, 2050.	44
Abbildung 12:	Feinstaubbelastung (PM _{2,5} Äq.) durch die Holzwirtschaft (Block A) in den Jahren 2020, 2030, 2040, 2050.	45
Abbildung 13:	Vorratsentwicklung nach Baumarten im Basisszenario	46

- Abbildung 14: Gegenüberstellung der THG-Emissionen durch die Holzwirtschaft (links, Block A) und durch die Herstellung der analogen Produkte auf fossiler oder mineralischer Basis (rechts, Block B) im Jahr 2020; Block A enthält zur Information auch die Emissionen des Papier- und Zellstoffsektors, hierfür ist in Block B kein Analogon berücksichtigt. 48
- Abbildung 14: Gutschriften und Lastschriften durch die Anrechnung von substituierten Produktionsprozessen für die zusätzlichen bzw. verringerten Produktmengen gegenüber dem Ausgangsstand in 2020. 49
- Abbildung 15: Kombination von Block A (Holzwirtschaft) mit Block B (Gutschriften und Lastschriften) bis 2050. 50
- Abbildung 16: Gegenüberstellung der THG-Emissionen einer Halle aus Holzkonstruktion mit einer aus Stahlkonstruktion, jeweils für das Endprodukt (Halle) insgesamt und für die Anteile der Halbwaren Holz und Stahl für die Tragwerke. 51
- Abbildung 17: Gegenüberstellung der THG-Emissionen eines Fensters aus Holz mit einem aus Aluminium, jeweils für das Endprodukt (Fenster) insgesamt und für die Anteile der Halbwaren Holz und Aluminium für die Rahmen. 52
- Abbildung 18: Entwicklung der CO₂-Speicherung in Holzprodukten. Vorgehensweise nach der IPCC -Methode. 54
- Abbildung 19: Entwicklung der CO₂-Speicherung in Holzprodukten nach Input (Holzprodukte) und Output (Altholz). 55
- Abbildung 20: Gesamtschau der THG-Emissionen (positive Werte) und CO₂-Senken (negative Beträge) nach den Blöcken A, B und C 57

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Geschätzte Nutzungsdauer (ESL) von HWP-Warengruppen, Obsolenzfaktor (O) und die entsprechende Halbwertszeit (HL); Quelle: (IPCC 2019).	28
Tabelle 2:	Geschätzte Nutzungsdauer und damit verbundener Zeitabhängiger Gewichtungsfaktor für temporäre Lagerungszeiten von Kohlenstoff in geernteten Holzprodukten; Quelle: IPCC und (Helin et al. 2016).	32
Tabelle 3:	Produkte aus der Bilanz nach Halbwaren und Verwendung gegliedert mit den jeweils zugewiesenen Substitutprodukten	36
Tabelle 4:	Emissionsfaktoren für Substitutprodukte mit prospektiven Daten (Quelle: das REFINE-Modell von (Dittrich et al. 2025))	37
Tabelle 5:	Äquivalenzfaktoren und and Festlegungen zu den Substitutprodukten (Quelle: ifeu Datenbank)	37

Abkürzungen

Atro	Holz im absolut trockenen Zustand (ohne Wassergehalt)
BtL	Biomass-to-Liquid; flüssige Biomasseprodukte auf Basis von Ligno-Zellulose
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO ₂ -Äq.	Kohlenstoffdioxidäquivalente
FaBio	Forestry and Agriculture Biomass Model
FNR	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe
GWP100	Global Warmig Potential (über 100 Jahren berechnet)
GWP _{bio}	Global Warmig Potential der Biomasse
HKV	Holz-Kunststoff-Verbundwerkstoffe
HoLCA	Ökobilanz (LCA) Tool für Holzstoffströme
HWI	Holzwerkstoffindustrie
HWS	Holzwerkstoffe
HDF	Faserplatte (high density fibre board)
HPL	HPL-Schichtstoff (Beschichtungsmaterial z.B. bei Laminat, aber auch bei Möbel)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change; Weltklimarat
IRH	Sonstiges Industriestholz (Restholz, das bei der Verarbeitung von Holz auf verschiedenen Verarbeitungsstufen anfällt, aber nicht Sägenebenprodukte)
ISO	International Standard Organisation
LULUCF	Land use, land-use change and forestry (Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft) Sektor für die nationale Emissionsberichterstattung
Lutro	Holz im lufttrockenen Zustand (dem Wassergehalt der Umgebung angepasst)
MDF	Faserplatte (medium density fibre board)
N ₂ O	Distickstoffmonoxid, Lachgas
NACE	Nomenclature statistique des activités économiques dans la Communauté européenne. Die Statistische Systematik der Wirtschaftszweige in der Europäischen Gemeinschaft (NACE) ist die Systematik der Wirtschaftszweige in der Europäischen Union (EU).
PEF	Product environmental footprint (Umweltfußabdruck für Produkte)
PEFCR	Product environmental footprint category rule

PM2.5	Particulate matter (Partikel, Staub) mit einem aerodynamischen Durchmesser von kleiner 2,5µm; Feinstaub
PPK	Papier, Papier, Karton
SNP	Sägenebenprodukte
SO ₂	Schwefeldioxid
SO ₂ -Äq.	Schwefeldioxidäquivalente
THG	Treibhausgas
TRAW	Total Resource Assessment of Wood
WPC	Wood Plastic Composite (Holz-Kunststoff-Verbundwerkstoffe (HKV),)

1 Einführung

1.1 Projektzusammenhang

Der Wald in Deutschland steht vor großen strukturellen Veränderungen (z.B. durch Waldumbau) und ökologischen Herausforderungen (z.B. Störungen durch Extremereignisse). Es zeichnen sich aber auch in der Holzverwendung Entwicklungen ab, die künftig der Forst- und Holzwirtschaft ebenfalls die Fähigkeit abverlangen, sich an disruptive Ereignisse anzupassen.

Um die Anpassungs- und Reaktionsfähigkeit der Akteure (Waldbesitzende, Unternehmen, Politiker) zu stärken, bedarf es wissenschaftlich fundierter Aussagen zur Wald- und Holzmarktentwicklung in Abhängigkeit von den künftigen bedeutenden Treibern. Diese können durch modellgestützte Szenarien entwickelt werden. Wichtige Treiber der Modelle in diesem Vorhaben sind neben demographischen und ökonomischen Entwicklungen, Klimawandel, natürliche Störungen, Politikmaßnahmen im Klima- und Naturschutz sowie der Bioökonomie und demographische und ökonomische Entwicklungen.

Das Hauptziel des Projekts ist die Entwicklung von Strategien für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung und Holzverwendung unter Berücksichtigung von erwarteten Korridoren der Waldentwicklung. Das Vorhaben verfolgt dabei vier Teilziele:

1. Bestimmung von Szenarien der möglichen Holzverwendung und daraus resultierenden Nachfrage nach Holzrohstoffen auf Basis von Nachfrageentwicklungen in Endwarensektoren.
2. Beschreibung möglicher Entwicklungskorridore mit Hilfe von Modellanalysen zur Waldentwicklung unter Änderungen der Holznachfrage, Klimawandel und Extremereignisse, natürlicher Störungen und Politikanforderungen.
3. Analyse der Klimawirksamkeit unter Berücksichtigung der Kohlenstoffspeicherleistung im Wald und von Holzprodukten sowie der Substitution fossiler Rohstoffe.
4. Analyse von Reaktionsmöglichkeiten der Waldbewirtschaftung und Holzverwendung sowie Bereitstellung von informatorischen Grundlagen zur Erhöhung der Entscheidungskompetenz der Akteure, um auf extreme ökonomische und ökologische Veränderungen zu reagieren und Anpassungs- und Reaktionsstrategien zu entwickeln.

1.2 Gesamtziel des Vorhabens DIFENS

Eine Reihe von zukünftigen Waldszenarien¹ hat kürzlich dargelegt, dass das Holzaufkommen bei verschiedenen Präferenzsetzungen zu Waldfunktionen und Bewirtschaftungszielen sehr unterschiedlich ausfallen kann. Damit ist das Spektrum an Waldentwicklungsszenarien auf der Grundlage historischer Trends und aktueller Zielvorstellungen weitgehend beschrieben. Allerdings wird durch regionale Klimaprognosen deutlich, dass sich die Wachstums- und Entwicklungsbedingungen im Wald stark ändern können. Diese Änderungen wirken auch unmittelbar auf das zukünftige Holzaufkommen. Es stellt sich somit die Frage, wie sich die Akteure in der Holzverarbeitenden Industrie, in der Waldbewirtschaftung und in der Politik aufstellen sollten, wenn Waldentwicklung und Möglichkeiten der Holzverwendung künftig erheblich disruptiver verlaufen.

Dazu wird zunächst die zukünftige Wald- und Holzaufkommensentwicklung betrachtet. Waldentwicklung und Holznutzung könnten durch äußere Treiber extremen Änderungsanforderungen unterliegen. Bedeutende Treiber sind Klimawandel und Extremereignisse, aber auch drastische Politikmaßnahmen, die zur Steigerung der Holznachfrage (etwa durch Erhöhung der Holzbauquote, Veränderung der Verbraucherpräferenzen, Bioökonomieentwicklung) oder zu erhöhten Anforderungen an Naturschutzziele (etwa durch striktere Biodiversitätsschutzvorgaben) und Klimazielen (etwa durch eine CO₂-Bepreisung) im Wald führen können. Eine besondere Rolle spielen in diesem Zusammenhang Störungen im Wald durch Kalamitäten und/oder extreme Wetterereignisse, besonders wenn diese nicht mehr nur sporadisch, sondern in immer kürzeren Abständen zu einander auftreten. Waldumbau- und Walderneuerungsmaßnahmen zur Anpassung werden zu einer Veränderung der Waldstruktur und der Baumartenverteilung führen. Die damit einhergehenden Änderungen der Menge, Qualität und Beschaffenheit des aufkommenden Holzes haben einen starken Einfluss auf Verwendungsmöglichkeiten und auf den Holzproduktmarkt und damit auch auf Kohlenstoffbilanzen der Holznutzung insgesamt.

Die Frage welche Reaktionsmöglichkeiten sich im Holzsektor auf diese Entwicklungen ergeben, stellt einen wesentlichen Teil des Vorhabens dar. Die Finanzkrise 2009 und die aktuelle Corona-Pandemie zeigen, dass auch auf der Nachfrageseite disruptive Entwicklungen stattfinden, die nicht ohne Folgen für die forstliche Produktion sind. Die aktuell häufig verwendeten Holzmarktmodelle (European Forest Sector Outlook Study (EFSOS), UNECE²; NAFSOS USDA Forest Service Model³; FASOM; GFTM) basieren auf der Entwicklung des Bruttoinlandsprodukts (BIP), welche die Nachfrage nach Halbwerten wie Schnittholz, Platten etc. gleichermaßen bestimmt. Diese starke Vereinfachung reicht nicht aus, um Veränderungen innerhalb der Branchen abzubilden.⁴ In diesem Vorhaben erfolgt die ökonomische Modellierung auf Ebene der Endwarenssektoren, so dass sektorspezifische Treiber (z.B. Baubedarf, Mediennutzung, Logistik) die Nachfrage nach Holz steuern. Ferner soll die Verknüpfung der Sektoren und der Rohstoffströme umfassender herausgearbeitet werden.

Die Wirkung von Waldbewirtschaftung und Holzverwendung auf den Kohlenstoffhaushalt wird mit Blick auf nationale und internationale Ziele der Treibhausgas-(THG)-Neutralität bis

¹ Z.B. WEHAM Szenarien www.weham-szenarien.de, Waldvision www.waldvision.de, Gutsch et al. 2018, etc.

² European Forest Sector Outlook Study (EFSOS). UNECE. Geneva 2011 <http://www.unece.org/efsos2.html>

³ North American Forest Sector Outlook Study 2006-2030. UNECE. Geneva 2012 https://www.srs.fs.fed.us/pubs/ja/2012/ja_2012_prestemon_004.pdf

⁴ Wegen der homogenen Produktstruktur und verfügbarer Statistik stellt der Papiersektor eine Ausnahme dar (Vgl. FAO Forestry Production).

2050 stark an Bedeutung gewinnen. Vor allem dann, wenn durch „negative Emissionen“ die Konzentration von THGs verringert werden sollen. Die Kohlenstoffbilanz der Waldfläche und von Produkten können damit zu dominanten Steuerungsgrößen für die Holznachfrage sowie der Waldbewirtschaftung werden.

Die angesprochenen Problemstellungen zeigen, dass klare Vorhersagen über Entwicklungen im Wald deutlich schwieriger geworden sind. Gleichzeitig wächst aber bei den Akteuren im Forst- und Holzsektor der Bedarf, auf Veränderungen zu reagieren und sich anzupassen. Diese Herausforderung stellt auch der Wissenschaftliche Beirat Waldpolitik am BMEL¹ heraus und unterstreicht die Notwendigkeit der Anpassungsfähigkeit als Daueraufgabe im Sinne eines adaptiven Managements und von Kommunikationsinstrumenten zur Klimaschutzleistung der Holz- und Forstwirtschaft sowie zu Maßnahmen der Risikovorsorge im Dialog mit anderen Waldnutzern.

Um die Anpassungs- und Reaktionsfähigkeit der Akteure zu stärken, bedarf es wissenschaftlich fundierter Aussagen zur Wald- und Holzmarktentwicklung in Abhängigkeit von den künftigen bedeutenden Treibern. Wichtige Treiber in der Modellierung in diesem Vorhaben sind Klimawandel und Extremereignisse, natürliche Störungen, Politikmaßnahmen im Klima- und Naturschutz sowie in der Bioökonomie und demographische und ökonomische Entwicklungen. So können modellgestützt Chancen wie z.B. kurzfristige Nadelholzüberschüsse und Förderung der Holzverwendung und Risikofolgen wie z.B. langfristige Nadelholzdefizite oder verstärkte Nutzungseinschränkungen aufgezeigt und Handlungsempfehlungen entwickelt werden.

Das Hauptziel des Vorhabens ist die Entwicklung von Strategien für eine nachhaltige Waldbewirtschaftung und Holzverwendung unter Berücksichtigung von erwarteten Korridoren der Waldentwicklung. Dabei sind insbesondere Klimaänderungen, vermehrte Extremereignisse und veränderte Politikanforderungen zu Bioökonomieentwicklung, Klima- und Naturschutz sowie demographische und ökonomische Entwicklungen zu berücksichtigen.

Das Vorhaben verfolgt vier Teilziele:

1. Bestimmung der Entwicklung der möglichen Holzverwendung und daraus resultierenden Nachfrage nach Holzrohstoffen auf Basis von Nachfrageentwicklungen in Endwarensektoren.
2. Beschreibung möglicher Entwicklungskorridore mit Hilfe von Modellanalysen zur Waldentwicklung unter Änderungen der Holznachfrage, Klimawandel und Extremereignisse, natürlichen Störungen und Politikanforderungen.
3. Analyse der Klimawirksamkeit von Holzprodukten unter Berücksichtigung der Kohlenstoffspeicherleistung im Wald und von Holzprodukten, von Aufwendungen entlang der Prozesskette sowie der Substitution fossiler Rohstoffe.
4. Analyse von Reaktionsmöglichkeiten der Waldbewirtschaftung und der Holzverwendung. Bereitstellung von informatorischen Grundlagen zur Erhöhung der Entscheidungskompetenz der Akteure (Waldbesitzende, Unternehmen, Politiker), um auf extreme

¹ Wissenschaftlicher Beirat Waldpolitik beim BMEL (Hrsg.) (2020): Eckpunkte der Waldstrategie 2050. Stellungnahme. Berlin, 71 S. https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Ministerium/Beiraete/waldpolitik/stellungnahme-waldstrategie-2050.pdf?__blob=publicationFile&v=1

ökonomische und ökologische Veränderungen reagieren zu können und Anpassungs- und Reaktionsstrategien zu entwickeln.

Die Projektergebnisse werden verschiedene Akteure in der Entscheidungsfindung unterstützen und Reaktionsmöglichkeiten der Waldbewirtschaftung und der Holzverwendung aufzeigen. In der Holzverwendung können diese z.B. Innovationen in den Endwarenmärkten (Papier, Bau, Möbel, neue biobasierte Ersatzstoffe etc.) sein, als Reaktion darauf, dass Verbraucher verstärkt auf klimaschonende Produkte umsteigen oder klimaschädliche meiden. Dazu werden THG-Emissionen der gesamten Produktionskette, wie auch andere ökologische und ökonomische Indikatoren für unterschiedliche Kombinationen der Nachfrage nach Holzprodukten und Waldbewirtschaftungen ermittelt.

Reaktionsmöglichkeiten der Waldbewirtschaftung werden dagegen darauf abzielen, mögliche Entwicklungen des Holzaufkommens unter extremen Bedingungen zu antizipieren und angepasste Bewirtschaftungsformen umzusetzen. Dabei können die Reaktionen z.B. die Diversifizierung des Baumartenspektrums, die Diversifizierung des Absatzmarktes oder andere Risikominderungsstrategien darstellen.

Die Ergebnisse werden insgesamt dazu dienen, die Informationsbasis der Akteure zu erweitern und damit die Entscheidungskompetenz der Akteure (Waldbesitzende, Unternehmen, Politiker) zu erhöhen.

1.3 Ziel des Arbeitspakets 3 Ökobilanzierung

AP 3 hat zum Ziel durch Methoden der Ökobilanzierung eine THG-Bilanzierung der möglichen Optionen der Waldbewirtschaftung und Holzverwendung unter den in AP 1 und AP 2 gesetzten Annahmen abzuschätzen. Dabei werden die komplexen Wechselwirkungen von THG-Minderungen durch Substitution THG-intensiver Nutzungen (insbesondere fossile Rohstoffe), Emissionen durch Veränderungen der Waldbewirtschaftung (z.B. Vorratsauf- bzw. -abbau) und die Senkenleistung in Holzprodukten in eine THG-Bilanz integriert. Ein besonderer Fokus der Analyse liegt auf Effekten, die im Zusammenhang mit den einzelnen extremen Rahmenbedingungen wie abiotische oder biotische Störungen stehen. In Bezug auf die Substitutionseffekte wird berücksichtigt, dass Sektoren wie Energie, Industrie, Gebäude und Verkehr entlang der Zeitachse zunehmend dekarbonisiert werden. Das Arbeitspaket soll Antworten auf folgende Fragen liefern:

1. Welche Treibhausgasemissionen sind für einzelne Holzprodukte entlang der Wertschöpfungskette zu erwarten, wenn Substitutionseffekte (Vergleich mit nicht-biogenen Produkten) und Änderungen der CO₂-Speicherleistung der Waldfläche (Vorratsaufbau, -abbau) und von Holzprodukten berücksichtigt werden, und wie ändern sich THG-Minderungspotenziale in Abhängigkeit der Reaktionsmöglichkeiten der Waldbewirtschaftung unter extremen Rahmenbedingungen?
2. Wie wirken sich Reaktionsmöglichkeiten und Rahmenbedingungen auf andere Umweltindikatoren (z.B. Luftschadstoffe (insbesondere relevant bei der energetischen Nutzung von Holz), Eutrophierung und Versauerung, etc.)?
3. Welchen Einfluss haben alternative Holzverwendungen, die sich im Zuge der verschiedenen Szenarien durch Verschiebungen der Produktmengen und Produktpaletten ergeben, auf die Klimaziele?

4. Welche Holzprodukte aus welcher Holzherkunft sind gegenüber Nicht-Holzprodukten im Hinblick auf die THG-Minderung sowie anderer Umweltindikatoren vorteilhaft und wie ändert sich diese Bewertung über die Zeitachse?

2 Methodik

2.1 Grundsätzliches zu Ökobilanzierung im Vorhaben DIFENS

Ökobilanzierungen (Life Cycle Assessment, kurz LCA) oder Treibhausgasbilanzen im Kontext von Holznutzungen liegen bereits zahlreich vor. Erwähnt seien hier insbesondere die frühen Arbeiten von Seiten des Thünen-Instituts wie z.B. (Albrecht et al. 2008) oder auch (Sebastian Rüter und Stefan Diederichs 2012) oder (Hafner et al. 2017). Im internationalen Bereich viel zitierte Arbeiten stammen u.a. von (Sathre und González-García 2014) oder (Costa et al. 2024). Viele Arbeiten sind dabei sehr spezifisch, wie es für konkrete Produkt-Ökobilanzen auch angemessen ist. Auch spezifische Bereiche wie die Zeitdimension bei der Speicherung von Kohlenstoff in LCA werden vielfach behandelt (Andersen et al. 2024).

Die vorliegende Aufgabenstellung ist dagegen sehr breit aufgesetzt, da der gesamte Holzmarkt abzubilden ist. Dies erfordert in vielen Stellen Vereinfachungen, da dies im Rahmen einer solchen Forschungsarbeit weder vollständig noch in allen Details von üblichen Produkt-Ökobilanzen zu leisten ist. Die Arbeit profitiert jedoch von den zahlreichen Vorarbeiten, u.a. den oben genannten, aber auch von vergleichbaren Studien, die Stoffströme insgesamt abzubilden versuchten wie (Fehrenbach et al. 2017).

2.1.1 Bilanzierungsansatz und Systemraumtiefe

Ziele dieses Teilvorhabens ist es, ökologische Bilanzen entlang der Wertschöpfungskette für das Gesamtsystem Holzproduktion und -nutzung im Kontext der Szenarien der Waldentwicklung (Teilvorhaben 2) und des Holzmarktes (Teilvorhaben 1) zu erstellen. Im Kern der Bilanzierung stehen damit die Stoffströme des Gesamtsystems, welches eine Vielzahl an Produkten als Output aufweist. Folglich werden **keine expliziten Produktökobilanzen** für die Vielzahl im Einzelnen erstellt, sondern sogenannte **Stoffstrombilanzen**, die die Wald- und Holzwirtschaft insgesamt unterschieden nach den verschiedenen Szenarien durchführt. Grundsätzlich können auf der Basis des angewandten Systemmodells durchaus einzelne Produktökobilanzen extrahiert werden, was jedoch die Anwendung eines umfassendes Allokationsmodells erfordern würde. Andererseits reicht die Bilanzierungstiefe auf der Basis der aus Teilvorhaben 1 eingepflegten Holzmarktdaten jedoch nur bis zur Halbwarenebene. Eine Vertiefung weiter bis zu fertigen Endwaren würde zu einer massiven Überlastung des Modellierungsansatzes führen, da die Vielzahl und an holzbasierten Endwaren nicht zu erfassen wäre und diese einzelnen Produkte zumeist noch dazu komplex gefertigt sind.

Auf der anderen Seite wird zu den Stoffstrombilanzen der jeweiligen Szenarien auch jeweils eine Bilanz über die **substituierten Produkte** erstellt. Die Ebene der Halbwaren führt daher unvermeidlich zu einer Unschärfe, weil auch für die substituierten Produkte (allein schon aus Konsistenzgründen) nur die Halbwarenebene betrachtet wird. Bilanziert man jedoch

beispielsweise ein Fenster aus Holz im Vergleich mit einem Alternativprodukt (Kunststoff oder Aluminium), so greift die Halbwarenebene (Holzlatten vs. Kunststoff- oder Aluminiumteilen) zu kurz, da jeweils weitere z.T. unterschiedliche Komponenten für ein fertiges Fenster benötigt werden. Dies gilt insbesondere auch für Bauholzelemente, wenn für diese ein Substitutionsprodukt bestimmt werden soll.

Die Gesamtbilanzen in DIFENS verbleiben somit im Wesentlichen auf einer rohstoffbezogenen Ebene und mit der Einbeziehung der substituierten Welt wie erwähnt in einer gewissen Unschärfe, die angesichts der großen Rohstoffströme für die hier vorliegenden Aufgabenstellung zunächst als akzeptierbar eingestuft wird. Um die Unschärfe ein Stück auszuleuchten werden jedoch auch zusätzlich eine Reihe von fallbezogenen detaillierten Produktbilanzen quasi parallel erstellt, um zeigen zu können, wieweit hier Abweichungen vom vereinfachten Bild der Halbwarenebene auf das differenzierte Bild der Endproduktebene zu erwarten sind.

2.1.2 Räumlicher und zeitlicher Bilanzrahmen

Die zentrale Bilanzengangsgröße ist zunächst durch die **Holzentnahme aus dem Wald in Deutschland im Laufe eines Jahres** definiert (Output aus Teilvorhaben 2). Ergänzt wird diese Größe durch die Nachfrage des Gesamtmarkts an holzbasierten Produkten, wodurch sich im Falle von Unterdeckung auch eine (Netto)Importmenge an Holz bzw. holzbasierten Produkten ergibt. Bei Letzteren ist der Markt an Papier- und Zellstoffprodukten besonders relevant.

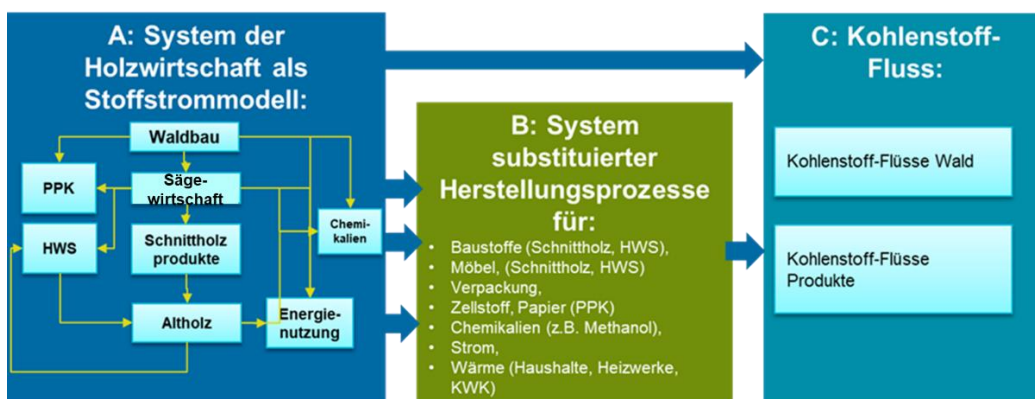
Der **zeitliche Systemraum** wird wiederum durch die Basisgröße der Holzentnahme aus dem Wald in Deutschland im Laufe **eines Jahres** bestimmt, wobei dies über den Bilanzraum 2020 bis 2050 in 10-Jahresscheiben (2020, 2030, 2040, 2050) erfolgt. Da der Ansatz grundsätzlich dem in der Ökobilanz vorgegebenen Lebenswegrahmen folgt, ergeben sich hier Abweichungen zu jahresbezogenen Verwendungs- bzw. Konsumbilanzen, in welchen z.B. Altholzaufkommen aus Produktionen längst vergangener Jahre einfließen, nicht jedoch der Verbleib des Altholzes aus Produkten, die im Bilanzjahr erzeugt werden und in den Markt kommen. Diese zeitliche Verschiebung ist insbesondere bei recyclingrelevanten Stoffströmen wie Holzwerkstoffen (Spanplatte etc.) zu beachten. Nimmt in einem Szenario der Anteil an langfristig genutztem Holz zu (z.B. durch mehr Bauholz), so verschiebt sich auch das Potenzial an späterer stofflicher oder energetischer Verwertung in spätere Jahre. Damit steigt auch der Anteil an Holz, das in den Produktspeicher übergeht, über die Jahre an.

Wie in Kapitel 1.3 erwähnt, wird bei der Bilanzierung auch davon ausgegangen, dass die Energiewende gemäß den Reduktionszielen der Bundesregierung, dem Klimaschutzgesetz (Bundesregierung 2021), den Langfristszenarien (Frömel et al. 2024) sowie der Projektionsberichte (Umweltbundesamt 2023) stattfindet. Dementsprechend wird die Energieversorgung zunehmend auf erneuerbaren Quellen beruhen und alle wesentlichen Produktionsprozesse und Dienstleistungen mit zurückgehenden Treibhausgasemissionen verbunden sein. Dies betrifft in den hier erstellten Bilanzen sowohl die Prozesse in der Holzwirtschaft als auch die substituierten Prozesse (d.h. die Blöcke A und B, siehe nachfolgender Abschnitt).

2.1.3 Differenzierte Systemblöcke

Das System der Holzwirtschaft selbst, die Einsparung von Emissionen durch substituierte Produkte sowie die Frage des Speichers sind drei grundlegend verschiedene Bereiche, die jeweils separat dargestellt werden. Somit erfolgt die Bilanzierung in drei Teil-Bilanzräumen (Blöcken), wie auch in Abbildung 1 dargestellt:

- System der Holzwirtschaft als Stoffstrommodell, inklusive der Waldwirtschaft sowie aller weiteren holzverarbeitenden bzw. nutzenden Prozessen, sowie der Altholzverwertung.
- die Produktionssysteme der substituierten funktionsgleichen Produkte auf der Halbwarenebene.
- Kohlenstoff-Fluss: Freisetzung von CO₂ bei der Holzentnahme vs. temporäre Speicherung in stoffliche Produkte.



Quelle: ifeu; Erläuterung: PPK: Papier, Pappe, Karton; HWS: Holzwerkstoffe; KWK: Kraft-Wärme-Kopplung

Abbildung 1: Die drei Teilsysteme (Blöcke) der Ökobilanzierung des Holzstoffstroms;

2.1.4 Wirkungskategorien

Der Klimawandel (ausgedrückt als Treibhausgaseffekt in kg CO₂Äq. nach dem GWP100-Ansatz des IPCC) stellt eine der relevanten Wirkungskategorien der Ökobilanz dar und steht gemäß dem Gesamtziel dieses Projekts im Vordergrund. Von entscheidender Bedeutung ist dabei, die Effekte der Speicherleistung bzw. der Freisetzung von biogenem Kohlenstoff als CO₂ durch die Wachstumsdynamik des Waldes sowie der Speicherung in Produkten in die Bilanzierung aufzunehmen.

Die Ökobilanz beinhaltet neben Klimawandel weitere Wirkungskategorien, um ein möglichst gesamtökologisches Bild zu erstellen und Schwachstellen bezüglich weiterer Umweltschutzgüter zu identifizieren. Dabei werden insbesondere folgende Wirkungskategorien betrachtet:

- Versauerung (ausgedrückt in kg SO₂Äq)
- Feinstaubbelastung (als Repräsentant für Humantoxizität, ausgedrückt in kg PM2.5-Äquivalente)

- Flächenbelegung (ausgedrückt in $m^2 \cdot a$, ggf. auch charakterisiert über den Grad an Hemerobie)

Für die Bilanzierung der Stoffströme sowie der Umweltwirkungen wird das Modell HoLCA eingesetzt, das im folgenden Kapitel beschrieben wird. In Kapitel 0 wird das Vorgehen bei der Kohlenstoffbilanz der Waldwirtschaft und in Holzprodukten, in Kapitel 2.4 das Vorgehen für die Substitutionsrechnung beschrieben.

2.2 Stoffstrom- und Ökobilanzmodell HoLCA

Das Stoffstrom- und Ökobilanz-Modell HoLCA wurde im Rahmen des UBA-Projekts BIOMASSEKASKADEN (Fehrenbach et al. 2017) entwickelt. Darin werden ausgehend vom Waldbau die verschiedenen Verarbeitungs- und Lieferketten zu den jeweiligen Produkten, bzw. Produktgruppen abgebildet. Das auf Basis der Software Umberto entwickelte Modell bezog sich in der Version 1.0 auf Stoffstromdaten der differenzierten Holzrohstoffbilanz Deutschlands von Mantau (2012). Die Modellierung der Stoffströme erfolgt in massenbezogenen Einheiten. Die Ausgangsdaten in m^3 werden für Frischholz anhand der Dichteangaben (im Anhang der Mantau-Studie) in Tonnen umgerechnet. Ein Update dieser Umrechnungsfaktoren erfolgte anhand der in den UBA-Studien BioWISE und BioSINK angesetzten Daten (Hennenberg et al. 2022). Alle Holzprodukte werden mit tatsächlichen Massewerten gerechnet.

Im Rahmen von DIFENS werden neben den Stoffströmen, die auf die Daten aus AP 1 auf die Version 2.0 angepasst werden auch Aktualisierungen der Hintergrunddaten durchgeführt (siehe Kapitel 2.2).

2.2.1 Module des Stoffstrommodells

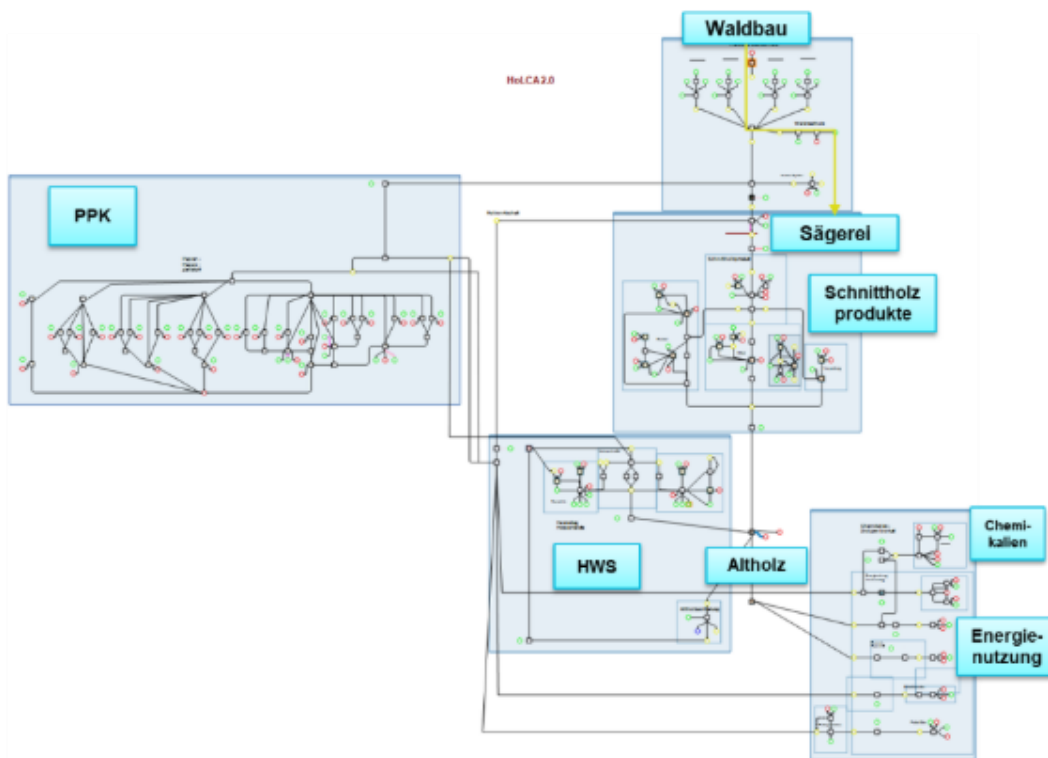
Die einzelnen Module von HoLCA beinhalten neben der Steuerung und Modellierung des Holzstroms ökobilanzielle Daten zu Inputs (Energie, andere Rohstoffe oder Chemikalien, Wasser etc.) und Outputs (Emissionen in Luft und Wasser, Abfälle etc.). Folgende Module stellen die obere Ebene des Modells dar, wie sie auch in Abbildung 2, die die Oberfläche des Umberto-Netzes von HoLCA 2.0 zeigt, zu erkennen sind.

2.2.1.1 Waldbau

Hier werden in Version 2.0 folgende Produktsortimente erzeugt:

- Stammholz, unterschieden in Nadel- und Laubholz
- Industrieholz (bzw. sonstiges Derbholz), unterschieden in Nadel- und Laubholz,
- Waldrestholz (Nichtderbholz)
- Rinde

Bezüglich der Bewirtschaftungsweise kann eine Auswahl bzw. eine prozentuale Mischung zwischen fünf verschiedenen Waldbauformen (nach Giegrich, Sturm 1996) getroffen werden. Daraus errechnet sich der Flächenbedarf für die nachgefragte Holzmenge sowie eine Einstufung dieser Fläche nach Naturnähe bzw. Hemerobie.



Quelle: ifeu; Erläuterung: PPK: Papier, Pappe, Karton; HWS: Holzwerkstoffe; KWK: Kraft-Wärme-Kopplung

Abbildung 2: Oberfläche des Umberto-Netzes von HoLCA 2.0 in der Software Umberto 11 in Sankey-Darstellung

2.2.1.2 Sägewirtschaft

Der Input (Stammholz, Nadel und Laub) wird in diesem Modul zu Schnittholz umgewandelt unter entsprechendem Energieeinsatz und in Verbindung mit der Erzeugung von Sägenebenprodukten. Diese werden in Anteilen der Produktion von Holzwerkstoffen, Papier/Pappe/Karton sowie Zellstoffindustrie und der Herstellung von Holzpellets.

2.2.1.3 Herstellung Schnittholzprodukte

Die Produkte aus Schnittholz werden in in drei grobe Gruppen unterteilt:

- Bauholz
- Vollholzmöbel
- Verpackungsholz (im Wesentlichen sind das Paletten)

Auch hier fallen Nebenprodukte an (Verschnitt, Säge- Hobelspäne), die dem Pool an Sägenebenprodukten zugeführt werden (s.o.). Wie auch bei weiteren Verarbeitungsprozessen wird ein Teil der Sägenebenprodukte für die Deckung des Eigenenergiebedarfs (Dampf, Wärme) eingesetzt.

2.2.1.4 Herstellung Holzwerkstoffe

Die Produkte werden in Version 1 hier folgendermaßen unterteilt:

- OSB-Platten
- LDF-Platten

Der Rohstoffstoff besteht aus Industrieholz und Sägenebenprodukten sowie Anteilig auch Altholz. Daten zu Energieaufwand und Materialien (z.B. Harze) werden in Version 1.0 Rüter und Diedrichs (2012) entnommen.

2.2.1.5 Papier/Pappe/Karton sowie Zellstoffindustrie

Dieser Teilsektor ist sehr komplex und somit aus zahlreichen Modulen zusammengesetzt. Datengrundlage sind verschiedene durch ifeu erstellte Ökobilanzarbeiten, sowie Daten aus ecoinvent 3.9. Der Rohstoffstoff besteht aus Industrieholz und Sägenebenprodukten. Die üblichen Recyclingraten sind berücksichtigt. Die Produktgruppen auf der Halbwarenebene sind hier:

- Graphische Papiere
- Zeitungspapier
- Hygienepapiere
- Verpackungspapiere (Wellpappkarton)

Im Folgenden wird die Produktgruppe als Papier, Pappe, Karton (PPK) zusammengefasst.

2.2.1.6 Chemikalienproduktion

Die Produktion von Basischemikalien aus Holz findet bisher nur mit einem sehr geringen Maße statt. Hier sind grundsätzlich sehr viele verschiedene technische Pfade möglich. In das Modell integriert ist ein pyrotechnischer Pfad über die Vergasung und die Produktion von Methanol. Datensätze zur Produktion von flüssigen Kohlenwasserstoffen, die als Kraftstoffe oder Chemikalien eingesetzt werden können, sind hier zu Grunde gelegt (Rettenmaier et al. 2019) (Hurtig et al. 2022) (Brown et al. 2020).

2.2.1.7 Nutzung

Für energetisch genutztes Holz gelten die Ausführungen in Kapitel 2.2.1.9 Die Nutzungsphase für stoffliche Produkte geht in das Modell im Wesentlichen lediglich ein als Berechnung des Kohlenstoffspeichers über den Nutzungszeitraum. Spezifische Emissionen aus der stofflichen Nutzung der Holzprodukte werden nicht berücksichtigt.

2.2.1.8 Erfassung Altholz

Nach Nutzung gehen die Holzprodukte in den Altholz-Pool über. Dieser ist differenziert nach den Altholzklassen und in den Anteil an Holz in Restabfällen.

Das Modell kann hier auf zwei verschiedene Zeitdimension eingestellt werden:

5. Lebenswegbilanz, d.h. jeder Stoffstrom wird bis zu seinem Lebenswende geführt
6. Jahresbilanz: da der Input über die Jahresproduktion von Waldholz definiert wird, kann auch der Gesamtstrom auf den Einjahreszeitraum eingestellt werden, d.h. in den Altholzpool geht nur die jeweilige Jahresmenge, was dazu führt, dass eine größeren Menge Holz in einem Speicher verbleibt.

2.2.1.9 Energetische Nutzung von Holz

Dies umfasst sowohl den Einsatz von Frischholz

- Scheitholz (Nutzung in Haushalten)
- Hackschnitzel (Nutzung in Biomasse-HKW)
- Pellets (Nutzung in Haushalten und Nutzung in Haushalten)

Die energetische Nutzung von Altholz erfolgt ebenfalls in Biomasse-HKWs. Holz in Restabfällen wird über Abfallverbrennungsanlagen unter Energienutzung entsorgt.

2.2.2 Beschreibung des Vorgehens der Berechnung für DIFENS (HoLCA 2.0)

Die Aufgabenstellung von DIFENS erforderte eine Weiterentwicklung von HoLCA 1.0 zu HoLCA 2.0 mit einer Reihe von Anpassungen und Aktualisierungen. Das auf älteren Quellen beruhende Modell HoLCA 1.0 bedurfte einer Anzahl an Updates und zum Zwecke von DIFENS auch Ergänzungen. Diese lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Die Stoffströme werden von der ursprünglichen Quelle (Mantau 2012) auf die Ergebnisse von Teilprojekt 1 aktualisiert und dabei auch z.T. in der Differenzierung der Materialströme angepasst (ins-besondere auf die Ebene der Halbwaren wie in Teilprojekt 1 differenziert)
2. Anpassung von Umrechnungsfaktoren anhand der Daten in (Hennenberg et al. 2022)
3. Ergänzung der Kohlenstoffbilanz mit dem Speichersaldo für die Veränderungen von Kohlenstoffspeicher durch das Wachstum und die Entnahme von Holz im Wald (siehe Kapitel 2.3.1) sowie die mit der temporären Speicherwirkung in Holzprodukten (siehe Kapitel 2.3.2).
4. Differenzierung und Erweiterung des Produktoutputs für die zu substituierenden Halbwaren (siehe Kapitel 2.4)
5. Aktualisierung Hintergrunddaten wie z.B. für Strom aus dem allgemeinen deutschen Netz und für Transporte und Anlagen von Jahresbilanzen über die Zeitschieben 2020, 2030, 2040 und 2050.

2.3 Berücksichtigung von Kohlenstoffspeichern

2.3.1 Ansätze zur Berücksichtigung von Änderungen der CO₂-Speicherleistung des Waldes

2.3.1.1 Verwendung der Emissionen bzw. Senken aus den Inventarberichten

Die IPCC-Leitlinien enthalten sehr konkrete methodische Vorschläge zur Ermittlung der jährlichen Veränderungen im Kohlenstoffbestand von Wäldern durch Zuwachs, Entnahme und Zerfall im Chapter 4 *Forest Land*, der in 2019 überarbeiteten IPCC-Leitlinien Vol. 4.¹ Tatsächlich stellen die nach diesem Kapitel die umfassend und detailreich ermittelten Werte zu Emissionen und Senken im Wald Deutschlands im Grunde die tatsächliche Situation dar.

Betrachtet man die Entwicklung im Sektor LULUCF über die Vergangenheit, so fällt die massive Schwankung auf, die vor allem auf die Veränderungen beim Wald zu sehen sind. In Abbildung 3 ist der Wald anhand der blaugrünen Balkenanteile zu erkennen. Bis zum Jahr 2017 war der Wald eine Senke und glich damit Emissionen aus der Landwirtschaft (Grünland, Ackerland) und Feuchtgebieten aus im Gesamt-Sektor aus. Im Jahr 2018 wendete sich das Bild – verursacht durch Änderungen in der Berechnungsmethodik, aber auch durch die sehr hohen Emissionen aus der Landnutzungskategorie Wald durch Berücksichtigung der Ergebnisse der vierten Bundeswaldinventur, insbesondere durch die Erfassung der Waldschäden bis 2022 (Gensior et al. 2025). Der Wald ist in den Jahren zur Quelle im Bereich von 16 bis 24 Mio. t CO₂ pro Jahr geworden. Vorläufige Schätzungen weisen für 2024 einen Rückgang der Quelle auf nahezu Null aus, bedingt durch eine angenommene Erholung des Waldes durch das vergleichsweise regenreiche Jahr.

Versteht man den Wald als „Produktionsstätte“ für Holz, so wäre es naheliegend, dem Produkt diese Emissionen zuzurechnen. Würde man beispielsweise im 2023 den ca. 68 Mio. m³ entnommenen Waldholz (siehe Daten in Teilbericht 1 (Mantau 2025)) die Emission von 21 Mio. t CO₂Äq. zurechnen, ergäbe das einen Emissionsfaktor von 310 kg CO₂Äq pro Kubikmeter Holz. Im Jahr 2024 ginge der Emissionsfaktor dann jedoch runter auf Null. Im Jahr 2017 allerdings wäre der Faktor bei minus 650 kg CO₂Äq pro Kubikmeter Holz.

¹ https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/4_Volume4/19R_V4_Ch04_Forest%20Land.pdf

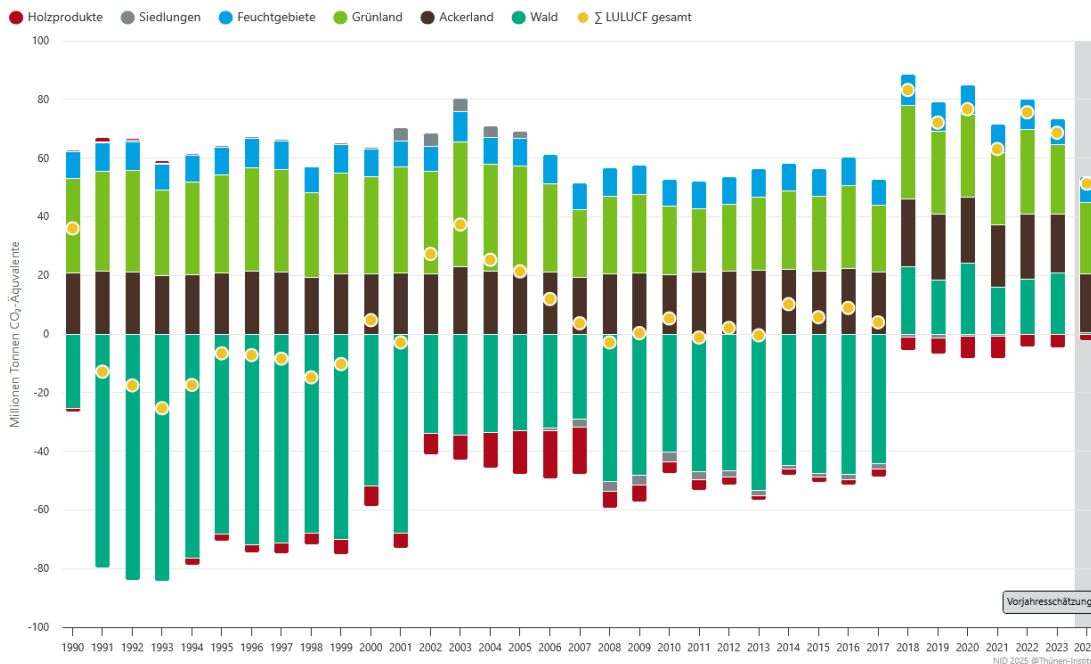


Abbildung 3: Zeitreihen der Treibhausgasemissionen (Summe aus CO₂, CH₄ und N₂O in [Millionen CO₂-Äquivalente]) im LULUCF-Sektor seit 1990, unterschieden nach Landnutzungskategorien (Werte 1990 – 2023 aus NID 2025); positiv: Quelle; negativ: Senke; Quelle: Thünen-Institut (Gensior et al. 2025)

Solche Schwankungen lassen sich für ein jährlich gleichartiges Produkt schwer begründen. Die mehr oder weniger gleich hohen Entnahmen durch Holzernte stehen in der Höhe, wie sie in den Inventarberichten nach der IPCC Methode errechnet werden, letztlich auch nicht direkt in direktem Zusammenhang. Wie erwähnt sind die äußeren Einflüsse wie Trockenheit und damit verbunden auch Schädlingsbefall mit entscheidend.

Nichtsdestoweniger ist die Entnahme von Holz ein entscheidender Faktor für die Entwicklung des Bestands an Kohlenstoff im Wald. Dieser ist schlussendlich eine Funktion des Zuwachses, der natürlichen Mortalität (die den Zerfall der Biomasse bedeutet, aber auch Zufuhr in den Altholzpool) und eben der Entnahme. Unterbleibt die Letztere, nimmt der Kohlenstoffspeicher zu (Soimakallio et al. 2022a). Dieser Aspekt wird von dem im Folgenden beschriebenen Ansatz des CO₂-Speichersaldos aufgegriffen.

2.3.1.2 CO₂-Speichersaldo

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 hingegen wieder freigesetzt, wodurch sich der CO₂-Speicher der Waldfläche verringert. Wird Holz im Zuge der Waldbewirtschaftung entnommen, reduziert dies ebenfalls den CO₂-Speicher der Waldfläche. 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 kann anhand der Kohlenstoffbilanz zwischen einem Szenario mit einer intensiven Waldbewirtschaftung und einem Szenario mit einer extensiven Waldbewirtschaftung gebildet werden. Dabei wird jeweils die Senkenleistung (t CO₂) und die Holzentnahme (m³) ins Verhältnis gesetzt und nach folgender Formel der resultierende Parameter, der CO₂-Speichersaldo¹ in der Einheit t CO₂/m³ errechnet:

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

Die Holzentnahme verringert somit die Senkenleistung der Waldfläche. Bei einer verringerten Holzentnahme steigt die Senkenleistung an. Der CO₂-Speichersaldo gibt somit an, wie stark sich die Senkenleistung pro entnommenen m³ Holz verändert.

Nach umfangreichen Recherchen und Simulationen von (Soimakallio et al. 2022a) lässt sich für Wälder gemäßigten und der borealen Zone ein mittlerer CO₂-Speichersaldo von 1,2 t CO₂/m³ ableiten, der bei einer Standardabweichung von ±0,7 t CO₂/m³ jedoch durch eine deutliche Spannweite aufweist. Zum Vergleich: Im Holz von Buche, Eiche und langlebigen Laubbaumarten sind etwa 1,0 Tonnen CO₂/m³ und in Nadelbäumen und kurzlebigen Laubbaumarten etwa 0,7 t CO₂/m³ gespeichert. Dies zeigt, dass die Menge an CO₂, die im Holz festgelegt ist, einen deutlichen Anteil des CO₂-Speichersaldos und damit der Auswirkung der Holzentnahme auf die Senkenleistung des Waldes erklärt. Hinzu kommen weitere Effekte aus der Walddynamik in einer Größenordnung von 0,4 t CO₂/m³.

Für die Anwendung des CO₂-Speichersaldos in produktbezogenen Treibhausgasbilanzen ist beachten, dass es sich um einen sogenannten kontrafaktischen Ansatz handelt. Das bedeutet, er drückt aus, wie sich die Dinge alternativ entwickeln würden, würde ein bestimmtes Handeln unterbleiben – in diesem Fall, die Entnahme von Holz aus dem Wald. In vergleichenden Produkt-Ökobilanzen ist dieser Ansatz konsistent, denn der Unterschied zwischen zwei verschiedenen Produkten drückt sich darin aus, dass die Ressourcenverbräuche für das eine Produkt weiterhin zur Verfügung stehen, wenn stattdessen das andere Produkt erzeugt wird.

Der Ansatz, der die THG-Effekte von waldbwirtschaftlichem Handeln allein den Produkten aus dem entnommenen Holz zurechnet, wird in der Fachwelt auch kritisiert (Rüter 2023).

2.3.1.3 Verwendung der direkten CO₂-Emissionen der Holzverbrennung

Im Projekt BioSINK (Hennenberg et al. 2024) wurde für die Berücksichtigung der Speicherleistungsänderung abgewogen, dass für konkrete CO₂-Bilanzen für Systeme oder Produkte die Emissionen bzw. Einbindungen, die mit der Dynamik der Waldentwicklung zusammenhängen über eine aufwendige Modellierung von Waldbeständen ermittelt werden müssen. Schwierig ist es dabei zeitverzögerte Effekte nach der Holzentnahme oder Effekte aus der stark bestandsabhängigen Variabilität abzudecken.

¹ Siehe weitere Details in Hennenberg et al. (2023), <https://co2-speichersaldo.de> und <https://blog.oeko.de/red-iii-methode-in-der-treibhausgasbilanz-fuer-energieholz-fehlt-ein-wichtiger-aspekt-der-ipcc-regeln/>

Auf der anderen Seite stellt die Menge an im Holz gebundenem CO₂ eine einfach zu ermittelnde Größe ist und als Solche durch Umrechnung in direkte CO₂-Emissionen bei der Verbrennung von Holz in THG-Bilanzen integriert werden kann. Die Menge an im Holz gebundenem CO₂ pro Energieeinheit beträgt laut den „Kohlendioxid-Emissionsfaktoren für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen“ des UBA 102 g CO₂Äq./MJ.¹ Dieser Wert – umgerechnet in 1,1 g CO₂Äq./m³ – wurde in BioSINK vorgeschlagen, um die durch Holzentnahme resultierende veränderte Dynamik auf der Waldfläche stellvertretend zu berücksichtigen. Mit diesem Faktor bewegt man sich im unteren Bereich der Bandbreite für den Speichersaldo nach (Soimakallio et al. 2022a), eine Überschätzung des Effekt ist daher unwahrscheinlich.

Dieser Ansatz wurde auch für die Berücksichtigung von Holzenergie im CO₂-Rechner des Umweltbundesamts angewendet (Fehrenbach et al. 2024).

2.3.1.4 Ergebnisse der Modellierungen in Teilprojekt 2

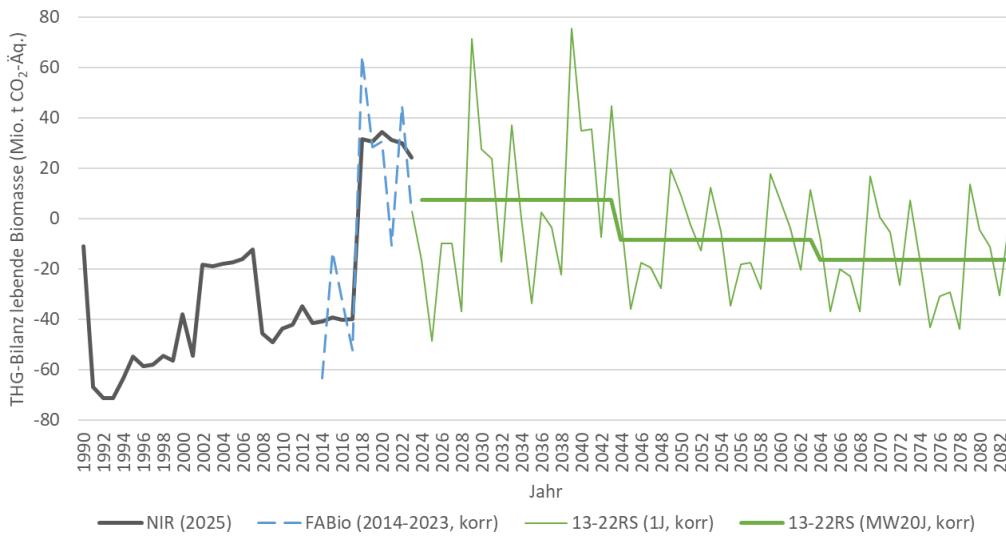
Die umfassenden Analysen und Modellrechnungen in Teilprojekt 2 (Pfeiffer et al. 2025) machen deutlich, wie komplex die Entwicklung von CO₂-Speicherung und Senkenleistung der Waldbiomasse sind. Für das Basisszenario wurde anhand des FABio-Modells im Verbund 4C eine in der Waldbiomasse gespeicherte CO₂-Menge von insgesamt um die 5 Mrd. t CO₂ mit über den Zeitverlauf nur moderaten Schwankungen. Allerdings behält das Nadelholz – welches bereits nach den Inventarberichten zu LULUCF in 2021 bis 2023 eine erhebliche CO₂-Quelle darstellte – auch in Zukunft eine CO₂-Quellenfunktion. Die Laubhölzer dagegen werden weiterhin als Senke wirken und die Verluste an CO₂-Speicherung dabei weitgehend durch die zunehmende Bindung im Laubholz kompensieren.

Im Zeitraum 2044–2063 bleiben nach dem von (Pfeiffer et al. 2025) modellierten Basisszenario die Wälder in Deutschland im Mittel somit eine leichte CO₂-Senke. Deren Senkenleistung wird sich danach in den letzten 20 Jahren der Simulationsperiode sogar weiter verstärken, wie in Abbildung 4 zu sehen ist. Die Abbildung schließt die im Basisszenario modellierte THG-Bilanz der lebenden Bäume an die die historisch berichteten Quellen/Senken aus den nationalen Inventaren (NIR) an. Darin wird ersichtlich, dass die THG-Bilanz unter den angenommenen Klimabedingungen und Erntemengen

- im Zeitraum 2020 bis 2040 um die 7 Mio. t CO₂ pro Jahr als Nettoquelle bedeutet und
- im Zeitraum danach bei etwa -8 Mio. t CO₂ pro Jahr als Nettosenke liegen wird.

Nach 2060 (also außerhalb der zeitlichen Bilanzgrenze dieser Studie) entwickelt die Nettosenke dauerhaft auf einem Niveau von knapp über -20 Mio. t CO₂ pro Jahr. Dass sie frühere Senkenwerte (d.h. vor 2016) nicht mehr erreicht, liegt u.a. am kontinuierlichen Vorratsabbau in den Nadelholzbeständen bis etwa Mitte der 2040er Jahre.

¹ https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/co2_ef_liste_2022_brennstoffe_und_industrie_final.xlsx



Quelle: Öko-Institut, Ergebnisse aus FABio-Forest, eigene Darstellung. Historische Entwicklung bis zum Jahr 2023 nach NIR-2025 (CRF-Tabellen). korr = Skalierte Werte (siehe Methode in Kap. 3.7), J = Jahr, MW = Mittelwert, 13-22RS = zyklische Wiederholung (repeated sequence) der Witterung der Jahre 2013-2022; siehe (Pfeiffer et al. 2025).

Abbildung 4: THG-Bilanz der lebenden Bäume im Basisszenario und Anbindung an die THG-Berichterstattung; aus Sachbericht von Teilvorhaben 2 (Pfeiffer et al. 2025).

2.3.2 Methodische Ansätze zur Berücksichtigung von Speichereffekten in Holzprodukten

2.3.2.1 Internationale Leitlinien (IPCC)

Die IPCC-Leitlinien enthalten sehr konkrete methodische Vorschläge zu Harvested Wood Products (HWP), beschrieben in Kapitel 12 der 2019 überarbeiteten IPCC-Leitlinien Vol. 4. (IPCC 2019)

Wie immer gilt auch hier der Vorbehalt, dass sich die IPCC-Inventare auf die Emissionen und den Abbau von Wirtschaftsgütern beziehen, nicht auf das Produkt im Detail. Auf den ersten Blick scheint dieses Problem für die vorliegende Thematik überschaubar zu sein, da der Scope bereits explizit auf das einzelne Produkt und nicht auf komplexe Lebenszyklusketten ausgerichtet ist. Auch die Frage des Imports/Exports von Produkten mit C-Lagerung stellt hier keine besondere Herausforderung dar. Die umfangreichen Definitionen von Systemgrenzen im IPCC-Leitfaden sind daher produktbezogen. Die Komplikation für die Anwendung auf Produktebene ergibt sich aus dem Zeitrahmen (siehe weiter unten).

In der methodischen Logik des IPCC-Leitfadens binden HWP nicht direkt Kohlenstoff aus der Atmosphäre. Wie bereits in Abschnitt 2.1.2 erwähnt, stellt der in HWP gebundene Kohlenstoff einen Kohlenstoffpool dar, der ursprünglich durch den oberirdischen Biomassekohlenstoffpool von Wäldern und anderen holzproduzierenden Landkategorien gebunden wurde. In dieser Hinsicht wird der ursprünglich von der Vegetation gebundene CO₂-Kohlenstoff in den HWP-Pool übertragen, ähnlich wie bei der Übertragung vom oberirdischen Biomassekohlenstoffpool in die Streu- und Bodenkohlenstoffpools im AFOLU-Sektor. Der einzige

Unterschied besteht darin, dass die Übertragung von Kohlenstoff aus der Vegetation in den HWP immer das Ergebnis anthropogener Aktivitäten ist. Wenn die Kohlenstoffvorräte im HWP-Pool im Laufe der Zeit zunehmen, bedeutet dies: Netto-CO₂-Entnahme in den HWP-Pool und Netto-CO₂-Emission im umgekehrten Fall.

Der IPCC-Leitfaden bietet zwei verschiedene konzeptionelle Rahmen mit zwei Ansätzen:

1. Bestandsänderung innerhalb definierter HWP-Pools

- Ansatz der Bestandsveränderung
- Produktionsansatz

2. Tatsächlicher CO₂-Fluss aus und in die Atmosphäre aus HWP

- Atmosphärischer Fluss
- Einfacher Zerfall

Der Ansatz der Bestandsänderung schätzt die Nettoveränderung des Kohlenstoffbestands im HWP-Pool innerhalb der nationalen Grenzen und ergänzt die Schätzung der Emissionen und des Abbaus durch Veränderungen des Kohlenstoffbestands im oberirdischen Biomass-pool der Wälder innerhalb derselben Systemgrenzen. Da die Messung schwierig ist, werden daher Modelle mit unterschiedlichem Komplexitätsgrad (Tier 1, Tier 2) verwendet.

Wie bereits erwähnt, ist hier die entscheidende Frage: Wie wird die Verweildauer des C-Reservoirs definiert und wie kann eine zeitliche Speicherung einem bestimmten Produkt zugeordnet werden? Zunächst einmal gibt der Leitfaden auch hierfür Vorgaben und definiert die Halbwertszeit als die Anzahl der Jahre, die es dauert, bis die Hälfte des aktuell im Pool befindlichen Materials verloren ist. Da sich die Halbwertszeit in diesem Zusammenhang auf in Gebrauch befindliche HWP bezieht, ist die anzuwendende Halbwertszeit (HL) eine Funktion der angepassten geschätzten Nutzungsdauer (ESL) der jeweiligen HWP-Waren (mit $HL = \text{angepasste ESL} \cdot \ln(2)$), siehe Tabelle 1.

Tabelle 1: Geschätzte Nutzungsdauer (ESL) von HWP-Warengruppen, Obsolenzfaktor (O) und die entsprechende Halbwertszeit (HL); Quelle: (IPCC 2019).

HWP commodity class	Nutzung	Estimated service life (ESL) years	Obsolence factor (O)	Half-life (HL) $ESL \times O \times (\ln 2)$ years
Schnittholz	Baustoff	70	0,9	43,7
	Möbel	45	0,6	18,7
	Verpackung	6	0,3	1,2
Holzwerkstoffe (HWS)	Baustoff	60	0,7	25
	Möbel	35	0,6	14,6
	Verpackung	6	0,3	1,2
Papier, Pappe, Karton (PPK)	Verpackung	3	0,3	0,6
	Papier	10	2	13,9

Für die Zuordnung der zeitlichen C-Speicherung zu einem bestimmten Produkt gibt es keinen gemeinsamen Standard oder eine Einigung innerhalb der wissenschaftlichen Gemeinschaft. Es gibt jedoch Vorschläge, die eine methodische Kopplung mit den Prinzipien und der Datengrundlage des IPCC ermöglichen. (siehe unten die Studie von (Soimakallio et al. 2022)).

2.3.2.2 Internationale und europäische Normen (ISO, EN)

Produkte auf der Basis von Biomasse stellen eine zeitliche biogene Kohlenstoffsenke für die Dauer der Produktlebensdauer dar. Während einige biobasierte Produkte, wie z. B. Biokraftstoffe, Lebensmittel oder Verpackungen, in der Regel nur eine kurze Lebensdauer haben, können einige andere Produktanwendungen potenziell biogenen Kohlenstoff über einen Zeitraum von Jahrzehnten bis zu Jahrhunderten speichern. Der zeitliche Abbau und die Speicherung von Kohlenstoff in der Technosphäre sind sowohl in der Wissenschaft als auch in der Politik ein Diskussionsthema.

Dementsprechend unterscheidet auch die ISO 14067:2018 zwischen kurzlebigen und langlebigen Produkten: Treten Emissionen aus der EoL- und Nutzungsphase erst nach zehn Jahren nach Beginn der Produktnutzung auf, handelt es sich um ein langlebiges Produkt im Sinne der Norm. Falls berechnet, sind der Zeitpunkt der Emissionen / des Abbaus sowie die entsprechenden Auswirkungen der verzögerten Emissionen für langlebige Produkte in der Dokumentation des (Teil-)PCF gesondert auszuweisen. Als Methode der Wahl für die Berechnung werden in der Norm zeitabhängige Charakterisierungsfaktoren oder diskontierungs-basierte As-Bewertungsmethoden referenziert. Es wird jedoch auf den ergänzenden Charakter dieser Informationen und die Nichtaufnahme in den (partiellen) PCF hingewiesen.

EN 16760:2016 enthält auch Hinweise zur Kohlenstoffbindung in Produkten. Die zeitlichen Auswirkungen von THG-Emissionen sollten daher berücksichtigt werden, wenn sie von Bedeutung sind [EN 16760]. Es wird jedoch nicht zwischen kurz- oder langlebigen Produkten unterschieden, außer dass die Sequestrierung in Produkten mit einem Zeithorizont von mehr als 100 Jahren als unbefristete Speicherung zu betrachten ist. Darüber hinaus enthält die EN 16760:2016 Berechnungen zu den Auswirkungen der zeitlichen Kohlenstoffspeicherung in Produkten. Diese beschränkt sich jedoch auf die Wirkungskategorie "Klimawandel" und fokussiert zudem ausschließlich auf CO₂ und CH₄.

$$CFP_{\text{zeitlicher Speicher}} = - \sum m_i \times t_s \times GWP_{IPCC,i} / 100$$

wobei: CFP zeitlicher Speicher: Kohlenstoff-Fußabdruck der zeitlichen Speicherung von THG_i

m_i : Masse des Treibhausgases

t_s : Zeitrahmen der vorübergehenden Ableitung/Speicherung, in Jahren

$GWP_{IPCC,i}$: IPCC-Charakterisierungsfaktor (GWP 100) für THG_i

Bei kurzlebigen Produkten müssen die Emissionen und der Abbau zeitunabhängig berechnet werden, d. h. so, als ob sie direkt zu Beginn der Bewertung auftreten. In diesem Fall wird

das Prinzip der Netto-Null-Kohlenstoff-Biogenitäts-Bilanz angewandt, wobei davon ausgegangen wird, dass die Kohlendioxidbindung während des Pflanzenwachstums genauso hoch ist wie die Freisetzung durch EoL, sei es durch Verbrennung oder Zerfall. Nur wenn eine Verdauung zu CH₄ stattfindet, gilt das Netto-Null-Prinzip nicht mehr.

2.3.2.3 Europäische Verordnung (RED II, Richtlinie (EU) 2018/2001)

Da die RED II Biokraftstoffe und andere kurzlebige energetische Nutzungen von Biomasse behandelt, ist die Frage nach Speichereffekten prinzipiell ausgeschlossen.

2.3.2.4 PEF-Leitfaden

Die Frage, wie Speichereffekte zu bewerten sind, ist im PEF-Leitfaden sehr klar geregelt. Er besagt, dass für alle drei Kategorien von Kohlenstoffströmen keine Gutschriften aufgrund einer vorübergehenden oder dauerhaften Kohlenstoffspeicherung und/oder einer verzögerten Emission berücksichtigt werden dürfen. Eine Abzinsung der Emissionen im Laufe der Zeit ist nicht zulässig, und alle Emissionen (oder der Abbau) müssen so betrachtet werden, als ob sie "jetzt" stattfinden würden.

In der PEFCR (Version 6.3 - Mai 2018) wird jedoch die Frage der (vorübergehenden) biogenen Kohlenstoffspeicherung erweitert. Die Lebensdauer des Produkts wird berücksichtigt, und außerdem wird zwischen Endprodukten und Zwischenprodukten unterschieden. Für letztere gibt es unter keinen Umständen Gutschriften, da die weitere Verarbeitung und die endgültige Lebensdauer nicht bekannt sein können.

Im Falle eines Endprodukts und eines Cradle-to-Grave-Ansatzes bestimmen die Lebensdauer des Produkts sowie - falls das Produkt aus einem Wald stammt - die Speicherdauer im Wald das Speicherpotenzial mit. Bei einer Produktlebensdauer von mehr als 100 Jahren ist eine Gutschrift anwendbar, die einem Charakterisierungsfaktor von -1 für "Kohlendioxid (biogen -100yr)" entspricht. Diese Gutschrift muss auf alle (Neben-)Produkte des Systems aufgeteilt werden.

Anhang H der PEFCR (Version 6.3, 2018) unterscheidet drei verschiedene Fälle, die entweder ein Waldsystem oder eine Kombination aus einem Wald- und einem Produktsystem beschreiben. Alle Fälle, in denen ein Kredit per se denkbar ist, haben einige Annahmen gemeinsam: Ein Wald (System) wird neu gepflanzt (die Speicherzeit beginnt mit der Kohlenstoffaufnahme im Wald durch Photosynthese) und die kombinierte Speicherdauer von Produkt und Wald beträgt mehr als 100 Jahre. Dabei ist zu beachten, dass die Speicherdauer "rückwärts" gerechnet werden muss, von dem Zeitpunkt an, an dem das Produkt (oder das kombinierte System) den EoL erreicht.

Ein Beispiel: Ein Waldsystem wird 120 Jahre lang nachhaltig bewirtschaftet. Nach der Logik des PEF-Leitfadens entspricht die Menge an Kohlenstoff, die in Wirklichkeit für einen Zeitraum von 100 Jahren gespeichert wird, der Menge an Kohlenstoff in diesem Wald 20 Jahre nach dem Pflanzen des ersten Baumes (120-100 Jahre). Jede andere Kohlenstoffspeicherung innerhalb desselben Waldes nach dem Jahr 20 kann - per Definition - nicht die 100-jährige Speicherdauer erreichen und ist daher nicht für ein Credit geeignet. In diesem Sinne macht der PEF keinen Unterschied zwischen einer natürlichen Kohlenstoffsénke (Wald) und einer Kohlenstoffsénke in der Technosphäre (Produkt). Dementsprechend spielt es keine Rolle,

ob z.B. ein Waldsystem über einen Zeitraum von 120 Jahren bewirtschaftet wird, oder ob der Wald nur 60 Jahre steht und zusätzlich 60 Jahre lang Kohlenstoff in einem Folgeprodukt speichert.

Der Anhang H der PEFCR (v 6.3, 2018) enthält einige zusätzliche Beispiele, die helfen zu verstehen, wo eine Gutschrift anwendbar ist, und die auch die Höhe der möglichen Kohlenstoffgutschrift veranschaulichen.

2.3.2.5 Weitere Ansätze aus der Literatur

Andere Ansätze aus der Literatur (Soimakallio et al. 2022b) erarbeiteten eine umfassende Literaturrecherche zu Substitutions- und Kohlenstoffspeicherungseffekten von holzbasierten Produkten. Die Studie schlägt schließlich eine fundierte Lösung vor, wie man die zeitliche C-Speicherung durch biobasierte Produkte unterschiedlicher Lebensdauer zuordnen kann. Die Begründung bezieht sich auf die folgende Tatsache: Es ist allgemein üblich, dass Nicht-CO₂-THGs in Kohlendioxid-Äquivalente umgerechnet werden, indem man ihren kumulativen Strahlungsantrieb über 100 Jahre verwendet. Es kann gerechtfertigt sein, die gleiche Grundlage für die vorübergehende Kohlenstoffspeicherung und die verzögerten Emissionen in der Lebenszyklusbewertung anzuwenden.

(Soimakallio et al. 2022b) verweisen auf (Helin et al. 2016), die berechnen, dass eine vorübergehende Kohlenstoffspeicherung von 5, 10, 20, 40, 60 oder 80 Jahren zu einem um etwa -5 %, -9 %, -17 %, -34 %, -52 % und -72 % geringeren kumulativen Strahlungsantrieb über 100 Jahre führt, verglichen mit der sofortigen Freisetzung der gleichen Menge Kohlendioxid (Abbildung 5). Solche Informationen können verwendet werden, um die vorübergehende Kohlenstoffspeicherung in der Lebenszyklusbewertung zu charakterisieren. So entspricht beispielsweise eine Emission von 100 kg CO₂ nach 40 Jahren Lagerzeit einer sofortigen Emission von 66 kg CO₂ [$100 \text{ kg CO}_2 \cdot (1 - 0,34)$].

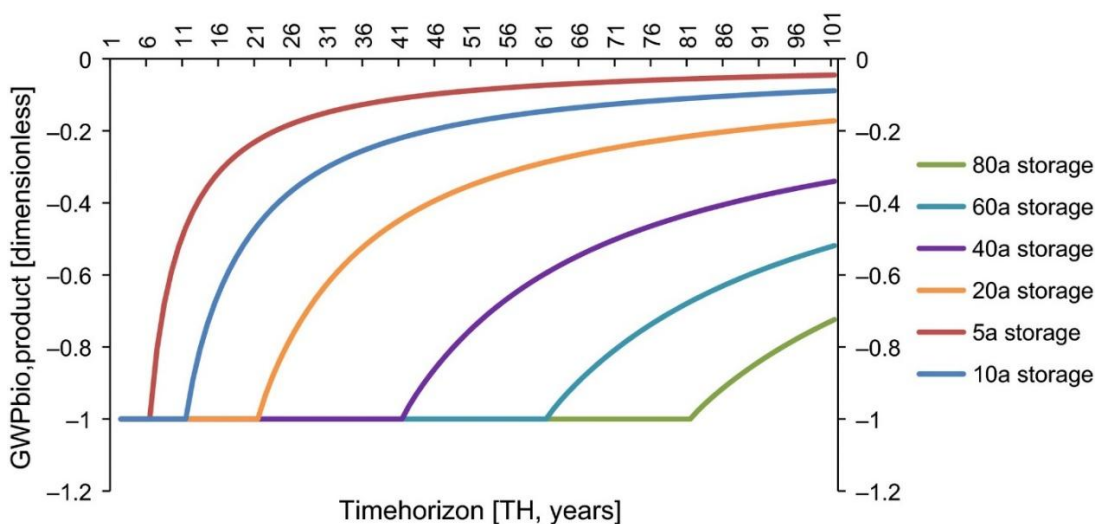


Abbildung 5: Zeitabhängiger Gewichtungsfaktor auf der Grundlage des kumulativen Strahlungsantriebs und ausgedrückt als globales Erwärmungspotenzial (GWP_{bio}) für verschiedene (5, 10, 20, 40, 60 und 80 a) temporäre Lagerungszeiten von Kohlenstoff in geräucherten Holzprodukten (nachgedruckt aus (Helin et al. 2016)).

Aus dem Ansatz von (Helin et al. 2016) leiten sich für die betrachteten groben Halbwarengruppen die in Tabelle 2 ab. Da der Modellansatz das gesamte System von Waldwirtschaft über die Verarbeitung und Verwendung des Holzes sowie dem Endverbleib der Produkte (Altholz) umfasst, sind auch die verschiedenen Recycling- und Kaskadennutzungen (zumindest nach dem Status quo) mit abgebildet. Zwar bildet der Rohstoff-Input eines Jahres die Basisgröße für die Bilanz. Diese schließt aber auch den Verbleib des gesamten Materials ein, auch bis zum Lebenswegende nach langer Nutzungsphase sowie der Nutzung in einem zweiten Lebensweg. Mit dem Ansatz von Speicherfaktoren für die einzelnen Produkte auf Halbwaren werden somit auch Folgeprodukte über Recycling- und Kaskadennutzungen mit abgedeckt.

Tabelle 2: Geschätzte Nutzungsdauer und damit verbundener Zeitabhängiger Gewichtungsfaktor für temporäre Lagerungszeiten von Kohlenstoff in geernteten Holzprodukten; Quelle: IPCC und (Helin et al. 2016).

	Nutzung	Lebensdauer Jahre	Faktor zur Anrechnung eines temp. Speicher	Speicherfaktor g CO ₂ /kg C im Produkt
Schnittholz	Baustoff	70	0,65	-2.380
	Möbel	45	0,53	-1.940
	Verpackung	6	0,03	-110
Holzwerkstoffe	Baustoff	60	0,4	-1.470
	Möbel	35	0,25	-917
	Verpackung	6	0,03	-110
Papier, Pappe, Karton	Verpackung	3	0,0	0
	Papier	10	0,08	-293

2.3.3 Gewählte Ansätze für DIFENS

2.3.3.1 Ansatz für den CO₂-Speicher im Wald

Für die Integration der Speicherleistung des Waldes in das auf Produkte der Waldwirtschaft bezogene System gibt es bisher wenige beispielhafte Ansatzpunkte. Das Projekt DIFENS bietet mit den Ergebnissen aus Teilprojekt 2 einen Ansatz, die Netto-Speicherleistung des Waldes wie sie in Kapitel 2.3.1.4 abgebildet ist, zu übernehmen. Dies bedeutet für folgende Zeiträume folgende Nettowerte:

- 2020 bis 2040: 7 Mio. t CO₂ pro Jahr als Nettoquelle
- 2041 bis 2050: -8 Mio. t CO₂ pro Jahr als Nettosenke.

Diese Werte werden der informationshalber mit in die Betrachtung einbezogen.

Der alternative Ansatz über den CO₂-Speichersaldo zu gehen, wird für die vorliegende Aufgabenstellung eher als unpassend gewertet, da der Untersuchungsgegenstand hier nicht die Produkte im Einzelnen sind, für die ansonsten vollständige Lebenswegbilanzen erstellt

würden. In solchen wäre die Einbeziehung von kontrafaktischen Effekten formal korrekt. Insbesondere wäre es konsistent, wenn als gleichfalls kontrafaktischer Effekt die Substitution eines alternativen Produktes vollständig und direkt eingerechnet wird. Für die Waldsenke würde die bedeuten: welcher Zuwachs an Holz und damit CO₂-Speicher entgeht durch die Entnahme des Holzes zur Deckung des Bedarfs im Nutzungsszenario?

Da hier der Untersuchungsgegenstand jedoch das Stoffstromsystem (Waldbau plus alle Arten der Holznutzung) darstellt und nicht die Produkte im Einzelnen, wird dieser kontrafaktische Ansatz hier nicht als passend erachtet. Ebenso wenig werden im Teilsystem Substitution hier der Gesamtheit die THG-Lasten von Holzprodukten mit hypothetischen Substitutprodukten gegengerechnet (siehe Kapitel 2.4.1).

2.3.3.2 Ansatz für den CO₂-Speicher in Produkten

Für den hier anzuwendenden Ansatz stehen zwei Optionen zur Auswahl. Mit der ersten wird die Methodik nach IPCC angesetzt.

Mit einer zweiten Variante wird auf das Datenwerk zurückgegriffen, das mit dem Holzmarktmodell in Teilvorhaben 1 (Mantau 2025) direkt im Rahmen dieses Vorhabens erstellt worden ist. Dieses Datenwerk enthält über die Zeitreihe konkret Angaben zu den Mengen an Produkten, die jährlich in den Markt fließen und den Mengen an Altholz, das ebenfalls jährlich wieder aus dem Markt herausfließt – das teilweise wieder über Recycling in den Rohstoffmarkt zurückgeht, aber zum größeren Teil energetisch genutzt wird und damit seine Speicherfunktion verliert. Dieser Ansatz wird daher hier als primäre Grundlage verwendet, da sie vollständig konsistent mit den Stoffstrommodell ist. Ergänzt muss der Ansatz mit Faktoren für den Kohlenstoffgehalt der Produkte. Außerdem begrenzt sich das Modell hier auf die längerlebenden Produkte, d.h. Holz im Baubereich und Möbel, die sich auch im Altholz wiederfinden.

Die Ergebnisse nach der IPCC werden zur Information mit dargestellt und diskutiert.

2.4 Substitutionseffekte

2.4.1 Wie wird Substitution einbezogen?

Wie in Kapitel 0 bereits beschrieben, wird der Aspekt der Substitution in Form eines eigenen Teilsystems (Block B) betrachtet. Die Vorstellung von Substitution ist keine inhärente Eigenschaft des auf Waldholz basierenden Produktionssystems, sondern folgt vielmehr dem Gedankenspiel: Auf welcher Basis würde von der Volkswirtschaft ein Produkt oder eine Dienstleistung erzeugt werden, wenn das vorhandene Produkt auf Basis von Holz nicht erzeugt und zur Verfügung gestellt werden könnte. Es handelt sich um einen sogenannten *konsequenziellen* Ansatz, was anders ausgedrückt bedeutet, dass der Systemraum erweitert werden muss.

Das Gedankenspiel, die gesamte Menge an Holz stünde nicht mehr zur Verfügung und alle aktuell daraus erzeugten Produkte müssten durch andere, i.d.R. nicht-erneuerbare Rohstoffe erzeugt werden, ist eine **extrem hypothetische Annahme** und bildet nicht den Grundansatz für die Bilanzen in dieser Studie. Exemplarisch soll dieser Fall dennoch einmal dargestellt werden, um die Dimensionen der Umweltwirkungen – einmal auf Basis Holz, einmal gänzlich ohne Holz – zu verdeutlichen. Die Gesamtheit an Holzprodukten wird hierzu der Wirkung von funktionsgleichen Produkten aus Metall, Beton, Kunststoff, Strom aus Mix ohne Holzkraftwerke, Wärme aus Erdgas gegenübergestellt (zu den Substitutprodukten siehe nachfolgenden Abschnitt).

Im **Grundansatz** für die Bilanzierung des Block B in dieser Studie wird von diesem hypothetischen Maximalansatz abgesehen und einer realitätsnäheren Annahme ausgegangen. Sie fügt sich außerdem in die Bilanzierung über die Zeitreihe ein und ist folgendermaßen definiert:

- Die Holzwirtschaft im Startjahr (2020) stellt mit ihren Produkten nach Art und Menge die Ausgangsbasis. Sie ist eine Realität und „substituiert“ als solche keine anderen Stoffflüsse.
- Über die Zeit verändert sich der Konsum an holzbasierten Produkten gemäß dem Holznutzungsszenario auf Teilstudie 1: Er nimmt für manche Produkte zu, bleibt für andere Produkte gleich und nimmt für wiederum andere sogar ab.
- Für die Substitutionsrechnung sind diese Änderungen nicht hypothetisch, sondern real. Sie werden hier somit bilanziert:
 - für die zusätzlichen Produkte aus Holz (z.B. mehr Konstruktionsholz im Bausektor) wird die entsprechende Menge an bisher eingesetztem und dadurch eingespartem Material (z.B. Stahl und Beton) als Gutschrift berechnet.
 - Für die Produkte, deren Menge reduziert wird (z.B. Energieholz) wird die Differenz zum Startjahr durch eine Lastschrift wegen alternativer Erzeugung der Fehlmenge bilanziert (z.B. Strom aus dem Netz – ohne Holzenergie oder Wärme auf Basis von Erdgas.)

In dem Teilsystem in Block B wird für die Bilanzierung der Substitution somit nur berücksichtigt, was **in den Jahren 2030, 2040 und 2050 jeweils zusätzlich oder weniger an Holz in den Markt kommt** und damit anderes verdrängt oder durch anderes ersetzt werden muss, bzw. welche Umweltwirkungen dadurch vermieden werden oder zusätzlich entstehen.

Bei diesem Ansatz ist außerdem zu beachten, dass die Emissionslasten für die Erzeugung dieser Alternativprodukte (Stahl, Beton, Strom aus dem Netz, Wärme) sich durch die Energiewende verringern. Die Gut- und Lastschriften werden somit auch hier bis 2050 abnehmen.

2.4.2 Basisansatz auf Halbwarenebene

Als Output der Bilanzrechnungen steht eine Liste an holzbasierten Produkten auf der Halbwarenebene. In einem **ersten Schritt** werden die Produkte identifiziert und definiert, die durch diese holzbasierten Produkte substituiert werden können. Dabei werden Kriterien wie Funktionsgleichheit und marktbezogener Zusammenhang zu Grunde gelegt und bei der Ableitung von Substitutionspaaren dargelegt. Dabei werden die konkreten Bauelemente zur Erzielung der Funktionsgleichheit definiert. Der Rahmen wird hier so weit wie möglich gefasst, um auch innovative Ansätze einzubeziehen. Somit werden folgende Anwendungen abgedeckt:

- „klassische“ etablierte Holzanwendungen (z.B. Bauholz aus massivem Nadelholz, Holzmöbel),
- innovative Ansätze in klassischen Anwendungen (z.B. Leimholzträger aus Laubholz),
- bereits teilweise etablierte doch mit Ausbaupotenzial versehene Anwendungen (z.B. Dämmmaterial aus Holzfasern, Viskosefasern im Textilbereich),
- noch am Anfang stehende Entwicklungen mit hohem Innovationspotenzial (z.B. Biomaterialien, Biochemikalien)

In einem **zweiten Schritt** wird jeweils die funktionale Äquivalenz bestimmt: z.B. wieviel Tonnen Stahlbeton werden durch 1 Tonne des funktional gleichen Bauelements aus Holz ersetzt. Dabei wird auf den stark auf Rohmaterial (Halbwaren) bezogenen Ansatz Betonung gesetzt (siehe Kapitel 2.1.1 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). In Tabelle 3 finden sich eine Aufstellung der Substitutprodukte für explizite Holzprodukte.

Die Halbwarengruppe Papier, Pappe, Karton (PPK) wird bei der Substitutionsrechnung außen vor aus folgenden Gründen außer Acht gelassen:

1. Substitutionsprodukte sind für diese Waren grundsätzlich schwer zu definieren; für Zeitungspapier und grafische Papiere wären elektronische Medien die adäquaten Substitute, im Bereich Hygienepapiere könnten teilweise durch elektrische Händetrockner ersetzt werden, für größere Bereiche (insb. Toilettenpapier) sind Alternativsysteme in Deutschland nicht etabliert und schwer etablierbar.
2. Für solche komplexen Produktsysteme wären einzelne sehr differenzierte Produkt-Ökobilanzen weitaus angemessener als hier in einer Gesamtstoffstrombetrachtung auf Halbwarenebene.
3. Die Warengruppe ist an sich relevant, steht jedoch von Gesamtstoffstrom her betrachtet nicht im Fokus des Vorhabens und wird auch im Rahmen der Sensitivitätsanalysen im Holzmarktmodell (Teilvorhaben 1) nicht variiert.

An den letzten Punkt schließt sich auch an, dass der Stoffstrom der Papierhalbwaren auch nicht über den Verlauf bis 2050 verändert wird. Mit dem in Kapitel 2.4.1 beschriebenen Ansatz ist der Bereich PPK daher für die Substitutionsrechnung nicht relevant.

Tabelle 3: Produkte aus der Bilanz nach Halbwaren und Verwendung gegliedert mit den jeweils zugewiesenen Substitutprodukten

	Halbware	Baumarkt	Möbel	Verpackung	Sonstiges
chnittholz als Vollholz	Balken, Kanthölzer, Bohlen, Bretter, Lat-ten	Beton, Stahl	Metall, Kunststoff	Kunststoff (für Paletten)	
Schichtholz	Konstruktionsvollholz, Leimbinder	Beton, Stahl			
Holzwerkstoffe (HWS)	Spanplatte	Gipskarton, Ziegel	Metall, Kunststoff		
	MDF / HDF	Wie Spanplatte	Wie Spanplatte		
	OSB	Wie Spanplatte			
	LDF (Dämmstoff)	Mineralwolle, Polystyrol (EPS)			
	Sperrholz	-	-	Kunststoff	
Chemikalien (Methanol)					Fossil basiert
Strom					Strommix nach Prognose
Wärme					(Fern-)Wärme-mix/Erdgas

Zusammenstellung: ifeu

In einem **dritten Schritt** wird nun auch auf der Ebene der Substitution die Verbindung zu den Szenarien aus AP 1 und AP 2 hergestellt. Die Holzanwendungen im Bestand entsprechen dabei dem Basisszenario. Für die anderen Szenarien werden die sich verändernden Produktströmen entsprechend verändernden Substitutionsprodukte abgeleitet. Die Lebenswegbilanzen dieser Substitutionsprodukte werden – je nach Fall als Last- oder als Gutschrift – in die Gesamtbilanz einbezogen.

2.4.3 Verwendete Emissions- und Äquivalenzfaktoren

In Tabelle 4 sind die THG-Emissionsfaktoren zusammengestellt, die für die Substitutionsrechnung angesetzt wurden. In dem UBA-Vorhaben REFINE wurden auch für die anderen Umweltwirkungskategorien die spezifischen prospektiven Daten erarbeitet.

Tabelle 5 enthält die Äquivalenzfaktoren für die Herstellung der gleichen Funktionalität der holzbasierten Halbwaren und der Substitutprodukte.

Tabelle 4: Emissionsfaktoren für Substitutprodukte mit prospektiven Daten (Quelle: das REFINE-Modell von (Dittrich et al. 2025))

	Einheit	2020	2030	2040	2050
Beton	kg CO ₂ eq/m ³	0,654	0,551	0,356	0,22
Stahl primär	kg CO ₂ eq/kg	1,80	1,66	1,35	0,28
Stahl sekundär	kg CO ₂ eq/kg	0,564	0,364	0,207	0,075
Alu, primär	kg CO ₂ eq/kg	14,42	8,65	5,13	1,75
Alu, sekundär	kg CO ₂ eq/kg	0,698	0,432	0,252	0,043
Kunststoff	kg CO ₂ eq/kg	2,10	1,67	1,20	0,27
Mineralwolle	kg CO ₂ eq/kg	1,28	1,05	0,55	0,38
Strom	kg CO ₂ eq/MJ	0,151	0,047	0,019	0,002
Wärme (Erdgas)	kg CO ₂ eq/MJ	0,051	0,047	0,036	0,003

Tabelle 5: Äquivalenzfaktoren und and Festlegungen zu den Substitutprodukten (Quelle: ifeu Datenbank)

	Einheit
Beton in Stahlbeton	0,23 kg/kg
Stahl in Stahlbeton	4,73 kg/kg
Stahl als Träger	1,33 kg/kg
Alu in Möbel	0,70 kg/kg
Relation Alu primär/sekundär	50/50
Kunststoff in Möbel	0,4 kg/kg
Kunststoff EPS	0,15 kg/kg
Mineralwolle	0,93 kg/kg
Relation EPS/Mineralwolle	50/50
Strom	1 MJ/MJ
Wärme (Erdgas)	1 MJ/MJ

2.4.4 Detailliertere Beispielbetrachtung von Substitutionspaaren

Der grundsätzliche Ansatz auf Halbwarenebene bedingt eine Unschärfe wie im Eingangskapitel beschrieben. Die Frage ist, welche Unterschiede sind zu erwarten in der Bilanz, wenn man bis zur Endwarenebene geht.

Dies ist v.a. dort wichtig, wo die Halbwarenebene was die Fertigungsschritte und den weiteren Materialinput noch weit von der Endware entfernt ist. Es werden daher verschiedene Fallbetrachtungen in die Untersuchung mit einbezogen, anhand derer der Unterschied zwischen der Halbwaren- und der Endwarenebene in der THG-Bilanz ausgeleuchtet wird.

Folgende Beispiele werden betrachtet:

1. Konstruktionsholz für Hallenbau:

- Während im Basismodell lediglich die baulichen Grundelemente (Balken, Bretter) durch funktional analoge Elemente aus alternativen Materialien (Stahl, anderen Metalle, Beton etc.) substituiert werden, werden bei der detaillierteren Beispielbetrachtung die Herstellung eines ganzen Gewerks bilanziert für die Alternativfälle Holzbau vs. Bau mit minimalem Holzanteil.

2. Fensterbau:

- Hier wird ein Holzfenster gegen ein Aluminiumfenster bilanziert; während auf der Halbwarenebene lediglich der Holzrahmen betrachtet ist, umschließt das Endprodukt auch Glas, Beschläge, Dichtung etc. sowie die Endfertigung. Beim Vergleichsprodukt gilt entsprechendes, wobei auf der Halbwarenebene nur der Aluminiumrahmen betrachtet wird.

Auf Basis von einer definierten Rohstoffeinheit (z.B. 1.000 m³ Schnittholz) werden die Ergebnisse der beiden Ansätze – Halbwarenebene und Endwarenebene – verglichen und die Unterschiede bewertet.

3 Beschreibung des Holzstoffstroms

3.1 Übersicht

Im Teilvorhaben 1 wurde anhand des Modells TRAW die Mengenentwicklung der zukünftigen Holzverwendung abgeleitet (Mantau 2025). Basis dazu bildet ein Szenario ausgehend vom Bedarf der verschiedenen Fertigwarenspektoren, wie z.B. dem Baugewerbe. Diese Mengenströme werden in HoLCA2.0 für die ökobilanzielle Bewertung nachgebildet. Ausgehend von den üblichen volumetrischen Angaben (in m³ Rohholzäquivalente bzw. m³_{SWE}) werden für HoLCA Massenangaben (Mio. t) benötigt sowie auch Energieeinheiten (Petajoule, PJ) für die energetische Nutzung.

Abbildung 6 zeigt nochmals schematisch und grob vereinfacht, wie sich das System der Holzstoffstrommodells zusammensetzt. Daraus sind auch Recyclingschleifen und Kaskaden zu erkennen. Zur Strukturierung wird hier daher zunächst nur der Verbleib der aus dem Wald entnommenen Mengen betrachtet (Kapitel 3.2). Diese sind in Abbildung 6 durch die grünen Pfeile gekennzeichnet. Im Anschluss wird das Bild durch die sekundären Ströme (Altholz, Altpapier) vervollständigt (Kapitel 3.3).

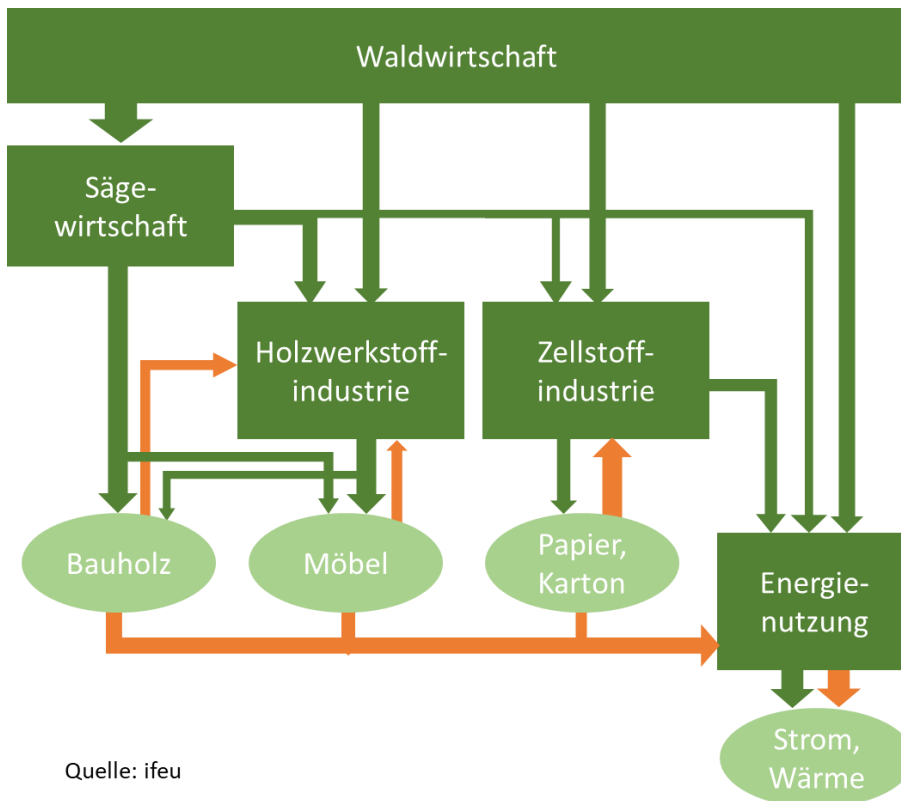


Abbildung 6: Vereinfachtes Blockfließschema der betrachteten Holzstoffströme

3.2 Stoffstrom von Waldholz

Abbildung 7 zeigt die Anteile der aus dem Wald entnommenen Holzarten und deren mengenmäßige Entwicklung. Erkennbar ist ein leichter Anstieg von 77 Mio. m³_{SWE} im Jahr 2020 auf 82 Mio. m³_{SWE} in 2050. Die Erhöhung beruht auf mehr Stammholzentnahme bei leichtem Rückgang von sonstigem Derbholz (Industrieholz, meist aus Durchforstungen).

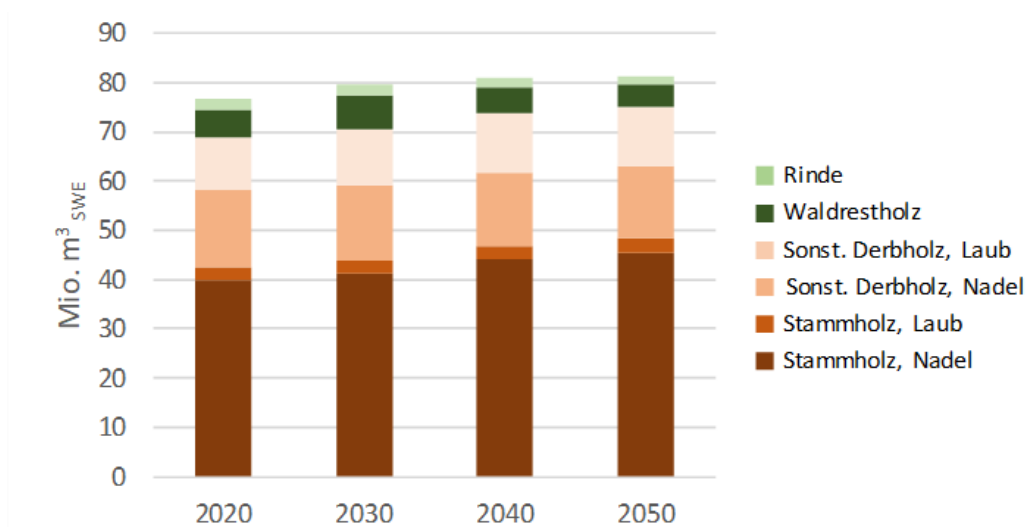


Abbildung 7: Aus dem Wald entnommene Holzarten und deren mengenmäßige Entwicklung von 2020 bis 2050 gemäß dem Basisszenario aus dem Teilvorhaben 1 (Mantau 2025).

In Abbildung 8 finden sich die Rohholzkategorien umgerechnet in die den Verwendungen zugeordneten Halbwarensektoren. Große Anteile finden sich dort in Schnittholz für den Bausektor (mit leichtem Anstieg) wieder. Während Sektoren wie Möbel und Zellstoff und Papier weitgehend konstant bleiben, nimmt der Energieholzbereich, v.a. in den in Haushalten eingesetzten Mengen ab. Als neue Nutzung kommt in begrenztem Maß die stoffliche Nutzung in der Chemie hinzu.

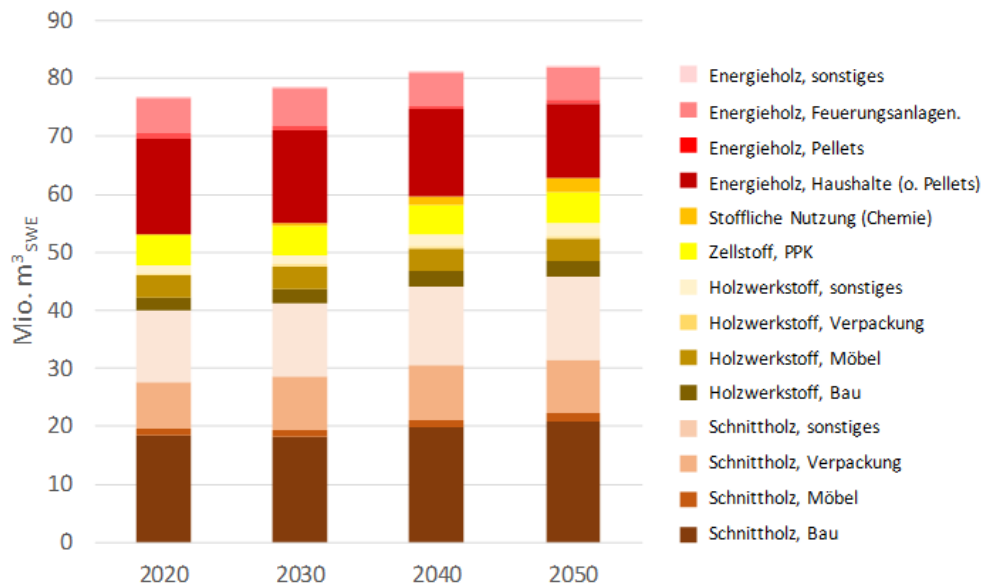


Abbildung 8: Rohholzkategorien umgerechnet in die den Verwendungen zugeordneten Halbwarensektoren und deren mengenmäßige Entwicklung von 2020 bis 2050 gemäß dem Basisszenario aus dem Teilvorhaben 1 (Mantau 2025).

3.3 Sekundäre Stoffströme

Hier sind in erster Linie Altholz und Altpapier zu nennen. Interne Abfall- und Reststoffströme wie sind in den Waldholzbilanzen des vorausgehenden Kapitels entweder enthalten (z.B. Sägenebenprodukte) oder sie werden bei der Verarbeitung z.B. als Energieträger verbraucht (z.B. Schwarzlauge in der Papierindustrie) oder es handelt sich um spezielle nebenstoffströme, die hier nicht weiter betrachtet werden (z.B. Tallöl aus der Zellstoffindustrie).

Abbildung 9 zeigt die Aufkommensentwicklung und die Verwendung von Altholz entsprechend der mengenmäßigen Entwicklung von 2020 bis 2050 nach Basisszenario aus dem Teilvorhaben 1 (Mantau 2025). Der Zuwachs ergibt sich aus dem ansteigenden Anteil an stofflicher Nutzung bei steigender Altholzerfassung. Die Verwendung wird dabei proportional gleich belassen. In einem der Szenarien zur Sensitivitätsanalysen wird die Erfassung von Altholz weiter erhöht, wodurch aus dem, Wald entnommenes, sonstiges Derbholz verringert wird.

Im Jahr 2020 setzte die Papierindustrie 13,6 Mio. m³_{SWE} in Form von Altpapier ein. Bezogen auf die Inputmenge der Produktion sind das insgesamt 63,7 % Altpapieranteil. Der Anteil an Frischzellstoff beträgt 22 %, der Anteil an Additiven 14,3 %. Die Entwicklung der Endwarenspektoren hat dabei großen Einfluss, da diese in sehr unterschiedlichen Anteilen Altpapier einsetzen. Gemäß dem Basisszenario geht die Gesamtproduktion bis 2050 zurück, sodass dann nur noch ca. 10 Mio. m³_{SWE} Altpapier anfallen.

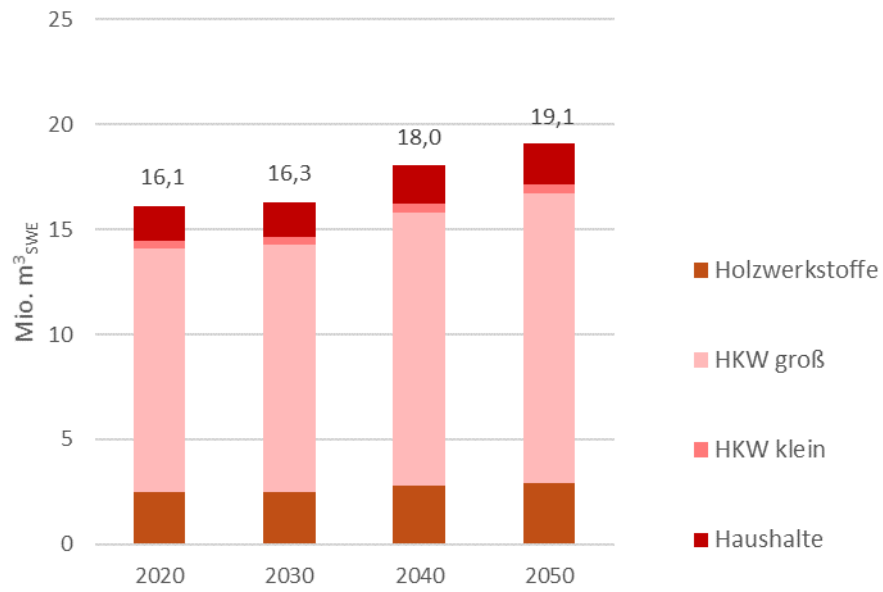


Abbildung 9: Aufkommen und Verwendung von Altholz; mengenmäßige Entwicklung von 2020 bis 2050 gemäß dem Basisszenario aus dem Teilvorhaben 1 (Mantau 2025).

4 Bilanzergebnisse der Szenarien

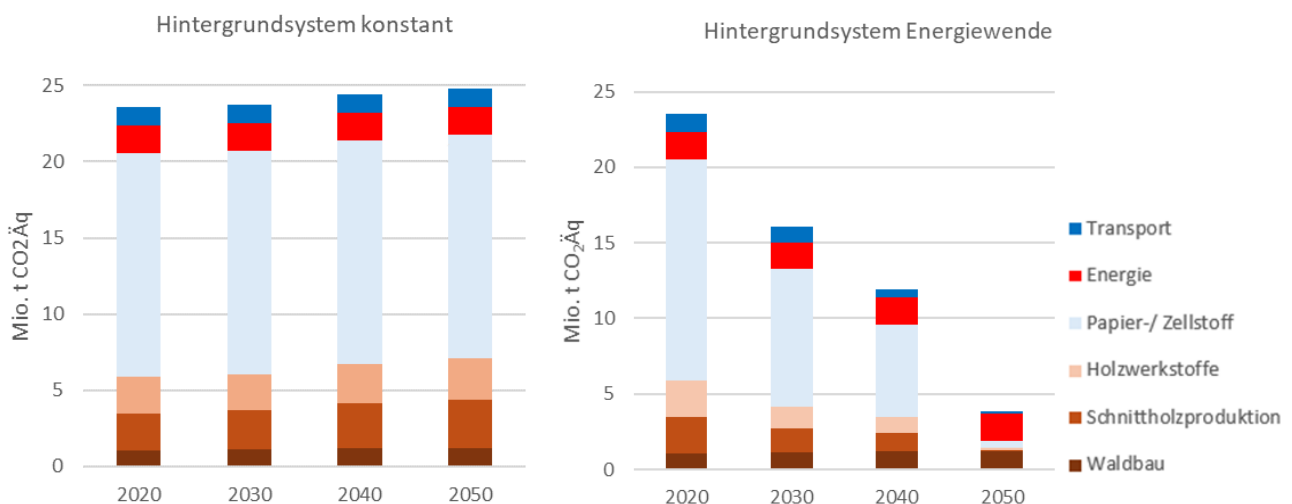
4.1 Bilanzen der Holzwirtschaft (Block A)

4.1.1 Treibhausgasemissionen

Im Jahr 2020 belaufen sich die Treibhausgasemissionen der Holzwirtschaft auf 23 Mio. t CO₂Äq. Damit nimmt der Zellstoff- und Papiersektor allein 70 % ein. Deutlich geringer ist der Beitrag von Schnittholz- und Holzwerkstoffen. Bei der Energienutzung sind hier nur die Emissionen an Methan und Lachgas (N₂O) angerechnet.

Abbildung 10 zeigt die Entwicklung bis 2050 unter zwei unterschiedlichen Annahmen: Auf der linken Seite mit der Annahme, dass die Energiewende nicht stattfindet, d.h. die Emissionsfaktoren des Hintergrundsystems bleiben konstant. Auf der rechten Seite wird von der Energiewende ausgegangen und dass das Energiesystem sukzessive ganz auf erneuerbare Quellen umsteigt und Industrieprozesse wie auch der Verkehr emissionsneutral werden.

Während links die Emissionen aufgrund der Erhöhung der Holzentnahme und damit des Volumens der Holzwirtschaft ebenfalls leicht ansteigen, gehen die Emissionen auf der rechten Seite in allen Bereichen deutlich zurück und liegen im Jahr 2050 noch bei 10 % gegenüber 2020. Dabei zeigen die Emissionen der Energieholznutzung kaum einen Rückgang, da die Methan- und Lachgasemissionen nur schwer technisch zu vermeiden sind.



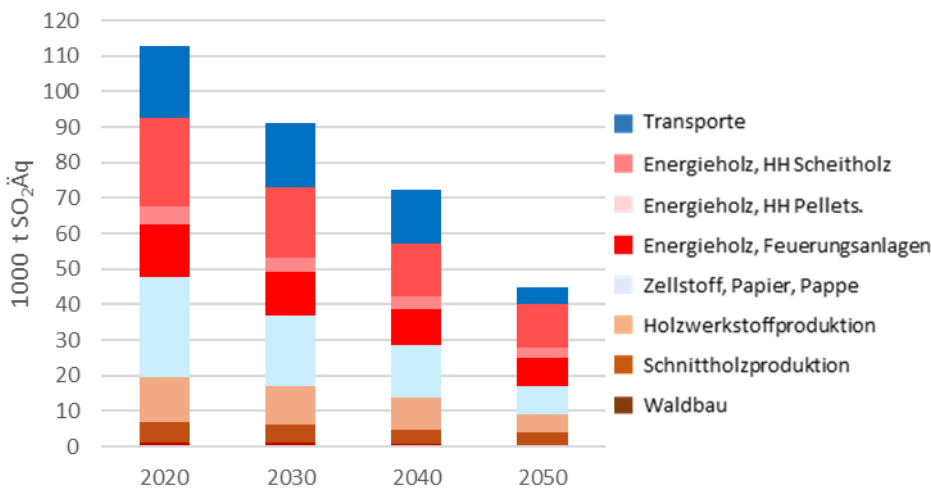
HH: Haushalte; Berechnungen und Darstellung: ifeu

Abbildung 10: Treibhausgasemissionen durch die Holzwirtschaft (Block A) in den Jahren 2020, 2030, 2040, 2050; linke Seite unter Annahme, die Energiewende findet nicht statt; rechte Seite unter der Annahme, die Energiewende findet statt.

Da im Rahmen dieser Studie grundsätzlich von der Umsetzung der Energiewende ausgegangen wird, bleibt die Darstellung in Abbildung 10 (links) nur hierbeispielhaft auf die THG-Emissionen beschränkt.

4.1.2 Versauerung

Bezüglich der Versauerung werden saure Abgase wie Stickstoffoxide (NO_x) und Schwefeldioxid (SO₂) sowie Ammoniak (NH₃) betrachtet. Sie zeigen ein ähnliches Bild wie die Feinstaubemission. Die Emission im Jahr 2020 liegt ebenfalls um die 110 t SO₂Äq. und auch hier ist die Papierindustrie besonders relevant. Die Verhältnisse liegen hier ähnlich. Neben verbesserter Abgasreinigung kommt hier auch der Wechsel von Verbrennungstechniken zu alternativen Quellen (auch beim Transport) eine Rolle.

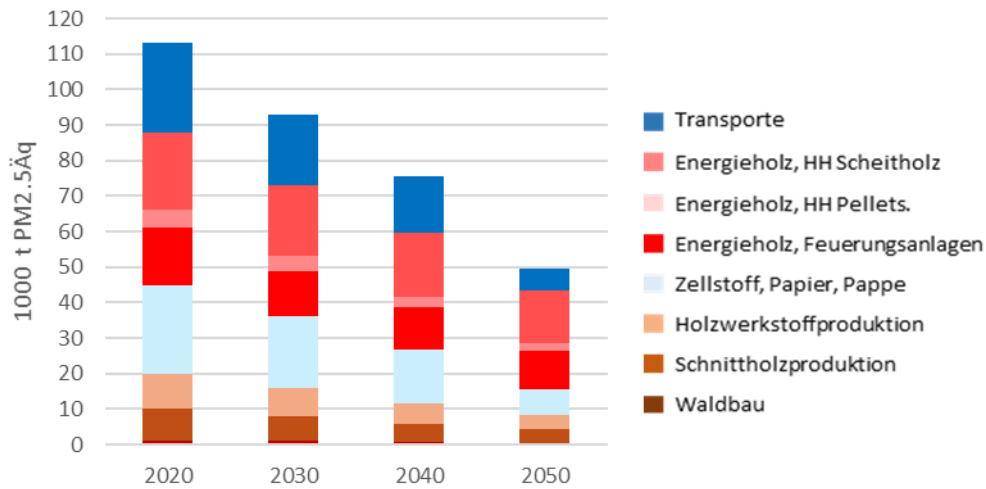


HH: Haushalte; Berechnungen und Darstellung: ifeu

Abbildung 11: Versauerungspotenzial durch die Holzwirtschaft (Block A) in den Jahren 2020, 2030, 2040, 2050.

4.1.3 Feinstaub

In den Feinstaubemissionen sind nicht nur primäre Feinstaubpartikel, sondern auch sogenannte Sekundärpartikel aus verschiedenen Luftverunreinigungen wie NO_x, SO₂, NH₃ und organische Gase berücksichtigt. Insgesamt beläuft sich die Emission im Jahr 2020 auf 110 t PM_{2,5}Äq. Hauptquelle sind hier die Energieprozesse. Da auch die Papierindustrie sehr energieintensiv ist, liegen auch dort wiederum große Emissionsbeiträge. Die Emissionsminderung über die Zeit ist wie bei der Versauerung deutlich geringer als bei den Treibhausgasemissionen. Verbesserungen bei der Abgasreinigung werden berücksichtigt, doch sind die Minderungseffekte begrenzt.



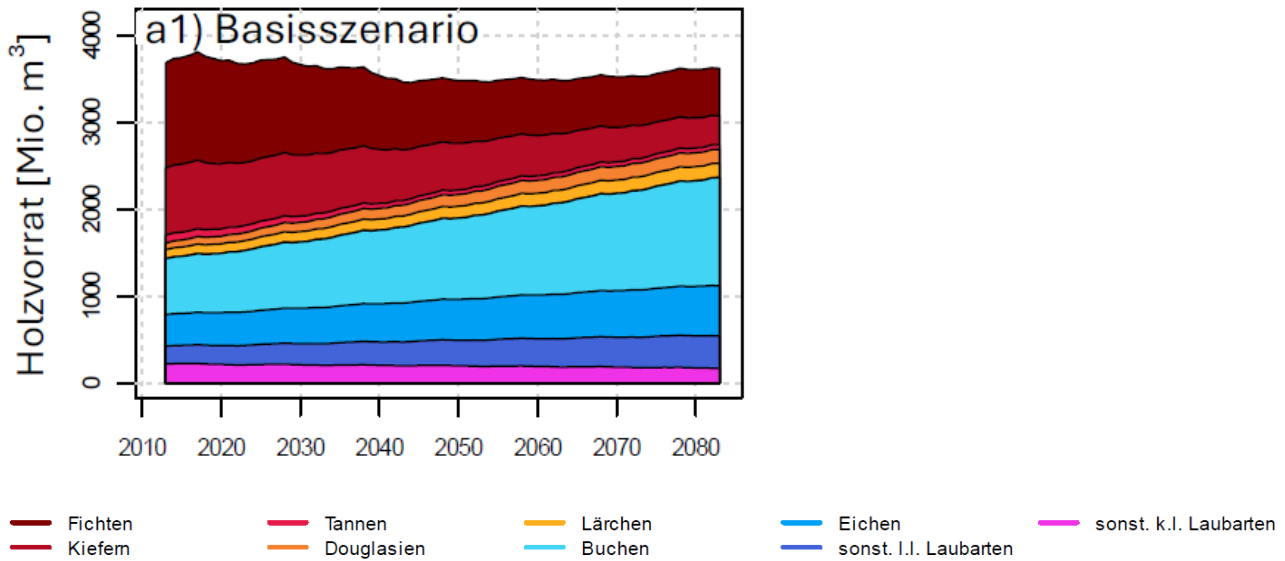
HH: Haushalte; Berechnungen und Darstellung: ifeu

Abbildung 12: Feinstaubbelastung (PM_{2,5}Äq.) durch die Holzwirtschaft (Block A) in den Jahren 2020, 2030, 2040, 2050.

4.1.4 Flächenbelegung - Hemerobie

Die Flächenbelegung wird in diesem Fall fast vollständig durch die Waldfläche bestimmt. Andere Fläche, die z.B. durch Infrastruktur (Sägereien, Papierfabriken, Verkehrswege für den Transport von Holz) in Anspruch genommen werden, sind in dieser Bilanz dagegen vernachlässigbar.

Die Waldfläche in Deutschland beträgt 11,5 Mio. ha und verändert sich im Zuge der Szenarien von DIFENS nicht. Durch veränderte Waldbewirtschaftung insbesondere durch Umbau in Richtung naturnähere Baumartenauswahl verändert sich jedoch die ökologische Bewertung des Waldes. Im Teilbericht 2 (Pfeiffer et al. 2025) wurden unterschiedliche Waldumbauszenarien simuliert wie z.B. die gezielte Förderung der Douglasie, die intensivere Einbringung klimaresilienter Laubhölzer, sowie eine Kombination aus Laubbaumförderung und angepasster Holzentnahmestrategie. In all diesen Variationen wie auch im Basisszenario erfolgt ein klarer Trend von verringerten Nadelholzbestand hin zu höherem Laubholzbestand. Wie Abbildung 13 zeigt, kehrt sich das Verhältnis von ca. 60 zu 40 auf ca. 47 zu 53 um. Wobei die Zahlen sich auf den Holzvorrat beziehen und nicht direkt auf die bestockte Fläche. Sie kann jedenfalls als Anhaltspunkt für die Betrachtung hier dienen.



Quelle: (Pfeiffer et al. 2025)

Abbildung 13: Vorratsentwicklung nach Baumarten im Basisszenario

Der sogenannte Hemerobie-Ansatz kann die Veränderung der Naturnähe bzw. Naturferne hier eingeordnet werden. Der Ansatz wurde bereits in den 1990er Jahren für die Bewertung von Waldbau entwickelt und ist auch methodische Grundlage für den sogenannten Flächenrucksack aus einem UBA-Vorhaben (Fehrenbach et al. 2021a). Daten zur Ist-Situation wurden dazu im Datenband (Fehrenbach et al. 2021b) bereitgestellt. Danach wird die Waldfläche nach dem derzeitigen Zustand wie folgt eingestuft:

- 6,7 % der Waldfläche in Klasse II
- 10,9 % der Waldfläche in Klasse III
- 66,5 % der Waldfläche in Klasse IV
- 15,9 % der Waldfläche in Klasse V

Nach der Hemerobie-Methode ergibt sich daraus ein mittlerer Hemerobiefaktor von 0,132 m² künstliche Flächen-Äquivalente pro m². Multipliziert man diesen mit der Waldfläche Deutschlands ergibt sich ein Naturfernepotenzial (NFP) von insgesamt 1,52 Mio. ha aF-Äq.

Durch die Verschiebung von umfangreichen Fichten- und Kieferbeständen mehr in Richtung Buche, wie in Abbildung 13 zu sehen und unter Annahme von verringerten Intensitäten der Bewirtschaftung ist folgende Verlagerung der Relationen bis 2050 möglich:

- 10 % der Waldfläche in Klasse II
- 30 % der Waldfläche in Klasse III
- 55 % der Waldfläche in Klasse IV
- 5 % der Waldfläche in Klasse V

Daraus ergibt sich Naturfernepotenzial (NFP) von insgesamt 1,19 Mio. ha aF-Äq. Die Verringerung der Hemerobie beträgt dabei insgesamt 22 %.

Diese Darstellungen sollen nur beispielhaft zeigen, dass mit dem Waldumbau in Linie mit den DIFENS Szenarien auch Effekte in Richtung höhere Naturnähe bzw. Reduktion der Hemerobie und somit auch eine Verbesserung der Situation für die natürliche Biodiversität verbunden ist.

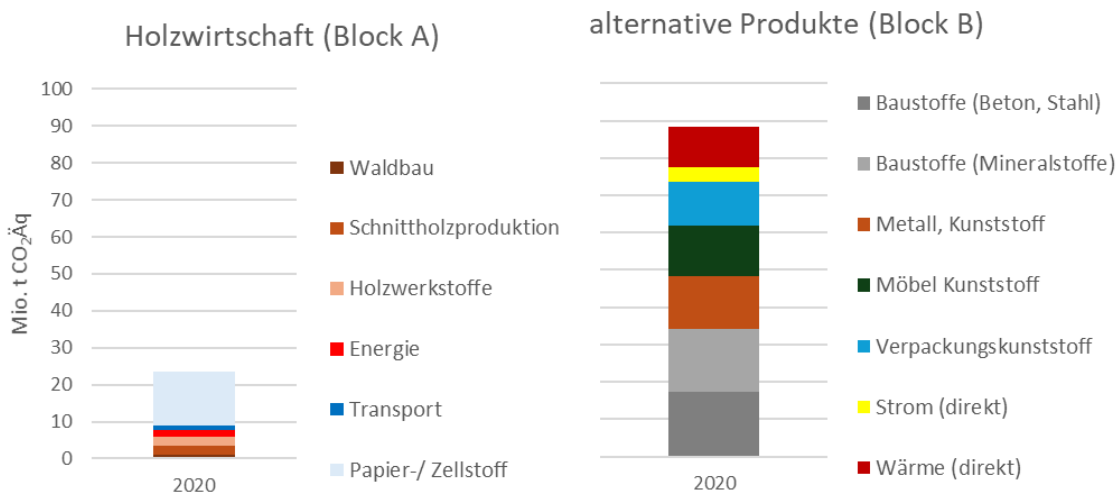
4.2 Bilanzen mit Substitutionsrechnungen (Block B)

4.2.1 Annahme: Vollständige Substitution

Wie in Kapitel 2.4.1 beschrieben, wird zunächst die hypothetische Annahme einer vollständigen Substitution zu Grunde gelegt. Dies wird hier exemplarisch für die Treibhausgasemissionen durchgerechnet, um die Dimensionen der Umweltwirkungen durch Bereitstellung funktionsanaloger Halbwaren, einmal auf Basis Holz, einmal ohne Holz – zu verdeutlichen. Dies ist in Abbildung 14 dargestellt:

- Auf der linken Seite: die THG-Emissionen durch die Holzwirtschaft (Block A) für das Jahr 2020 belaufen sich auf insgesamt 23,5 Mio. t CO₂-Äq, lässt man die Papier- und Zellstoffprodukte außen vor, sind es 8,9 Mio. t CO₂-Äq.
- Auf der rechten Seite: die THG-Emissionen durch die Herstellung funktionsanaloger Halbwaren auf fossiler oder mineralischer Basis (Teil B) belaufen sich – ohne analoge Produkte für Papier- und Zellstoffprodukte – auf 88 Mio. t CO₂-Äq.

Führt man das Gedankenspiel der oben aufgestellten Hypothese zu Ende, so kann man schließen: Stünde Holz als Rohstoff nicht zur Verfügung, würden zur Deckung des gleichen Bedarfs an Gütern und Dienstleistungen die zehnfache Menge an Treibhausgasen emittiert werden. Wobei hier der Bereich der Papier- und Zellstoffprodukte, wie erwähnt, auβervor gelassen ist.



Berechnungen und Darstellung: ifeu

Abbildung 14: Gegenüberstellung der THG-Emissionen durch die Holzwirtschaft (links, Block A) und durch die Herstellung der analogen Produkte auf fossiler oder mineralischer Basis (rechts, Block B) im Jahr 2020; Block A enthält zur Information auch die Emissionen des Papier- und Zellstoffsektors, hierfür ist in Block B kein Analogon berücksichtigt.

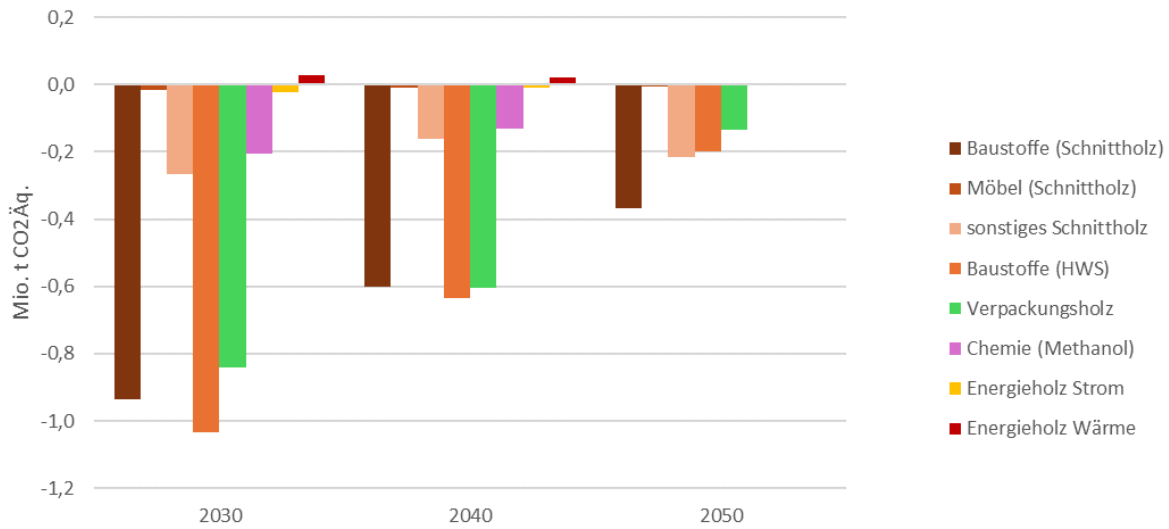
4.2.2 Substitution gemäß Grundansatz

Wie ebenfalls in Kapitel 2.4.1 beschrieben, ist der **Grundansatz** für die Bilanzierung des Block B in dieser Studie wie folgt definiert: von diesem hypothetischen Maximalansatz abgesehen und einer realitätsnäheren Annahme ausgegangen. Sie fügt sich außerdem in die Bilanzierung über die Zeitreihe ein und ist folgendermaßen definiert: für die Bilanzierung der Substitution lediglich berücksichtigt, was in den Jahren 2030, 2040 und 2050 jeweils zusätzlich oder weniger an Holz in den Markt kommt. Es wird davon ausgegangen, dass diese Mengen somit andere Produkte verdrängen bzw., wenn sie entfallen, durch anderes ersetzt werden muss. Die daraus entstehenden vermiedenen oder zusätzlich Umweltwirkungen werden hier abgebildet.

Die Daten für die Substitutionsrechnung können den Tabellen in Kapitel 2.4.3 entnommen werden. Abbildung 15 zeigt die resultierenden Gutschriften und Lastschriften durch die Anrechnung von substituierten Produktionsprozessen für die zusätzlichen bzw. verringerten Produktmengen gegenüber dem Ausgangsstand in 2020.

Die größten Gutschriften werden dabei durch den Holzeinsatz im Bau erzielt: Für das zusätzlich verbaute Schnittholz werden im Jahr 2030 etwa 940.000 t CO₂Äq. durch Ersatz von Stahl und Beton eingespart. Durch Holzwerkstoffe (v.a. als LDF-Platten zur Dämmung und Substitution von Mineralwolle und EPS-Platten) werden sogar etwas mehr als 1 Mio. t CO₂Äq. vermieden. Auch der Zuwachs an Verpackungsholz führt bei Verdrängung von Kunststoff zu hohen Reduktionen. Niedrigere Gutschriften werden durch sonstiges Schnittholz und holzbasierte Basischemikalien (hier als Methanol) erzielt. Sehr gering – sowohl als Gutschrift wie auch als Lastschrift – zeichnen die zusätzlichen oder wegfallenden energetischen Nutzungen ab. Da bei Möbeln kaum Veränderungen der Produktionsmengen erfolgen, sind die entsprechenden Gutschriften auch hier sehr klein.

Durch die Energiewende werden die Substitutionen wie auch bei den Emissionen der Holzwirtschaft (Block A) über die Jahre geringer, gehen aber nicht auf Null zurück.



Berechnungen und Darstellung: ifeu

Abbildung 15: Gutschriften und Lastschriften durch die Anrechnung von substituierten Produktionsprozessen für die zusätzlichen bzw. verringerten Produktmengen gegenüber dem Ausgangsstand in 2020.

In Abbildung 16 werden die THG-Emissionen aus Block B mit denen von Block A gemeinsam dargestellt. Es zeigt sich, dass sich die jährliche Emissionslast von 2020 bis 2030, die sich bereits durch die Energiewende und die THG-Minderungen in der Wirtschaft insgesamt von 8,3 auf 6 Mio. t CO₂Äq. um weitere ca. 3 Mio. t CO₂Äq. sozusagen nochmals halbiert, rechnet man die Entlastungen durch Substitution ein. Es wird aber auch deutlich, dass sich auch die Entlastung durch Substitution bis 2050 immer weiter verringert. Zur Gesamtentlastung leistet somit die Substitution weiterhin einen Beitrag, aber einen zunehmend geringeren.

Dies setzt jedoch auch voraus, dass die Energiewende tatsächlich stattfindet. Wäre dies nicht der Fall, wäre die Bilanz in 2030 ähnlich wie in 2020, um die 9 Mio. t CO₂Äq. in Block A mit einer Gutschrift von dann etwa 5 Mio. t CO₂Äq. durch Block B. Dies bliebe dann auch etwa das Bild bis 2050.



Berechnungen und Darstellung: ifeu

Abbildung 16: Kombination von Block A (Holzwirtschaft) mit Block B (Gutschriften und Lastschriften) bis 2050.

4.2.3 Vergleich der Halbwarenebene mit der von Fertigwaren

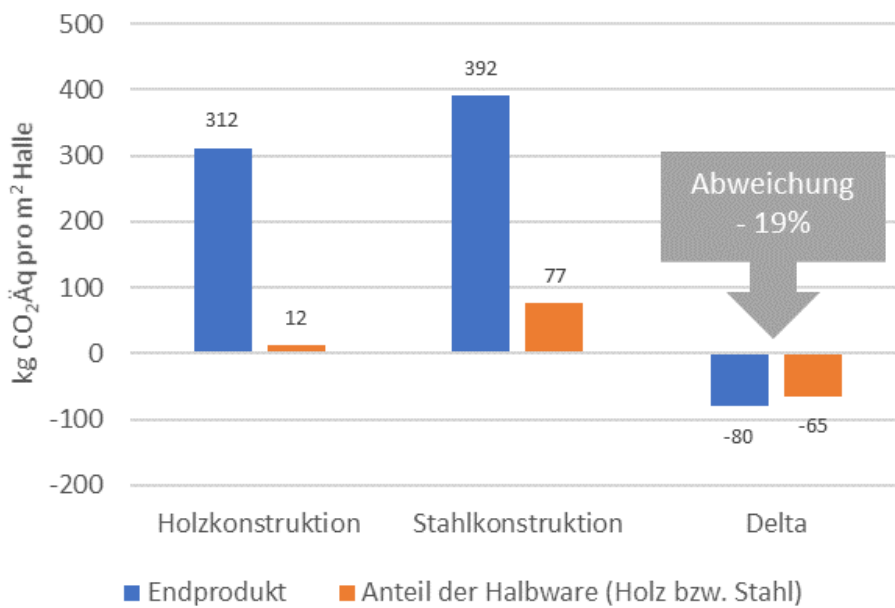
In Kapitel 2.4.4 wurde dargelegt, dass der Ansatz auf Halbwarenebenen zu Bilanzieren und Vergleiche mit Substitutprodukten anzustellen, aus Sicht einer Produkt-Ökobilanz eine zu große Vereinfachung wäre. Sie wird für die hier vorliegende Aufgabenstellung einer Gesamtbilanz des Holzstoffstroms, angesichts der Unzahl an holzbasierten Einzelprodukten, die als Endwaren vollständig durchbilanziert werden müssten, als nicht durchführbar erachtet. Das bedeutet jedoch, dass die Bilanzen mit Substitutionsrechnungen Unsicherheiten aufweisen. Wie groß diese Unsicherheiten – bzw. der Fehler in der Bilanz – ausfallen kann, soll anhand von zwei Fallbeispielen analysiert werden. Diese sind:

1. eine **Hallenkonstruktion**, in allen tragenden Elementen konstruiert aus Holz gegenüber einer gleichgroßen Halle deren tragende Elemente aus Stahl bestehen,
2. ein **Fenster** aus Holz gegenüber einem Fenster aus Aluminium bilanziert.

Dabei wurde jeweils die THG-Emission durch die Herstellung des Gesamtprodukts und die durch die Bereitstellung der jeweiligen Halbwaren (Holzbalken vs. Stahlträger und Holzrahmen vs. Aluminiumrahmen) gegenübergestellt. Die Frage ist dabei, wie stark die Ergebnisse für die Unterschiede zwischen Gesamtprodukt und Halbwarenanteilen voneinander abweichen.

4.2.3.1 Beispiel: Hallenkonstruktion – Holz vs. Stahl

Dies wird in Abbildung 17 veranschaulicht: Die Endprodukte (das sind komplette Hallenbauten) verursachen danach um die 310 kg CO₂Äq bezogen auf 1 m² Hallenfläche für eine Holzkonstruktion und ca. 390 kg CO₂Äq. für eine Stahlkonstruktion. Die Beiträge des Holzes machen dabei 12 bzw. 77 kg CO₂Äq. aus. Der Unterschied zwischen Holzbaus und Stahlbau liegt damit bei 80 kg CO₂Äq./m² für das Gesamtprodukt und bei 65 kg CO₂Äq./m² für die Halbwaren. Die Abweichung zwischen Gesamtprodukt und Halbware liegt somit bei 19 % - zu Ungunsten für das Gesamtprodukt, d.h.: der Ansatz der Bewertung auf Halbwarenebene ist eher von Nachteil für das Holzprodukt, die Ermittlung eines Substitutionseffekt damit eher konservativ.



Berechnungen durch ifeu auf Basis von Daten aus ecoinvent 3.9; Darstellung: ifeu

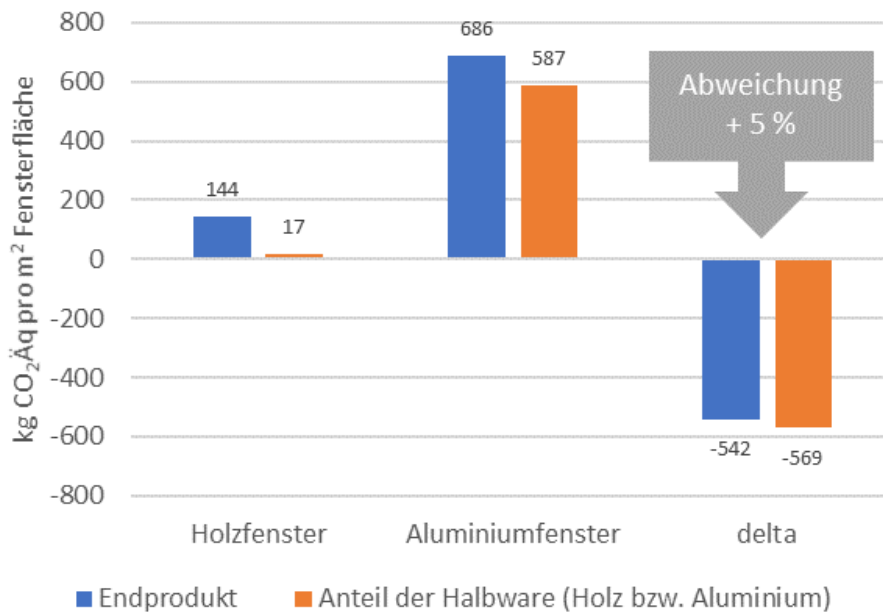
Abbildung 17: Gegenüberstellung der THG-Emissionen einer Halle aus Holzkonstruktion mit einer aus Stahlkonstruktion, jeweils für das Endprodukt (Halle) insgesamt und für die Anteile der Halbwaren Holz und Stahl für die Tragwerke.

4.2.3.2 Beispiel: Fenster – Holz vs. Aluminium

Im zweiten Beispiel wird ein Holzfenster gegen ein Aluminiumfenster bilanziert. Während auf der Halbwarenebene lediglich der Holzrahmen betrachtet ist, umschließt das Endprodukt auch Glas, Beschläge, Dichtung etc. sowie die Endfertigung. Beim Vergleichsprodukt gilt entsprechendes, wobei auf der Halbwarenebene nur der Aluminiumrahmen betrachtet wird.

Das Ergebnis ist Abbildung 18 zu entnehmen. Anders als beim Hallenbau ist hier der Unterschied sowohl auf der Ebene der Halbwaren wie auch der Endprodukte sehr groß – zum Nachteil des Aluminiumfensters. Die Unterschiede auf der Halbwarenebene betragen 542 kg CO₂Äq./m² Fensterfläche bei Holz und 542 kg CO₂Äq./m² bei Aluminium und deutet somit auf 5 % Abweichung. Diese geht dabei zu Lasten des Holzfensters, d.h. mit der

Begrenzung auf die Ebene der Halbwaren unterschätzt man ganz leicht den Substitutionsnutzen des Holzes.



Berechnungen durch ifeu auf Basis von Daten aus ecoinvent 3.9; Darstellung: ifeu

Abbildung 18: Gegenüberstellung der THG-Emissionen eines Fensters aus Holz mit einem aus Aluminium, jeweils für das Endprodukt (Fenster) insgesamt und für die Anteile der Halbwaren Holz und Aluminium für die Rahmen.

4.2.3.3 Diskussion

Die zwei Beispiele können nur einen gewissen Einblick in die beschriebene Unsicherheit geben, die die Begrenzung auf die Halbwarenebene anstelle der Bilanzierung vollständiger Endprodukte mit sich führt. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass andere Beispiele zu völlig anderen Ergebnissen führen. Allerdings wird es bei vielen Produkten, z.B. im Möbelbereich, oft der Fall sein, dass das Werkstück aus Holz (z.B. Tischplatte oder Regalböden) ohne erheblich zusätzliche oder geringere Aufwendungen der Verarbeitung direkt durch Werkstücke aus alternativen Materialien (Metall, Kunststoff, Glas etc.) ersetzt werden können. Somit kann das Ergebnis der beiden Fallbeispiel schon als Orientierung dienen zur Einschätzung der Unsicherheit.

Diese liegt in offenbar begrenztem Umfang vor. Bei einem sehr komplexen Produkt wie einem Fenster, ist der Unterschied in der THG-Bilanz am Ende offenbar fast vollständig auf der Ebene der Halbware bestimmt. Beim noch komplexeren Beispiel der Halle ist die Abweichung zwar höher, aber die Halbwarenebene überschätzt nicht den Unterschied gegenüber den Endprodukten. Somit geben die Beispiele einen Hinweis, dass die Unsicherheiten (bzw. der „Fehler“) mit der Substitutionsrechnung auf Halbwarenebene in einem überschaubaren Rahmen bleiben. Dies ist mit Blick auf den breiten Rahmen der Bilanzen dieses Teilprojekts, in welchem es vor allem um die Einordnung von Größenordnungen geht, vertretbar.

4.3 Kohlenstoffbilanzen (Block C)

Im Rahmen dieses Blocks werden folgende drei Größen ausgewiesen, um die Größenordnungen des Aspekts der Kohlenstoffbilanzen sichtbar zu machen:

- In welchem Bereich bewegt sich die Netto-Speicherleistung des Waldes für CO₂ nach den Ergebnissen der FABio-Modellierung im DIFENS Teilprojekt 2?
- Wie hoch ist die CO₂-Last durch die Entnahme von Waldholz, das nicht in einem temporären Speicher geht, sprich, welches direkt zur Energienutzung verbrannt wird?
- In welchem Bereich liegt die Speicherleistung in langlebenden Produkten?

Diese verschiedenen Größen stellen unterschiedliche Sichtweisen auf den Kohlenstoffspeicher dar und sind unter unterschiedlichen Randbedingungen definiert. Sie sind daher nicht zu aggregieren, sondern werden vielmehr zur Veranschaulichung dieser verschiedenen Sichtweisen nebeneinandergestellt.

4.3.1 CO₂-Speicher im Wald nach den Ergebnissen aus DIFENS Teilprojekt 2

In Kapitel 2.3.3.1 wurde die Entwicklung der Netto-Speicherleistung des Waldes gemäß den Ergebnissen aus DIFENS Teilprojekt 2 (Pfeiffer et al. 2025) beschrieben. Im Mittel beläuft sie sich auf folgende Nettowerte für folgende Zeiträume:

- 2020 bis 2040: 7 Mio. t CO₂ pro Jahr als Nettoquelle
- 2041 bis 2050: -8 Mio. t CO₂ pro Jahr als Nettosenke.

4.3.2 CO₂-Last durch die Entnahme von Waldholz zur Energienutzung

Wie in Kapitel 2.3.1.3 beschrieben, war eines der Ergebnisse des UBA-Projekts BioSINK (Hennenberg et al. 2024), dass die Menge an im Holz gebundenem CO₂ eine einfache aber von der Dimension her adäquate Größe ist, um eine CO₂-Last dem entnommenen Holz zuzurechnen, ohne die komplexen Dynamiken der Waldentwicklung aufwendig modellieren zu müssen. Diese CO₂-Last wird real bei der Verbrennung des entnommenen Holzes.

Als Emissionsfaktor wird der entsprechende Kohlendioxid-Emissionsfaktor für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen von 102 g CO₂Äq./MJ angesetzt (Umweltbundesamt 2022).

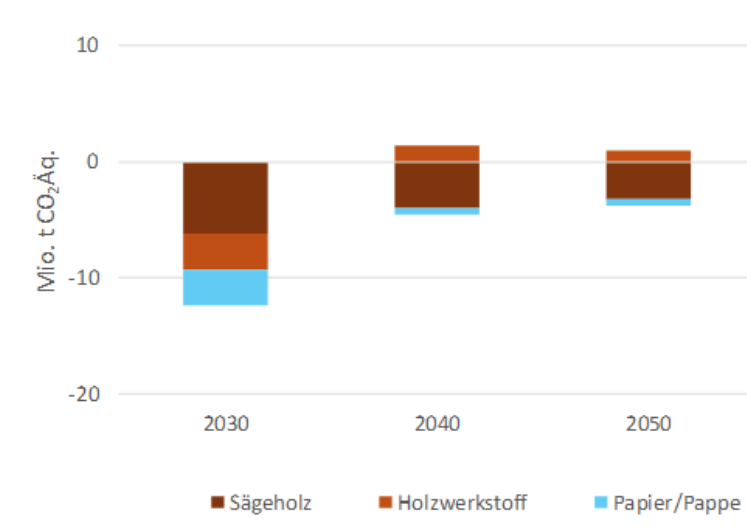
4.3.3 CO₂-Speicher in Produkten

In den THG-Inventaren der Nationalen Berichterstattung unter der UN-Klimarahmenkonvention (UNFCCC) hat der Sektor *Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft* (kurz: LULUCF) eine wachsende Bedeutung. In diesem Sektor wird auch die (zeitweilige) Speicherung von Kohlenstoff in Produkten berücksichtigt – in Form einer Gutschrift und als „Ausgleich“ der vorausgehenden Anrechnung der Holzentnahme aus dem Wald als CO₂-Emission. In Ökobilanzen ist es jedoch unüblich, diese Speichereffekte zu berücksichtigen, da sie nur temporärer Natur sind. Bei der hier vorliegenden Untersuchung handelt es sich jedoch, wie erwähnt, nicht um eine Produktökobilanz. Vielmehr erfolgt die

Systembilanzierung hier ähnlich wie in der Nationalen THG-Berichterstattung anhand von Jahresmengenströmen.

Für die vorliegende Untersuchung bieten sich verschiedene Ansätze zur Anrechnung dieses Produktspeichers an. Eine Möglichkeit wäre es, methodisch streng den methodischen Vorgaben nach den IPCC-Leitlinien vorzugehen. Dabei wird eine Zerfallsrechnung für Holzprodukte durchgeführt. Alternativ bietet sich an, das jährliche Verhältnis von jährlichem Input an Holzprodukten in den Markt und den Output an Altholz anhand der im Rahmen dieses Vorhabens bilanzierten Holzmarktstroms abzubilden. Dadurch ergibt sich ein als realitätsnah eingeschätztes Bild der Kohlenstoffmengen, die in den Produktspeicher übergehen.

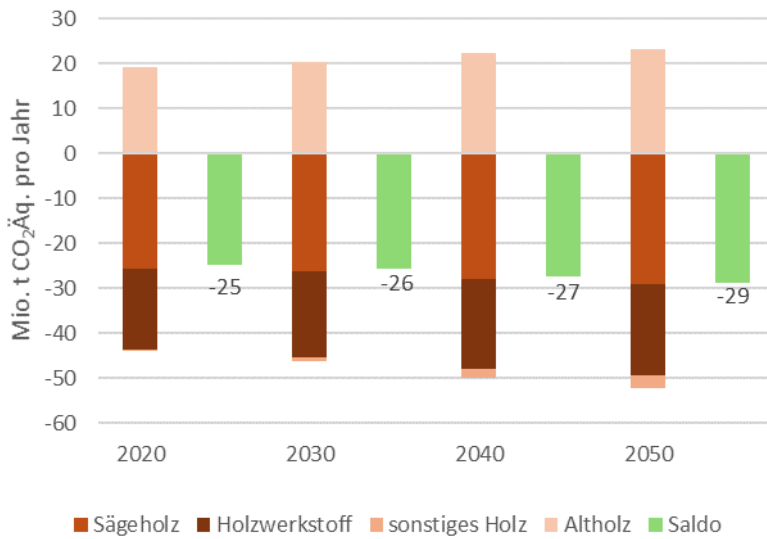
Abbildung 19 zeigt das Ergebnis, geht man nach der **IPCC-Methode** vor. Die Anwendung hier ist jedoch unvollständig, da die Beiträge aus der Vergangenheit (zurück bis vor 1990) in die Rechnung einfließen müssten. So weit zurück wurden die Mengenströme im Rahmen dieses Vorhabens jedoch nicht bilanziert. Von der Größenordnung ergibt sich für das Jahr 2030 ein Fluss von um die 12 Mio. t CO₂ in den Produktspeicher, der in den späteren Jahren jedoch bei den eher kurzlebigen Holzwerkstoffen deutlich zurückgeht.



Berechnungen durch ifeu und Öko-Institut; Darstellung: ifeu

Abbildung 19: Entwicklung der CO₂-Speicherung in Holzprodukten. Vorgehensweise nach der IPCC -Methode.

Abbildung 20 zeigt die Ergebnisse des alternativen Ansatzes der **Input/Output-Bilanz**: Einem Input von ca. 44 Mio. t CO₂ durch Produkte aus Sägeholz und Holzwerkstoffen (mit zunehmender Tendenz) stehen etwa 19 Mio. t CO₂ an Austrag durch Altholz gegenüber. Der Produktspeicher (Saldo aus Input und Output) nimmt hier nicht ab, sondern steigt von 2020 mit -25 Mio. t CO₂ 2050 auf -29 Mio. t CO₂ an.



Berechnungen durch ifeu und Öko-Institut; Daten aus (Mantau 2025); Darstellung: ifeu

Abbildung 20: Entwicklung der CO₂-Speicherung in Holzprodukten nach Input (Holzprodukte) und Output (Altholz).

Da für einen anderen Verbleib der Differenz des Holzes im Input in den Markt und dem Output als Altholz kein vernünftiger Ansatzpunkt vorliegt (möglich wäre illegale Entsorgung, Verbrennung im privaten Bereich) als eine Speicherung, ist davon auszugehen, dass diese Speichermengen auch real sind. Zwar spiegeln die Werte an sich nicht wider, wie lange dieser Speicher Bestand haben wird, doch ist anhand des empirischen Verlaufs von Input zu Output angesichts weiter steigenden Inputs in den stofflichen Markt davon auszugehen, dass eine Abnahme der Speichervolumina nicht eintritt – außer, eine plötzliche Veränderung in der Praxis würde eintreten (z.B. vollständiges Entsorgen bisher aufgehäufter Holzspeicher). Auf der anderen Seite ist ebenfalls nicht vernünftig anzunehmen, der Speicher könne über die Zeit endlos weiter anwachsen. Das wäre nur der Fall, wenn zur Entsorgung stehendes Altholz nicht verbrannt, sondern in ein tatsächliches stabiles Endlager verbracht würde.

Als Erkenntnis der hier vorliegenden Analyse ist somit davon auszugehen, dass die jährlich in den Speicher eingetragenen Mengen an CO₂ im Bereich von 25 bis 29 Mio. t realistisch sind.

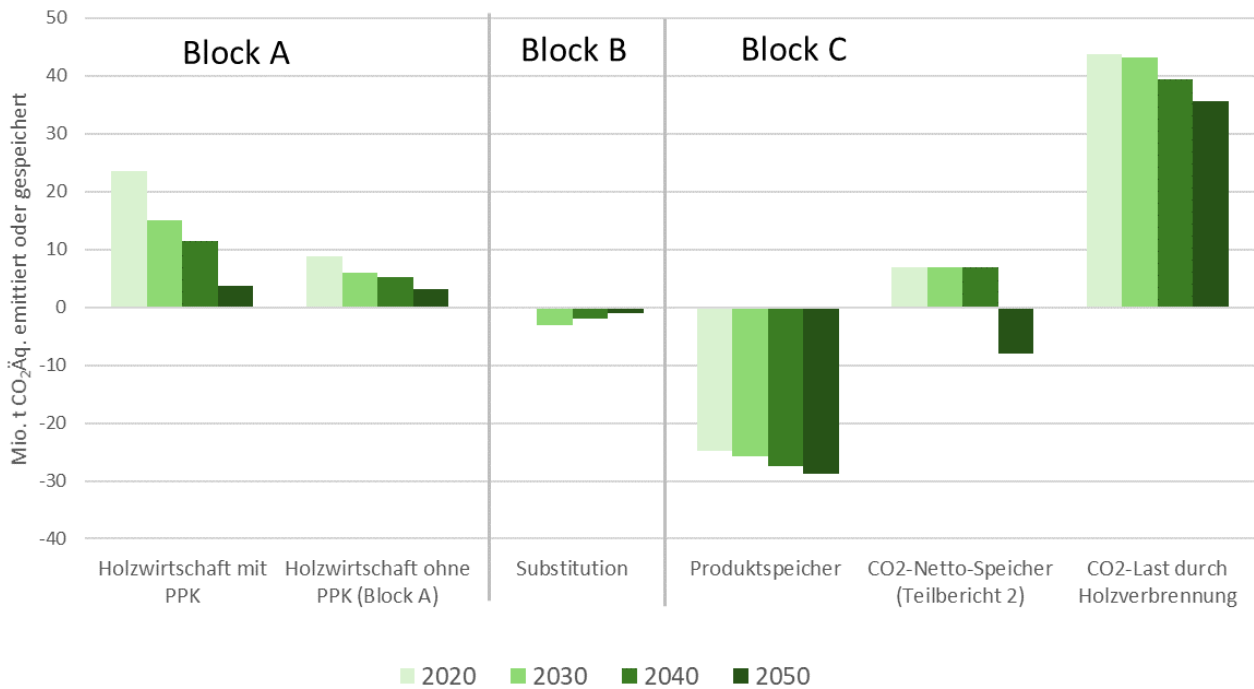
4.4 Gesamtschau – Blöcke A, B und C

Wie bereits erläutert, ist es nicht sachgerecht, die Ergebnisse der drei Blöcke insgesamt zusammen zu aggregieren, da insbesondere für den Block C z.T. unterschiedliche Systemannahmen getroffen wurden. Es geht hier jedoch darum, die Dimensionen der Ergebnisse in den Blöcken zu vergleichen. Hierzu werden diese in Abbildung 21 insgesamt zusammengestellt.

Daraus erschließen sich folgende Erkenntnisse:

- Zu Block A:
 - Die Gesamtemissionen an Treibhausgasen durch die **Holzwirtschaft** (Block A) liegt aktuell etwa 24 Mio. t CO₂Äq und ist damit mit 3,6 % Anteil an der Gesamtemission Deutschlands¹ nicht unerheblich, wenngleich deutlich niedriger als andere Bereich der Industrie oder andere Sektoren wie die Energiewirtschaft, der Verkehr oder Gebäude.
 - Sie sind v.a. durch die **Zellstoff- und Papierindustrie** geprägt, nehmen bis 2050 auf ein Zehntel ab. Der Grund für die Abnahme: die von der Dekarbonisierung getriebene Reduktion von THG-Emissionen in allen Sektoren. Diese Reduktion, d.h. die Realisierung der Energiewende ist dabei Grundvoraussetzung.
 - Schließt man die Emissionen der Zellstoff- und Papierindustrie aus, liegen die Emissionen der Holzwirtschaft bereits im Jahr 2020 deutlich niedriger.
- Zu Block B:
 - Mit der Veränderung der im Markt eingesetzten Holzvolumina ergeben sich durch Zunahme Verdrängungen anderer (insbesondere fossiler oder mineralischer) Produkte oder – bei Abnahme dagegen eine Bedarfsdeckung durch zusätzliche andere Produkte. Dies führt zu potenziell eingesparten oder zusätzlichen Emissionen durch **Substitution**. Die dafür errechneten Werte liegen in den Summen deutlich niedriger als die Werte in Block A: ca. 3 Mio. t CO₂Äq. im Jahr 2030 mit Rückgang auf 1 Mio. t CO₂Äq. in 2050.
 - Unter der hypothetischen Annahme, die aktuell im Markt befindlichen Produkte auf Holzbasis müssten vollständig ersetzt werden durch funktionsanaloge Produkte auf fossiler oder mineralischer Basis, errechnen sich andere Dimensionen: nimmt man die schwer zu bewertenden Papier- und Zellstoffprodukte davon aus, wäre die Einsparung durch Substitution bei 88 Mio. t CO₂Äq. (nicht in Abbildung 21 dargestellt, siehe dazu Kapitel 4.2.1).
- Zu Block C:
 - Die potenziell in **Holzprodukten** jährlich gespeicherten CO₂-Mengen, berechnet als Saldo von in den Markt gebrachten Holzprodukten und der entsorgten Menge an Altholz – liegen in 2020 bei 25 Mio. t CO₂Äq. und erhöhen sich bis 2050 auf 29 Mio. t CO₂Äq. Diese *negativen* Emissionen (Senken) übersteigen im Betrag damit die Emissionen aus Block A wie auch aus Block B. Und anders als die Emissionen und Senken in Block A und B nehmen diese Werte über die nicht ab, sondern zu.
 - Die Entwicklung der Netto-Speicherleistung des Waldes gemäß den Ergebnissen aus DIFENS Teilprojekt 2 beläuft sich im Mittel über die einzelnen Dekaden dagegen auf einstellige Werte mit einer Nettoemission im Bereich von 7 Mio. t CO₂ pro Jahr bis 2040 und einer Netto-Senke von -8 Mio. t CO₂ pro Jahr danach.
 - Ergänzend wird in Abbildung 21 dargestellt, in welcher Höhe die Emissionen an biogenem CO₂, die durch die Verbrennung bei der Energienutzung von Holz freigesetzt werden, liegen: im Jahr 2020 betragen sie etwa 43 Mio. t CO₂Äq und liegen damit deutlich höher als die Emissionen in den jeweiligen anderen Blöcken. Dies bleibt auch mit der Abnahme auf 36 Mio. t CO₂Äq. in 2050 so.

¹ Nach UBA lag die Gesamtemission ohne LULUCF bei 649 Mio. t CO₂Äq im Jahr 2024: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#emissionsentwicklung>



Berechnungen und Darstellung: ifeu

Abbildung 21: Gesamtschau der THG-Emissionen (positive Werte) und CO₂-Senken (negative Beträge) nach den Blöcken A, B und C

Zu den zwei letzten Anstrichen ist zu bemerken, dass in der Nettospeicherbilanz in Teilbericht 2 diese mit der Entnahme verbundenen CO₂-Freisetzungen berücksichtigt sind, sie werden hier jedoch durch den gleichzeitig erfolgenden Zuwachs an Holz weitgehend (wenn auch in den Jahren bis 2040 sichtbar) nicht völlig ausgeglichen. Der Zuwachs an Holz erfolgt jedoch auch unabhängig von der Entnahme, wenngleich unter dann unterschiedlichen Wuchsdynamiken¹. Somit ist es auch gerechtfertigt, der Holzentnahme, so sie dann nicht zu einer Speicherung in Produkten führt, auch THG-Emissionen in dieser Größenordnung zuzurechnen. Dies wäre bei einer expliziten Produkt-Ökobilanz der Fall, da dafür die Einbeziehung von kontrafaktischen Effekten formal korrekt ist. In der vorliegenden Studie mit Fokus auf die Gesamtstoffströme ist eine Zurechnung kritisch zu sehen, da – wie erwähnt – unterschiedliche Systemannahmen vorliegen und damit auch das Risiko einer Doppelzählung von Emissions- und Senkeneffekten gegeben wäre.

Im Übrigen fehlt bisher eine allgemein anerkannte Methode, diese Emissionen auf THG-Bilanzen für Produkte zu übertragen, wenngleich diese Emissionen in der nationalen Berichterstattung berücksichtigt werden.

¹ Unterschiedlicher Zuwachs nach Alter und Mortalität; siehe dazu die Beschreibungen zum Modell FABio Wald in (Pfeiffer et al. 2025)

5 Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen

Zusammenfassung wesentlicher Ergebnisse

Der von der in Deutschland geernteten Holzmenge belieferte Wirtschaftsbereich beinhaltet sehr viele verschiedene Sektoren. Mit der Papier- und Zellstoffindustrie ist dabei auch ein vergleichsweise emissionsintensiver Sektor. Dieser hat jedoch bereits sehr hohe Recyclingraten umgesetzt und greift daher nur in geringem Maße auf Rohholzressourcen zu.

In dem analysierten Holzmarktsystem fallen nach der hier durchgeführten Bilanzierung insgesamt 23 Mio.t CO₂Äq. an **Treibhausgasen** an. Das entspricht 3,5 % der Gesamtemission in Deutschland. Auf die Papier- und Zellstoffindustrie fallen davon allein 62 %. Der zweitgrößte Emissionsanteil geht auf die Holzwerkstoffproduktion, v. a. aufgrund des Einsatzes von Bindemitteln.

Bis 2050 gehen die Gesamtemissionen auf ein Zehntel zurück, geht man von einer erfolgreichen Umsetzung der Energiewende mit weitgehender Abkehr von fossilen Rohstoffen aus. Die Nicht-CO₂-Emissionen aus der Energienutzung (Methan, Lachgas) bleiben auch bis 2050 bestehen, sodass dann der Energieeinsatz auch den höchsten Emissionsanteil haben wird. Wenn die Transformation zum Erreichen der Klimaschutzziele nicht erfolgreich ist, bleiben sowohl die Emissionen durch die Holzwirtschaft hoch, allerdings werden dann auch die Substitutionseffekte größer sein.

Auch in den **anderen Umweltwirkungskategorien** werden sich Lasten bis 2050 deutlich verringern. Beispielhaft wurden vorausgehend Feinstaubemission und Versauerung dargestellt. In diesen Kategorien ist der Beitrag der Energienutzung deutlich höher, allerdings sind hier auch geringere Reduktionspotenziale vorhanden, sodass die Gesamtreduktion ausgehend von ca. 110.000 t versauernde bzw. partikelbildende Emissionen nur auf 40 % sinken werden.

In der Bilanzierung wird berücksichtigt, welches Potenzial mit der **Substitution** von alternativen Materialien durch die Nutzung von Holz verbunden sind. Eine direkte Gegenüberstellung der funktionsgleichen Materialien zeigt, dass mit einem hypothetischen Ersatz aller holzbasierten Produkte Mehremissionen von knapp 80 Mio. t CO₂Äq. verbunden wären. Wendet man den Substitutionseffekt nur auf die sich mit Start der Bilanz veränderten Mengen an (zusätzliche Mengen an Bauholz, weniger Energieholz), dann bleibt der Effekt vergleichsweise gering: 3 Mio. t CO₂Äq im Jahr 2030.

Die jährliche **CO₂-Speicherung in Holzprodukten** zeigt dagegen wachsendes Potenzial: durch Steigerung stofflicher Nutzung kann dieser von 25 Mio. t bis 29 Mio. t CO₂Äq. pro Jahr steigen.

Die jährliche **CO₂-Bilanz im Wald** bleibt nach den Modellrechnungen in Teilbericht 2 bis 2040 bei einer Nettoemission von 7 Mio. t CO₂Äq. und entwickelt sich danach zu einer Senke in Höhe von 8 Mio. t CO₂Äq.

Demgegenüber werden durch die energetische Nutzung von Holz insgesamt über 40 Mio. t CO₂ emittiert.

Handlungsempfehlungen

Aus den Ergebnissen lassen sich folgende Empfehlungen ableiten:

- Da sich deutlich zeigt, dass **stoffliche Holzprodukte** aktuell in ihrer Klimabilanz klar im Vorteil gegenüber nicht erneuerbaren Alternativen, sollte deren verstärkte Nutzung weiter unterstützt werden. Sie können auch künftig bei weiterer Dekarbonisierung zusätzliche Beiträge zur Emissionsminderung leisten.
- Durch den Umbau der derzeit dominierenden Nadelhölzer, die auch für die stoffliche Nutzung vor allem im Baubereich vorrangig vertreten sind, hin zu Laubholz (v.a. Buche) stellt sich die Herausforderung, wie damit auch der Baumarkt verstärkt mit Laubholz erreicht werden kann. Dies wird weitere technische Entwicklungen aber auch ein Umdenken im Bausektor erfordern.
- Ein relevanter Absatzmarkt kann in jedem Fall der Bereich der Dämmstoffe bilden, der gerade auch für Laubholz hohe Ausbau- und Substitutionspotenziale bietet.
- Bei der **energetischen Nutzung** ist die positive Klimabilanz in deutlich eingeschränkterem Maße der Fall. Hier sind die Substitutionspotenziale mit fortschreitender Energiewende nur mehr gering. Zu beachten sind hier auch weitere negative Umweltwirkungen durch Emissionen der Holzverbrennung. Eine Reduktion dieser Art der Nutzung, wie sie sich auch in den DIFENS-Szenarien darstellt, ist daher zu empfehlen. Die sollte v.a. dort noch erfolgen, wo hohe Nutzungseffizienzen vorliegen und alternative erneuerbare Lösungen schwer umsetzbar sind.
- Die in dieser Studie nicht weiter untersuchte Option der CO₂-Abscheidung und Speicherung (CCS, für Biomassenlagen auch als BECCS bezeichnet) ist nur für großtechnische Anlagen eine Option, z.B. große Biomassekraftwerke. Inwieweit diese jedoch in der Zukunft eine relevante Rolle spielen werden, ist zu hinterfragen.
- Insgesamt machen die Bilanzen deutlich, dass der **Kohlenstoffspeicher** in Produkten und auch im Wald den größten Faktor für die THG-Bilanz der Holznutzung darstellt. Zukünftig muss daher der Fokus bei derartigen Bewertungen und Analysen auch auf diesem Aspekt liegen. Das Projekt DIFENS hat dabei vor allem auch in den beiden anderen Teilvorhaben wesentliche Grundlagenerkenntnisse erarbeitet, auf die es aufzubauen gilt.
- Was die Berücksichtigung in Treibhausgas – und Ökobilanzen betrifft, besteht jedoch gerade hier noch Forschungsbedarf, um an zu breit anerkannten Methoden der Speicherbilanzierung zu kommen.

Literaturverzeichnis

Albrecht, S.; Rüter, S.; Welling, S.; Knauf, J.; Mantau, M.; Braune, A.; Baitz, A.; Weimar, M.; Sörgel, H.; Kreissig, S.; Deimling, J.; Hellwig, J. (2008): Ökologische Potenziale durch Holznutzung gezielt fördern. *Arbeitsbericht*, Stuttgart / Hamburg. S. 299. https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dk041313.pdf (23.12.2020).

Andersen, C. E.; Hoxha, E.; Rasmussen, F. N.; Sorensen, C. G.; Birgisdottir, H. (2024): Temporal considerations in life cycle assessments of wooden buildings: Implications for design incentives. In: *Journal of Cleaner Production*. Vol. 445, S. 141260. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.141260.

Brown, A.; Waldheim, L.; Landälv, I.; Saddler, J.; Ebadian, M.; McMillan, James. D.; Bonomi, A.; Klein, B. (2020): Advanced Biofuels – Potential for Cost Reduction. IEA Bioenergy. https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2020/02/T41_CostReductionBiofuels-11_02_19-final.pdf.

Bundesregierung (2021): Bundes-Klimaschutzgesetz. Deutscher Bundestag. <https://dserver.bundestag.de/btd/19/302/1930230.pdf> (01.10.2022).

Costa, D.; Serra, J.; Quinteiro, P.; Dias, A. C. (2024): Life cycle assessment of wood-based panels: A review. In: *Journal of Cleaner Production*. Vol. 444, S. 140955. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.140955.

Dittrich, M.; Liebich, A.; Vogt, R.; Münter, D.; Wingenbach, C.; Ludmann, S.; Rosenthal, M.; Fröhlich, D. T.; Petri, F.; Ewers, B.; Doppelmayr, A.; Limberger, S.; Müller, J.; Loibl, A.; Marscheider-Weidemann, F.; Rostek, L.; Brauer, C.; Schoer, K. (2025): REFINE (Umwelt): Betrachtung von Rohstoffaufwendungen und Umweltwirkungen für die Energiewende in einem ressourcenschonenden und treibhausgasneutralen Deutschland. Teilbericht Umweltwirkungen.

Fehrenbach, H.; Busch, M.; Bürck, S.; Bischoff, M.; Theis, S.; Reinhardt, J.; Blömer, J.; Grahl, B. (2021a): Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen. Ermittlung und Verifizierung von Datenquellen und Datengrundlagen für die Berechnung der Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen für Ökobilanzen – Teilbericht I: METHODEN–. Umweltbundesamt.

Fehrenbach, H.; Busch, M.; Bürck, S.; Bischoff, M.; Theis, S.; Reinhardt, J.; Blömer, J.; Grahl, B. (2021b): Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen. Ermittlung und Verifizierung von Datenquellen und Datengrundlagen für die Berechnung der Flächenrucksäcke von Gütern und Dienstleistungen für Ökobilanzen – Teilbericht III: DATEN –. Umweltbundesamt.

Fehrenbach, H.; Köppen, S.; Kauertz, B.; Detzel, A.; Wellenreuther, F.; Breitmayer, E.; Essel, R.; Carus, M.; Bienge, K.; von Geibler, J. (2017): Biomassekaskaden - Mehr

Ressourceneffizienz durch stoffliche Kaskadennutzung von Biomasse – von der Theorie zur Praxis. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/biomasse-kaskaden-mehr-ressourceneffizienz-durch> (03.06.2022).

Fehrenbach, H.; Köppen, S.; Paar, A.; Hennenberg, K.; Pfeiffer, M.; Bilharz, M. (2024): Ansatz zur Neubewertung von CO₂-Emissionen. *Factseheet*, Umweltbundesamt. S. 12. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/factsheet_ansatz_zur_neubewertung_von_co2-emissionen_aus_der_holzverbrennung_0.pdf.

Frömel, M.; Sensfuß, Dr. F.; Lux, Dr. B.; Deac, Dr. G.; Männer, W.; Luderer, Dr. C. (2024): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland - Endbericht. Fraunhofer ISI & Consentec GmbH, Karlsruhe.

Gensior, A.; Drexler, S.; Fuß, R.; Stürmer, W.; Rüter, S. (2025): Treibhausgasemissionen durch Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF). <https://www.thuenen.de/de/themenfelder/klima-und-luft/emissionsinventare-buchhaltung-fuer-den-klimaschutz/treibhausgas-emissionen-lulucf>. (15.07.2025).

Hafner, A.; Rüter, S.; Ebert, S.; Schäfer, S.; König, H.; Cristofaro, L.; Diederichs, S.; Kleinhenz, M.; Krechel, M. (2017): Treibhausgasbilanzierung von Holzgebäuden – Umsetzung neuer Anforderungen an Ökobilanzen und Ermittlung empirischer Substitutionsfaktoren (THG-Holz-bau).

Helin, T.; Salminen, H.; Hynynen, J.; Soimakallio, S.; Huuskonen, S.; Pingoud, K. (2016): Global warming potentials of stemwood used for energy and materials in Southern Finland: differentiation of impacts based on type of harvest and product lifetime.

Hennenberg, K.; Pfeiffer, M.; Benndorf, A.; Böttcher, H.; Reise, J.; Mantau, U.; Köppen, S.; Fehrenbach, H.; Bürck, S. (2024): Auswirkungen der energetischen Nutzung forstlicher Biomasse in Deutschland auf deutsche und internationale LULUCF-Senken (BioSINK). ifeu; INFRO; Öko-Institut e.V., Darmstadt; Berlin; Heidelberg; Dessau-Roßlau. S. 84. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/cc_33-2024_biosink.pdf.

Hurtig, O.; Scarlat, N.; Motola, V.; Buffi, M.; Georgakaki, A.; Letout, S.; Mountraki, A.; Joanny, G. (2022): Clean Energy Technology Observatory, Advanced biofuels in the European Union: status report on technology development, trends, value chains and markets : 2022. Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union, LU.

IPCC (2019): 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Chapter 12: Harvested Wood Products. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/4_Volume4/19R_V4_Ch12_HarvestedWoodProducts.pdf (14.06.2024).

Mantau, U. (2025): Modellierung des Stoffstroms Holz als Folge der Fertigwarennachfrage. *Sachbericht zum Projekt DIFENS*, INFRO.

Pfeiffer, M.; Hennenberg, K.; Reise, J.; Benndorf, A.; Böttcher, H. (2025): Szenarien der Waldentwicklung unter veränderten Klimabedingungen. *Sachbericht zum Projekt DIFENS*, Öko-Institut e.V. S. 113.

Rettenmaier, N.; Fehrenbach, H.; Bischoff, M. (2019): Zukünftige relevante fortschrittliche Biokraftstoffpfade. ifeu - Institut für Energie - und Umweltforschung Heidelberg GmbH. https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Arbeitspapier-A_Technologiepfade.pdf (16.12.2021).

Rüter, S. (2023): Abschätzung von Substitutionspotentialen der Holznutzung und ihre Bedeutung im Kontext der Treibhausgas-Berichterstattung. Thünen-Institut für Holzforschung, Hamburg. https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn066391.pdf (07.05.2024).

Sathre, R.; González-García, S. (2014): Life cycle assessment (LCA) of wood-based building materials. In: *Eco-efficient Construction and Building Materials*. Elsevier. S. 311–337. DOI: 10.1533/9780857097729.2.311.

Sebastian Rüter; Stefan Diederichs (2012): Ökobilanz-Basisdaten für Bauprodukte aus Holz. Institut für Holztechnologie und Holzbiologie. https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi1lo3l2PvpAhVN2aYKHRgmBL4QFjAAegQIBBAB&url=https%3A%2F%2Fdn.nb.info%2F1024984133%2F34&usg=AOvVaw3Zg12eDScEorWQo0xTdhc_ (09.06.2020).

Soimakallio, S.; Böttcher, H.; Niemi, J.; Mosley, F.; Turunen, S.; Hennenberg, K.; Reise, J.; Fehrenbach, H. (2022a): Closing an Open Balance: the Impact of Increased Roundwood Harvest on Forest Carbon.

Soimakallio, S.; Fehrenbach, H.; Sironen, S.; Myllyviita, T.; Abdalla, N.; Seppälä, J. (2022b): Fossil carbon emission substitution and carbon storage effects of wood-based products.

Umweltbundesamt (2022): Kohlendioxid-Emissionsfaktoren für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen.

Umweltbundesamt (2023): Projektionsbericht 2023 für Deutschland. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/39_2023_cc_projektionsbericht_12_23.pdf.