



Berichte über Landwirtschaft

Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft

Sonderheft Nr. 242

Januar 2026

Agrarwissenschaft Forschung --- Praxis

**Die Ermittlung der Klimaschutzleistungen von
Wald und Holznutzung: Orientierungshilfe in
einer kontroversen Debatte**

Wissenschaftlicher Beirat für Waldpolitik (WBW),
beim Bundesministerium für Landwirtschaft, Ernährung und
Heimat (BMLEH)

Januar 2026

Die Ermittlung der Klimaschutzleistung von Wald und Holznutzung: Orientierungshilfe in einer kontroversen Debatte

Stellungnahme des Wissenschaftlichen Beirates für Waldpolitik
Juli, 2025



Zitieren als:

Weber-Blaschke G, Dieter M, Knoke T, Bauhus J, Lindner M, Endres E, Farwig N, Hafner A, Kätzel R, Kleinschmit B, Lang F, Meyer P, Müller J, Schraml U, Seeling U (2025): Die Ermittlung der Klimaschutzleistung von Wald und Holznutzung: Orientierungshilfe in einer kontroversen Debatte. Stellungnahme des Wissenschaftlichen Beirates für Waldpolitik (Hrsg.), Juli 2025. Berlin, 44 S.

Titelfotos:

Katja Clemens (1. Bild oben links), Gabriele Weber-Blaschke (2. Bild oben Mitte), Nils Ermisch (3. Bild oben rechts), Jürgen Bauhus (1. Bild unten links), Ralf Rosin (2. Bild unten Mitte und 3. Bild unten rechts)

Danksagung:

Der Wissenschaftliche Beirat für Waldpolitik bedankt sich bei Christoph Schulz, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), und bei Dr. Sebastian Rüter, Johann Heinrich von Thünen-Institut, für die kritische Durchsicht einer vorherigen Version der Stellungnahme und die wertvollen Hinweise.

Mitglieder des Wissenschaftlichen Beirates für Waldpolitik beim BMLEH

Prof. Dr. Jürgen Bauhus (Vorsitzender), Universität Freiburg, Fakultät für Umwelt und Natürliche Ressourcen, Professur für Waldbau

Prof. Dr. Birgit Kleinschmit (stellvertretende Vorsitzende), Thünen-Institut, Braunschweig

Prof. Dr. Matthias Dieter, Thünen-Institut für Waldwirtschaft, Hamburg

Prof. Dr. Ewald Endres, Forstrecht und Forstpolitik, Hochschule für angewandte Wissenschaften Weihenstephan

Prof. Dr. Nina Farwig, Philipps-Universität Marburg, Fachbereich Biologie, Arbeitsgruppe Naturschutz

Prof. Dr. Ing. Annette Hafner, Ruhr-Universität Bochum, Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften

Prof. Dr. Ralf Kätzel, Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde, Fachbereich Waldökologie und Monitoring

Prof. Dr. Thomas Knoke, Technische Universität München, School of Life Sciences, Professur für Waldinventur und nachhaltige Nutzung

Prof. Dr. Friederike Lang, Universität Freiburg, Fakultät für Umwelt und Natürliche Ressourcen, Professur für Bodenökologie

Dr. Marcus Lindner, European Forest Institute, Bonn

Dr. Peter Meyer, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Abteilung Waldnaturschutz

Prof. Dr. Jörg Müller, Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Biozentrum, Lehrstuhl für Tierökologie und Tropenbiologie

Prof. Dr. Ulrich Schraml, Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Freiburg

Prof. Dr. Ute Seeling, Berner Fachhochschule - Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL

Prof. Dr. Gabriele Weber-Blaschke, Technische Universität München, Holzforschung München, Fachgebiet Stoffstrommanagement

Geschäftsführung des WBW

Christoph Schwanitz, BMLEH, Referat 513, 513@bmel.bund.de

Wissenschaftliche Mitarbeit

Dr. Rüdiger Unseld und Stefan Sorge, Universität Freiburg, Fakultät für Umwelt und Natürliche Ressourcen, Professur für Waldbau

Zusammenfassung

Anlass und Zielsetzung

Klimaschutz ist auf nationaler und internationaler Ebene ein vordringliches Politikziel. Für die Klimaschutzpolitik ist es daher wichtig, zu wissen, welchen Klimaschutzbeitrag der Wald und die Holznutzung in Deutschland zu den Klimaschutzzielen der Bundesregierung aktuell und in Zukunft leisten kann.

Der Wissenschaftliche Beirat für Waldpolitik (WBW) des Bundesministeriums für Landwirtschaft, Ernährung und Heimat (BMLEH) hat sich deshalb mit der vorliegenden Stellungnahme zum Ziel gesetzt, die Komplexität der Klimaschutzleistung von Wald und Holznutzung anschaulich darzustellen, auf wesentliche Punkte bei der Ermittlung der Klimaschutzleistung hinzuweisen und Empfehlungen zum Umgang mit diesem Thema in der gesellschaftlichen und politischen Diskussion zu geben.

Unter Klimaschutzbeitrag werden in diesem Gutachten die Klimaschutzleistung durch die Kohlenstoff-(C-) Speichereffekte im Wald zuzüglich der Effekte durch weitere Treibhausgase, die Kohlenstoff-(C-) Speichereffekte in Holzprodukten, sowie die potentiellen Substitutionseffekte von Treibhausgas-(THG) Emissionen bei Verwendung von Holzprodukten statt Nicht-Holzprodukten verstanden. Der Begriff Klimaschutzbeitrag bzw. Klimaschutzleistung ist dabei zunächst nicht wertend, d.h. positiv oder negativ zu verstehen. Effekte hinsichtlich des Waldspeichers und des Holzproduktespeichers können bei Vorratsaufbau Senken bzw. bei Vorratsabbau Quellen darstellen. Potenzielle Effekte bei der Substitution von Nicht-Holzprodukten durch Holzprodukte können je nach Vergleichsvariante grundsätzlich entweder zur Einsparung oder Erhöhung von Treibhausgasemissionen führen.

In der Klimaberichterstattung wird aus methodischen Gründen nach Sektoren (Quellgruppen) unterschieden. Danach werden die laufende Speicherung (Senken) und die Emission (Quellen) von Treibhausgasen bei Wald und Holzproduktespeicher dem Landnutzungssektor „*Land Use, Land Use Change, Forestry*“ (LULUCF)-Sektor zugeschrieben. Substitutionseffekte der Holzverwendung lassen sich nicht direkt messen und gehen daher nur indirekt vor allem über die Quellgruppen Industrie und/oder Energie in die Klimaberichterstattung ein. Die Klimaschutzleistung der Holzverwendung als Teil der forstlichen Nutzung ist dadurch nicht in Gänze ersichtlich.

Aktuell gibt es unterschiedliche Argumentationslinien für den Klimaschutzbeitrag von Waldbewirtschaftung und Holznutzung, die auf unterschiedliche Betrachtungsweisen zurückzuführen sind. Bei der Interpretation der Ergebnisse dieser unterschiedlichen Ansätze ist zu berücksichtigen, dass die Höhe der Klimaschutzleistung nicht nur davon abhängt, welche Systemgrenzen gesetzt, sondern auch welche zeitlichen und räumlichen Skalen betrachtet werden. Dazu erschweren Einflüsse von natürlich einwirkenden Störungen und von sich dynamisch entwickelnden wirtschaftlichen, technischen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen für die Holznutzung die Quantifizierung von Klimaschutzeffekten, insbesondere über lange, Generationen-übergreifende Zeiträume.

Empfehlungen

1. Betrachtung der Zusammenhänge der Klimaschutzleistungen von Waldspeicher, Holzproduktespeicher und potenzieller Substitution

Die Teilsysteme Waldspeicher, Holzproduktespeicher und potenzielle Substitution interagieren miteinander und bilden zusammen die Klimaschutzleistung von Wald und Holznutzung. Daher sollten sie auch immer im Zusammenhang betrachtet werden.

Potenzielle Substitutionseffekte, die sich aus den Differenzen der Treibhausgas-Emissionen über den Lebensweg von funktionsgleichen Holz- und Nicht-Holzprodukten ergeben, dürfen nicht gesondert als Klimaschutzleistung betrachtet werden, sondern müssen immer im Zusammenhang mit den Veränderungen der Kohlenstoffspeicher im Wald und im Bestand der Holzprodukte gesehen werden. Ebenso ist es bei der Beurteilung der Klimaschutzleistung von Wald und Holznutzung zu kurz gegriffen, den Blick nur auf die Waldspeicher zu richten und mögliche *Leakage*-Effekte, d. h. räumliche Verlagerungen mit erhöhten Holzimporten oder potenzielle Substitutionseffekte in anderen Sektoren, v. a. Industrie und Energie zu ignorieren.

2. Differenzierung zwischen Kohlenstoffspeicherung und Substitutionseffekten

Eine Beschränkung der Kommunikation auf die summarischen Klimaschutzleistungen (Veränderung der C-Speicher und Substitution) kann zu Fehlinterpretationen hinsichtlich des Klimaschutzbeitrages von Wald und Holznutzung führen, da sich unterschiedliche Entwicklungen zwischen Senkenleistung und Vermeidung von THG-Emissionen darin nicht erkennen lassen. Es sollten daher immer auch jeweils die Speichereffekte von Wald und Holzprodukten sowie die THG-Emissionseffekte der Holz- und Nicht-Holzprodukte getrennt dargestellt werden.

3. Vermeidung der Verwendung von pauschalen Substitutionsfaktoren

Die Verwendung von pauschalen, nicht nach verschiedenen Produktbereichen bzw. Gebäudetypen differenzierten Substitutionsfaktoren sollte vermieden werden, da dies zu erheblichen Fehlern bei der ermittelten Klimaschutzleistung führen kann. Sollten allerdings wegen fehlender Ökobilanz-Studien spezifische Substitutionsfaktoren nicht verfügbar sein oder wegen zeitlicher und finanzieller Einschränkungen nicht neu berechnet werden können, ist bei Verwendung von bereits ermittelten Substitutionsfaktoren der notwendige Transfer von einem Kontext in einen anderen Kontext zu begründen, die Herleitung der Substitutionseffekte exakt zu beschreiben und bei der Interpretation zu berücksichtigen. Im Sinne guter wissenschaftlicher Praxis ist es erforderlich, die verfügbare Datenbasis offenzulegen sowie für bestehende Datenlücken aufzuzeigen, mit welchen Ersatzwerten gerechnet wurde und diese auch zu begründen. Die verbreitete Praxis, Substitutionsfaktoren aus Vergleichen von Produkten oder Gebäuden auf das Rohholz zu beziehen, führt systematisch zu einer Überschätzung und ist daher als nicht sachgerecht abzulehnen.

4. Zeitliche Darstellung von THG-Flüssen der Wald- und Holzproduktespeicher und THG-Emissionen der Produktlebenszyklen

Auf die Verwendung von Substitutionsfaktoren, die auf kumulierten THG-Emissionen über den Produktlebensweg beruhen, sollte verzichtet werden. Stattdessen empfehlen wir, nicht nur die zeitlichen Verläufe der Wald- und Holzspeicher, sondern auch die THG-Emissionen aus Herstellung, Gebrauch und Entsorgung der Holz- und Nicht-Holzprodukte über den gesamten Produktlebensweg zeitlich differenziert darzustellen.

Durch eine Gegenüberstellung der zeitlichen Verläufe der unterschiedlichen Speicheränderungen und THG-Emissionen können die zeitlichen Entwicklungen von Klimaschutzleistungen und

deren Wechselwirkungen differenzierter analysiert und Maßnahmen im Bereich der Waldbewirtschaftung und Holzverwendung besser an kurz-, mittel- und langfristige Herausforderungen angepasst werden als bisher. Ein wichtiger Aspekt ist hierbei auch die Einschätzung kurzfristiger Klimawirkungen von kurzlebigen Treibhausgasen, z.B. Methan u. a.

5. Transparenter Umgang mit Unsicherheiten

Bei der Berechnung der zukünftigen Klimaschutzleistung von Wald und Holznutzung gibt es eine ganze Reihe von Unsicherheiten. Die Unsicherheiten der verwendeten Daten sollten möglichst mit geeigneten statistischen Methoden quantifiziert und kommuniziert werden. Unsicherheiten hinsichtlich methodischer Entscheidungen, wie z. B. Modellansätzen und Annahmen in Bezug auf zeitliche Entwicklungen und Rahmenbedingungen sollten mit Szenario- und Sensitivitätsanalysen charakterisiert werden, um Entscheidern deutlich zu machen, wie verlässlich Aussagen getroffen werden können.

6. Folgebetrachtung auf gesamtwirtschaftlicher Ebene

Für die Analyse der Klimaschutzleistungen auf gesamtwirtschaftlicher Ebene ist die Koppelung von Änderungen im Wald, z. B. durch natürliche Störungen, Bewirtschaftung oder Nicht-Bewirtschaftung, mit darauf basierenden Änderungen bei Holzflüssen und Verwendung entsprechender Holzprodukte notwendig. Zusätzlich muss auch die Kopplung mit den korrespondierenden Märkten der Nicht-Holzprodukte erfolgen, um Folgen über den Forst- und Holzsektor hinaus mitberücksichtigen zu können.

7. Transparente Szenarienbildung

Szenarienbildung umfasst die Wahl der Systemgrenzen, des Betrachtungszeitraums und der Annahmen über die Entwicklung der natürlichen, wirtschaftlichen, technischen und gesellschaftlichen Einflussfaktoren. Zusammen haben diese

Setzungen starken Einfluss auf das Ergebnis. Für den Vergleich und die Interpretation von errechneten Klimaschutzleistungen von Wald und Holznutzung ist es daher unabdingbar, die Setzungen zu definieren und transparent offenzulegen. Darüber hinaus könnte die gemeinsame Bildung von Szenarien für die Ermittlung von potenziellen zukünftigen Klimaschutzleistungen von Wald und Holznutzung unter Einbeziehung verschiedener Stakeholder und Bundesressorts substantziell zur Harmonisierung der unterschiedlichen Sichtweisen beim Thema Klimaschutz durch Wald und Holznutzung beitragen.

Ein besonderes Beispiel von Szenarienanalyse ist die Ermittlung von Zusätzlichkeit. Hier werden nur die Effekte ganz bestimmter Maßnahmen im Vergleich zu einem festgelegten Referenzszenario betrachtet. Zusätzlichkeit ist ein entscheidendes Kriterium für die Anerkennung von Klimaschutzmaßnahmen auf nationaler Ebene oder bei der Anrechnung von Zertifikaten auf betrieblicher Ebene.

Ausblick

Diese Stellungnahme des WBW ist wegen der aktuellen, oft widersprüchlichen Diskussion auf das Thema Klimaschutzleistung von Wald und Holznutzung fokussiert. Dabei stehen die Treibhausgase, insbesondere CO₂, CH₄ und N₂O, im Vordergrund. Zu Klimaschutzwirkungen des Waldes, die sich durch Einflüsse auf den Wasser- und Strahlungshaushalt (z. B. Albedo) ergeben, ist der Wissensstand noch zu lückenhaft und uneinheitlich, um sie in einem solchen Gutachten angemessen zu behandeln.

Der WBW weist ausdrücklich darauf hin, dass es außer den Wirkungen von Wald und Holznutzung auf das Klima noch weitere Wirkungen auf die Umwelt gibt. Klimaschutz als eine Leistung des Ökosystems Wald muss mit seinen vielfältigen anderen Leistungen (Holzbereitstellung, Boden-, Wasser-, Landschafts-, Natur-, Biodiversitätsschutz sowie Erholungsfunktion), mit der Einkommens- und Beschäftigungsfunktion sowie

mit der Anpassung der Wälder und ihrer Bewirtschaftung an den globalen Klimawandel in Einklang gebracht werden (WBW 2022, WBW 2023).

Angesichts der gesamten THG-Emissionen und der projizierten Entwicklung des Waldes im Klimawandel kann durch Wald und Holznutzung nur ein geringer Beitrag zum Klimaschutz in Deutschland erzielt werden. Ohne weitere Treibhausgasreduzierungen in anderen Sektoren wie Verkehr, Energie, Industrie, Gebäude sowie Landwirtschaft sind die Klimaziele in den gesetzten Größenordnungen nicht zu erreichen. Aus gesamtgesellschaftlicher Sicht ist die entscheidende Frage, zu welchen Anteilen weitere Maßnahmen zur Ressourcen- und Energieeffizienz, die Energiewende, also die Zunahme THG-emissionsfreier Energie, und die Suffizienz, also Konsumverzicht, zur Erreichung der Klimaschutzziele Deutschlands beitragen werden.

Mittelbar bleiben Holznutzung und die damit einhergehende Reduzierung der Bestandesdichte zur Etablierung klimaangepasster Baumarten eine entscheidende Voraussetzung für die recht-

zeitige Anpassung der Wälder an den Klimawandel und damit für die langfristige Aufrechterhaltung der Kohlenstoff-Sequestrierung der Wälder, insbesondere für labile Bestände. Stabile, produktive und klimaangepasste Wälder bieten die Gewähr für eine effektive und langfristige CO₂-Bindung durch Wälder. Welche Formen der Forstwirtschaft und Holznutzung dann, rein aus Klimaschuttsicht, als vorzüglich zu beurteilen sind, ist abhängig von der Stabilität und dem Speicherpotenzial der Wälder, der Verwendung von Holz in langlebigen und kreislauffähigen Produkten sowie den zukünftigen Substitutionseffekten. Für die Zukunft kann dies nur unter Verwendung von Szenarien abgeschätzt werden. Dabei könnten auch derzeit noch nicht realisierte Optionen wie *Bio-Energy Carbon Capture and Storage* (BECCS), Pyrolyse mit Holzkohlegewinnung zur Festlegung des Kohlenstoffs in Böden oder in Baumaterialien oder die Einlagerung von nicht stofflich nutzbaren Sortimenten unter Luftabschluss in alten Stollen zukünftig eine Rolle spielen. Diese Optionen sollten daher so früh wie möglich in zukünftige Abschätzungen einbezogen werden.

Zusammenfassung	iii
1 Anlass und Zielsetzung	1
2 Klimaschutzleistung von Wald und Holznutzung – Definitionen und Erläuterungen	2
2.1 Einfluss des konzeptionellen Rahmens und verschiedener Einflussfaktoren auf die Klimaschutzleistung	2
2.2 Teilsysteme der Klimaschutzleistung	3
2.3 Kohlenstoffspeicher und deren Änderungen	5
2.4 Vermeidung von Treibhausgasemissionen (Potenzielle Substitutionseffekte)	6
2.5 Treibhausgas-Emissionen in der Klimaberichterstattung	7
2.6 Umfassende Betrachtung der Klimaschutzleistung	8
3 Methoden zur Ermittlung der Klimaschutzleistung von Wald und Holznutzung	10
3.1 Stand des Wissens zu methodischen Ansätzen	10
3.1.1 Ermittlung der C-Speicher im Wald und in Holzprodukten	10
3.1.2 Ermittlung von potenziellen Substitutionseffekten	11
3.1.3 Ermittlung von Klimaschutz- leistungen	18
3.2 Wesentliche Aspekte bei der Er-mittlung der Klimaschutzleistung von Wald und Holznutzung	20
3.2.1 Systemgrenzen	20
3.2.2 Produktebene und räumliche Ebene	21
3.2.3 Zeitliche Betrachtung	23
3.2.4 Folgenbetrachtung	25
3.2.5 Zusätzlichkeit	26
3.2.6 Szenarienbildung	26
4 Empfehlungen	29
5 Schlussfolgerungen und Ausblick	33
6 Literatur	34
7 Glossar	41

1 Anlass und Zielsetzung

Der Klimawandel wird weithin als eines der größten globalen Probleme des Anthropozäns angesehen. Zudem gehen mit dem Klimawandel auch andere große globale Umweltprobleme wie Wüstenbildung, Trockenheit, Hochwasser, Stürme oder Verlust an biologischer Vielfalt einher. Klimaschutz ist daher ein vordringliches Politikziel, sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene. Etablierte Produktionsprozesse und gewohnte Verhaltensmuster aus allen Lebensbereichen werden vor dem Hintergrund des Klimawandels in Frage gestellt. Betroffen davon sind zum Beispiel unsere Mobilität, der Energieverbrauch im Bereich Wohnen, die Versorgung energieintensiver Industrien oder das Ausmaß unseres privaten Konsums.

Auch Waldbewirtschaftung wird zunehmend aus dem Blickwinkel des Klimaschutzes betrachtet. Dabei lassen sich in der öffentlichen Auseinandersetzung über den Beitrag von Wald zum Klimaschutz unterschiedliche Argumentationslinien beobachten (vgl. z. B. Schulz & Weber-Blaschke 2021): Die eine bezieht sich ausschließlich auf den Wald und argumentiert folgerichtig mit einer möglichst hohen Kohlenstoffspeicherung im Wald. Eine andere argumentiert überwiegend mit vermiedenen Treibhausgas (THG)-Emissionen bei der Verwendung von Holz anstelle anderer Materialien, die mit höherem Energieaufwand hergestellt und verarbeitet werden. Eine weitere versucht, das gesamte System der Nutzung von Wald zu betrachten und argumentiert entsprechend mit den Kohlenstoffspeichern Wald und Holzprodukte sowie mit den potenziellen Substitutionseffekten. Bei dieser Diskussion wird deutlich, wie vielschichtig dieses Thema ist und wie viele verschiedene Disziplinen und Perspektiven ineinandergreifen.

Mit der vorliegenden Stellungnahme zielt der Wissenschaftliche Beirat Waldpolitik (WBW) des Bundesministeriums für Landwirtschaft, Ernährung und Heimat (BMLEH) darauf ab, das komplexe Thema der Klimaschutzleistungen von Wald und Holznutzung anschaulich darzustellen, auf wesentliche Punkte bei der Ermittlung der Klimaschutzleistungen hinzuweisen und Empfehlungen zum Umgang mit diesem Thema zu geben. Die Stellungnahme versucht bei der Darstellung des Themas, die Balance zwischen „so einfach wie möglich“ und „so komplex wie notwendig“ zu wahren. Mit dieser Stellungnahme sollen der Politik, den Unternehmen sowie der Öffentlichkeit Hilfestellung bei der Interpretation von Informationen zu Klimaschutzleistungen von Wald und Holznutzung in Deutschland gegeben werden.

Zur Vermeidung von Missverständnissen sei vorab darauf hingewiesen, dass bestehende internationale Konventionen wie die der Treibhausgas-Berichterstattung oder die Normen der Produkt-Ökobilanzierung in diese Stellungnahme miteinbezogen wurden. Der WBW gibt mit der Stellungnahme aber auch Verfahrensvorschläge, die über diese Konventionen und Normen hinausgehen, wenn dies für eine sachgerechte Ermittlung der Klimaschutzleistungen von Wald und Holznutzung erforderlich ist. Der Begriff Klimaschutzbeitrag bzw. Klimaschutzleistung ist dabei zunächst nicht wertend, d.h. positiv oder negativ zu verstehen. Die Klimaschutzleistungen beschreiben, inwieweit Klimaschutz durch Wald und Holznutzung unter verschiedenen Rahmenbedingungen erreicht wird, wobei die Ergebnisse für Speicher- und potenzielle Substitutionseffekte durch bestimmte Entwicklungen oder Steuerungsmaßnahmen (im Vergleich zwischen verschiedenen Szenarien) besser oder schlechter ausfallen können.

2 Klimaschutzleistung von Wald und Holznutzung – Definitionen und Erläuterungen

2.1 Einfluss des konzeptionellen Rahmens und verschiedener Einflussfaktoren auf die Klimaschutzleistung

Vor dem Einstieg in die eigentlichen Teilsysteme und Mechanismen der Klimaschutzleistung von Wald und Holznutzung geben wir zunächst einen Überblick darüber, (i) welchen Einfluss der gewählte konzeptionelle Rahmen auf die ermittelte Klimaschutzleistung von Wald und Holznutzung hat und (ii) von welchen natürlichen, wirtschaft-

lichen, technischen und gesellschaftlichen Einflussfaktoren diese Klimaschutzleistung vor allem abhängig ist (Abb. 1).

Die Klimaschutzleistung von Wald und Holznutzung ist danach grundsätzlich davon abhängig, bis zu welcher Ebene die drei Skalen (1) räumliche Skala, (2) zeitliche Skala und (3) Skala der miteinander agierenden Teilsysteme betrachtet werden. Es gilt: Je umfassender die Skalen gewählt werden, desto vollständiger wird die Klimaschutzleistung abgebildet. Eine globale Skala stellt beispielsweise sicher, dass auch Verlagerungseffekte wie z. B. die Veränderung der Waldnutzung im Ausland infolge von Klimaschutzmaßnahmen im Inland und damit deren Klimaschutzwirkung einbezogen werden.

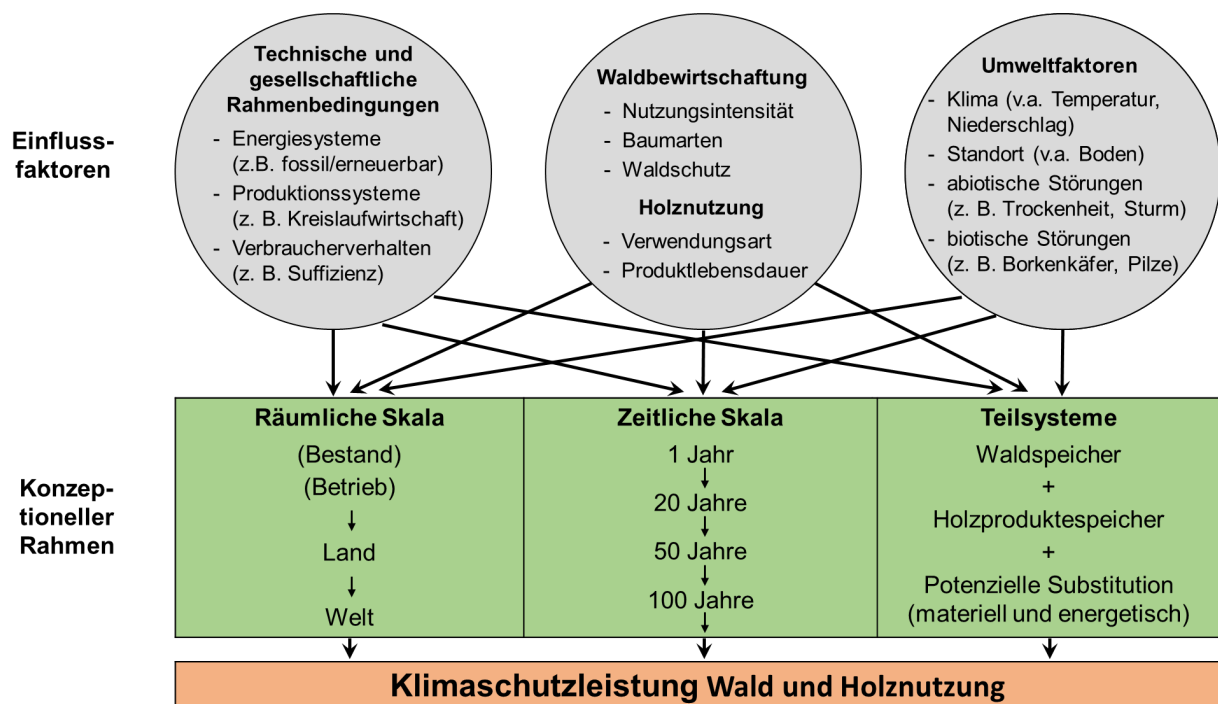


Abb. 1: Bedeutung des konzeptionellen Rahmens und verschiedener Einflussfaktoren auf die Klimaschutzleistung von Wald und Holznutzung; Bestand und Betrieb können hinsichtlich des Waldspeichers analysiert werden; diese Ebenen können aber meist keinen Holzmarkt und damit keine Effekte hinsichtlich Substitution oder Holzproduktespeicher abbilden.

Eine langfristige zeitliche Skala gewährleistet, dass die mit der Waldwirtschaft untrennbar verbundenen langfristigen Wirkungen, wie z. B. die Emissionen aus der natürlichen Zersetzung von abgestorbenem Holz, sowie die langfristigen wirtschaftlichen, technischen und gesellschaftlichen Entwicklungen berücksichtigt werden. Die Berücksichtigung aller drei Teilsysteme stellt zuletzt sicher, dass nicht nur die Speicherung von Kohlenstoff in Wald und Holzprodukten, sondern auch alle verbundenen Treibhausgas-Emissionen in anderen Sektoren durch die Wahl von Holz anstelle anderer Materialien erfasst werden. Auch hier gilt, dass eine möglichst umfassende Betrachtung aller betroffenen Sektoren zu einer möglichst umfassenden Abbildung der Klimaschutzleistung führt. Wenn Untersuchungen auf kleinerer räumlicher Skala, für kürzere Zeiträume oder nur für Teilsysteme und einzelne Sektoren vorgenommen werden, sollte auf diese Einschränkungen im Untersuchungsrahmen und damit auch in der Ergebnisinterpretation hingewiesen werden.

Die Klimaschutzleistung von Wald und Holznutzung hängt von einer Vielzahl von Einflussfaktoren ab. Natürliche Faktoren wie Temperatur und Niederschlag oder abiotische und biotische Störungen beeinflussen die Treibhausgasbilanz des Waldes ebenso wie Art und Intensität der Waldbewirtschaftung. Von großer Bedeutung sind ebenfalls die technischen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen. Die zukünftigen Energiesysteme bestimmen wesentlich über den Fortbestand und die Höhe der Substitutionseffekte. Bei vollständig emissionsfreier Energieversorgung, wie im Klimaschutzgesetz Deutschlands für das Jahr 2045 gefordert, entfallen entsprechend sowohl stoffliche als auch energetische Substitutionseffekte, die bisher auf der geringeren Energieintensität der Holzprodukteherstellung oder der Substitution fossiler Energieträger basieren. Stoffliche Substitutionseffekte, die sich aus prozessbedingten CO₂-Emissionen wie beispielsweise bei der Zementherstellung ergeben, sind hiervon nicht betroffen. Auch Änderungen der

Produktionssysteme und des Verbraucherverhaltens haben Einfluss auf die Klimaschutzleistung von Wald und Holznutzung. Eine verstärkte Kreislaufwirtschaft verlängert die stoffliche Nutzung von Holz und dadurch die (biogene) Kohlenstoffspeicherung in diesen Produkten bzw. Materialien und zögert die Freisetzung von biogenem CO₂ aus der energetischen Holznutzung hinaus (siehe Glossar 1 und 2, Anhang). Ein stärker an Suffizienz orientiertes Verhalten der Bevölkerung würde, ceteris paribus, dazu führen, dass nicht nur weniger Holzprodukte, sondern weniger Produkte insgesamt verbraucht würden. Das könnte dazu führen, dass weniger Nicht-Holz-Produkte mit höheren Emissionen ersetzt werden, was zwar die Substitutionseffekte verringern würde, aber gleichzeitig auch die Gesamtemissionen.

Auf alle diese Punkte wird im Weiteren noch näher eingegangen. Wichtig ist an dieser Stelle herauszustellen, dass die Klimaschutzleistung von Wald und Holznutzung immer nur für eine bestimmte Konstellation von Einflussfaktoren und Annahmen über deren Entwicklung ermittelt werden kann. Das Ergebnis ist dementsprechend der Beitrag von Wald und Holznutzung unter den konkreten Annahmen über die Einflussfaktoren und deren Entwicklung. Abschätzungen der Klimaschutzleistung unterliegen den Unsicherheiten in allen Annahmen über die relevanten Einflussfaktoren an sich und über deren Wirkung.

2.2 Teilsysteme der Klimaschutzleistung

Die hier diskutierten, grundlegenden Klimaschutz-Wirkmechanismen zur Minderung des anthropogen verursachten Klimawandels umfassen (1) Senkenleistungen sowie (2) THG-Emissionsvermeidungen.

Wald und Holznutzung können zu beiden Wirkmechanismen beitragen (siehe Abb. 2), wenn

(1a) eine Netto-Erhöhung des Waldspeichers aus der Differenz der Aufnahme von Treibhausgasen

(insbesondere CO_2) aus der Atmosphäre in Waldkompartimente und deren Abgabe vorliegt (Speicherfunktion),

(1b) eine Netto-Erhöhung des Holzproduktespeichers aus der Differenz des Zu- und Abflusses von Holzprodukten vorliegt (Speicherfunktion),

(2) Treibhausgas-Emissionen, insbesondere von fossil-basiertem Kohlenstoffdioxid ($\text{CO}_{2,\text{fossil}}$), aufgrund der Verwendung von Holz anstelle von anderen, energie-intensiver hergestellten Materialien oder anstelle von fossilen Energieträgern vermieden werden können (Substitutionspotenzial).

Für die Bestimmung dieser Veränderungen bei (1a, 1b) und (2) muss zuvor immer definiert werden, gegenüber welcher Referenz diese stattfinden,

z. B. gegenüber einem Status Quo, einer bestimmten Referenzperiode, einem „business-as-usual“-Szenario oder anderen Referenzszenarien.

Beide Wirkmechanismen werden in den folgenden Kapiteln 2.2 und 2.3 näher erläutert. Es sei darauf hingewiesen, dass neben CO_2 auch weitere relevante Treibhausgase wie Methan (CH_4) und Lachgas (N_2O) berücksichtigt werden müssen. Sie können vom Waldboden als Teil der Biosphäre sowohl aufgenommen als auch abgegeben werden (Abb. 2 links) und entstehen ebenfalls bei industriellen Prozessen (Abb. 2, rechts). Verwendete Begrifflichkeiten im Text sowie in den Abbildungen und Tabellen werden in Glossar 1 und Glossar 2 im Anhang gemäß Definitionen in Fachliteratur und Normen erläutert.

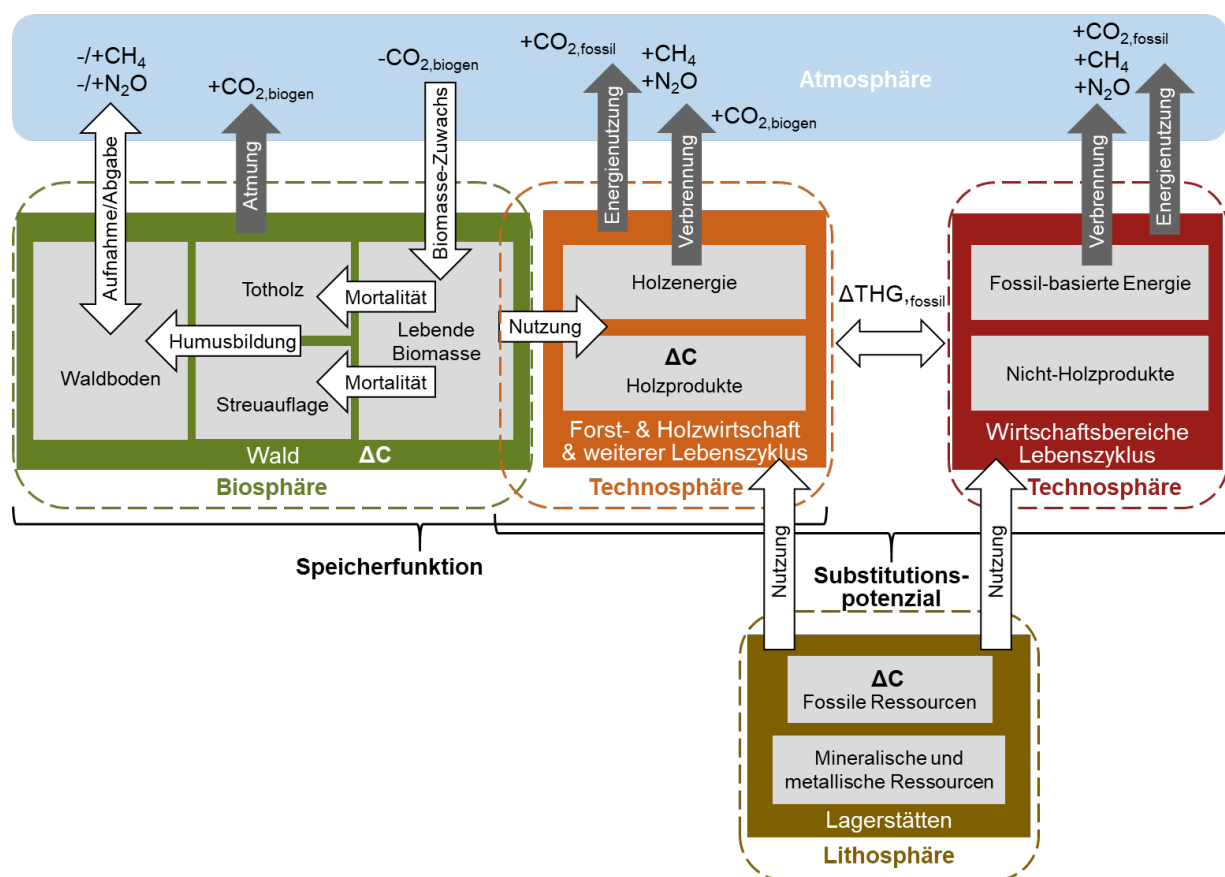


Abb. 2: Klimaschutz relevante Kohlenstoffspeicher (C) und Treibhausgas (THG)-flüsse (CO_2 , CH_4 , N_2O) von Wald und Holznutzung und ihre Wechselwirkungen (verändert und ergänzt nach Schulz & Weber-Blaschke 2021, Nabuurs et al. 2015).

Klimarelevante Wirkungen gehen von Waldböden nicht nur durch CO_2 -, sondern auch durch N_2O - und CH_4 -Produktion oder Aufnahme aus (Maier et al. 2017). In Böden wird durch die Atmung von Wurzeln, Mikroorganismen und Makrofauna CO_2 produziert. Unter aeroben Bedingungen wird ein Teil der organischen Bodensubstanz von Mikroben unter Emission von CO_2 verbraucht. Ein anderer Teil der organischen Substanz im Boden wird stabilisiert und kann dort je nach Bodeneigenschaften bis zu mehreren hundert oder sogar mehreren tausend Jahren verbleiben. Je nachdem welcher Prozess dominiert, kann der Boden eine Quelle oder auch eine Senke für CO_2 sein. Methan (CH_4) kann je nach Sauerstoffverfügbarkeit in der Bodenluft gleichzeitig an verschiedenen Bodenmikrostandorten produziert oder verbraucht werden. Unter anaeroben Bedingungen wird CH_4 produziert, unter aeroben Bedingungen wird CH_4 durch mikrobielle Oxidation zu CO_2 umgewandelt. Auch bei der Entstehung von Lachgas (N_2O) spielt der Wasserhaushalt der Böden eine große Rolle. Bei anaeroben Bedingungen (z. B. in wassergesättigten Böden) entsteht durch Denitrifikation von Nitrat (NO_3^-) Lachgas (N_2O). Das Gleichgewicht zwischen Gesamtproduktion und -verbrauch macht Boden zu einem Nettoproduzenten oder -verbraucher von CH_4 oder N_2O . Daher ist die Bodenbelüftung, die einerseits von den natürlichen Bodeneigenschaften abhängt, aber auch von forstwirtschaftlichen Maßnahmen wie Bodenbefahrung beeinflusst werden kann, von zentraler Bedeutung.

Neben dem Austausch klimarelevanter Treibhausgase beeinflussen Wälder auch durch ihre biophysikalischen Eigenschaften das Klima (Luyssaert et al. 2014). Landnutzungsänderungen und Verschiebungen der Baumartenzusammensetzung verändern die Albedo, d. h. den Anteil des von der Erdoberfläche reflektierten Sonnenlichts. Die Zunahme der Waldbedeckung (dunkle Oberfläche), insbesondere in hohen Breiten mit lang andauernder Schneebedeckung (helle Oberfläche), kann stärker zur globalen Erwärmung beitragen als die mit der Bewaldung

verbundenen Kohlenstoffsenkeneffekte der Erwärmung entgegenwirken (Hasler et al. 2024). Albedo-Unterschiede zwischen Baumarten beeinflussen auch die Temperaturen an der Kronenoberfläche. So wurde in Norddeutschland für Kiefernbestände im Sommer eine 0,6 K höhere Temperatur berechnet im Vergleich zu natürlich vorherrschenden Buchenwäldern (Leuschner et al. 2022). Daneben gibt es auch Kühlungseffekte, mit denen Wälder durch Evapotranspiration, Wolkenbildung und Aerosole das regionale Klima beeinflussen (Ellison et al. 2024; Smith & Gasser 2022). Auch wenn bereits aktuelle Studien zu Albedo-Effekten vorliegen, z. B. von Hasler et al. (2024) oder Graf et al. (2023), ist der Wissensstand doch noch zu lückenhaft und uneinheitlich, um diese Klimaschutzeffekte in diesem Gutachten ausreichend fundiert zu behandeln. Die unterschiedlichen klimarelevanten Effekte sollten deshalb zukünftig in verbesserten Vegetationsmodellen sowie Landnutzungs- und Forstmanagementszenarien berücksichtigt werden.

2.3 Kohlenstoffspeicher und deren Änderungen

Der Wald besteht aus verschiedenen Kompartimenten, die Kohlenstoff speichern: Die lebende ober- und unterirdische Biomasse, das abgestorbene organische Material (Totholz, Streuauflage, tote Wurzeln) und der mineralische Waldboden. Über die Photosynthese nehmen Pflanzen Kohlenstoffdioxid (CO_2) aus der Atmosphäre auf und binden dabei den Kohlenstoff (C), vor allem im Holz (Senke). Durch Absterben der Biomasse (Mortalität) werden die Speicher ober- und unterirdisches Totholz und Humusaufgabe sowie nachfolgend über Bioturbation und Verlagerung mit dem Sickerwasser der Speicher Mineralboden mit Kohlenstoff beliefert (zeitliche Verlängerung der Speicherung). Durch Atmung der Organismen wird der organische Kohlenstoff aus diesen Speichern wieder an die Atmosphäre abgegeben.

Diese Prozesse spielen sich im Austausch zwischen Atmosphäre und Biosphäre ab (siehe Abb. 2). Werden die Einbindung von Kohlenstoff in das

Waldökosystem und die Freisetzung aus diesem System an die Atmosphäre ermittelt und davon noch diejenige Menge an Kohlenstoff abgezogen, die über das geerntete und genutzte Holz den Wald und damit die Biosphäre verlässt, erhält man als Saldo die Veränderung des Kohlenstoffspeichers Wald. Ist die Änderung positiv, wurde also in einem Zeitraum der Kohlenstoffspeicher erhöht, ist dies ein positiver Beitrag des Teilsystems Wald zum Klimaschutz.

Infolge der Nutzung der Wälder entsteht der Speicher der Holzprodukte, in dem der Kohlenstoff von Teilen der Biomasse je nach entstandenen Holzprodukten unterschiedlich lang gespeichert wird (zeitliche Verlängerung der Speicherung). Durch die Zersetzung und energetische Nutzung der Holzprodukte wird der Kohlenstoff wieder freigesetzt. Bei der Nutzung als Brennholz geschieht dies meist nach wenigen Jahren oder bei der abschließenden Verwertung des Altholzes nach der stofflichen (Kaskaden-)Nutzung nach längeren Zeiträumen. Der Holzproduktespeicher vergrößert sich, wenn in einem bestimmten Zeitraum mehr Holz dem Speicher zugeführt wird als aus dem Speicher entlassen wird (Verbrennung und Zersetzung), z. B. durch zusätzliche Verwendung von Holz im Gebäudesektor. Bei einer gleichbleibenden Zufuhr von Holz in den Speicher, würde eine Verlängerung der durchschnittlichen Lebensdauer vorübergehend ebenfalls zu einer Erhöhung des Speichers führen. Dies stellt dann rechnerisch eine Senke dar. Der Holzproduktespeicher nimmt selber jedoch keinen Kohlenstoff aktiv auf (keine Photosynthese). Verringert sich jedoch der Holzproduktespeicher, da z. B. weniger Holzhäuser gebaut als rückgebaut werden und das Altholz energetisch statt weiter stofflich genutzt wird, wird der Holzproduktespeicher zur Quelle.

In der erweiterten gemeinsamen Betrachtung von Waldspeicher und Holzproduktespeicher ist eine Klimaschutzleistung dann gegeben, wenn sich die Speicher Wald und Holzprodukte in der Summe (netto) vergrößern.

2.4 Vermeidung von Treibhausgas-emissionen (Potenzielle Substitutionseffekte)

Sind die fossil-basierten Treibhausgas-Emissionen (siehe Glossar 1, Anhang) durch die Holz-Verwendung über den Lebensweg der Herstellung und Nutzung niedriger als diejenigen funktionsgleicher Energieträger oder Produkte aus anderen Materialien, kann über die Differenz der THG-Emissionen das Einsparpotenzial berechnet werden, wenn Holz statt anderer Materialien eingesetzt wird. Dies wird als potenzieller Substitutionseffekt bezeichnet, wobei zwischen potenziellen Effekten der Energiesubstitution und der Materials substitution unterschieden wird. Der Begriff der „potenziellen Effekte“ wird verwendet, wenn Substitutionseffekte zwischen einer definierten Referenz und Szenarien mit angenommener, alternativer Produktverwendung berechnet werden. Dabei werden die Treibhausgasbilanzen über die Methode der Produkt-Ökobilanzierung berechnet (Kap. 3.1.2). Bei dieser Methode wird die Technosphäre, also der „vom Menschen unter Anwendung von Technik beeinflusste“ Lebensweg der Produkte analysiert. Bei Holzprodukten ist dies der Lebensweg von der Forstwirtschaft über die (Holz-)Produktherstellung und -verwendung(en) bis zum Altholz-/Abfallmanagement. Durch die Forstwirtschaft überlappen sich Biosphäre (mit Effekten durch natürliche Abläufe im Wald) und Technosphäre (mit Effekten durch menschliche Eingriffe in den Wald) (Abb. 2).

2.5 Treibhausgas-Emissionen in der Klimaberichterstattung

Alle Länder sind im Rahmen der internationalen Klimapolitik (United Nations Framework Convention on Climate Change - UNFCCC) verpflichtet, jährlich Emissionen und Speicherung von Treibhausgasen für den Sektor „Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft“ (LULUCF) zu berichten. Für die Länder innerhalb der EU wird die Treibhausgasberichterstattung nach internen Regeln der EU auf Grundlage der international vereinbarten Verpflichtungen vorgenommen.

In nationalen Berichten, wie bei der deutschen Klimaberichterstattung, werden Emissionen von Kohlenstoffdioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) im LULUCF Sektor in den Landnutzungskategorien Wald, Ackerland, Grünland, Feuchtgebiete, Siedlungen und Sonstiges Land über die Änderung der Kohlenstoffspeicher in organischen und mineralischen Böden, ober- und unterirdischer Biomasse sowie Totholz und Streu inventarisiert (Gensior et al. 2025). Außerdem wird die verzögerte Freisetzung von biogenen CO₂-Emissionen über den Kohlenstoffspeicher in Holzprodukten erfasst. Dazu wird die durchschnittliche Nutzungsdauer unterschiedlicher Holzprodukte berücksichtigt.

Die Treibhausgasemissionen des LULUCF-Sektors in Deutschland sind in Abbildung 3 dargestellt (Gensior et al. 2025).

Hierbei werden für den Bereich „*Forestry* – Forstwirtschaft“ die Kategorien Wald und Holzprodukte betrachtet, die auf Grundlage der aktuellen Ergebnisse der Bundeswaldinventur 4 (BMEL 2024) neu bilanziert wurden. Der Wald ist in den letzten 5 Jahren 2018-2023 aufgrund der Abnahme der Biomassevorräte zu einer Quelle von Treibhausgasen geworden, der Holzproduktespeicher fungiert nach wie vor als Senke.

Der Substitutionseffekt durch die Nutzung von Holz taucht in der Klimaberichterstattung nach UNFCCC nicht direkt auf. Es werden nur die tatsächlichen THG-Emissionen im LULUCF-Sektor berichtet. Sind aber durch Energie- und Materialsubstitution in einem Jahr tatsächlich THG-Emissionen vermieden worden, schlägt sich das in niedrigeren Treibhausgasemissionen in anderen Sektoren nieder, vor allem in den Sektoren Energie und Industrie. Indirekt wirkt der Substitutionseffekt dadurch auf die Höhe der gesamten Treibhausgasemissionen eines Landes. Allerdings ist diese tatsächliche Einsparung nicht einfach zu berechnen. Bei der Energieerzeugung kann basierend auf Statistiken bzw. Umfragen der Wechsel von einem fossil-basierten Energieträger zu Energieholz in einem Jahr annähernd nachvollzogen werden. Hinsichtlich der stofflichen Nutzung ist es schwieriger, da meistens nur vermutet werden kann, was substituiert worden sein könnte.

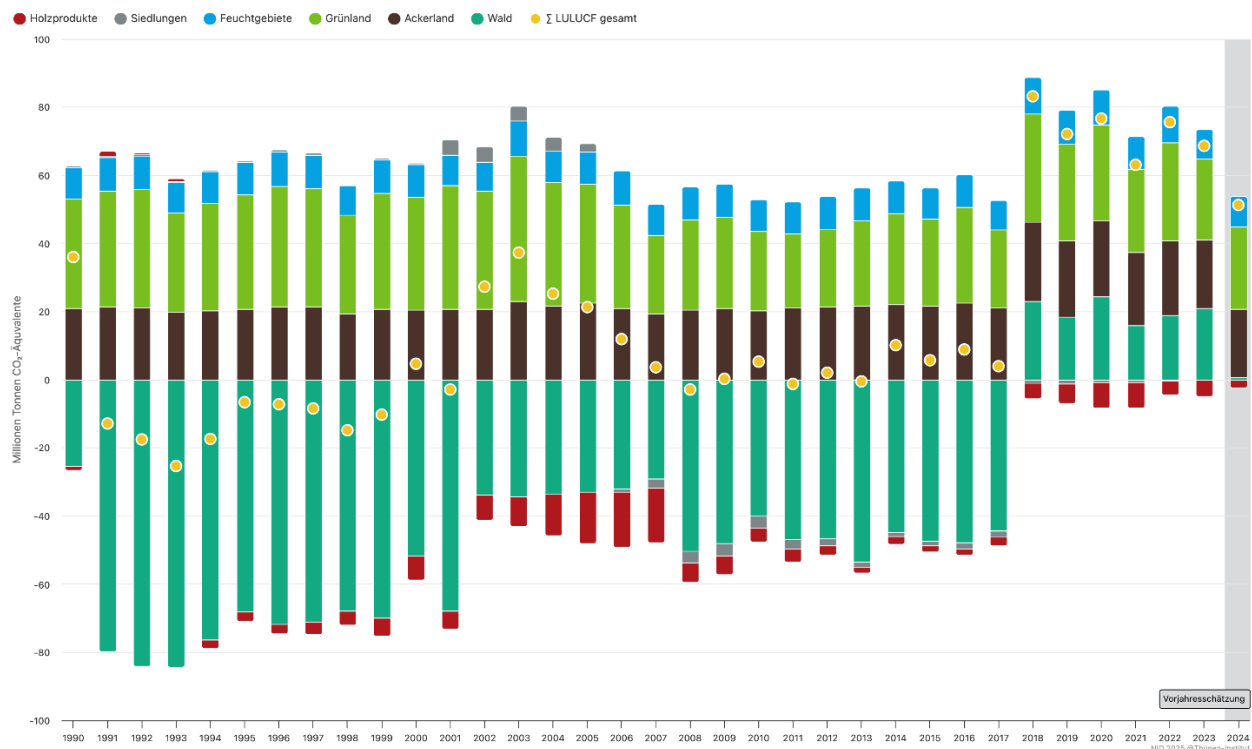


Abb. 3: Zeitreihe der jährlichen Treibhausgasemissionen (Summe aus CO₂, CH₄ und N₂O in Mio. CO₂-Äquivalenten) im LULUCF-Sektor seit 1990, unterschieden nach Landnutzungskategorien; positiv (Balkensegmente oberhalb der Nulllinie): Quelle; negativ (Balkensegmente unterhalb der Nulllinie): Senke (Gensior et al. 2025). Der sprunghafte Wechsel des Waldes von einer Senke zu einer Quelle nach 2017 ist auf die Inventurperioden zurückzuführen. Zwischen der Kohlenstoffinventur 2017 und der Bundeswaldinventur 2022 kam es aufgrund der massiven Waldschäden zu einem signifikanten Rückgang der Biomassevorräte (BMEL 2024).

2.6 Umfassende Betrachtung der Klimaschutzleistung

Abbildung 2 zeigt, dass sich die Prozesse der Klimaschutz-Wirkmechanismen in den Teilsystemen Wald- und Holzproduktespeicher sowie potenzielle Substitution gegenseitig beeinflussen. Wenn im Wald weniger genutzt wird, kann (je nach Ausgangslage) mehr Vorrat aufgebaut und damit Kohlenstoff aus atmosphärischem CO₂ in Biomasse gespeichert werden. Damit steht aber weniger Holz für die Nutzung zur Verfügung. Es wird weder der Holzproduktespeicher aufgebaut, noch werden andere Materialien substituiert, wodurch Treibhausgase eingespart werden könnten. Wird im Gegensatz dazu mehr Holz genutzt, sinkt der Kohlenstoffvorrat in der Biomasse des Waldes (der Wald kann zur C-Quelle werden), dafür kann mehr Kohlenstoff in

Holzprodukten gespeichert und es können mehr Nicht-Holzprodukte substituiert werden. Für die Berechnung der Klimaschutzleistung muss also analysiert werden, wie diese Teilsysteme quantitativ zusammenhängen und in welcher Höhe sie sich ergänzen oder kompensieren (siehe z.B. Taverna et al. 2007 und Werner et al. 2023 für die Schweiz).

Daraus lässt sich ableiten, dass die Klimaschutzleistung des Gesamtsystems Wald und Holznutzung einer Region, z. B. Deutschland, grundsätzlich nur aus der Zusammenschau der beschriebenen Teilsysteme quantifiziert werden kann, d. h. der Dynamik (1) der Kohlenstoffspeicherung im Wald, (2) der Kohlenstoffspeicherung in Holzprodukten sowie (3) der potenziellen Substitutionseffekte durch Holznutzung. Eine Interpretation der Klimaschutzleistung eines einzelnen dieser genannten Teilsysteme ist nicht zielführend für

Rückschlüsse auf das Gesamtsystem. Denn aus den oben genannten Erläuterungen wird ersichtlich, dass zur Interpretation von Klimaschutzleistungen von Wald und Holznutzung Speichereffekte nicht ohne potenzielle Substitutionseffekte betrachtet werden können, und potenzielle Substitutionseffekte nicht ohne Einbeziehung von Änderungen im Wald bzw. der Holzproduktespeicher.

Waldspeicher und Holzproduktespeicher beziehen sich auf eine räumliche Skala. Beim Wald könnte dies je nach Zielsetzung ein Waldbestand, der Forstbetrieb, und Wald auf regionaler, nationaler oder internationaler Ebene sein. Hinsichtlich der Holzproduktespeicher sind demgegenüber die Märkte zu betrachten, die nicht nur räumliche, sondern auch sektorale Grenzen (z. B. Bau-, Möbel-, Verpackungssektor u. a.) aufweisen können. Für eine umfassende Betrachtung sind dabei nicht nur die Holzprodukte innerhalb des Systems zu betrachten, sondern auch Importe/Bezüge und Exporte/Lieferungen, um mögliche *Leakage*-Effekte identifizieren zu können (siehe Kapitel 2.1).

Die Speicher- und Substitutionseffekte sind zeitlichen Entwicklungen unterworfen, die für Zukunftsanalysen in Szenarien abgebildet werden, die zwischen kurz-, mittel- und langfristigen Zeiträumen differenzieren sollten. Aufgrund der in vielen Fällen langen Zeitspannen sowohl bei der Waldentwicklung als auch bei den Produktlebenswegen ist es für eine konsistente Betrachtung erforderlich, einerseits die natürliche Zersetzung von abgestorbener Biomasse und Holz im Wald, andererseits die Lebensdauern von Holzprodukten miteinzubeziehen.

3 Methoden zur Ermittlung der Klimaschutzleistung von Wald und Holznutzung

3.1 Stand des Wissens zu methodischen Ansätzen

3.1.1 Ermittlung der C-Speicher im Wald und in Holzprodukten

Die Waldspeicher und ihre Änderungen sind über Messungen (retrospektiv) und Modellierungen (prospektiv) quantifizierbar. Für die Messung der Speicher Biomasse und Totholz werden in der Regel Daten forstlicher Inventuren verwendet. Das kann betriebsweise über Forstbetriebsinventuren erfolgen oder für ganze Regionen, wie für Deutschland durch die Bundeswaldinventur, die alle 10 Jahre stattfindet, und die Kohlenstoffinventur, die zeitlich versetzt in der Mitte der Inventurperiode der Bundeswaldinventur stattfindet (BMEL 2024). Darauf aufbauend werden Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierungen (WEHAM) für Deutschland durchgeführt (z. B. Oehmichen et al. 2018). Sie erlauben die Abschätzung der C-Speicher auch jenseits der letztverfügbaren Inventuren (z. B. Wellbrock et al. 2014). Weitere Modellierungs-Tools wie z. B. der Waldwachstumssimulator SILVA (Pretzsch et al. 2002, Schwaiger et al. 2019), das Forstbetriebliche Simulationsmodell Forest Economic Simulation Model (FESIM) (z. B. Rosenkranz et al. 2023) oder das Waldlandschaftsmodell iLand (Rammer et al. 2024), finden neben WEHAM ebenfalls Anwendung zur Abschätzung von C-Speicheränderungen der oberirdischen Biomasse im Wald.

Die Ermittlung der Änderungen des Waldbodenspeichers erfolgt in Deutschland über die periodische Bodenzustandserhebung im Wald, die in den Jahren 2022-2024 zum dritten Mal durchgeführt wird (Thünen 2024). Zur Abschätzung von Veränderungen im Zuge der Waldentwicklung werden von einigen Waldsimulationsmodellen Bodenmodule verwendet, z.B. Carbon Budget Model (CBM-CFS3; Pilli et al. 2017), oder als separates Modell

gekoppelt, z. B. Yasso für die Projektion der Humusaufgabe (Liski et al. 2005, Hernandez et al. 2017).

Das FABio-Waldmodell kombiniert die Modellierungen von Wald- und Holzproduktespeicher. Das Simulationsmodell beschreibt Biomasseproduktion und Nutzung in der Land- und Forstwirtschaft und deren Auswirkungen auf bestimmte Umweltindikatoren. FABio integriert verschiedene Teilmodelle vom Wald bis zum Holzprodukt: ein Einzelbaumwachstumsmodell auf Basis der Daten der Bundeswaldinventur (BWI), ein Einwuchs-, ein Mortalitäts- und ein Totholzmodell, ein Bodenkohlenstoffmodell sowie ein Holzsortierungs- und Holzproduktmodell (Böttcher et al. 2018).

Für die Berechnung der Klimaleistungen der Waldbewirtschaftung und Holzverwendung in der Schweiz wurde das Management-Szenario-Simulationsmodell MASSIMO verwendet, das die Waldentwicklung auf Basis des Schweizer Landesforstinventars simuliert (siehe Werner et al. 2023). Das European Forest Information SCENario Space Model 1.0 (EFISCEN-Space, Schelhaas 2022) ist ein räumlich und zeitlich hochaufgelöstes Waldmodell, das die Waldressourcen der Europäischen Region auf Basis der nationalen Waldinventuren hinsichtlich der zukünftigen Entwicklungen projektieren kann. Es wurde erstellt, um beispielsweise Szenarien hinsichtlich nachhaltigem Forstmanagement, Waldflächen- oder Waldwachstumsänderungen aufgrund des Klimawandels, zukünftigen Holzproduktionsmöglichkeiten sowie Zielkonflikte zwischen Waldökosystemleistungen und Kohlenstoffbilanzen unter unterschiedlichen Bewirtschaftungsweisen modellieren zu können.

Ein weiteres Modell, das für globale und regionale Studien zur Berechnung von C-Speichern der Landnutzung entwickelt (Smith et al. 2001) und auch bereits für Bayern, Deutschland und Europa (Krause et al. 2020, Gregor et al. 2024) angewendet wurde, ist das Prozess-basierte Vegetationsmodell LPJ-GUESS (Lund-Potsdam-Jena General Ecosystem Simulator).

Nicht alle relevanten Prozesse sind und können in Waldsimulationsmodellen abgebildet werden. Es gibt große Unterschiede zwischen alternativen Modellansätzen, die sich auf die Realitätsnähe z. B. von Bewirtschaftungseffekten, natürlichen Störungen oder klimatischen Extremereignissen auswirken (Mahnken et al. 2022).

Die Veränderung der Holzproduktespeicher kann grundsätzlich über zwei verschiedene Wege ermittelt werden: 1) über die Erfassung der Holzproduktespeicher zu zwei verschiedenen Zeitpunkten und die Ermittlung der Differenz oder 2) über den Saldo der Zuflüsse zum Holzproduktespeicher und Abflüsse aus ihm. Zudem sind verschiedene Ansätze zur Erfassung der Kohlenstoffspeicherwirkung entwickelt worden, die sich insbesondere durch Systemgrenzen unterscheiden und hinsichtlich der Beitragswirkung und Anrechnung einem politischen Diskurs unterliegen (Nabuurs & Sikkema 1998, Rüter 2017).

Oft verwendete Ansätze sind der *Stock-Change Approach* (Bestandsänderungsansatz) und der *Production Approach* (Produktionsansatz) (IPCC 2006). Beim *Stock-Change Approach* ist entscheidend, wo bzw. in welchem Land oder in welcher Region die Holzprodukte in Gebrauch sind. Dabei werden Exporte als Emissionen betrachtet und vom Speicher abgezogen, während Importe dem Holzproduktespeicher zugerechnet werden. Dieser Ansatz berücksichtigt somit die Änderung des Holzproduktespeichers direkt in einem Land oder einer Region. Beim *Production Approach* dagegen werden einem Land oder einer Region die Menge Holz, die dort produziert wird, einschließlich der Exporte angerechnet, Importe werden dagegen nicht berücksichtigt.

Für eine Abschätzung des Beitrags der stofflichen Nutzung von Holz im Rahmen internationaler Verpflichtungen zur Treibhausgasberichterstattung (UN und EU) hat Rüter (2017) den WoodCarbonMonitor entwickelt, der mit Flussgrößen arbeitet, welche die Änderungen der Kohlenstoffspeicherwirkung in Holzprodukten auf Basis der statistischen Daten zu Produktion und Außenhandel sowie der Informationen zu Nutzungs-

dauern abschätzt. Die Verknüpfung eines solchen Modells mit Modellen zur Abschätzung der Auswirkungen unterschiedlicher Waldbewirtschaftungsregime erlaubt die Berechnung der biogenen Kohlenstoffspeicher eines Landes insgesamt. Auch auf Ökobilanzergebnissen aufbauende Substitutionseffekte könnten an das Modell gekoppelt werden.

3.1.2 Ermittlung von potenziellen Substitutionseffekten

Das Thema der Substitution wird in dieser Stellungnahme ausführlicher betrachtet. Grund dafür ist, dass vermiedene Emissionen durch Substitution nicht messbar sind und daher nur auf Grundlage von Annahmen über die Güter, die substituiert werden könnten, berechnet werden können. Dieser Umstand führt dazu, dass errechnete Substitutionseffekte in der politischen Diskussion oft zu optimistisch und allgemeingültig verwendet werden und dadurch zu Überschätzungen führen. Im Folgenden finden sich daher detailliertere Informationen zur Verbesserung des Verständnisses.

Produkt-Umweltbewertung auf Basis von Ökobilanzen

Substitutionsfaktoren werden auf Basis von Produkt-Ökobilanzen ermittelt. Die grundsätzliche Vorgehensweise einer Ökobilanz wurde in den 1990er Jahren entwickelt und mit den Normen DIN EN ISO 14040:2021/14044:2021 vereinheitlicht, um funktionsgleiche Produkte aus unterschiedlichen Materialien und Herstellungswegen hinsichtlich ihrer Umweltwirkungen über den gesamten Lebensweg vergleichen zu können. Diese Produkt-Ökobilanzierung (engl. *Product Life Cycle Assessment*) analysiert, wie hoch die Umweltwirkung eines Produktes ist, und wird als *Attributional Life Cycle Assessment* (LCA) (Eigenschaftszuschreibende Ökobilanzierung) bezeichnet (weiterführende Informationen, siehe z. B. Curran 2017). Ein weiterer LCA Ansatz ist die *Consequential LCA* (Folgenabbildende Ökobilanzierung) (ohne Normerstellung) (Weidema et al. 2009), die

auch Konsequenzen, d. h. Umweltwirkungen außerhalb der Systemgrenzen berücksichtigt, die durch Produktentscheidungen (z. B. mehr Nachfrage nach einem bestimmten (umweltfreundlichen) Produkt anstelle des anderen) herbeigeführt werden können (weiterführende Informationen siehe z. B. Curran 2017, siehe auch Kap. 3.2.5).

Für Bauprodukte und Gebäude wurden basierend auf DIN EN ISO 14040:2021/14044:2021 spezifische internationale Normen hinsichtlich der Berechnung von Umweltwirkungen entwickelt, um die sich seit den 1990er weltweit entwickelnden Nachhaltigkeitsbewertungssysteme für den Baubereich zu harmonisieren. Der Baubereich ist der größte Verwendungsbereich von Holzprodukten im engeren Sinn, d. h. ohne Papierprodukte. Sein Anteil liegt in den letzten Jahren konstant bei ca. 50 % (54 % bei Mantau & Bilitewski 2010; 48 % bei Bösch et al. 2015; 49 % bei Glasenapp et al. 2017; 53 % bei Pfeifer et al. 2023). Im Bausektor wird auch ein großes Potenzial gesehen, mit Holz als Material für Bauprodukte Treibhausgase einzusparen (Churkina et al. 2020).

Drei für den Bausektor relevante Normen werden nachfolgend beschrieben.

- Die DIN EN 15804:2022 (S. 7) „liefert grundlegende Produktkategorieregeln (PCR) für Typ III Umweltdeklarationen für Bauprodukte und Bauleistungen aller Art“, um die harmonisierte Bereitstellung von Umweltinformationen gemäß Ökobilanz 14040/14044 sicher zu stellen. In die verbindliche Datenbasis des Bewertungssystems Nachhaltiges Bauen (BNB) „Ökobaudat“ werden Datensätze für die relevanten Bauprodukte konform zu dieser DIN EN 15804 bereitgestellt (BMWSB 2025).
- Die DIN EN 16485:2014 (S. 5) „liefert allgemeine Produktkategorieregeln (PCR) für Typ III-Umweltdeklarationen für Produkte aus Holz und Holzwerkstoffen zur Verwendung in Bauwerken und die damit zusammenhängenden Bauverfahren und Dienstleistungen“. Sie ergänzt damit die in DIN EN 15804:2022 festgelegten Grundregeln. Besondere Aspekte bei Holz

sind seine biogene Natur, seine Erneuerbarkeit und seine potenzielle Kohlenstoffneutralität, so dass in dieser Norm die Systemgrenze zwischen dem natürlichen System und dem untersuchten Produktsystem festgelegt wird.

- Die DIN EN 15978:2012 hat das Ziel, Berechnungsregeln für die Bewertung der umweltbezogenen Qualität (Umweltleistung) von neuen und bereits bestehenden Gebäuden zur Verfügung zu stellen. Ein valider Vergleich kann nämlich nur bei funktionsgleichen Produkten unternommen werden, weshalb der eigentliche Bewertungsgegenstand im Bauwesen nicht das Bauprodukt, sondern das Gebäude ist.

Für andere Verwendungszwecke von Holz, wie Möbel, Verpackungen, Textilien, Papier, Chemie, Energie gibt es außer den grundlegenden Ökobilanz-Normen DIN EN ISO 14040:2021/14044:2021 keine produktspezifischen Normen wie im Bauwesen. Teilweise sind aber für eine möglichst harmonisierte Vorgehensweise Leitfäden oder wissenschaftliche Artikel entstanden, die oftmals die Vorgehensweise und den Ansatz der Modularität der DIN EN 15804 (d. h. der systematischen Berücksichtigung und transparenten Darstellung von Prozessmodulen des Lebenswegs) auf Ökobilanzierungen von beispielsweise Möbeln (z. B. Wenker 2015) oder Energie (z. B. Wolf et al. 2016a) übertragen. Für sich entwickelnde, neue, innovative Produkte (z. B. Plattformchemikalien, Lignin-basierte Produkte aus Bioraffinerien) gibt es inzwischen immer mehr Ökobilanzstudien, die aber aufgrund sehr unterschiedlicher Prozesswege, mehrerer gleichzeitig entstehender Produkte (Multi-Outputs), schwieriger Datenerhebung, unterschiedlicher Rahmenbedingungen und Zukunftsszenarien nicht direkt vergleichbar sind (Hurmekoski et al. 2022; z. B. Sander-Titgemeyer et al. 2023).

Für die Systemgrenze zwischen dem natürlichen System (Biosphäre) und dem untersuchten Produktsystem (Technosphäre) (s. Kap. 2.4) wird in DIN EN 16485:2014 festgelegt, dass bei Holz, das aus dem natürlichen System in das Produktsystem eintritt, der Energiegehalt und der biogene

Kohlenstoffgehalt als Werkstoffeigenschaften gelten. Damit zählt der Eintritt des Kohlenstoffs in das Produktsystem mit -1 und der Austritt als +1,

was bilanztechnisch 0 und somit „neutral“ ergibt (Abb. 4).

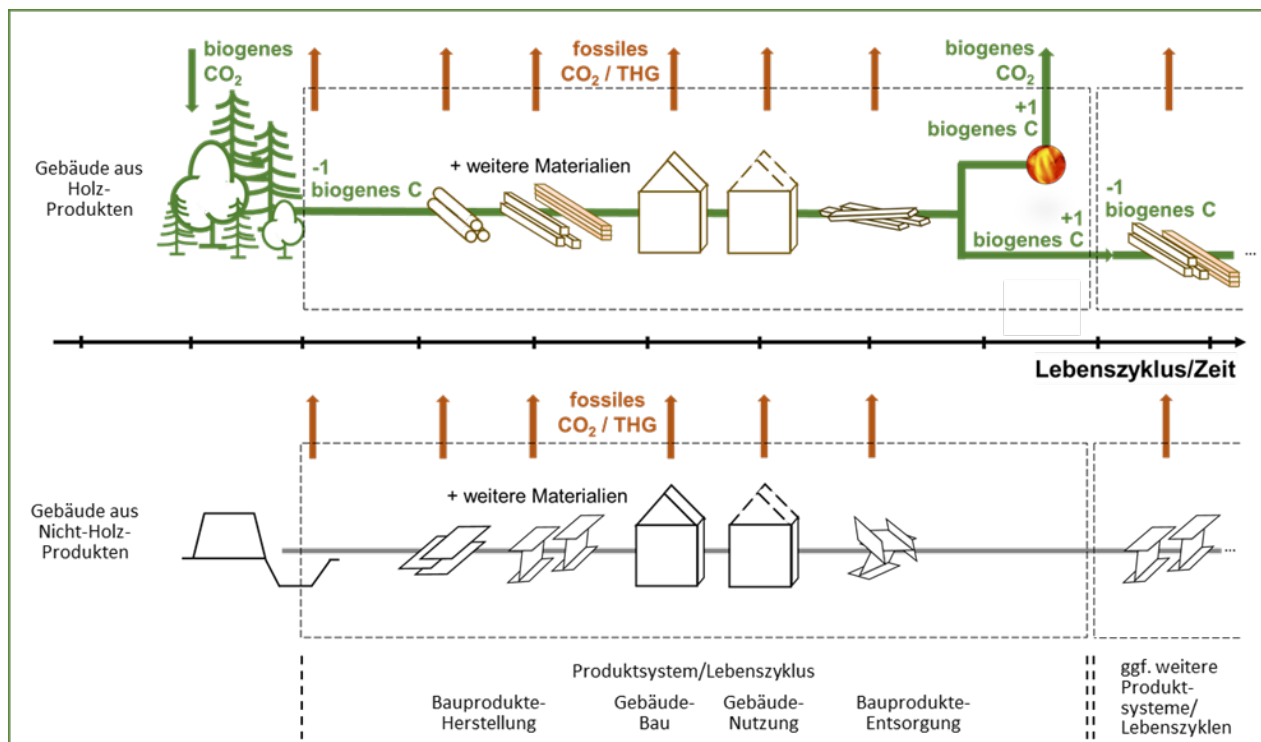


Abb. 4: Vereinfachtes Beispiel von vergleichbaren Lebenszyklen funktionsgleicher Holz- und Nicht-Holz-Gebäude mit zeitlich differenzierten CO₂- und THG-Emissionen (auf Basis von Wegener et al. 2010, DIN EN 16485:2014, DIN EN 15804:2022); unter Voraussetzung einer nachhaltigen Forstwirtschaft tritt bei Holzprodukten biogener Kohlenstoff (biogenes C) mit dem Rohstoff Holz zu Beginn in den Lebenszyklus mit -1 ein und am Ende mit +1 hinaus entweder in ein neues Produktsystem zur weiteren stofflichen Nutzung (Kaskadennutzung) oder durch Verbrennung als biogenes CO₂ in die Atmosphäre, was als „biogene Kohlenstoffneutralität“ bezeichnet wird; fossiles CO₂ wird emittiert bei Prozessen, die fossile Energieträger verbrauchen.

Hinsichtlich der biogenen CO₂-Emissionen im Zusammenhang mit dem Kohlenstoff (C) im Holz, wird bei Norm-konformen Ökobilanzen für Holzprodukte aus deutscher und europäischer Forstwirtschaft in der Regel von der so genannten biogenen Kohlenstoffneutralität ausgegangen. DIN EN 16485:2014 (S. 11) merkt weiterhin an, dass „[sich] aus dem fundamentalen Grundsatz der nachhaltigen Forstwirtschaft, die Produktionsfunktion des Waldes zu bewahren, [...] ergibt, dass Kohlenstoffvorkommen bei nachhaltiger Forstwirtschaft insgesamt als gleichbleibend (oder zunehmend) angesehen werden können“.

Dabei wird unterstellt, „dass die zeitweilige Abnahme des Kohlenstoffvorkommens im Wald durch Holzernte an einer Stelle und durch die Zunahme des Kohlenstoffvorkommens an anderen Stellen, die bei nachhaltiger Forstwirtschaft gemeinsam das Waldgebiet bilden, kompensiert wird.“ Zudem geht DIN EN 16485:2014 (S. 12) davon aus, dass „Gegenwärtig [...] alle großen Holz produzierenden Länder Europas über zunehmende Kohlenstoffvorkommen im Wald gemäß Art. 3.4 des Kyoto-Protokolls“ [berichten], was für Deutschland gemäß den aktuellen Ergebnissen der BWI 4 (BMEL 2024) nicht mehr grundsätzlich angenommen werden kann. Ist gemäß DIN EN 16485:2014 bekannt, dass die Herkunft des Holzes aus einer

Forstwirtschaft mit nicht-nachhaltiger Holznutzung stammt (d. h. die mit der Ernte des Holzes verbundene, zeitweilige Abnahme des C-Speichers nimmt nicht durch Nachwachsen wieder zu), wird die Einbindung mit „0“ gewertet, so dass in Summe das biogene CO₂ als Emission bestehen bleibt und als Umweltbelastung berücksichtigt wird. Dabei ist allerdings nicht klar definiert, wann dieser Fall eintritt, ob beispielsweise nur ein Raubbau oder bereits ein Vorratsrückgang aufgrund von Schadereignissen oder Waldumbau dazugehören. Hinsichtlich des Klimaschutzes ist es zudem wichtig, dass die emittierten CO₂-Mengen bei der Holzverbrennung (direkt oder als letzte Stufe der Kaskadennutzung) zeitnah wieder durch Holzzuwachs im Wald gebunden werden (prospektive Perspektive). Die unterschiedlichen Perspektiven können bei einer zeitlich-dynamischen Betrachtung zu unterschiedlichen Ergebnissen führen (z. B. Levasseur et al. 2013, Hoxha et al. 2020). So wird ersichtlich, dass Produkt-Ökobilanz-Informationen konsistent mit Änderungen von Wald- und Holzspeicher auf höherer Skalenebene (Region, Land) kombiniert werden müssen.

Substitutionsfaktoren für die Wirkungskategorie Klimawandel

Die Wirkungskategorie „Klimawandel“ in Ökobilanzen wird durch das sogenannte Treibhauspotenzial (THP) (*Global Warming Potential* (GWP)) abgebildet. Dabei werden die über den Lebensweg entstandenen klimawirksamen Treibhausgasemissionen, z. B. CO₂, CH₄, N₂O etc., ermittelt. Das Treibhauspotenzial gibt den relativen Beitrag eines Treibhausgases zur Erderwärmung über einen bestimmten Zeitraum an. In Ökobilanzen (wie auch in der Treibhausgasberichterstattung) wird dafür der Zeithorizont 100 Jahre verwendet (GWP₁₀₀). Diese Charakterisierungsfaktoren sind in den Ökobilanz-Softwares hinterlegt. Methan (CH₄) beispielsweise trägt nach seiner Freisetzung in den ersten 100 Jahren gemäß IPCC (2021) 27,9-mal mehr zum Treibhauseffekt bei als Kohlenstoffdioxid (CO₂). Der Charakterisierungsfaktor GWP₁₀₀ beträgt somit 27,9 kg CO₂-

Äquivalente/kg CH₄ (siehe Glossar 2, Anhang). Allerdings sind Charakterisierungsfaktoren hinsichtlich der Zeithorizonten-Wahl sehr sensitiv (Smith & Gasser 2022). Das kurzlebige Treibhausgas CH₄ (atmosphärische Lebensdauer ca. 11 Jahre) hat beispielsweise für einen Zeithorizont von 20 Jahren ein GWP₂₀ von 81, das 10-fache gegenüber dem GWP₅₀₀ von 8 (Zeithorizont 500 Jahre). Zudem werden kurzlebige Treibhausgase und sog. „black carbon“ im Feinstaub (Albedoeffekt) oft hinsichtlich der Klimawirkungen vernachlässigt. Die Ermittlung ihrer Charakterisierungsfaktoren sind mit großen Unsicherheiten behaftet, da sowohl indirekte (z.B. Wolkenbildung, Ozonschichtzerstörung) als auch wechselseitige Effekte von Treibhausgasen (Änderung der atmosphärischen Lebensdauern) die Klimawirkungen beeinflussen (Smith & Gasser 2022).

Mit dem GWP bezogen auf CO₂-Äquivalente besteht für alle betrachteten klimawirksamen Gase eine einheitliche Einheit, so dass diese in Ökobilanzen über den Lebensweg zu einem Gesamt-Indikatorwert aufaddiert werden können. Durch diese Zusammenfassung der THG-Emissionen geht allerdings der zeitliche Aspekt der Wirkung der Emissionen verloren. Ein dynamischer Ansatz mit einer Auflösung der Emissionen nach Modulen würde helfen, kurzfristige, mittelfristige und langfristige Klimawirkungen abschätzen zu können.

Das ursprüngliche Ziel von Ökobilanzen ist die Bewertung eines Produktes sowie eines Produktvergleiches über den gesamten Lebensweg. Die aggregierten THG-Emissionen werden deshalb auf das Produkt mit bestimmten Funktionen als festgelegte funktionelle Einheit bezogen. Dadurch kann bewertet werden, welches funktionsgleiche Produkt im Vergleich mit einem anderen die geringere Wirkung hinsichtlich Klimawandel hat. Die Differenz der Ergebnisse im Produktvergleich stellt die Einsparung dar, wenn das Produkt mit den geringeren Treibhauseffekten über den Lebensweg das andere Produkt ersetzt. Diese Differenz ist dann die Grundlage zur Berechnung des Substitutionsfaktors (z.B. Taverna et al. 2007, siehe Glossar 2, Anhang). Im Englischsprachigen

wird sowohl der Begriff „*substitution factor*“ (z. B. Leskinen et al. 2018) als auch der Begriff „*displacement factor*“ (z. B. Sathre & O'Connor 2010, Rüter et al. 2016) verwendet (Verkerk et al. 2021). Der Begriff „Substitutionsfaktor“ wird in der deutschsprachigen Literatur aber teilweise auch dafür verwendet, den Anteil [%] der ersetzten Nichtholz-Produkte eines Marktes durch Holzprodukte zu beschreiben (z.B. Lauf et al. 2021: z. B. Anteil der fossilen Energieträger, die durch Holzenergie ersetzt werden). In englischsprachiger Literatur grenzt sich dafür der Begriff „*replacement factor*“ vom „*displacement factor*“ ab (z. B. Schulte et al. 2022).

Substitutionsfaktoren in Bezug zur Treibhausgaseinsparung werden dabei unterschiedlich definiert und berechnet (mögliche Formeln siehe Glossar 2, Anhang). Letztendlich ist das Ziel der Berechnungen, die potenzielle Treibhausgas-Einsparung durch die Substitution von Nicht-Holz-Produkten durch Holzprodukte zu ermitteln. Der Substitutionseffekt wird am anschaulichsten als absolute Differenz „Treibhausgasemissionen des Holzprodukts minus Treibhausgasemissionen des Nicht-Holzprodukts“ dargestellt. Sind die THG-Emissionen des Nicht-Holzproduktes größer als die des Holzproduktes erhält man einen negativen Wert, der die Einsparung darstellt. Ist das Ergebnis größer als Null, geht die Verwendung von Holz mit einer zusätzlichen Belastung einher. Wird diese Differenz beispielsweise auf die verwendete Menge an Holz bezogen, entsteht ein relativer Wert, ein Substitutionsfaktor (siehe Glossar 2, Anhang).

Spezifische Substitutionsfaktoren, die anhand von Produkt-Ökobilanznormen ermittelt wurden, sind somit für spezifische Vergleiche von funktionsgleichen Produkten hinsichtlich ihrer Klimawirkungen wissenschaftlich valide hergeleitet, anerkannt und nur für diese anwendbar. Substitutionsfaktoren könnten mit dieser Vorgehensweise auch für andere Umweltwirkungen ermittelt werden, was aber selten auf diese Weise gemacht wird (z. B. Wolf et al. 2016b für „Feinstau-

bemissionen“). Somit ist der Begriff Substitution(sfaktor) generell mit der Wirkungskategorie Klimawandel verbunden.

Allerdings gibt es für gleiche oder ähnliche Produkte bzw. Produktgruppen oft mehrere (internationale) Studien mit unterschiedlichen Ergebnissen zu spezifischen Substitutionsfaktoren, da unterschiedliche Produktportfolios, Rohstoffherkünfte und -zusammensetzungen, Fertigungslinien etc. zugrunde liegen. Für die Verwendung und Interpretation der Ergebnisse der Substitutionsfaktoren sind deshalb mehrere Aspekte zu beachten (Hurmekoski et al. 2022): Sie sind

- (1) Produkt spezifisch, d. h. sie gelten nur für die analysierten Produktvergleiche;
- (2) regional spezifisch, d. h. sie gelten nur unter den regionalen Rahmenbedingungen (z. B. regionaler Energiemix, technische Verfahren);
- (3) Zeit spezifisch, d. h. sie gelten nur für einen bestimmten retrospektiven Zeitrahmen (für z. B. Energiemix, Stand der Technik), der meistens Daten von kurz vor der Studiererstellung bis 10 Jahre zurückliegend umfasst, je nach Verfügbarkeit von primären und/oder sekundären Daten;
- (4) statisch, d. h. die Treibhausgase werden nicht über die Zeit des Lebensweges dargestellt, sondern in einem Emissionsfaktor zusammengefasst.

Deshalb muss betont werden, dass Norm-konforme Ökobilanz-Studien nur im Kontext der jeweiligen Definition des Ziels und des Untersuchungsrahmens sowie der Methodenspezifikationen zu interpretieren und anzuwenden sind (siehe DIN EN ISO 14040:2021/14044:2021). Diese Aussage gilt entsprechend ebenfalls für aus (Norm-konformen) Ökobilanzstudien abgeleiteten Substitutionsfaktoren.

Meta-Analysen zu Substitutionsfaktoren

Viele aus Ökobilanz-Studien abgeleitete spezifische Substitutionsfaktoren von Holzprodukten zeigen, dass mit der Verwendung von Holz als Bau- und Werkstoff sowie als Brennstoff (unter

Annahme der biogenen Kohlenstoffneutralität), meist Treibhausgas-Emissionen aus fossilen Brennstoffen vermieden werden können. Einerseits werden Holzprodukte meist weniger energieintensiv hergestellt als vergleichbare Produkte aus anderen Materialien, andererseits entweicht bei Beton und Stahl während der Herstellungsprozesse CO₂. Die Substitutionseffekte werden sich somit in Zukunft verringern, wenn sich der Anteil erneuerbarer Energie erhöht und die Herstellungsprozesse bis hin zur CO₂-Bindung im Beton optimiert werden können.

Aufgrund der Bestrebungen, diese potenziellen Substitutionseffekte in die Abschätzung von Klimaschutzleistungen von Wald und Holznutzung zu integrieren, und der großen Zahl an Ökobilanz-Studien, sind seit einigen Jahren vermehrt Reviews und Meta-Analysen entstanden, um durchschnittliche Substitutionsfaktoren für die direkte Anwendung zu identifizieren (z. B. Leskinen et al. 2018, Verkerk et al. 2021, Soimakallio et al. 2022). Dabei wird deutlich, dass die durchschnittlichen Substitutionsfaktoren auf nationaler, globaler oder europäischer Ebene stark voneinander abweichen, da es große Unterschiede z. B. hinsichtlich Produktportfolio (d. h. diverser Produkte der stofflichen und/oder energetischen Nutzung von Holz mit diversen Herstellungs- und Entsorgungsverfahren), Energiemix (fossiler und/oder emissionsfreie erneuerbarer Energien), regionaler Rahmenbedingungen (z. B. spezifischer Technologien, Infrastruktur) etc. gibt.

Zudem umspannen die Substitutionsfaktoren je nach ausgewähltem Vergleich große Wertebereiche (Hurmekoski et al. 2022). Im Bereich der Ma-

terialsubstitution zeigen Hafner et al. (2017), Hafner & Schäfer (2017) sowie Hafner & Özdemir (2023) auf Basis konkreter Ökobilanzen gemäß EN 15978:2012 beispielsweise, dass Substitutionsfaktoren (berechnet nach Formel 2, siehe Glossar 2, Anhang) sowohl für Wohn- als auch Nicht-Wohngebäude in Deutschland mit 0,05 bis 0,56 kg CO₂-Äq./ kg CO₂-Äq. in einem breiten Wertekorridor liegen, da unterschiedliche Bauprodukte bzw. -elemente aus Holz unterschiedliche Bauprodukte bzw. -elemente aus anderen Materialien ersetzen können (unter Einhaltung der definierten Funktion des Gebäudes), und so unterschiedliche Einsparpotenziale entstehen.

Auch bei der Energiesubstitution ist der Wert des Substitutionsfaktors stark von der Auswahl des Vergleichs der Energieträger beeinflusst. Zum Beispiel liegen die Substitutionsfaktoren (berechnet auf Basis konkreter Ökobilanzen in Anhang an DIN EN 15804) für die Wärmebereitstellung in Bayern mit Holz statt mit verschiedenen fossilen Energieträgern für die gleiche Energieeinheit in einem Bereich von 303 bis 1.248 kg CO₂-Äq./ eingesetztem Festmeter Holz (berechnet nach Formel 1, siehe Glossar 2, Anhang), wenn biogene Kohlenstoffneutralität vorausgesetzt wird (Wolf et al. 2015, 2016b).

In Abbildung 5 sind Substitutionsfaktoren und ihre Wertebereiche für die Energie- und Materials substitution nur zur Veranschaulichung dargestellt. Es wurde keine Tabelle mit Zahlenwerten zusammengestellt, um nicht zu einer vorschnellen und falschen Anwendung der Substitutionsfaktoren zu verleiten.

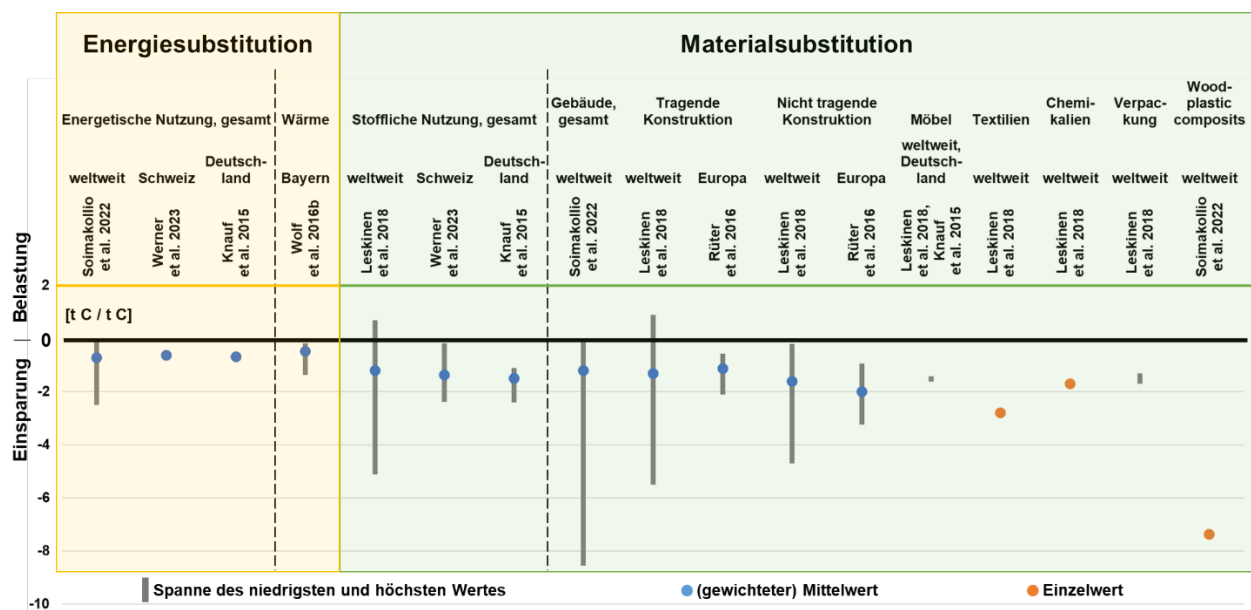


Abb. 5: Beispielhafter Überblick über Substitutionsfaktoren für Holzprodukte versus Nicht-Holzprodukte für Produktkategorien auf Basis von veröffentlichten Meta-Analysen (z. B. Leskinen et al. 2018, Soimakollio et al. 2022) und Original-Studien (z. B. Knauf et al. 2015, Rüter et al. 2016, Wolf et al. 2015, 2016b). Negative Werte stellen potenzielle Treibhausgas-Einsparungen dar (bei Kohlenstoffneutralität, siehe Abb. 4); die Einheit t C/t C bedeutet Tonne C aus Treibhausgas-(THG-)Emissionen bezogen auf Tonne C im eingesetzten Holz; bei Materials substitution ist die zusätzliche Energiesubstitution durch energetische Altholznutzung meist eingeschlossen; kritische Diskussion zur Verwendung von Substitutionsfaktoren siehe Text.

Neben den großen Unterschieden bei den in den Reviews untersuchten Ökobilanz-Studien gibt es auch große Unterschiede bei der Ermittlung eines durchschnittlichen Substitutionsfaktors in den Meta-Analysen (z.B. Sathre & O'Connor 2010, Leskinen et al. 2018, Verkerk et al. 2021 (als update von Leskinen et al. 2018), Myllyviita et al. 2021).

Nachfolgend sind einige Aspekte genannt, die bei Vergleich und Interpretation der Ergebnisse der Meta-Analysen berücksichtigt werden müssen.

- Die Anzahl der untersuchten Ökobilanz-Studien in den oben genannten verschiedenen Meta-Analysen variiert stark.
- In den analysierten Produktkategorien sind ganz unterschiedliche Produkte bzw. Produktvergleiche berücksichtigt. Der Schwerpunkt liegt auf der Analyse von Bauprodukten bzw. Bauelementen. Nur wenige Studien sind zu Textilien, Verpackungen, Chemikalien etc. verfügbar.

- Es werden unterschiedliche Länder/Regionen betrachtet, die unterschiedliche Energiemixe mit unterschiedlichen Mengen an Treibhausgas-Emissionen aufweisen. Schwerpunkte bilden Skandinavien und USA/Kanada; teilweise ist auch Zentraleuropa mit höheren Anteilen vertreten; Asien, Südamerika sind nur gering repräsentiert, Afrika nicht erwähnt.
- Die Daten in den Studien repräsentieren sehr unterschiedliche zeitliche Perioden; der Anteil erneuerbarer Energieträger im Energiemix dürfte für die meisten Industrieländer im Laufe der Zeit zugenommen haben, was zu niedrigeren Substitutionsfaktoren führt.
- Die Ausweisung von Lebenszyklusphasen ist sehr unterschiedlich. Es ist oft unklar, ob die potenzielle Energiesubstitution nach der stofflichen Nutzung des Holzproduktes in der End-of-Life-Phase eingeschlossen und so im Substitutionsfaktor der stofflichen Nutzung enthalten ist. Dies scheint meistens der Fall zu sein, wie z. B.

bei Leskinen et al. (2018) (durchschnittlicher Substitutionsfaktor: 1,2 kg C/kg C (Produktionsphase 0,8 + End-of-Life (EoL)-Phase einschließlich der Gutschrift für die energetische Substitution 0,4));

- Die Herleitung der durchschnittlichen Substitutionsfaktoren ist oft unklar (z. B. Sathre & O'Connor 2010; Leskinen et al. 2018) oder hergeleitet als gewichteter Mittelwert (z. B. Taverna et al. 2007; Frühwald & Knauf 2014; Knauf et al. 2016; jeweils Gewichtung anhand des Verbrauchs) oder als Median (Verkerk et al. 2021). Der Substitutionsfaktor bezieht sich teilweise auf eingeschlagenes Holz oder in den überwiegenden Fällen auf in Holzprodukten eingesetztes Holz. Zudem wird die Einsparung bei der Nutzung von Holz mal als positiver, mal als negativer Wert berichtet.

Bei der Anwendung von aggregierten durchschnittlichen Substitutionsfaktoren können deshalb folgende Fehler auftreten, die in der Regel zu einer Überschätzung der Substitutions- und damit der Treibhausgaseinsparungspotenziale führen:

- Falscher Substitutionsfaktor, da der literaturbasierte nur für den untersuchten Markt gilt und nicht übertragbar ist.
- Zu hoher Substitutionsfaktor für zukunftsorientierte Studien, da der wachsende Anteil an erneuerbaren Energien nicht berücksichtigt wird.
- Doppelzählung bei Anwendung von Substitutionsfaktoren für die Verwertung von Altholz, wenn diese in den durchschnittlichen, aggregierten Substitutionsfaktoren bereits enthalten ist.
- Anwendung des Substitutionsfaktors auf die Menge des geernteten Holzes anstelle der tatsächlich in den Produkten eingesetzten Holzmenge, dadurch Überschätzung des Anteils an stofflicher Nutzung sowie nicht Berücksichtigung von Holzverlusten über den Lebensweg.

Ökobilanzstudien über unterschiedliche Holzproduktsysteme unter Berücksichtigung der Substi-

tution (Energiesubstitution z. B. Wolf et al. 2016b, Materialsubstitution im Gebäudesektor z. B. Hafner & Schäfer 2017, Kaskadennutzung von Holz z. B. Höglmeier et al. 2015) zeigen, dass ein sehr großer bzw. der größte Einflussfaktor auf die Höhe der Klimawirkungen unterschiedlicher Szenarien meistens die Auswahl der (möglichen) Substitutionsprodukte ist. Des Weiteren bestehen Unsicherheiten bei Vergleichen von (aggregierten) Substitutionsfaktoren hinsichtlich unterschiedlicher Annahmen, welche Holzwaren(gruppen) z. B. bei verringertem oder erhöhtem Holzaufkommen hergestellt und welche Energieformen dabei eingesetzt werden (Schulte et al. 2022). Bisher werden Unsicherheitsanalysen bei Produkt-Ökobilanzen selten eingesetzt, werden aber sowohl durch die Normen (DIN EN ISO 14040:2021/14044:2021) als auch in der wissenschaftlichen Literatur (z. B. Bamber et al. 2020) eingefordert.

Das Upscaling von Produktökobilanzen auf die räumliche Ebene bzw. die Ebene des Marktes bereitet nach wie vor große Schwierigkeiten aufgrund der unsicheren Datenlagen, welche Endprodukte aus Holz tatsächlich erstellt worden sind, welche (Nicht-Holz-)Produkte substituiert worden sein könnten, und welche indirekten Effekte eine veränderte Holznutzung auf den Markt hat (Hurmekoski et al. 2021).

3.1.3 Ermittlung von Klimaschutzleistungen

Zur Bewertung der Klimaschutzleistungen unterschiedlicher Ansätze der Waldbewirtschaftung sind in den letzten Jahren bereits zahlreiche Studien in verschiedenen Ländern veröffentlicht worden, die sowohl die Speicher- als auch die potenziellen Substitutionseffekte auf methodisch unterschiedliche Weise berücksichtigen (z. B. Taverna et al. 2007, Werner et al. 2023: Schweiz; Klein & Schulz 2012: Bayern; Knauf et al. 2015, Rüter et al. 2017, Schweinle et al. 2018, Bösch et al. 2019, Fehrenbach et al. 2022: Deutschland; Seppälä et al. 2019: Finnland; Schulte et al. 2022: Schweden; Rüter et al. 2016: Europa). Wie der

WBW in dieser Stellungnahme, so fordern auch Grassi et al. (2021) und Hurmekoski et al. (2022), dass für die Abschätzung der Klimaschutzleistungen ein umfassender Ansatz gewählt werden soll. Dabei werden die in den Kapitel 3.1.1 und 3.1.2 dargestellten und weitere Methoden auf verschiedenste Weise kombiniert. Neben der Feststellung der aktuellen Treibhausgasbilanz werden in einer Reihe von Studien mit Modellierungen des Wald- (und Holzprodukte-)speichers auch Zeitverläufe in die Zukunft durchgeführt. Jedoch wird hinsichtlich der potenziellen Substitutionseffekte oft sehr vereinfachend nur ein oder zwei (getrennt für stoffliche und energetische Substitution) der in Kapitel 3.1.2 dargestellten durchschnittlichen Substitutionsfaktoren verwendet (z. B. Bauhus et al. 2017, Bolte et al. 2021, Gregor et al. 2024), ohne dass die Marktdiversität oder Zeitverläufe berücksichtigt werden.

Für die Ermittlung der Klimaschutzleistungen müssen die zeitlich differenzierten Treibhausgasemissionen aus den Ökobilanzen beim Produktvergleich auf die betrachtete räumliche Ebene (z. B. Bayern, Deutschland, Europa) hochgerechnet werden. Um die Summe der vermiedenen Treibhausgas-Emissionen durch alle eingesetzten Holzprodukte präzise zu ermitteln, müsste für jede Produktgruppe der aktuelle Mix aller eingesetzten Materialien (z. B. Anteile der eingesetzten Fenster aus Aluminium, Verbundstoffen, Holz usw.) bekannt sein. Aufgrund begrenzter Datenverfügbarkeit sind in der Regel Annahmen bzw. Experteneinschätzungen zu den verschiedenen Anteilen erforderlich. Die Energiesubstitution ist vergleichsweise einfacher zu er-

mitteln. Für den Teilmarkt Wärme kann für die genutzten und zu nutzenden Brennholzmengen die Differenz und damit die insgesamt vermiedenen fossilen Treibhausgas-Emissionen für eine Region berechnet werden, wenn die anteilsgewogenen Treibhausgas-Emissionen aller eingesetzten Energieträger, also die THG-Emissionen des regionalen Wärme-Mix, ermittelt werden, und begründbare Annahmen für die potenziell zu ersetzenden Nicht-Holz-Energieträger getroffen werden können (z. B. Wolf et al. 2016b).

Für die stoffliche Nutzung von Holz gibt es vor allem Studien zum Bausektor (Hafner & Rüter 2018, Rüter 2023), die zeigen, wie die ermittelten Treibhausgas-Einsparpotenziale (Hafner et al. 2017) für die Region Deutschland hochgerechnet werden können. Hier werden u. a. statistische Daten zu Gebäude-Fertigstellungen mit Ökobilanzdaten verschiedener Gebäude-Typen verknüpft. Hochrechnungen für andere Sektoren (z. B. Möbelsektor, Chemiesektor) sind noch schwerer durchzuführen, da weder detaillierte Statistiken der Holzanteile in den Produkten, noch begründete Annahmen für Substitutionsprodukte vorliegen (vgl. Möbel: z.B. Wenker 2015). Die potenziellen Substitutionseffekte sind zudem ständigen Änderungen unterworfen, da die fossilen Treibhausgas-Emissionen bei Herstellung, Gebrauch und Entsorgung von Produkten mit steigendem Anteil erneuerbarer Energien sinken und sich Produktionsbedingungen, Stoffströme, Märkte sowie Produkte und ihre Lebensdauer ändern können (Rüter et al. 2016, Brunet-Navarro et al. 2021).

3.2 Wesentliche Aspekte bei der Ermittlung der Klimaschutzleistung von Wald und Holznutzung

3.2.1 Systemgrenzen

In den bisherigen Studien wurden oft unterschiedliche Systemgrenzen verwendet. Aussagen zu Klimaschutzleistungen können sehr unterschiedlich sein, wenn nur der lebende Biomasse-

speicher, der ganze Waldspeicher (einschließlich Totholz und Boden), zusätzlich auch der Holzspeicher oder auch die Emissionen aus der Forstwirtschaft sowie die (energetische und stoffliche) Substitution berücksichtigt werden (Abb. 6, vgl. Abb. 2). Es muss also stets genau analysiert werden, welche Teilsysteme tatsächlich betrachtet werden sollen. Für die jeweilige Zielsetzung einer Studie ist darauf zu achten, das passende System zu definieren und zu analysieren.

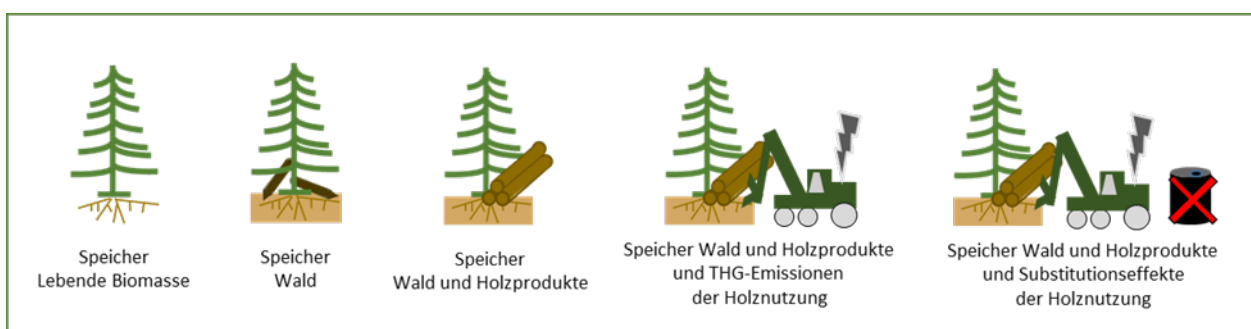


Abb. 6: Unterschiedliche Systemgrenzen hinsichtlich der Berücksichtigung von Teilsystemen bis hin zum Gesamtsystem „Klimaschutzleistungen von Wald und Holznutzung“ (verändert nach Schulz & Weber-Blaschke 2021).

Ist die Zielsetzung, die Klimaschutzleistung einer Region zu bewerten, müssen alle Teilsysteme dieser Region miteinbezogen werden. Die Teilsysteme Waldspeicher, Holzproduktespeicher und potenzielle Substitution stehen in Interaktion miteinander und bilden zusammen die Klimaschutzleistung von Wald und Holznutzung (siehe Kap. 2.3, 3.1.3).

Die Zielsetzung einer Studie kann aber auch sein, spezifische Einzelaspekte herauszugreifen, die detaillierter untersucht werden sollen. Allerdings müssen die Schlussfolgerungen dann konkret auf die zuvor ausgewählte Zielsetzung gerichtet sein; sie dürfen dann nicht weitergehende Antworten finden wollen, die durch die Zielsetzung und Systemdefinition nicht abgedeckt sind. Ist die Zielsetzung beispielsweise, den Einfluss der Nutzungsdichte und der Baumartenwahl auf die Kohlenstoffspeicherung von Wäldern mit den verschiedenen Kompartimenten ober- und unterirdische

Biomasse, Totholz, organische Auflage, mineralische Waldböden zu analysieren, kann sich das zu untersuchende System auf den Wald beschränken, wenn die Zielsetzung nicht den Anspruch hatte, die gesamte Klimaschutzleistung in einer Region zu analysieren und die Schlussfolgerungen dementsprechend eingeordnet werden.

Bei der Berechnung von Treibhausgasemissionen von Produktsystemen, ggf. potenziellen Substitutionseffekten, anhand der sog. „*Attributional LCA*“ wird nur die Technosphäre, der „vom Menschen unter Anwendung von Technik beeinflusste“ Lebensweg, von der Rohstoffbereitstellung (bei Holzprodukten Forstwirtschaft) bis zur Abfallbehandlung berücksichtigt, nicht aber mögliche Änderungen in der Biosphäre (s. Kap. 2.4), weil die Systemgrenze zwischen dem natürlichen System und dem Produktsystem definiert ist. So werden Änderungen in den Kohlenstoffpools des Waldes (z. B. in der Phytomasse oder dem Waldboden) o

der in der Holzverwendung (z. B. Verschiebungen von energetischer zu stofflicher Nutzung oder umgekehrt) nicht berücksichtigt.

Substitutionseffekte durch Herstellung und Verwendung von (weniger energieintensiv hergestellten) Holzprodukten dürfen daher nicht isoliert als Klimaschutzleistung auf räumlicher Ebene betrachtet werden, sondern müssen immer im Zusammenhang mit den Veränderungen der Kohlenstoffspeicher im Wald und im Bestand der Holzprodukte gesehen werden. Hennenberg et al. (2019) machten dazu einen methodischen Vorschlag, um Effekte der CO₂-Speicherleistung in die Treibhausgasbilanz (auf Basis der Ökobilanz) zu integrieren. Diesen sog. „CO₂-Speichersaldo der Holznutzung“ definierten sie als die Menge an CO₂ pro Kubikmeter geerntetem Holz [t CO₂-Äq./m³] bzw. bei Energieholz pro Energieinhalt [g CO₂-Äq./MJ], die aufgrund von Waldbewirtschaftung und Holznutzung auf Waldflächen oder in Holzprodukten zusätzlich gespeichert bzw. nicht gespeichert wird (Hennenberg et al. 2019). So soll dieser Saldo auch dazu geeignet sein, zu den Treibhausgasemissionen aus der Ökobilanz hinzugezählt zu werden. Allerdings wird das Speichersaldo mit großräumigen Szenarien eventueller zukünftiger Entwicklungen (z. B. für Deutschland) bzw. mit Vergleichen einer bestimmten Referenz verknüpft, die immer von einem Rückgang des Biomassespeichers ausgehen. Diese hypothetische Entwicklung der nächsten Jahrzehnte wird auf den heutigen Rucksack quasi diskontiert. Würde stattdessen ein Szenario mit Vorratsaufbau benutzt (was nicht passiert), müsste das Speichersaldo negativ sein, das Saldoergebnis also von den Treibhausgasemissionen aus der Ökobilanz abgezogen werden. Dieses Ergebnis aus einem unter vielen möglichen Szenarien dann auf jeden beliebigen Festmeter Holz in Deutschland umzulegen, scheint fragwürdig, vor allem vor dem Hintergrund der großen Unsicherheit über die zukünftige Waldentwicklung und den damit verbundenen Veränderungen im ökosystemaren C-Speicher (Rock et al. 2025). Genauso wenig wie der Substitutionsfaktor ein einzig möglicher Wert

ist, ist dies beim CO₂-Saldo der Fall, da viele Parameter (z. B. Waldtypen und Waldentwicklungsphasen, Betrachtungszeitraum) die Saldogröße beeinflussen. Eine Weiterentwicklung dieser Größe wird deshalb auch von Hennenberg et al. (2019) selbst vorgeschlagen.

3.2.2 Produktebene und räumliche Ebene

Die Zielsetzung, die Klimaschutzleistung von Wald und Holznutzung zu analysieren, gibt als Systemdefinition die räumliche Ebene vor.

Waldspeicher und Holzproduktespeicher sowie deren Änderung können methodisch valide nur im räumlichen Zusammenhang ermittelt werden: Waldspeicher mindestens eines Bestandes (nicht nur eines Baumes), eines Betriebes, einer Region etc. (Abb. 7), Holzproduktespeicher ebenfalls einer Region und mindestens eines ausgewählten Sektors (nicht nur eines Produktes) (Abb. 8).

Die Substitutionsfaktoren bzw. potenziellen Treibhausgaseinsparungen durch Substitution (siehe Kap. 3.1.2) werden auf Produktebene für einzelne spezifische Produktvergleiche ermittelt. Die Möglichkeiten der Verwendung von Holz sind so vielfältig und die technologischen und rechtlichen Rahmenbedingungen entlang der jeweiligen Lebenswege so dynamisch, dass keine Aussicht darauf bestehen kann, zu einem bestimmten Zeitpunkt eine umfassende und gleichzeitig aktuelle Abdeckung aller Holzprodukte und ihrer Nicht-Holzsubstitute einer Region mit Ökobilanzdaten vorliegen zu haben. Um dennoch Substitutionseffekte abschätzen zu können, werden bisher bestehende Kenntnisse für größere Aggregate (z. B. Produktgruppen) verallgemeinert (vgl. Hurmekoski 2021, siehe kritische Diskussion in Kap. 3.1.2). Dies erfolgt meistens dadurch, dass einzelne Substitutionsfaktoren (ggf. für Leitprodukte) als Stellvertreter für größere Produktbereiche herangezogen werden. Durch solche Verallgemeinerungen steigen aber die Unsicherheiten sowie die Fehlerquellen der berechneten Substitutionseffekte (siehe Kap. 3.1.2). Hier ist es also notwendig, die verfügbare Datenbasis und die

statistischen Methoden der Meta-Analysen transparent offenzulegen sowie für die bestehenden Datenlücken aufzuzeigen, mit welchen Substitutionsfaktoren gerechnet wurde und dies auch zu

begründen. Dabei müssen Unsicherheiten ermittelt und durch Sensitivitätsanalysen die Effekte besser interpretierbar gemacht werden.

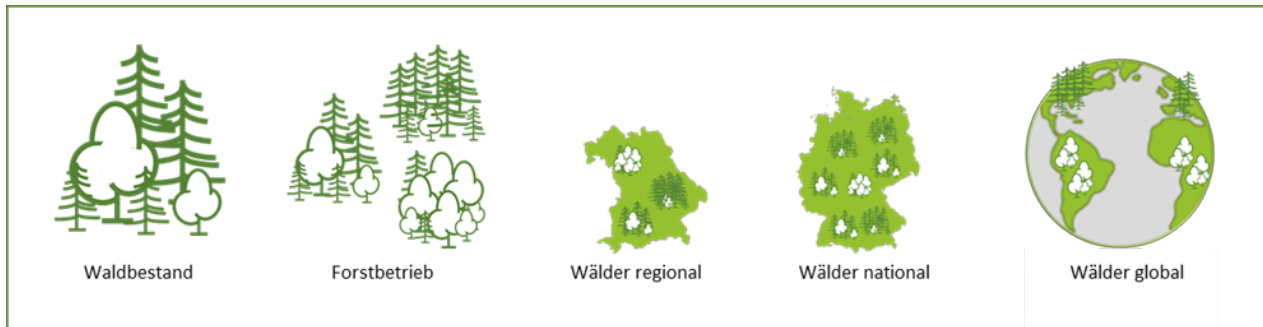


Abb. 7: Unterschiedliche Betrachtung von räumlichen Ebenen in Bezug auf den Waldspeicher (verändert nach Schulz & Weber-Blaschke 2021).

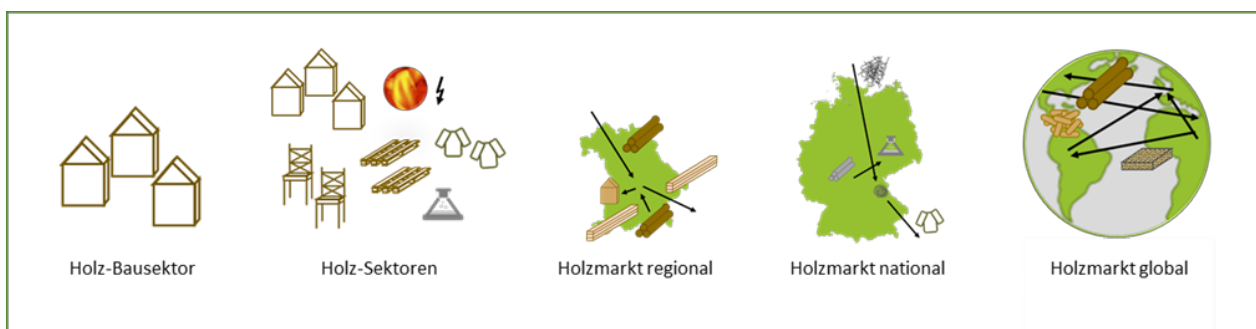


Abb. 8: Unterschiedliche Betrachtung von sektoralen oder räumlichen Ebenen in Bezug auf den Holzspeicher (weiterentwickelt auf Basis von Schulz & Weber-Blaschke 2021).

Ein weiterer Fallstrick ist, dass Substitutionsfaktoren auf die Menge des eingesetzten Holzes (z. B. Taverna et al. 2007) oder auf die Menge des in Holzprodukten genutzten Holzes (z. B. Sathre & O'Connor 2010, Schulte et al. 2022) bezogen sein können. Die Multiplikation eines Substitutionsfaktors mit dem Rohholzaufkommen ist im letzten Fall (Schulte et al. 2022) nicht korrekt.

Für die Hochrechnung des produktbezogenen Substitutionseffektes auf die regionale Ebene unter Berücksichtigung des dort verwendeten Produktportfolios steht bisher kein Leitfadens und keine standardisierte Methode zur Verfügung,

auch wenn einzelne Substitutionsfaktoren auf Basis von LCA Standards ermittelt wurden (Hurmekoski et al. 2023). Grund dafür ist einerseits das Fehlen der hierfür notwendigen Datengrundlagen, wie etwa Ökobilanzdaten funktionsgleicher Produktsysteme, und die für solch eine Hochrechnung notwendigen Markt- bzw. Statistikdaten, andererseits die Komplexität der Holzmärkte mit ihrem breiten und je nach Region und Zeit unterschiedlichen Spektrum an verwendeten Holzprodukten, die zu sehr unterschiedlichen Annahmen und Ergebnissen hinsichtlich der Kohlenstoffflüsse in den Studien führen (Hurmekoski et al. 2021).

Für die Verwendung von Holz in (Wohn-)Gebäuden in Deutschland hat Rüter (2023) eine Methodik für die Hochrechnung von Substitutionseffekten von verschiedenen Holzbau-Szenarien entwickelt und beschrieben. Ein allgemeingültiges, anerkanntes und standardisiertes Verfahren für die Einbeziehung des gesamten Holzproduktportfolios liegt allerdings noch nicht vor (Hurmekoski et al. 2023). Es muss also weiterhin an der Entwicklung einer wissenschaftlich validen Methode, inkl. Datenermittlung, gearbeitet werden, die für das

gesamte Produktportfolio einer Region die Produktebene mit der räumlichen Ebene in Einklang bringt.

3.2.3 Zeitliche Betrachtung

Die Veränderungen der Wald- und Holzproduktespeicher werden in periodischen Abständen gemessen bzw. jährlich modelliert und zeitlich aufgelöst dargestellt (Abb. 9, 10).

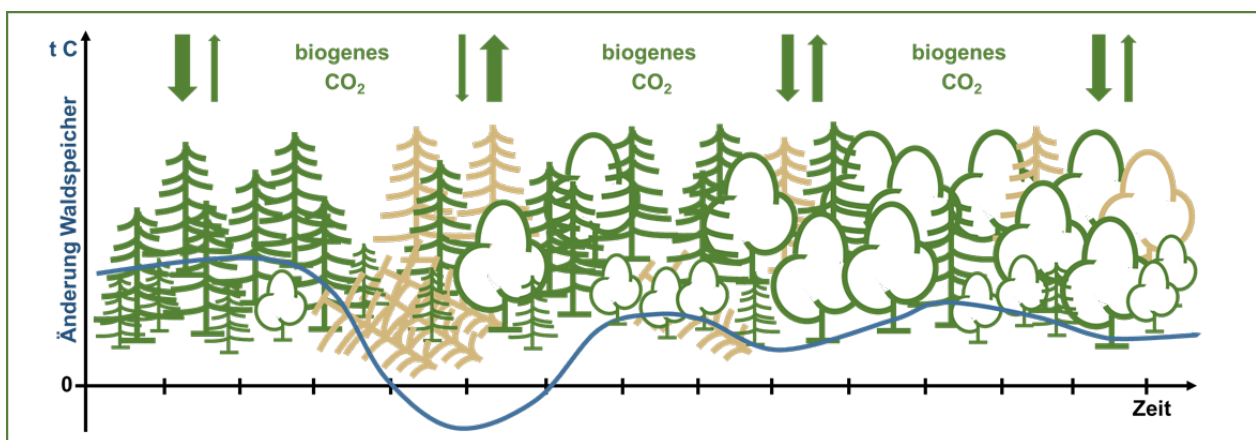


Abb. 9: Beispielhafte zeitliche Betrachtung von Änderungen in Bezug auf den Waldspeicher. Hier: positive Werte oberhalb der Nulllinie = Erhöhung; negative Werte unterhalb der Nulllinie = Verringerung (weiterentwickelt auf Basis von Schulz & Weber-Blaschke 2021).

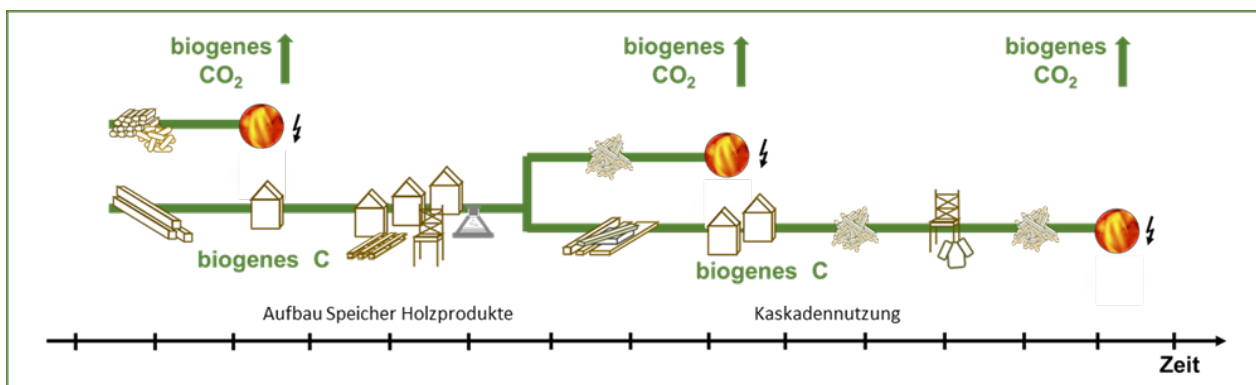


Abb. 10: Beispielhafte zeitliche Betrachtung von Änderungen in Bezug auf den Holzproduktespeicher. Festlegung von biogenem C in Abhängigkeit vom Aufbau des Holzproduktespeichers sowie von Kaskadennutzung zur Verlängerung der Nutzungs- und Lebensdauer von Holz (weiterentwickelt auf Basis von Schulz & Weber-Blaschke 2021).

Durch die Vorgabe in Ökobilanz-Normen, den Produktlebensweg modular zu unterteilen, sollen die Umweltwirkungen, wie Treibhausgasemissionen, zeitlich dargestellt werden. Die Substitutionsfaktoren jedoch stellen die über den Lebensweg aufsummierte Differenz der Treibhausgasemissionen dar, die zeitliche Auflösung ist so verloren gegangen. Bei der Verwendung von Studien (ggf. Meta-Analysen) zur Ermittlung von Substitutionseffekten muss deshalb unbedingt nachvollzogen werden können, welche Lebenswegphasen einbezogen und ob diese getrennt und transparent dargestellt wurden. Insbesondere muss klar erkenntlich sein, ob in den Substitutionsfaktoren Gutschriften für die Wiederverwendung, Rückgewinnungs- und Recyclingpotenziale einbezogen sind. Ansonsten besteht die Gefahr (1) von Doppelzählungen, beispielsweise durch die zusätzliche Berücksichtigung der Verbrennung von Altholz als energetische Substitution, und (2) der Verbuchung von Treibhausgaseinsparungen, die nicht jetzt, sondern erst nach der langjährigen Nutzung der (Bau-)Produkte in ferner Zukunft stattfinden. Die DIN EN 15804:2020 fordert deshalb eine getrennte Darstellung des Moduls D (Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenze, Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs-, Recyclingpotenzial). Das Modul D darf nicht in die Umweltwirkungsbeziehung eingehen, sondern nur als ergänzende Information berichtet werden.

Um eine umfassende Betrachtung von Waldspeicher, Holzproduktespeicher und potenziellen Substitutionseffekten periodengerecht durchführen und valide kurz-, mittel- und langfristige Entwicklungen abschätzen zu können, ist es notwendig, die Treibhausgas-Emissionen zeitlich differenziert darzustellen und damit die methodischen Ansätze zur Ermittlung der Speicheränderungen und der potenziellen Substitutionseffekte besser aufeinander abzustimmen, wie es Rüter (2023) für den Gebäudesektor entwickelt hat.

Zwar gibt es eine methodische Entwicklung der dynamischen Produkt-Ökobilanzierung (*Dynamic LCA*) bzw. der dynamischen Betrachtung der bio-

genen Kohlenstoffflüsse in der Ökobilanzierung unter Einbezug eines erwarteten Baum- bzw. Waldwachstums (z. B. Guest et al. 2012, Levasseur et al. 2013). Diese gilt jedoch nur für den direkten Produktvergleich. Für die Analyse der Klimaschutzleistung von Wald und Holznutzung sollte die Berücksichtigung des Baum- bzw. Waldwachstums aber nicht direkt mit der Produkt-Ökobilanzierung verknüpft werden, sondern die Waldspeicheränderungen im Kontext der Fragestellung, wie unter Kapitel 2.1 und 3.1.1 dargestellt, extra modelliert werden, um mögliche Doppelzählungen zu vermeiden und eine transparente und nachvollziehbare Darstellung zu ermöglichen (vgl. Rüter 2023).

Die Darstellung der CO₂-Bindungen sowie THG-Emissionen jahres- oder zumindest perioden- bzw. modularscharf über den gesamten Produktlebensweg (sowohl der Holz- als auch Nicht-Holzprodukte) erlaubt es, die Zeitlichkeit der unterschiedlichen Flüsse zu erkennen. Nur über eine zeitlich differenzierte Darstellung ist zu erkennen, wann im Laufe der Waldentwicklung und eines Produktlebensweges welche Einbindungen oder Emissionen entstehen und wann damit ein Substitutionseffekt und Beitrag zum Klimaschutz geleistet wird (siehe Taverna et al. 2007, Rüter et al. 2016, Hafner et al. 2017, Werner et al. 2023).

Generell gibt es großes Interesse daran, die kurzfristigen Klimaschutzleistungen von Maßnahmen zu erkennen. Diese Höhergewichtung der Gegenwart gegenüber der Zukunft wird in der Volkswirtschaftslehre auch als Zeitpräferenz bezeichnet. Spätere Ereignisse werden zum Vergleich mit früher eintretenden Ereignissen anhand einer Zeitpräferenzrate abgezinst. Meist erfolgt dies mit Hilfe konstanter Diskontierungsraten.

Ein wichtiger Aspekt ist deshalb auch die Zeitsensitivität der kurzfristigen Klimawirkungen der einzelnen Treibhausgas-Emissionen. Dabei sollten auch die indirekten und wechselseitigen Klimaeffekte weniger gängiger, v. a. kurzlebiger THG-Emissionen, z. B. Methan (CH₄), volatiler organischer Kohlenstoffverbindungen (VOC), Koh-

lenmonoxid (CO), *black carbon*, genauer betrachtet werden (z. B. Smith & Gasser 2022; siehe Kap. 3.1.2).

3.2.4 Folgenbetrachtung

Bei der Berechnung von Substitutionsfaktoren wird anhand der sog. *Attributional LCA* (siehe Kap. 2.2, 3.1.2) nur der „vom Menschen unter Anwendung von Technik beeinflusste“ Lebensweg von der Rohstoffbereitstellung (d. h. hier Holzbereitstellung durch Forstwirtschaft) bis zur Abfallbehandlung bezogen auf eine Produktfunktion berücksichtigt. Dabei werden Änderungen des Waldes (z. B. Holzvorrat) oder des (Holz)Marktes (z. B. Verschiebungen von energetischer zu stofflicher Nutzung oder umgekehrt) nicht einbezogen.

Bei der Modellierung von Szenarien auf räumlicher Ebene können sich jedoch auch Folgeeffekte, z. B. für Waldbestände oder Holz- und Nicht-Holz-Märkte ergeben. Die Kombination von Ökobilanzierung und Stoffstromanalyse ist notwendig, um die Auswirkungen veränderter Nutzungsmuster zu untersuchen (Weber-Blaschke 2019, Weber-Blaschke & Muys 2020). In einem Szenario zur stärkeren stofflichen Verwendung von Holz können z. B. Sägenebenprodukte und Industrieresthölzer vermehrt zu Holzwerkstoffen verarbeitet und dann in Bauprodukten verwendet werden. Ein reiner Vergleich auf der Produktebene würde in diesem Fall zu kurz greifen. Die zwangsläufige Folge der verstärkten stofflichen Verwendung bei gleichem Holzaufkommen ist nämlich, dass weniger Restholz zur Energieerzeugung zur Verfügung steht und bei gleichem Bedarf durch andere Energiequellen (heute ggf. fossile, in Zukunft ggf. vermehrt erneuerbare) ersetzt werden muss. Diese Emissionsdifferenzen im Bereich der Energieerzeugung müssten folglich ebenfalls betrachtet werden. Als Methodik kann die sogenannte Folgenabbildende Ökobilanzierung (*Consequential LCA* (CLCA)) verwendet und mit sich verändernden Holzflüssen kombiniert werden. Die Bewertung einer Verschiebung von Laubholzflüssen von energetischer zu stofflicher Nutzung ist bei Sander-Titgemeyer et al. (2025) mit Hilfe der CLCA

durchgeführt worden. Dabei wurden nicht nur funktionsgleiche Produkte, sondern auch funktionsgleiche Nutzenkörbe der Szenarien verglichen, die die Erfüllung gleicher Bedürfnisse auf unterschiedlicher Weise (durch Holz- oder Nicht-Holz-Produkte) abbilden. Welche Konsequenzen bei derartigen Szenarienvergleichen berücksichtigt, welche Systemgrenzen dabei gesetzt und welche Modelle verwendet werden sollen, ist weiterhin Gegenstand wissenschaftlicher Diskussionen (z.B. Weidema et al. 2018, Schaubroeck et al. 2021).

Folge einer durch reduzierte Holzernte induzierte Zunahme des Kohlenstoffspeichers im Wald bei gleichzeitiger Abnahme des Holzproduktespeichers könnte sein, dass der Kohlenstoffspeicher im Wald einem höheren Risiko durch Störungen (z. B. Windwurf, Trockenstress und/oder Borkenkäfer) ausgesetzt ist, da die Wahrscheinlichkeit für derartige Störungen mit dem Alter und Höhe der Bäume sowie der Biomasse des Baumbestandes zunimmt (z. B. Forzieri et al. 2021). Der in den abgestorbenen Bäumen enthaltene Kohlenstoff in nicht bewirtschafteten Wäldern wird infolge der Störungen zwar nicht schlagartig freigesetzt, doch erhöht sich das Verhältnis von Atmung (durch Zersetzung der abgestorbenen Bäume) zur Aufnahme von C durch Photosynthese der nachwachsenden Baumgeneration für einige Jahrzehnte deutlich (Harmon 2009). In bewirtschafteten Wäldern, in denen die abgestorbenen Bäume i. d. R. geerntet werden, könnten die Störungen dazu führen, dass ein größerer Teil des Holzes zu kurzlebigen Produkten verarbeitet wird und somit die Speicher und die potenziellen

Substitutionseffekte abnehmen (Hoeben et al. 2023). Nach Störungen könnte das geerntete Holz aufgrund von Bruch, mechanischer Belastung, Austrocknung, Pilzbefall etc. von verminderter Qualität sein. Gleichzeitig kommt es infolge der Störungen oft zu einem kurzfristig sehr hohen Angebot an Schadholz und somit zu Marktverwerfungen, die zur Verwendung des Holzes in geringwertigen und kurzlebigeren Produkten führen könnten (z. B. in Hackschnitzeln statt Bauholz).

Diese Veränderungen der Risiken der Kohlenstoffspeicher im Wald und in den Holzprodukten sind in den Modellen, die zur Abschätzung der Klimaschutzleistung eingesetzt werden, bisher nicht oder wenig berücksichtigt, zumal diese zukünftigen Veränderungen und Risiken großen Unsicherheiten hinsichtlich räumlicher und zeitlicher Ausprägung unterliegen.

3.2.5 Zusätzlichkeit

Zusätzlichkeit ist eine wichtige Anforderung für die Anerkennung von Klimaschutzmaßnahmen in der internationalen Klimaschutzpolitik. Voraussetzung ist dabei immer die Bestimmung einer Referenz. Die Zusätzlichkeit ergibt sich dann aus dem Vergleich der Klimaschutzleistung eines betrachteten zukünftigen Maßnahmen szenarios oder einer historischen Entwicklung mit der Klimaschutzleistung der Referenz.

Eine Besonderheit des Systems von Waldspeichern, Holzproduktespeichern und potenzieller Substitution ist, dass es aufgrund der komplexen Wirkungszusammenhänge dazu kommen kann, dass Maßnahmen, die auf eine höhere Klimaschutzleistung abzielen, wie beispielsweise Nutzungseinschränkungen im Wald, zu insgesamt höherer Treibhausgasbelastung führen könnten. Durch den Wegfall von Holzprodukten können höhere Emissionen durch Ersatzprodukte aus anderen Sektoren verursacht werden. Diese müssten dann den Veränderungen der beiden Speicher Wald und Holzprodukte gegenübergestellt werden. Die „Zusätzlichkeit“ würde in der Gesamtbetrachtung in einem solchen Fall negativ ausfallen.

Bei der Beurteilung der Klimaschutzleistung von Wald und Holznutzung können sich zwei Betrachtungsweisen ergeben. Sie sollen am Beispiel Holzfenster versus Fenster aus Aluminium verdeutlicht werden. Bei höheren THG-Emissionen, die mit der Verwendung von Aluminiumfenstern verbunden sind (Salazar & Sowlati 2008; Scharai-Rad & Welling 2002; jeweils nach Sathre & O'Connor 2010), vermeidet grundsätzlich jedes eingebaute Holzfenster einen bestimmten Betrag an THG-Emissionen. Dieser Betrag ist ein Teil der

Klimaschutzleistung der Nutzung von Holz für die Endverwendung als Fenster. Diese Betrachtungsweise kann selbstverständlich entsprechend dem oben Geschriebenen auch daraufhin verengt werden, nur die Klimaschutzleistung zu betrachten, die sich aus einem Mehr an Holzfenstern ergibt, z. B. als Ergebnis eines spezifischen Förderprogramms (Zusätzlichkeit).

Die Treibhausgasberichterstattung in der EU wird nach internen Regeln der EU auf Grundlage international vereinbarter Verpflichtungen vorgenommen. Für die Klimaschutzleistung des Waldes, die im Sektor Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft (LULUCF) dargestellt wird, ist der sogenannte *Forest Reference Level* als Referenzniveau maßgeblich. Der noch bis Ende 2025 gültige *Forest Reference Level* wurde von der EU-Kommission, basierend auf Emissionen, die die Länder berichtet haben, über einen delegierten Rechtsakt für alle EU-Mitgliedsstaaten festgelegt. Der *Forest Reference Level* gibt vor, welche Kohlenstoffspeicherung (als negative Emission) unter einem „business as usual (BAU)“ Szenario zukünftig erwartet werden kann. Nur die Differenz einer höheren Speicherung von Kohlenstoff im Wald zu diesem *Forest Reference Level* kann folglich als eine durch eine veränderte Waldbewirtschaftung erwirkte Emissionsminderung auf das Klimaziel eines Landes angerechnet werden.

Generell geht es in diesem Gutachten nicht um die Anrechnung bestimmter Klimaschutzleistungen, sondern um wesentliche methodische Aspekte bei deren Bestimmung ganz allgemein, weshalb die „Zusätzlichkeit“ als Aspekt der Szenarienbildung gesehen wird (s. Kap. 3.2.6).

3.2.6 Szenarienbildung

Aussagen zu Klimaschutzleistungen von Wald- und Holznutzung gelten nur für den jeweils vorgenommenen Vergleich von Bewirtschaftungsvarianten und resultierenden Produktverwendungen. Dies gilt insbesondere auch für die potenziellen Substitutionseffekte. Die Substitution ist zudem naturgemäß hypothetisch, da nur angenom-

men werden kann, welche Produkte aus welchen Materialien das Holzprodukt wohl ersetzen würden. Das heißt, es werden nur mögliche, aber keine realen Effekte ermittelt. Der potenzielle Substitutionseffekt hängt somit stark vom angenommenen Substitutionsprodukt ab. Diese Annahmen können sehr unterschiedlich ausfallen. Folglich gelten Klimaschutzleistungen nur für den jeweiligen Vergleich von Handlungsoptionen (Szenarien), die sowohl den Wald- und Holzproduktespeicher als auch die Substitution betreffen (vgl. auch Englund et al., 2025). Die *eine* Klimaschutzleistungen von Wald- und Holznutzung kann es daher nicht geben.

Bei einer Ex-post-Betrachtung ist zumindest die reale Entwicklung messbar, jede damit verglichene Entwicklung (Szenario) ist aber hypothetisch (kontrafaktisch). Kontrafaktische Szenarien als Referenzszenarien blenden bewusst bestimmte Einflussfaktoren aus, um deren Einfluss isolieren und abschätzen zu können. Kontrafaktische Modelle können beispielsweise helfen, Additonalität von Klimaschutzmaßnahmen zu beurteilen (Knoke et al. 2023). Bei Ex-ante-Betrachtungen sind naturgemäß alle Szenarien hypothetisch. Für solche Bewertungen, die in die Zukunft blicken, müssen die Speicher, die Substitutionspotenziale sowie mögliche Einflussfaktoren verschiedene mögliche Entwicklungen berücksichtigen. Zukünftige Substitutionspotenziale können anhand von zukunftsgerichteten Ökobilanzen (*Prospective LCA*) hergeleitet werden. Dazu gehören Änderungen der äußeren Bedingungen (z. B. des Energiemixes), oder Änderungen der Produktsysteme selbst, z.B. sich in Entwicklung befindliche (innovative) Produkte, die ggf. vom Labormaßstab zu marktreifen Produkten mit industriellen Fertigungsprozessen hochskaliert werden sollen (Leskinen et al. 2018, z. B. Sander-Titgemeyer et al. 2023).

Berechnete potenzielle Substitutionseffekte bzw. ermittelte Klimaschutzleistungen beruhen damit immer auf Annahmen über hypothetische Szenarien. Die explizite Offenlegung dieser Annahmen, seien sie zu technologischen, wirtschaftlichen, ge-

sellschaftlichen oder anderen Entwicklungen, ist für die Beurteilung von Studien zu potenziellen Substitutionseffekten sowie Klimaschutzleistungen insgesamt unerlässlich. Die Ergebnisse können nur vor dem Hintergrund der getroffenen Annahmen und ihrer Konsistenz bewertet werden. Zudem müssen die Szenarien der Zielsetzung entsprechend gebildet sein und dürfen auch nur in diesem Kontext interpretiert werden.

Zudem ist bei der Bewertung von Klimaschutzleistungen darauf zu achten, dass für vergleichbare Szenarien immer der gleiche Warenkorb (Nutzenkorb) zugrunde gelegt wird. Das bedeutet, dass immer die gleiche Nachfrage nach bestimmten Gütern als befriedigt angenommen werden muss. Ein einfaches Beispiel wäre die Nutzung von Waldrestholz als Brennholz. Dessen Klimaschutzleistung kann nur ermittelt werden, wenn in dem Alternativszenario berücksichtigt ist, mit welchen alternativen Energieträgern geheizt wird und welche Emissionen alternativ damit einhergehen. Ein weiterer Szenarienvergleich für diese Problematik wäre: Das Referenzszenario sei die Bewirtschaftung des Waldes und die Nutzung des Holzes ohne Einschränkung und das PolitikszENARIO sei eine verringerte Holznutzung durch Nutzungsverzicht, aber ohne Berücksichtigung der potenziellen Substitutionseffekte. In diesem Fall impliziert das PolitikszENARIO eine geringere Anzahl an neu gebauten Häusern aus Holz und vergleicht damit unterschiedliche Konsumniveaus. Entweder müsste das Referenzszenario dann auch mit einer geringeren Anzahl an neu gebauten Häusern gerechnet werden oder es müsste im PolitikszENARIO berücksichtigt werden, dass die benötigten Häuser eben aus anderen Materialien oder importiertem Holz gebaut würden, was zur Einbeziehung der potenziellen Substitutionseffekte führen würde.

Eine Akteursgruppen-übergreifende Diskussion über die Festlegung von Szenarien, die für die Ermittlung der Klimaschutzleistung von Wald und Holznutzung eine zentrale Rolle spielen, bietet die Chance, substanziell zur Harmonisierung der unterschiedlichen Sichtweisen beizutragen. Wie

eingangs erwähnt, existieren bezüglich der Klimaschutzleistung von Wald und Holznutzung verschiedene Argumentationslinien, die von unterschiedlichen Interessensgruppen vorgetragen werden. Gelänge es, die unterschiedlichen Interessensgruppen ebenso wie die verschiedenen beteiligten Bundesressorts zur gemeinsamen Gestaltung von konsistenten Szenarien zu gewinnen und sich gleichfalls auch auf die anzuwendenden Modelle zu einigen, könnten bestehende unterschiedliche Perspektiven überwunden werden. Erste Ansätze dazu können im Prozess der nach Klimaschutzgesetz jährlich zu erstellende Projektionsberichte gesehen werden.

Die Harmonisierung von Sichtweisen ergibt sich aus dem Prozess einer transparenten und exakten Beschreibung von Szenarien, d. h. alle sonst impliziten Annahmen sind explizit zu machen und sie damit zur Diskussion zu stellen. So können Meinungsverschiedenheiten auf die zugrundeliegenden Ursachen, meist Annahmen und konzept-

tionelle Eckpunkte, zurückgeführt werden. Dazu gehören z. B. unterschiedliche Systemgrenzen (z. B. was passiert außerhalb Deutschlands oder außerhalb des Waldes), unterschiedliche Zeiträume (z. B. wann treten welche Wirkungen ein) oder unterschiedliche Annahmen über zukünftige Rahmenbedingungen (z. B. zukünftiger Energiemix). Der Zwang, ein gemeinsames Verständnis von Referenz- und Politikszenarios zu entwickeln, führt unweigerlich dazu, über die Auswahl und Quantifizierung bestimmter Rahmenparameter so lange zu diskutieren, bis Einigkeit darüber hergestellt ist. Wenn auch die Auswahl und Weiterentwicklung der Modelle gemeinsam beschlossen wird, dürfte einer abweichenden Sicht auf die Ergebnisse der Untersuchung die Grundlage fehlen.

4 Empfehlungen

Klimaschutz ist auf nationaler und internationaler Ebene ein vordringliches Politikziel. Für die Klimaschutzpolitik ist es daher wichtig, zu wissen, welchen Klimaschutzbeitrag der Wald und die Holznutzung in Deutschland zu den Klimaschutzzielen der Bundesregierung aktuell und in Zukunft leisten kann. Unter Klimaschutzbeitrag werden in diesem Gutachten die Klimaschutzleistungen durch die Kohlenstoff-(C-) Speichereffekte im Wald zuzüglich der Effekte durch weitere Treibhausgase, die Kohlenstoff-(C-) Speichereffekte in Holzprodukten, sowie die potenziellen Substitutionseffekte von Treibhausgas-(THG) Emissionen bei Verwendung von Holzprodukten statt Nicht-Holzprodukten verstanden. Der Begriff Klimaschutzbeitrag ist dabei zunächst nicht wertend, d. h. positiv oder negativ zu verstehen. Effekte hinsichtlich des Waldspeichers und des Holzproduktespeichers können bei Vorratsaufbau Senken bzw. bei Vorratsabbau Quellen darstellen. Potenzielle Effekte bei der Substitution von Nicht-Holzprodukten durch Holzprodukte können je nach Vergleichsvariante grundsätzlich entweder zur Einsparung oder Erhöhung von Treibhausgasemissionen führen. Andere Einflüsse von Wäldern auf das Klima basierend auf ihren biophysikalischen Eigenschaften (z.B. Albedoeffekte und hydrologische Kühlungseffekte) sind nicht Bestandteil dieses Gutachtens.

In der Klimaberichterstattung wird aus methodischen Gründen nach Sektoren (Quellgruppen) unterschieden. Danach werden die laufende Speicherung (Senken) oder Emissionen (Quellen) von Treibhausgasen bei Wald und Holzprodukten dem Landnutzungssektor (*Land Use, Land Use Change, Forestry* (LULUCF))-Sektor zugeschrieben. Substitutionseffekte der Holzverwendung lassen sich nicht direkt messen und gehen daher nur indirekt vor allem über die Sektoren Industrie und/oder Energie in die Klimaberichterstattung ein. Die Klimaschutzleistung der Holzverwendung als Teil der forstlichen Nutzung ist dadurch nicht ersichtlich. Unterschiedliche Argu-

mentationslinien für die Waldbewirtschaftung und Holznutzung entstehen, wenn die Klimaschutzleistung von Wald und Holznutzung unter verschiedenen Betrachtungsweisen ermittelt werden.

Basierend auf der Analyse der zugrundeliegenden Studien schlägt der WBW für eine konsistente Ermittlung der Klimaschutzleistung von Wald und Holznutzung folgende Empfehlungen vor:

1. Betrachtung der Zusammenhänge der Klimaschutzleistungen von Waldspeicher, Holzproduktespeicher und potenzieller Substitution

Die Teilsysteme Waldspeicher, Holzproduktespeicher und potenzielle Substitution interagieren miteinander und bilden zusammen die Klimaschutzleistungen von Wald und Holznutzung. Daher sollten sie auch immer im Zusammenhang betrachtet werden.

Wenn aus dem Wald weniger Holz genutzt wird, kann (je nach Ausgangslage) mehr Biomassevorrat aufgebaut und damit Kohlenstoff aus atmosphärischem CO₂ im Wald gespeichert werden. Damit steht aber weniger Holz für die Nutzung zur Verfügung. Es wird weder der Holzproduktespeicher aufgebaut, noch werden andere Materialien substituiert, wodurch Treibhausgase eingespart werden könnten. Wird im Gegensatz dazu mehr Holz genutzt, sinkt der Kohlenstoffvorrat in der Biomasse des Waldes, der Wald kann ggf. zur C-Quelle werden, dafür kann mehr Kohlenstoff in Holzprodukten gespeichert und können mehr Nicht-Holzprodukte substituiert werden.

Potenzielle Substitutionseffekte, die sich aus den Differenzen der Treibhausgas-Emissionen über den Lebensweg von funktionsgleichen Holz- und Nicht-Holzprodukten ergeben, dürfen nicht gesondert als Klimaschutzleistung betrachtet werden, sondern müssen immer im Zusammenhang mit den Veränderungen der Kohlenstoffspeicher im Wald und im Bestand der Holzprodukte gesehen werden.

Ebenso ist es bei der Beurteilung der Klimaschutzleistungen von Wald und Holznutzung zu kurz gegriffen, den Blick nur auf die Waldspeicher zu richten und mögliche *Leakage*-Effekte, d. h. räumliche Verlagerungen mit erhöhten Holzimporten oder potenzielle Substitutionseffekte in anderen Sektoren, v. a. Industrie und Energie zu ignorieren. Nur eine Berücksichtigung aller genannten Teilsysteme, Wirkmechanismen und ihrer Interaktionen erlaubt, den Klimaschutzbeitrag von Wald und Holznutzung valide abzubilden.

2. Differenzierung zwischen Kohlenstoffspeicherung und Substitutionseffekten

Eine Beschränkung der Kommunikation auf die summarischen Klimaschutzleistungen (Veränderung der C-Speicher und Substitution) kann zu Fehlinterpretationen hinsichtlich des Klimaschutzbeitrages von Wald und Holznutzung führen, da sich unterschiedliche Entwicklungen zwischen Senkenleistung und Vermeidung von THG-Emissionen darin nicht erkennen lassen. Es sollten daher immer auch jeweils die Speichereffekte von Wald und Holzprodukten sowie der THG-Emissionseffekt der Holz- und Nicht-Holzprodukte getrennt dargestellt werden.

Der Waldspeicher und der Holzspeicher können CO₂- bzw. Treibhausgas-Senken oder -Quellen sein. Eine Netto-Erhöhung der Kohlenstoff-Speicher stellt eine tatsächliche Netto-Senke dar, die, u. a. in Abbildungen, als negativer Wert dargestellt wird. Die Substitution kann zu einer Einsparung oder Zunahme von Treibhausgasen führen. Eine potenzielle Einsparung an Treibhausgasen durch Substitution wird in Abbildungen oft als negativer Wert dargestellt (Vermeidung). Wenn gleich diese eine positive Klimaschutzwirkung hat, ist der Lebensweg von Holz- und Nicht-Holzprodukten in der Regel immer auch mit fossilen Treibhausgas-Emissionen verbunden, so lange fossil-basierte Energieträger eingesetzt werden.

3. Vermeidung der Verwendung von pauschalen Substitutionsfaktoren

Die Verwendung von pauschalen, nicht nach verschiedenen Produktbereichen bzw. Gebäudetypen differenzierten Substitutionsfaktoren sollte vermieden werden, da dies zu erheblichen Fehlern bei der ermittelten Klimaschutzleistung führt. Sollten allerdings wegen fehlender Ökobilanz-Studien spezifische Substitutionsfaktoren nicht verfügbar sein oder wegen zeitlicher und finanzieller Einschränkungen nicht neu berechnet werden können, ist bei Verwendung von bereits ermittelten Substitutionsfaktoren der notwendige Transfer von einem Kontext in einen anderen Kontext zu begründen, die Herleitung der Substitutionseffekte exakt zu beschreiben und bei der Interpretation zu berücksichtigen. Im Sinne guter wissenschaftlicher Praxis ist es erforderlich, die verfügbare Datenbasis offenzulegen sowie für bestehende Datenlücken aufzuzeigen, mit welchen Ersatzwerten gerechnet wurde und diese auch zu begründen.

Die aus existierenden Meta-Analysen extrahierten Substitutionsfaktoren überschätzen in der Regel die Einsparungspotenziale der stofflichen Nutzung von Holz, da meist Bauprodukte mit höherem Einsparpotenzialen bei Einsatz von Holzprodukten in den analysierten Produktportfolios überwiegen. Die verbreitete Praxis, Substitutionsfaktoren aus Vergleichen von Produkten oder Gebäuden auf das Rohholz zu beziehen, führt systematisch zu einer Überschätzung und ist daher als nicht sachgerecht abzulehnen. Grundsätzlich ist bei einer Verwendung von Substitutionsfaktoren nachteilig, dass die erst in der Zukunft potenziell auftretenden Einsparpotenziale einer energetischen Substitution nach stofflicher Holznutzung mitverrechnet werden und somit eine Betrachtung der Emissionsdifferenzen über die Zeit nicht möglich ist (siehe nachfolgende Empfehlung zur zeitlichen Darstellung).

4. Zeitliche Darstellung von THG-Flüssen der Wald- und Holzproduktespeicher und THG-Emissionen der Produktlebenszyklen

Auf die Verwendung von Substitutionsfaktoren, die auf kumulierten THG-Emissionen über den Produktlebensweg beruhen, sollte verzichtet werden. Stattdessen empfehlen wir, nicht nur die zeitlichen Verläufe der Wald- und Holzspeicher, sondern auch die THG-Emissionen aus Herstellung, Gebrauch und Entsorgung der Holz- und Nicht-Holzprodukte über den gesamten Produktlebensweg zeitlich differenziert darzustellen.

Durch eine Gegenüberstellung der zeitlichen Verläufe der unterschiedlichen Speicheränderungen und THG-Emissionen könnten die zeitlichen Entwicklungen von Klimaschutzleistungen und deren Wechselwirkungen differenzierter analysiert und die Maßnahmen im Bereich der Waldbewirtschaftung und Holzverwendung besser an kurz-, mittel- und langfristige Herausforderungen angepasst werden als bisher. Ein wichtiger Forschungsbedarf ergibt sich hinsichtlich der Einschätzung kurzfristiger Klimaschutzwirkungen von kurzlebigen Treibhausgasen.

Die Veränderungen der Wald- und Holzproduktespeicher werden in periodischen Abständen gemessen und hochgerechnet bzw. jährlich modelliert. Die Treibhausgas-Emissionen über den Produkt-Lebensweg werden basierend auf Normkonformen Ökobilanzen je Prozessmodul ausgewiesen und können somit zeitlich differenziert werden. Die veröffentlichten Substitutionsfaktoren basieren jedoch auf aggregierten Summenwerten über den gesamten Lebensweg und nicht auf einzelnen Jahren oder Jahresperioden. Diese hoch aggregierten Substitutionsfaktoren können daher zeitliche Entwicklungen nicht abbilden.

5. Transparenter Umgang mit Unsicherheiten

Bei der Berechnung der Klimaschutzleistungen von Wald und Holznutzung gibt es eine ganze Reihe von Unsicherheiten. Die stochastischen Unsicherheiten hinsichtlich der verwendeten Daten

sollten möglichst mit geeigneten statistischen Methoden quantifiziert und kommuniziert werden. Unsicherheiten hinsichtlich methodischer Entscheidungen, wie z. B. Modellansätze und Annahmen in Bezug auf zeitliche Entwicklungen und Rahmenbedingungen sollten mit Szenario- und Sensitivitätsanalysen charakterisiert werden, um Entscheidern deutlich zu machen, wie verlässlich Aussagen getroffen werden können.

So werden in den existierenden Waldmodellen mögliche zukünftige Risiken und Störungen noch nicht angemessen berücksichtigt. Die zukünftige Rolle heimischer und nicht-heimischer Baumarten im klimaangepassten Waldumbau hinsichtlich Flächenanteile, Wachstum und Klimastabilität sind darüber hinaus noch weitgehend unklar. Auch die zukünftigen Treibhausgasemissionen über den Lebenszyklus von Holz- und Nicht-Holzprodukten und den darauf aufbauenden potenziellen Substitutionseffekten unterliegen Unsicherheiten, beispielsweise durch die den Szenarien zugrundeliegenden Annahmen über den zukünftigen Energiemix, oder wenn Verallgemeinerungen von Faktoren einzelner Studien auf größere Aggregate unvermeidbar sind.

6. Folgenbetrachtung auf gesamtwirtschaftlicher Ebene

Für die Analyse der Klimaschutzleistungen auf gesamtwirtschaftlicher Ebene ist die Koppelung von Änderungen im Wald, z. B. durch natürliche Störungen, Bewirtschaftung oder Nicht-Bewirtschaftung, mit darauf basierenden Änderungen bei Holzflüssen und Verwendung entsprechender Holzprodukte notwendig. Zusätzlich muss auch die Koppelung mit den korrespondierenden Märkten der Nicht-Holzprodukte erfolgen, um Folgen über den Forst- und Holzsektor hinaus mitberücksichtigen zu können.

Potenzielle Substitutionseffekte basieren auf dem Vergleich von funktionsgleichen Produkten. Dabei werden die Treibhausgas-Emissionen bilanziert, die entlang des Lebensweges der betrachteten Holz- und Nicht-Holzprodukte entstehen. Bei der Modellierung von Szenarien auf gesamtwirt-

schaftlicher Ebene können sich Folgeeffekte ergeben, z. B. wenn eine verstärkte stoffliche Verwendung von Laubholz fossilen Ersatz für Brennholz nach sich ziehen würde. Um Folgen umfassender abschätzen zu können, ist oft ein spezieller Produktvergleich nicht mehr ausreichend, sondern es müssen funktionsgleiche Nutzenkörbe erstellt und dementsprechend Systemerweiterungen vorgenommen werden. Die Methodik des Produktvergleichs (Mikroebene) zur Ermittlung von potenziellen Substitutionseffekten muss daher mit Informationen auf einer höheren regionalen und wirtschaftlichen Ebene (Makroebene) verbunden werden.

7. Transparente Szenarienbildung

Szenarienbildung umfasst die Wahl der Systemgrenzen, des Betrachtungszeitraumes und der Annahmen über die Entwicklung der natürlichen, wirtschaftlichen, technischen und gesellschaftlichen Einflussfaktoren. Zusammen haben diese Setzungen starken Einfluss auf das Ergebnis. Für den Vergleich und die Interpretation von errechneten Klimaschutzleistungen von Wald und Holznutzung ist es daher unabdingbar, die Setzungen zu definieren und transparent offenzulegen. Darüber hinaus könnte die gemeinsame Bildung von Szenarien für die Ermittlung von potenziellen zukünftigen Klimaschutzleistungen von Wald und Holznutzung unter Einbeziehung verschiedener Stakeholder und Bundesressorts substanziell zur Harmonisierung der unterschiedlichen Sichtweisen beim Thema Klimaschutz durch Wald und Holznutzung beitragen. Für zentrale Untersuchungen bietet sich die Einbindung von Stakeholdern und Bundesressorts in die Szenarienbildung und Modellauswahl an, was aufgrund des großen Aufwandes von Organisation und Durchführung nur in einzelnen Fällen möglich sein wird.

Aussagen zu Klimaschutzleistungen von Wald und Holznutzung gelten nur für den jeweils vorgenommenen Vergleich von Bewirtschaftungsvarianten und resultierenden Produktverwendungen. Dies gilt insbesondere auch für die potenziellen Substitutionseffekte. Sie sind naturgemäß hypothetisch, da nur angenommen werden kann, welche Produkte aus welchen Materialien das Holzprodukt ersetzen würde. Der Vergleich unterschiedlicher Szenarien führt zu unterschiedlichen Klimaschutzleistungen.

Ein besonderes Beispiel von Szenarienanalyse ist die Ermittlung von Zusätzlichkeit. Hier werden nur die Effekte ganz bestimmter Maßnahmen im Vergleich zu einem festgelegten Referenzszenario betrachtet. Zusätzlichkeit ist ein entscheidendes Kriterium für die Anerkennung von Klimaschutzmaßnahmen auf nationaler Ebene oder bei der Anrechnung von Zertifikaten auf betrieblicher Ebene.

Der WBW weist ausdrücklich darauf hin, dass es außer den Wirkungen von Wald und Holznutzung auf das Klima noch weitere Wirkungen auf die Umwelt gibt. Klimaschutz muss mit den vielfältigen anderen Ökosystemleistungen (Holzbereitstellung, Boden-, Wasser-, Landschafts-, Natur-, Biodiversitätsschutz und Erholungsfunktion), mit der Einkommens- und Beschäftigungsfunktion sowie mit der Anpassung der Wälder und ihrer Bewirtschaftung an den globalen Klimawandel in Einklang gebracht werden (WBW 2022, WBW 2023).

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Jahr 2023 war der LULUCF-Sektor in Deutschland eine Netto-Quelle von Treibhausgasen im Umfang von 68,7 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten (Äq.) (Abb. 3). Der Wald, welcher Bestandteil dieses Sektors ist, wurde in den letzten 5 Jahren gleichfalls zu einer Netto-Quelle, im Jahr 2023 mit 20,9 Millionen Tonnen CO₂-Äq. Die Kategorie Holzprodukte ist nach wie vor Netto-Senke mit einem Aufbau des Speichers um 4,6 Millionen Tonnen CO₂-Äq. Die Ergebnisse der jüngsten Bundeswaldinventur aus dem Jahr 2022 (BMEL 2024) legen nahe, dass sich dieser Trend in Zukunft aufgrund zunehmender Störungsergebnisse und Zuwachsrückgänge fortsetzen wird (Rock et al. 2025). Die Entwicklung steht damit im Widerspruch zu den gesetzlich festgelegten Senkenzielen des LULUCF-Sektors (vgl. § 3a Abs. 1 Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG)).

Die vorstehend genannten Punkte, insbesondere die zentrale Empfehlung, Waldspeicher, Holzproduktespeicher und potenzielle Substitutionseffekte immer gemeinsam zu betrachten, verdeutlicht, dass die explizite Abgrenzung des Sektors LULUCF mit eigenem Sektorziel im Bundes-Klimaschutzgesetz nicht sachgerecht ist. Aufgrund der Verflechtungen mit anderen Sektoren kann die Betrachtung der Klimaschutzleistung von Wald und Holznutzung bei alleinigem Fokus auf den Waldspeicher leicht zu falschen Schlussfolgerungen führen. Angesichts der gesamten THG-Emissionen und der projizierten Entwicklung des Waldes im Klimawandel kann durch Wald und Holznutzung nur ein geringer Beitrag zum Klimaschutz in Deutschland erzielt werden. Ohne weitere Treibhausgasreduzierungen in anderen Sektoren wie Verkehr, Energie, Industrie, Gebäude sowie Landwirtschaft sind die Klimaziele in den gesetzten Größenordnungen nicht zu erreichen.

Aus gesamtgesellschaftlicher Sicht ist die entscheidende Frage, zu welchen Anteilen weitere Maßnahmen zur Ressourcen- und Energieeffizienz, die Energiewende, also die Zunahme THG-emissionsfreier Energie, und die Suffizienz, also Konsumverzicht, zur Erreichung der Klima-

schutzziele Deutschlands beitragen werden. Dabei ist damit zu rechnen, dass höhere Anteile THG-emissionsfreier Energie die potenziellen Substitutionseffekte verringern werden. Ein genereller Konsumverzicht reduziert die Nachfrage nach Holz, die Transformation der Wirtschaft hin zur Bioökonomie könnte die Nachfrage hingegen steigern.

Wie in der gesamten Stellungnahme thematisiert worden ist, hängen Ergebnisse zu den Klimaschutzleistungen von Wald und Holznutzung stark von den Setzungen und Modellierungen der Szenarien ab. Diese Bedingungen sind bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen, insbesondere wenn Schlussfolgerungen hinsichtlich der spezifischen Waldbewirtschaftung und Holznutzung abgeleitet werden sollen.

Mittelbar bleiben Holznutzung und die damit einhergehende Reduzierung der Bestandesdichte zur Etablierung klimaangepasster Baumarten eine entscheidende Voraussetzung für die rechtzeitige Anpassung der Wälder an den Klimawandel und damit für die langfristige Aufrechterhaltung der Kohlenstoff-Sequestrierung der Wälder, insbesondere für labile Bestände. Stabile, produktive und klimaangepasste Wälder bieten die Gewähr für eine effektive und langfristige CO₂-Bindung durch Wälder. Welche Formen der Forstwirtschaft und Holznutzung dann, rein aus Klimaschutzsicht, als vorzüglich zu beurteilen sind, ist abhängig von der Stabilität und dem Speicherpotenzial der Wälder, der Verwendung von Holz in langlebigen und kreislauffähigen Produkten sowie den zukünftigen Substitutionseffekten.

Für die Zukunft kann dies unter Verwendung von Szenarien abgeschätzt werden. Dabei könnten auch derzeit noch nicht realisierte Optionen wie *Bio-Energy Carbon Capture and Storage* (BECCS), Pyrolyse mit Holzkohlegewinnung zur Festlegung des Kohlenstoffs in Böden oder in Baumaterialien oder die Einlagerung von nicht stofflich nutzbaren Sortimenten unter Luftabschluss in alten Stollen zukünftig eine Rolle spielen. Diese Optionen sollten daher so früh wie möglich in zukünftige Abschätzungen einbezogen werden.

6 Literatur

- Bamber N, Turner I, Arulnathan V et al. (2020): Comparing sources and analysis of uncertainty in consequential and attributional life cycle assessment: review of current practice and recommendations. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 25 168-180. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01663-1>
- Bauhus J, Rock J, Spellmann H et al. (2017): Beiträge der Forst- und Holzwirtschaft zum Klimaschutz. *AFZ-Der Wald* 3 10-14. https://www.nwfva.de/fileadmin/nwfva/publikationen/pdf/bauhus_2017_beitraege_der_forst-_und.pdf
- BMEL – Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (Hrsg.) (2024): Der Wald in Deutschland. Ausgewählte Ergebnisse der vierten Bundeswaldinventur. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft; Stand 30.10.2024; 58 S.
- BMWSB – Bundesministerium für Wohnen Stadtentwicklung und Bauwesen (Hrsg.) (2025): Ökobaudat. <https://www.oekobaudat.de/>
- Bösch M, Jochem D, Weimar H et al. (2015): Physical input-output accounting of the wood and paper flow in Germany. *Resources Conservation Recycling* 94 99-109. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.11.014>
- Bösch M, Elsasser P, Rock J et al. (2019): Extent and costs of forest-based climate change mitigation in Germany: accounting for substitution. *Carbon Management* 10(2) 127-134. <https://doi.org/10.1080/17583004.2018.1560194>
- Böttcher H, Hennenberg K, Winger C (2018): FABio-Waldmodell. Modellbeschreibung 2018 Version 0.54 Stand Nov. 2017. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/FABio-Wald-Modellbeschreibung.pdf>
- Bolte A, Ammer C, Annighöfer P et al. (2021): Fakten zum Thema: Wälder und Klimaschutz. *AFZ/DerWald* 11 12-15. http://www.dvffa.de/files/Bolte_Faktencheck_1_ste.pdf
- Brunet-Navarro P, Jochheim H, Cardellini G et al. (2021): Climate mitigation by energy and material substitution of wood products has an expiry date. *Journal of Cleaner Production* 303 127026. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127026>
- Churkina G, Organschi A, Reyser C. P et al. (2020): Buildings as a global carbon sink. *Nature Sustainability* 3(4) 269-276. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0462-4>
- Curran MA (Series Ed.) (2015-2023): *LCA Compendium–The Complete World of Life Cycle Assessment*. Book series. <https://www.springer.com/series/11776>
- Curran MA (Ed.) (2017): *Goal and Scope Definition in Life Cycle Assessment*. Volume of the *LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment*. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-94-024-0855-3>
- Destatis (Statistisches Bundesamt) (2024) *Waldgesamtrechnung 2014-2021*. EVAS-Nummer 85511. https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/landwirtschaft-wald/_inhalt.html#_zuxufivfs
- DIN EN 15804:2022-03: *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte; Deutsche Fassung EN 15804:2012+A2:2019 + AC:2021*.
- DIN EN 15978:2012-10: *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden – Berechnungsmethode; Deutsche Fassung EN 15978:2011*.
- DIN EN 16485:2014-07: *Rund- und Schnittholz – Umweltproduktdeklarationen – Produktkategorieregeln für Holz und Holzwerkstoffe im Bauwesen; Deutsche Fassung EN 16485:2014*.
- DIN EN ISO 14040:2021-02: *Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen*. Deutsche Fassung EN ISO 14040:2006 + A1:2020.
- DIN EN ISO 14044:2021-02: *Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen*. Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006 + A1:2018 + A2:2020
- Ellison D, Pokorný J, Wild M (2024) Even cooler insights: On the power of forests to (water the Earth and) cool the planet. *Global Change Biology* 30 17195. <https://doi.org/10.1111/gcb.17195>
- Englund, G., Eggers, J., Jonsson, BG. et al. (2025): *Why We Disagree about the Climate Impact of Forestry – A Quantitative Analysis of Swedish Research*. *Environmental Management*. <https://doi.org/10.1007/s00267-025-02208-z>
- Fehrenbach H, Bischoff M, Böttcher H et al. (2022): The missing limb: including impacts of biomass extraction on forest carbon stocks in greenhouse gas balances of wood use. *Forests* 13(3) 365. <https://doi.org/10.3390/f13030365>

- Forsell N, Korosuo A, Gusti M et al. (2019): Impact of modelling choices on setting the reference levels for the EU forest carbon sinks: how do different assumptions affect the country-specific forest reference levels? *Carbon Balance Manage* 14 10. <https://doi.org/10.1186/s13021-019-0125-9>
- Forzieri G, Girardello M, Ceccherini G et al. (2021) Emergent vulnerability to climate-driven disturbances in European forests. *Nat Commun.* 2021 Feb 23;12(1):1081. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21399-7>
- Frühwald A, Knauf M (2014): Carbon aspects promote building with wood. *Proceedings of the World Conference on Timber Engineering (WCTE)* Quebec Canada.
- Gensior A, Drexler S, Fuß R et al. (2025): Zahlen Fakten. Treibhausgas-Emissionen durch Landnutzung Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF): Stand: 10.04.2025. <https://www.thuenen.de/de/themenfelder/klima-und-luft/emissionsinventare-buchhaltung-fuer-den-klimaschutz/treibhausgas-emissionen-lulucf>
- Glasenapp S, Döring P, Blanke C et al. (2017): Entwicklung von Holzverwendungsszenarien. Abschlussbericht im Projekt WEHAM-Szenarien. Hamburg 2017. https://www.weham-szenarien.de/fileadmin/weham/Ergebnisse/Glasenapp_Doering_Blanke_Mantau_2017_Entwicklung_von_Holzverwendungsszenarien_WEHAM_Projekt_.pdf
- Graf A, Wohlfahrt G, Aranda-Barranco S et al. (2023) Joint optimization of land carbon uptake and albedo can help achieve moderate instantaneous and long-term cooling effects. *Communications Earth Environment* volume 4. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00958-4>
- Grassi G, Pilli R, House J et al. (2018) Science-based approach for credible accounting of mitigation in managed forests. *Carbon Balance and Management* 13 8.
- Grassi G, Fiorese G, Pilli R et al. (2021): Brief on the role of the forest-based bioeconomy in mitigating climate change through carbon storage and material substitution. Sanchez Lopez J, Jasinevičius G, Avraamides M. editor(s) *European Commission 2021 JRC124374*. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC124374>
- Gregor K, Krause A, Reyer CP et al. (2024): Quantifying the impact of key factors on the carbon mitigation potential of managed temperate forests. *Carbon Balance and Management* 19(1) 10. <https://doi.org/10.1186/s13021-023-00247-9>
- Guest G, Cherubini F, Strømman AH (2012): Global Warming Potential of Carbon Dioxide Emissions from Biomass Stored in the Anthroposphere and Used for Bioenergy at End-of-Life. *Journal of Industrial Ecology* 17(1) 20-30. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00507.x>
- Hafner A, Özdemir Ö (2022): Comparative LCA study of wood and mineral non-residential buildings in Germany and related substitution potential. *European Journal of Wood and Wood Products* 81 251-266. <https://doi.org/10.1007/s00107-022-01888-2>
- Hafner A, Schäfer S (2017): Comparative LCA study of different timber and mineral buildings and calculation method for substitution factors on building level. *Journal of Cleaner Production* 167 630-642. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.203>
- Hafner A, Rüter S (2018): Method for assessing the national implications of environmental impacts from timber buildings - an exemplary study for residential buildings in Germany. *Wood Fiber Sci* 50 (Special Issue) 139-154. <https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/2682>
- Hafner A, Rüter S, Ebert S et al. (2017): Treibhausgasbilanzierung von Gebäuden – Umsetzung neuer Anforderungen an Ökobilanzen und Ermittlung empirischer Substitutionsfaktoren (THG-Holzbau): 148 S. Forschungsprojekt: 28W-B-3-054-01 Waldklimafonds. BMEL/BMUB. ISBN: 978-3-00-055101-7.
- Hansen R. N, Rasmussen FN, Ryberg M et al. (2023): A systematic review of consequential LCA on buildings: the perspectives and challenges of applications and inventory modelling. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 28(2) 131-145. <https://doi.org/10.1007/s11367-022-02126-w>
- Harmon M. E (2009): Woody detritus mass and its contribution to carbon dynamics of old-growth forests: The temporal context. In: Wirth C, Gleixner G, Heimann M (eds.) *Old-growth forests: Function fate and value*. Ecological Studies 207 Springer Verlag Berlin Heidelberg 159-190 DOI: 10.1007/978-3-540-92706-8_8
- Hasler N, Williams CA, Denney VC et al. (2024): Accounting for albedo change to identify climate-positive tree cover restoration. *Nature Communications* 15 2275. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-46577-1>
- Hennenberg K, Böttcher H, Wiegmann K et al. (2019): Kohlenstoffspeicherung in Wald und Holzprodukten. *AFZ-Der Wald* 17 36-39. https://co2-speichersaldo.de/media/Hennenberg_Oekobilanz_sl.pdf

- Hernández L, Jandl R, Blujdea et al. (2017): Towards complete and harmonized assessment of soil carbon stocks and balance in forests: The ability of the Yasso07 model across a wide gradient of climatic and forest conditions in Europe. *Science of The Total Environment* 599-600 1171-1180. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.298>
- Hoebe AD, Stern T, Lloret F (2023): A Review of Potential Innovation Pathways to Enhance Resilience in Wood-Based Value Chains. *Current Forestry Reports* 9 301-318. <https://doi.org/10.1007/s40725-023-00191-4>
- Höglmeier K, Weber-Blaschke G, Richter K, (2014): Utilization of recovered wood in cascades versus utilization of primary wood - a comparison with life cycle assessment using system expansion. *International Journal of Life Cycle Assessment* 19 1755-1766. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0774-6>.
- Hoxha E, Passer A, Mendes Saade MR et al. (2020): Biogenic carbon in buildings: a critical overview of LCA methods. *Buildings Cities* 1(1) 504-524. <https://doi.org/10.5334/bc.46>
- Hurmekoski E, Smyth CE, Stern T et al. (2021): Substitution impacts of wood use at the market level: a systematic review. *Environmental Research Letters* 16(12) 123004. *Environ. Res. Lett.* 16 (2021) 123004 <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac386f>
- Hurmekoski E, Seppälä J, Kilpeläinen A et al. (2022a): Chapter 7: Contribution of Wood-Based Products to Climate Change Mitigation. In: Hetemäki L, Kangas J, Peltola H (2022): *Forest Bioeconomy and Climate Change*. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-99206-4>
- Hurmekoski E, Kilpeläinen A, Seppälä J, (2022b): Chapter 8: Climate-Change Mitigation in the Forest-Based Sector: A Holistic View. In: Hetemäki L, Kangas J, Peltola H (2022): *Forest Bioeconomy and Climate Change*. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-99206-4>
- Hurmekoski E, Kunttu J, Heinonen T et al. (2023): Does expanding wood use in construction and textile markets contribute to climate change mitigation? *Renewable and sustainable energy reviews* 174 113152. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113152>
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change / Pingoud K, Skog KE, Martino DL, Tonosaki M, Xiaoquan Z (2006): IPCC Guidelines for Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture Forestry and Other Land Use. Chapter 12. Harvested Wood Products. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/4_Volume4/V4_12_Ch12_HWP.pdf
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change / Smith C, Nicholls ZRJ, Armour K, Collins W et al (2021): The Earth's Energy Budget Climate Feedbacks and Climate Sensitivity Supplementary Material 35 S. In *Climate Change 2021. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter07_SM.pdf
- Klein D, Schulz C (2012): Die Kohlenstoffbilanz der Bayerischen Forst- und Holzwirtschaft. Abschlussbericht. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft Freising.
- Knauf M, Köhl M, Mues V (2015): Modeling the CO₂-effects of forest management and wood usage on a regional basis. *Carbon Balance and Management* 10:13. <https://doi.org/10.1186/s13021-015-0024-7>
- Knauf M, Joosten R, Frühwald A (2016): Assessing fossil fuel substitution through wood use based on long-term simulations. *Carbon Management* 7:1-2 67-77. <https://doi.org/10.1080/17583004.2016.1166427>
- Knauf M, Mues V, Frühwald A et al. (2017): Klimaschutzleistung der Forst- und Holzwirtschaft lokal bewerten. *AFZ-DerWald* 14 19-22. <https://knauf-consulting.de/wp-content/uploads/2017/07/AFZ-BEKLIFUH-Knauf-et-al.pdf>
- Knoke T, Hanley N, Roman-Cuesta RM et al. (2023): Trends in tropical forest loss and the social value of emission reductions. *Nature Sustainability* 6(11) 1373-1384. *Nature Sustainability*. <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01175-9>
- Krause A, Knoke T, Rammig A (2020): A regional assessment of land-based carbon mitigation potentials: Bioenergy BECCS reforestation and forest management. *GCB Bioenergy* 12(5) 346-360. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12675>

- Lauf T, Memmler M, Schneider S (2022): Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger. Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2021. Hrsg. UBA CLIMATE CHANGE 50/2022 170 S. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2022-12-09_climate-change_50-2022_emissionsbilanz_erneuerbarer_energien_2021_bf.pdf
- Leskinen P, Cardellini G, González-García S et al. (2018): Substitution effects of wood-based products in climate change mitigation. From Science to Policy 7. European Forest Institute. https://efi.int/sites/default/files/files/publication-bank/2018/efi_fstp_7_2018.pdf
- Leuschner C, Förster A, Diers M et al. (2022) Are northern German Scots pine plantations climate smart? The impact of large-scale conifer planting on climate soil and the water cycle. Forest Ecology and Management 507 120013. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120013>
- Levasseur A, Lesage P, Margni M et al. (2010): Considering time in LCA: dynamic LCA and its application to global warming impact assessments. Environmental science technology 44(8) 3169-3174. <https://doi.org/10.1021/es9030003>
- Levasseur A, Lesage P, Margni M et al. (2013): Biogenic Carbon and Temporary Storage Addressed with Dynamic Life Cycle Assessment. J. Ind. Ecol. 17(1) 117-128. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00503.x>
- Liski J, Palosuo T, Peltoniemi M et al. (2005): Carbon and decomposition model Yasso for forest soils. Ecological Modelling 189 168-182. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.005>
- Luyssaert S, Janssens I, Stoy PC et al. (2014): Land management and land-cover change have impacts of similar magnitude on surface temperature. Nature Clim. Change 4 389-393.
- Maier M, Longdoz B, Laemmle T et al. (2017): 2D profiles of CO₂ CH₄ N₂O and gas diffusivity in a well aerated soil: measurement and Finite Element Modeling. Agricultural and Forest Meteorology 247 21-33. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.07.008>
- Mahnken M, Cailleret M, Collalti A et al. (2022): Accuracy realism and general applicability of European forest models. Global Change Biology 28(23) 6921-6943. <https://doi.org/10.1111/gcb.16384>
- Mantau U, Bilitewski B (2010): Stoffstrom-Modell-Holz 2007 Rohstoffströme und CO₂-Speicherung in der Holzverwendung. Forschungsbericht für das Kuratorium für Forschung und Technik des Verbandes der Deutschen Papierfabriken e.V (VDP) Celle 2010 75 S.
- Memmler M, Schrempf L, Hermann S et al. (2014): Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger. Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2013. Hrsg. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/climate_change_29_2014_schrempf_komplett_10.11.2014.pdf
- Myllyviita T, Soimakallio S, Judl J et al. (2021): Wood substitution potential in greenhouse gas emission reduction – review on current state and application of displacement factors. For. Ecosyst. 8 42. <https://doi.org/10.1186/s40663-021-00326-8>
- Nabuurs G. J, Sikkema R (1998): The role of harvested wood products in national carbon balances - an evaluation of alternatives for IPCC guidelines. IBN-Research Report 98/3 53 p.
- Nabuurs G. J, Delacote P, Ellison D et al. (2015): A new role for forests and the forest sector in the EU. post-2020 climate targets. From Science to Policy 2. European Forest Institute. <https://pub.epsilon.slu.se/31889/1/nabuurs-e-et-al-20231011.pdf>
- Oehmichen K, Klatt S, Gerber K et al. (2018): Die alternativen WEHAM-Szenarien: Holzpräferenz Naturschutzpräferenz und Trendfortschreibung. Szenarienentwicklung Ergebnisse und Analyse (No. 59): Thünen Report. <https://doi.org/10.3220/REP1527686002000>
- Otto HJ (1994): Waldökologie. Verlag Eugen Ulmer Stuttgart 391 S.
- Pfeiffer M, Hennenberg K, Böttcher H et al. (2023): Referenzszenario der Holzverwendung und der Waldentwicklung im UBA-Projekt BioSINK. Working Paper. Öko-Institut. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/WP-Referenzszenario-BioSINK.pdf>
- Pilli R, Grassi G, Kurz WA, Fiorese G, Cescatti A (2017): The European Forest sector: past and future carbon budget and fluxes under different management scenarios. Biogeosciences 14(9) 2387-2405. <https://doi.org/10.5194/bg-14-2387-2017>

- Pretzsch H, Biber P, Ďurský J (2002): The single tree-based stand simulator SILVA: construction application and evaluation. *Forest ecology and management* 162(1) 3-21. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00047-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00047-6)
- Rammer W, Thom D, Baumann M et al. (2024): The individual-based forest landscape and disturbance model iLand: Overview, progress, and outlook, *Ecological Modelling* 495, <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2024.110785>
- Rock J, Adam S, Bender S et al. (2025): Effects of the 2018 - 2020 disturbances on the projected carbon balance of German forests and LULUCF climate protection targets. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 20 p, Thünen Working Paper 268, <https://doi.org/10.3220/253-2025-33>
- Rosenkranz L, von Arnim G, Englert H et al. (2023): Alternative forest management strategies to adapt to climate change: An economic evaluation for Germany Thünen Working Paper No. 219 Johann Heinrich von Thünen-Institut Braunschweig <https://doi.org/10.3220/WP1691499012000>
- Rüter S (2017): Der Beitrag der stofflichen Nutzung von Holz zum Klimaschutz – Das Modell WoodCarbonMonitor. Dissertation. Technische Universität München 270 S. <https://mediatum.ub.tum.de/1295127>
- Rüter S (2023): Abschätzung von Substitutionspotentialen der Holznutzung und ihre Bedeutung im Kontext der Treibhausgas-Berichterstattung Thünen Working Paper No. 214 40. S, Johann Heinrich von Thünen-Institut Braunschweig. <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/273347/1/1850835276.pdf>
- Rüter S, Werner F, Forsell N et al. (2016): ClimWood2030 "Climate benefits of material substitution by forest biomass and harvested wood products: Perspective 2030": final report. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut 142 p Thünen Rep 42. https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn056927.pdf
- Rüter S, Stümer W, Dunger K (2017): Treibhausgasbilanzen der WEHAM-Szenarien. *AFZ-DerWald* 13 30-31. https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn059104.pdf
- Salazar J, Sowlati T, 2008. Life cycle assessment of windows for the North American residential market: case study. *Scandinavian Journal of Forest Research* 23 (2) 121-132. <https://doi.org/10.1080/02827580801906981>
- Sander-Titgemeyer A, Risse M, Weber-Blaschke G (2023): Applying an Iterative Prospective LCA Approach to Emerging Wood-based Technologies: Three German Case Studies. *International Journal of Life Cycle Assessment* 28 495-515. <https://doi.org/10.1007/s11367-023-02139-z>
- Sander-Titgemeyer A, Torno S, Weber-Blaschke G (2025): Predicting the environmental consequences of different energy and material applications for Bavarian hardwood harvest. *Journal of Industrial Ecology*, <https://doi.org/10.1111/jiec.70047>
- Sathre R, O'Connor J (2010): Meta-analysis of greenhouse gas displacement factors of wood product substitution. *Environ Sci Policy* 13 104-114. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2009.12.005>
- Schaubroeck T, Schaubroeck S, Heijungs R et al. (2021): Attributional consequential life cycle assessment: Definitions conceptual characteristics and modelling restrictions. *Sustainability* 13(13) 7386. <https://doi.org/10.3390/su13137386>
- Scharai-Rad M, Welling J (2002): Environmental and Energy Balances of Wood Products and Substitutes. Food and Agricultural Organization of the United Nations 70 pp
- Schluhe M, Englert H, Wördehoff R et al. (2018): Klimarechner zur Quantifizierung der Klimaschutzleistung von Forstbetrieben auf Grundlage von Forsteinrichtungsdaten. *Landbauforsch Appl Agric Forestry Res* 68 (3/4) 67-86. https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn060611.pdf
- Schmidt-Bleek F (1994): Wieviel Umwelt braucht der Mensch? MIPS – Das Maß für ökologisches Wirtschaften. Birkhäuser Verlag Berlin 302 S.
- Schelhaas MJ, Hengeveld G, Filipek S et al. (2022): EFISCEN-Space 1.0 model documentation and manual. Wageningen Environmental Research Report 3220. 114 pp. <https://edepot.wur.nl/583568>
- Schulte M, Jonsson R, Hammar T et al. (2022): Nordic Forest management towards climate change mitigation: time dynamic temperature change impacts of wood product systems including substitution effects. *European Journal of Forest Research* 141 845-863. <https://doi.org/10.1007/s10342-022-01477-1>
- Schulz C, Weber-Blaschke G (2021): Kontrovers diskutiert: Der Klimaschutzbeitrag der Forst- und Holzwirtschaft. Wie kommt es zu unterschiedlichen Argumentationslinien und Widersprüchen? *LWF aktuell* 128 (1/|2021) 19-22.

- Schwaiger F, Poschenrieder W, Biber P et al. (2019): Ecosystem service trade-offs for adaptive forest management. *Ecosystem Services* 39 100993. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2019.100993>
- Schweinle J, Köthke M, Englert H et al. (2018): Simulation of forest-based carbon balances for Germany: a contribution to the "carbon debt" debate. *WIREs Energy Environ* 7(1) 1-15. <https://doi.org/10.1002/wene.260>
- Seppälä J, Heinonen T, Pukkala T et al. (2019): Effect of increased wood harvesting and utilization on required greenhouse gas displacement factors of wood-based products and fuels. *Journal of environmental management* 247 580-587. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.031>
- Smith B, Prentice IC, Sykes MT (2001): Representation of vegetation dynamics in the modelling of terrestrial ecosystems: comparing two contrasting approaches within European climate space. *Global Ecology Biogeography* 10: 621-637. <https://doi.org/10.1046/j.1466-822X.2001.t01-1-00256.x>
- Smith CJ, Gasser T (2022): Modeling the non-CO2 contribution to climate change. *One Earth* 5(12) 1330-1335. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.11.007>
- Soimakallio S, Fehrenbach H, Sironen S et al. (2022): Fossil carbon emission substitution and carbon storage effects of wood-based products. *Reports of the Finnish Environment Institute* 22. https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/342930/SYKERE_22-2022_Wood-based-products.pdf
- Taverna R, Hofer P, Werner F et al. (2007): CO2-Effekte der Schweizer Wald- und Holzwirtschaft. Szenarien zukünftiger Beiträge zum Klimaschutz. *Umwelt-Wissen* Nr. 0739. Bundesamt f. Umwelt Bern. 102 S.
- Thünen-Institut für Waldökosysteme (2024): Bodenzustandserhebung. <https://www.thuenen.de/de/bodenzustandserhebung>
- UBA – Umweltbundesamt (2022): Treibhausgasemissionen stiegen 2021 um 54,5 %. Pressemitteilung Nr. 15 vom 15.03.2022.
- Verkerk PJ, Hassegawa M, Van Brusselen J et al. (2021): The role of forest products in the global bioeconomy – Enabling substitution by wood-based products and contributing to the Sustainable Development Goals. Rome FAO on behalf of the Advisory Committee on Sustainable Forest-based Industries (ACSFI). <https://doi.org/10.4060/cb7274en>
- WBW - Wissenschaftlicher Beirat Waldpolitik beim BMEL (Hrsg.) (2022): Mehr als „Gute fachliche Praxis“ – Vorschlag für eine anpassungsfähige Governance zum Erhalt resilienter Wälder und ihrer Ökosystemleistungen in Zeiten des globalen Wandels. Stellungnahme. Berlin 14 S. https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Ministerium/Beiraete/waldpolitik/Stellungnahme-wbw-mehr-als-gute-fachliche-praxis.pdf?__blob=publicationFile&v=3
- WBW – Wissenschaftlicher Beirat Waldpolitik beim BMEL (Hrsg.) (2023): Zum Umgang mit alten naturnahen Laubwäldern in Deutschland im Spannungsfeld zwischen Biodiversitätsschutz Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel. Stellungnahme. Berlin 29 S. https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Ministerium/Beiraete/waldpolitik/stellungnahme-wbw-laubwaelder.pdf?__blob=publicationFile&v=3
- Weber-Blaschke G (2019): Nachhaltige Forst- und Holzwirtschaft als Basis der Bioökonomie. – In: Bayer. Akademie der Wissenschaften (Hrsg.): Ökologie und Bioökonomie. Neue Konzepte zur umweltverträglichen Nutzung natürlicher Ressourcen. *Rundgespräche Forum Ökologie* Band 48. Verlag Dr. Friedrich Pfeil München. ISBN 978-3-89937-246-5. 31–46. https://pfeil-verlag.de/wp-content/uploads/2019/12/5_46_05_WE.pdf
- Weber-Blaschke G, Muys B (2020): Bioeconomy – potentials for innovation and sustainability regarding wood utilisation and forest management. In: Krumm F.; Schuck A.; Rigling A (eds) 2020: How to balance forestry and biodiversity conservation – A view across Europe. *European Forest Institute (EFI); Swiss Federal Institute for Forest Snow and Landscape Research (WSL) Birmensdorf* 88-107. <https://doi.org/10.16904/envdat.196>
- Weidema B. P, Ekvall T, Heijungs R (2009): Guidelines for application of deepened and broadened LCA. Deliverable D18 of work package 5 of the CALCAS project 6-25. <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=8be59252f6790328a6360d506df522de78bbce4c>
- Weidema BP, Pizzol M, Schmidt J et al. (2018): Attributional or consequential life cycle assessment: a matter of social responsibility. *Journal of cleaner production* 174 305-314. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.340>
- Wegener G, Pahler A, Tratzmiller M (2010): Bauen mit Holz = aktiver Klimaschutz. *Holzforschung* München. <https://www.cluster-forstholzbayern.de/images/stories/downloads/broschuere/broschuere-bauen-mit-holz-klimaschutz.pdf>

- Wellbrock N, Grüneberg E, Stümer W et al. (2014): Wälder in Deutschland speichern Kohlenstoff. *AFZ-DerWald* 69(18) 38-39.
- Wenker J (2015): Ökobilanzierung komplexer Holzprodukte am Beispiel industriell hergestellter Möbel. Dissertation Technische Universität München. 232 S. mit Anhang.
- Werner F, Forsell N, Stadelmann G et al. (2023): Klimaleistungen der Waldbewirtschaftung und Holzverwendung in der Schweiz - Technischer Bericht.
- Wolf C, Klein D, Weber-Blaschke G et al. (2015): Systematic Review and Meta-Analysis of Life Cycle Assessments for Wood Energy Services. *Journal of Industrial Ecology* 20(4) 743-763; <https://doi.org/0.1111/jiec.12321>.
- Wolf C, Dressler D, Engelmann K et al. (2016a): ExpressBio. Methoden zur Analyse und Bewertung ausgewählter ökologischer und ökonomischer Wirkungen von Produktsystemen aus land- und forstwirtschaftlichen Rohstoffen. Berichte aus dem TFZ Nr. 45 ISBN 1614-1008 165 S. Internet: http://www.tfz.bayern.de/mam/cms08/biokraftstoffe/dateien/tfz_bericht_45_expressbio.pdf
- Wolf C, Klein D, Richter K et al. (2016b): Mitigating environmental impacts through the energetic use of wood: Regional displacement factors generated by means of substituting non-wood heating systems. *Science of the Total Environment* 569 395-403. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.021>

7 Glossar

Glossar 1: Begrifflichkeiten und Definitionen zu Kohlenstoffspeicher und Treibhausgasflüssen

- Biosphäre (grch. *Bios*: Leben; *Sphaira*: Kugel, Ball):
Gesamter Lebensraum der Erde, Teil der Ökosphäre, der Gesamtheit aller Sphären (Otto 1994)
- Lithosphäre (grch. *Lithos*: Stein; *Sphaira*: Kugel, Ball):
Gesteinshülle der Erde; Erdkruste und oberste Schicht des Erdmantels
- Technosphäre (grch. *Technikós*: Kunst, Handwerk, Kunstfertigkeit; *Sphaira* = Kugel, Ball):
Gedanklicher Raum, der alle menschlichen Aktivitäten umfasst bzw. die von menschlicher Technik beeinflusste Welt; Subsystem der Ökosphäre, da sie auf Stoffströme aus der Ökosphäre angewiesen ist und nach deren Umsetzung innerhalb seiner Grenzen wieder Stoffströme in die Ökosphäre entlässt (Schmidt-Bleek 1994)
- Atmosphäre (grch. *Atmos*: Dampf, Dunst, Hauch; *Sphaira*: Kugel, Ball):
Gasförmige Hülle der Erde
- Treibhausgase (THG): primär Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄), Lachgas (N₂O), die besonders zur Klimaerwärmung beitragen (IPCC 2021).
- CO_{2, biogen}: CO₂-Emissionen, die aus der Umwandlung von Biomasse, hier speziell Holz, stammen.
- CO_{2, fossil}: CO₂-Emissionen, die aus der Umwandlung von fossilen Energieträgern und Stoffen stammen.

Wald:

- C-Speicher – Bestandsgröße:
Bei Berechnungen werden folgende einzelne Kompartimente des Waldes betrachtet:
Oberirdische Biomasse, Verjüngung, Totholz, unterirdische Biomasse/Wurzeln, organische Auflage/Streu, Mineralboden.
- C-Bindung, C-Sequestrierung durch CO₂-Aufnahme – Flussgröße:
Durch Photosynthese wird mit Hilfe von Sonnenenergie, CO₂ und Wasser O₂ und Glucose/Biomasse gebildet und dabei C festgelegt.
- CO₂-Freisetzung, CO₂-Emissionen durch Veratmung – Flussgröße:
Durch pflanzliche und mikrobielle Veratmung wird der organische Kohlenstoff in den o. g. Speichern wieder freigesetzt.
- THG-Aufnahme/-Abgabe von Waldböden – Flussgrößen:
 - # CO₂-Abgabe bei aeroben Bedingungen durch Veratmung von Wurzeln, Mikroorganismen, Bodenlebewesen; CO₂-Aufnahme bei anaeroben-Bedingungen, da stattdessen CH₄ gebildet wird.
 - # CH₄-Abgabe bei anaeroben Bedingungen; CH₄-Aufnahme bei aeroben Bedingungen, da CH₄ durch mikrobielle Oxidation zu CO₂ umgewandelt wird.
 - # N₂O-Abgabe bei anaeroben Bedingungen durch Denitrifikation von Nitrat.
- Änderung des C-Speichers
(wird in der THG-Berichterstattung in CO₂-Äquivalenten dargestellt, siehe Kap. 2.5, Abb. 3):
 - # CO₂-Senke: Nimmt der Wald (oder einzelne Kompartimente) in einem definierten Zeitraum mehr CO₂ auf, als er abgibt, ergibt sich durch den Biomassezuwachs ein Vorratsaufbau und damit eine Netto-Zunahme des C-Speichers.
 - # CO₂-Quelle: Gibt der Wald (oder einzelne Kompartimente) in einem definierten Zeitraum mehr CO₂ ab, als er zunimmt, ergibt sich durch den Biomasseabbau ein Vorratsabbau und damit eine Netto-Abnahme des C-Speichers.

Glossar 1: Begrifflichkeiten und Definitionen zu Kohlenstoffspeicher und Treibhausgasflüssen – Fortsetzung

Holzprodukte:

- C-Speicher (auch Holzprodukte-Pool) – Bestandsgröße:
Kohlenstoff wird im Holz der Holzprodukte gespeichert (biogenes C); der Zeitraum der Speicherung hängt von der Lebensdauer der Holzprodukte ab.
Wird Altholz stofflich statt energetisch genutzt (Kaskadennutzung), verlängert sich die Lebensdauer des Holzes und damit der (biogene) C-Speicher, bevor das (biogene) CO₂ nach energetischer Nutzung des Holzes wieder emittiert wird.
- CO₂-Freisetzung, CO₂-Emissionen durch Verbrennung (Holz) – Flussgröße:
Bei Verbrennung des Holzes (energetische Nutzung) wird der Kohlenstoff des Holzes (biogenes C) oxidiert, es entsteht (biogenes) CO₂.
- Änderung des C-Speichers (wird in der THG-Berichterstattung in CO₂-Äquivalenten dargestellt, siehe Kap. 2.5, Abb. 3):
 - # C-Senke: Nimmt der Holzproduktespeicher in einem definierten Zeitraum zu, indem z. B. mehr Häuser (z. B. durch eine Holzbauinitiative) mit Holz gebaut werden als Altholz durch Rückbau entsteht und verbrannt wird, ergibt sich durch den Netto-Gewinn an Holzprodukten eine Zunahme an C-Speicher.
 - # C-Quelle: Nimmt der Holzproduktespeicher in einem definierten Zeitraum ab, in dem z.B. mehr Holz-Häuser rückgebaut als zugebaut werden und das entstehende Altholz verbrannt wird, ergibt sich durch den Netto-Verlust an Holzprodukten eine Abnahme an C-Speicher.

Glossar 2: Begrifflichkeiten zur Berechnung des Treibhauseffektes eines Produktes und des Substitutionsfaktors mit der Ökobilanz-Methode

- Produkt-Ökobilanz (DIN EN ISO 14040:2021 und 14044:2021):
Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Outputflüsse und der potenziellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges (weitere führende Literatur z.B. Curran 2015-2023)
- Produkt (DIN EN ISO 14040:2021):
Jede Ware oder Dienstleistung
- Bauprodukt (DIN EN 15978:2012):
Ware, die hergestellt oder bearbeitet/veredelt wurde, um in ein Bauwerk eingefügt zu werden.
- Funktionelle Einheit (FE) (engl. *Functional Unit: FU*):
Quantifizierter Nutzen eines Produktsystems für die Verwendung als Vergleichseinheit (DIN EN ISO 14044:2021), damit funktionsgleiche Produkte auf Basis der funktionellen Einheit verglichen werden können.
- Biogene Kohlenstoffneutralität (DIN EN 16485:2014):
Für die Systemgrenze zwischen dem natürlichen System (Biosphäre) und dem untersuchten Produktsystem (Technosphäre) wird in DIN EN 16485:2014 festgelegt, dass bei Holz, das aus dem natürlichen System in das Produktsystem eintritt, der Energiegehalt und der biogene Kohlenstoffgehalt als Werkstoffeigenschaften gelten. Damit zählt der Eintritt des Kohlenstoffs in das Produktsystem mit -1 (unter der Voraussetzung einer nachhaltigen Forstwirtschaft) und der Austritt als +1, was bilanztechnisch 0 und somit „neutral“ ergibt (siehe auch Kap. 3.1.2, Abb. 4).

Glossar 2: Begrifflichkeiten zur Berechnung des Treibhauseffektes eines Produktes und des Substitutionsfaktors mit der Ökobilanz-Methode – Fortsetzung

- **Sachbilanzergebnis:**
Ergebnis der Sachbilanz, d. h. der Zusammenstellung und Quantifizierung von Inputs (z.B. Ressourcen) und Outputs (z.B. Emissionen) eines gegebenen Produktes im Verlauf seines Lebensweges, das den Ausgangspunkt für die Wirkungsabschätzung darstellt (verändert nach DIN EN ISO 14040:2021).
- **Wirkungskategorie:**
Kategorie, die wichtige Umweltthemen repräsentiert und der Sachbilanzergebnisse zugeordnet werden können, z.B. Klimawandel (verändert nach DIN EN ISO 14040:2021).
- **Wirkungskategorie-Indikator, kurz Wirkungsindikator:**
Quantifizierbare Darstellung einer Wirkungskategorie (DIN EN ISO 14040:2021)
- **Wirkungskategorie Klimawandel (engl. *Climate Change*) (z.B. DIN EN 15804:2022 basierend auf IPCC 2021):**
 - # Klimawandel — gesamt:
Indikator: Treibhauspotenzial insgesamt (engl. *Global Warming Potential*; GWP-gesamt) [kg CO₂-Äq.] (Äq.: Äquivalente)
 - # Klimawandel — fossil:
Indikator: Treibhauspotenzial fossiler Energieträger und Stoffe (GWP-fossil) [kg CO₂-Äq.]
 - # Klimawandel — biogen:
Indikator: Treibhauspotenzial biogener Energieträger und Stoffe (GWP-biogen) [kg CO₂-Äq.]
 - # Klimawandel — Landnutzung und Landnutzungsänderung:
Indikator: Treibhauspotenzial der Landnutzung und Landnutzungsänderung (GWP-luluc, engl.: *land use and land use change*) [kg CO₂-Äq.]
- **Charakterisierungsfaktor:**
Faktor, der aus einem Charakterisierungsmodell abgeleitet wurde, das für die Umwandlung des zugeordneten Sachbilanzergebnisses in die gemeinsame Einheit des Wirkungsindikators angewendet wird (DIN EN ISO 14040:2021).
Charakterisierungsfaktoren für Treibhausgase nach IPCC (2021):
 - # CO₂: 1 kg CO₂-Äq./kg CO₂
 - # CH₄: 27,9 kg CO₂-Äq./kg CH₄
 - # N₂O: 273 kg CO₂-Äq./kg N₂O
- **Emissionsfaktor für Treibhausgase (eines Produktes):**
Menge an Emissionen pro funktionelle Einheit [kg CO₂-Äq./FU] über den Lebensweg
- **Energetische Substitution bzw. Energiesubstitution:**
Nutzung von Holz statt fossiler Energieträger zur Energieerzeugung
- **Stoffliche bzw. materielle Substitution bzw. Materials substitution:**
Verwendung von Holzprodukten statt (meist energieintensiver hergestellten) Nicht-Holz-Produkten

Glossar 2: Begrifflichkeiten zur Berechnung des Treibhauseffektes eines Produktes und des Substitutionsfaktors mit der Ökobilanz-Methode – Fortsetzung

■ Substitutionsfaktor:

Dieser Begriff wird unterschiedlich verstanden und verwendet:

Anteil der durch ein Holzprodukt ersetzten Nichtholz-Produkte eines Marktes

z.B. ausgedrückt in [%], siehe z. B. Memmler et al. (2014), Lauf et al. (2021).

Im Englischsprachigen wird hierzu der Begriff „*replacement factor*“ (z.B. Schulte et al. 2022) verwendet.

Differenz zwischen dem THG-Emissionsfaktor eines Holzproduktes und dem eines funktionsgleichen Nichtholz-Produktes

z.B. ausgedrückt in [kg CO₂-Äq./fm Holz] (Taverna et al. 2007) bzw.

[kg CO₂-Äq./m³ Holz] (Werner et al. 2023).

Im Englischsprachigen wird sowohl der Begriff „*substitution factor*“ (z. B. Leskinen et al. 2018)

als auch der Begriff „*displacement factor*“ (z. B. Sathre & O'Connor 2010, Rüter et al. 2016) verwendet (Verkerk et al. 2021).

Substitutionsfaktoren in Bezug zur Treibhausgaseinsparung werden in Studien unterschiedlich definiert und berechnet.

Beispiel 1:

Formel (1) übersetzt nach Sathre & O'Connor (2010): $SF = \frac{THG_{Nicht-Holz} - THG_{Holz}}{H_{Holz} - H_{Nicht-Holz}} \frac{[kg C]}{[kg C]}$

mit: SF: Substitutionsfaktor

THG_{Nicht-Holz}: Treibhausgasemissionen des Lebenszyklus von Nicht-Holzprodukten;
Einheit kg C der CO₂-Äquivalente

THG_{Holz}: Treibhausgasemissionen des Lebenszyklus von Holzprodukten;
Einheit kg C der CO₂-Äquivalente

H_{Holz}: Holz im Holzprodukt; Einheit kg C gespeichert im Holz

H_{Nicht-Holz}: Holz im Nicht-Holzprodukt; Einheit kg C gespeichert im Holz

Statt der Einheit [kg C/kg C] wird teilweise auch abgewandelt die Einheit [kg CO₂-Äq./fm Holz] bzw. [kg CO₂-Äq./m³ Holz] verwendet (z.B. Taverna et al. 2007, Werner et al. 2023).

Umrechnungsfaktoren sind dabei:

C in Treibhausgasen: kg C = kg CO₂-Äq./3,666; C im Holz: 250 kg C/fm Holz).

Beispiel 2:

Formel (2) nach Hafner et al. (2017): $SF_G = \frac{THG_{Gebäude_{mineralisch}} - THG_{Gebäude_{Holz}}}{THG_{Gebäude_{mineralisch}}} \frac{[kg CO_2 \text{ Äq.}]}{[kg CO_2 \text{ Äq.]}}$

mit: SF_G: Substitutionsfaktor auf Gebäudeebene

THG_{Gebäude_mineralisch}: Treibhausgasemissionen des Lebenszyklus von mineralischen Gebäuden bezogen auf m² Bruttoaußenraumfläche;
Einheit kg CO₂-Äquivalente

THG_{Gebäude_Holz}: Treibhausgasemissionen des Lebenszyklus von Gebäuden aus Holz bezogen auf m² Bruttoaußenraumfläche;
Einheit kg CO₂-Äquivalente