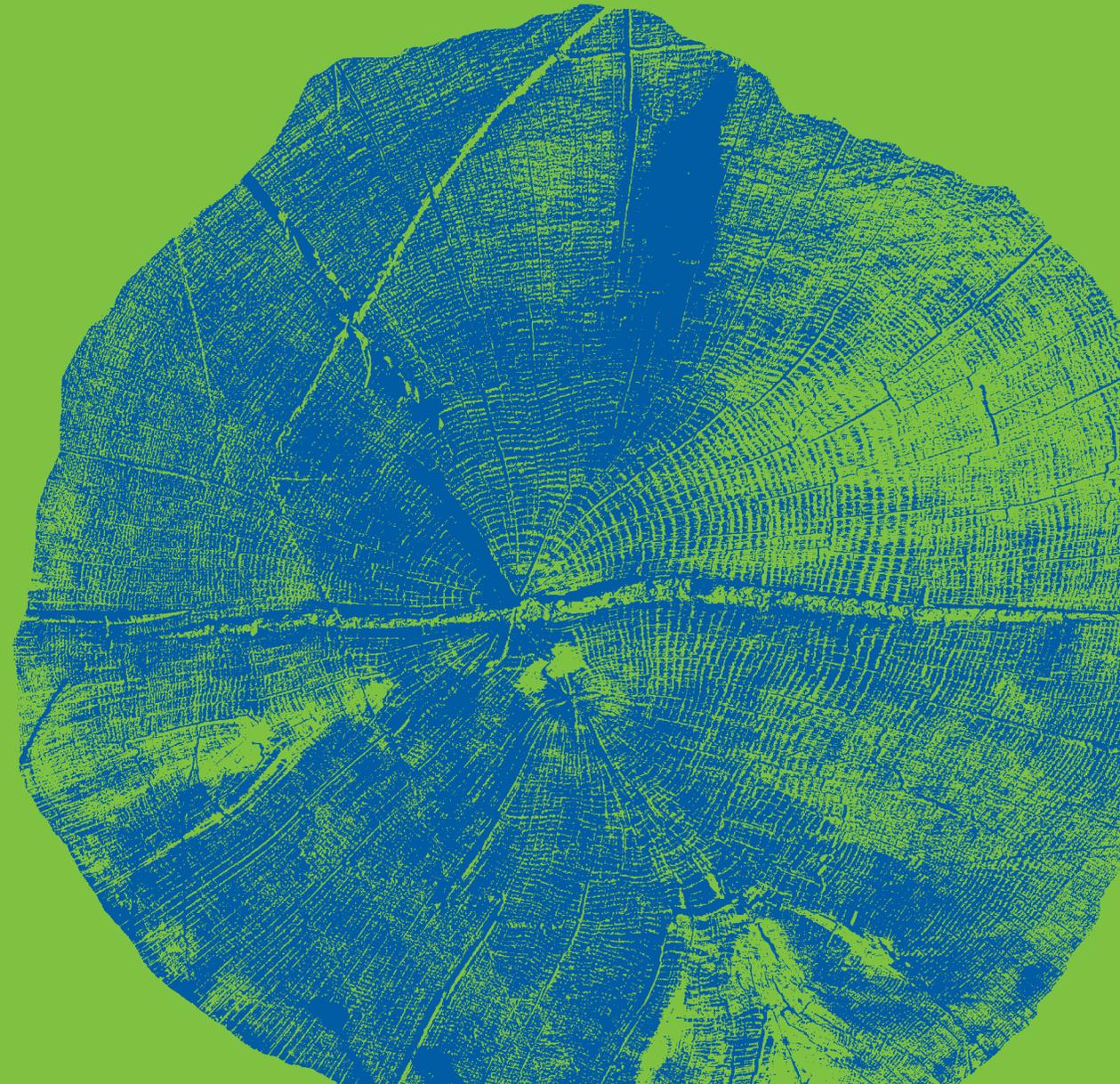


Wie kann der Holzbau zum

Rainer Vallentin

Entwicklung einer CO₂-Senkenstrategie für den deutschen Wohnbau

Klimaschutz beitragen?



Impressum

Wie kann der Holzbau zum Klimaschutz beitragen?
Entwicklung einer CO₂-Senkenstrategie für den deutschen Wohnbau

Autor:
Rainer Vallentin, München

Umschlagsgestaltung:
Michael Lang, Graphiker, Erding

Grafiken und Fotos: Rainer Vallentin, München
(Soweit bei den Abbildungen andere Quellen verwendet wurden wird dies direkt bei den Abbildungen aufgeführt)

Herausgabe im Eigenverlag als Online-Veröffentlichung
unter www.vraie.de
Das Urheberrecht liegt beim Autor.

München, Februar 2024

Inhalt

1	Technische Senken	5
2	Natürliche Senken	6
3	Hybride Senken	7
4	Der Wald als CO ₂ -Senke in Verbindung mit den energetischen und stofflichen Holznutzungen	7
5	Bilanzierung von Holz und sonstigen NAWAROS	16
6	Abschätzung der Potenziale des Bauens mit Holz und biogenen Materialien	38
7	Projektion der künftigen CO ₂ -Senkenpotenziale des Waldes in Verbindung mit dem Holzproduktespeicher	47
8	Abschätzung der CO ₂ -Minderungs- und -Senkenpotenziale im Holzbau	48
9	Versuchsweise Zusammenführung der Klimaschutzstrategien bei Betriebsenergie, Materialien/Bauprozessen und CO ₂ -Senken	53
10	Holz-Global-Jahresbudget und seine Auswirkungen auf die künftigen Holznutzungen	56
11	Umsetzungsphasen	62
12	Risikobegrenzende Strategien der künftigen Holznutzung bei den Energieanwendungen und im Holzbau	64
	Anmerkungen	68
	Literatur	68

Einleitung

Diese Studie war zunächst nur als Kapitel in der Untersuchung „CO₂-Global-Budget für Gebäude“ (Vallentin 2023) vorgesehen. Dort werden eine Vielzahl von Klimaschutz-Szenarien zum Wohngebäudepark Deutschlands modelliert und in Bezug zu den noch insgesamt zulässigen Treibhausgasemissionen gestellt. Die letzten 15 Jahre waren eine Phase des Stillstands, was den Klimaschutz betrifft. Das verbleibende Budget, um das Pariser Klimaziel für die deutschen Wohnnutzungen einzuhalten wurde in dieser Zeit so stark in Anspruch genommen, dass es bei gleichbleibenden Emissionen von derzeit 2,5 t/Pa CO₂-Äquivalenten bereits vor dem Jahr 2030 aufgebraucht sein wird.

Ein Paris-kompatibler Wohnbau benötigt daher neben der konsequenten Umsetzung der Energieeffizienzmaßnahmen und dem Ausstieg aus der fossilen Wärme- und Stromerzeugung einen zusätzlichen Ausgleich in Form negativer Emissionen durch die Schaffung von CO₂-Senken. In dieser Studie soll ausgelotet werden, welchen Beitrag hierzu der Holzbau und das Bauen mit nachwachsenden Rohstoffen (Nawaros) leisten kann.

Während der Bearbeitung des anfänglich noch recht knappen Kapitels sind immer neue offene Punkte aufgetaucht, die einer Klärung bedurften, beispielsweise:

- Konflikt zwischen Holznutzung und Biodiversität
- Unsicherheit des künftigen Holzaufkommens angesichts des Klimawandels und der notwendigen Waldanpassung
- Höhe des nachhaltig verfügbaren Holzaufkommens sowie seine Verteilung auf die unterschiedlichen Nutzungsarten (energetisch, stofflich) und Anwendungsbereiche
- Senkenpotenziale des Bauens mit Holz und Nawaros
- Bilanzierung biogener Emissionen
- Anrechenbarkeit von CO₂-Senken innerhalb von Ökobilanzen und sonstigen Nachweisverfahren.

Diese Fragen sind durchaus komplex und einem derzeit laufenden Klärungsprozess unterworfen. Es kann nicht erwartet werden, dass im Rahmen dieser Arbeit abschliessende Antworten gegeben werden können. Angesichts der erheblichen Unsicherheiten liegt der Schwerpunkt auf der Bestimmung von Leitplanken und einer darauf bezogenen Risikobegrenzung. Gleichwohl ist der Klimaschutz eine derart essenzielle und drängende Aufgabe, dass am Ende eine praktisch umsetzbare Strategie zu formulieren war. Einige Eckpunkte seien an dieser Stelle bereits vorweg genommen:

- Die Verbrennung von Holz und sonstiger Biomasse ist mit hohen Treibhausgasemissionen verbunden und darf keinesfalls von vorneherein als klimaneutral bewertet werden.
- In den letzten Jahren wurden eine Reihe wissenschaftlicher Arbeiten veröffentlicht, die neue Konzepte für ein senkenorientiertes Bauen aufgezeigt haben. Daraus ergibt sich eine Schwerpunktverlagerung weg vom Einsatz von Holz in Tragkonstruktionen hin zu holzsparenden Hüllkonstruktionen mit biogener Dämmung aus schnellwachsenden Materialien bzw. entsprechenden Rest- oder Recyclingprodukten.
- Am Ende schälte sich ein gangbarer Lösungsansatz heraus, der über die Kombination von Nawaros in Holzhüllen und einer sehr hohen Energieeffizienz eine in sich schlüssige Klimaschutzstrategie aufzeigt.
- Diese lässt sich mit einem gegenüber dem heutigen Verbrauch reduziertem Holzeinsatz realisieren. Damit kann ein Beitrag zur Entschärfung des Konflikts zwischen Holznutzung und Biodiversität geleistet werden.
- Über ein langfristiges Senkenregime bietet sich am Ende sogar die Chance, dass sich die Gebäude und deren Nutzung von einem kritischen Sektor hin zu einem Handlungsfeld entwickeln, das einen wesentlichen Beitrag zur Lösung der Klima- und Energiekrise leisten kann.

Wie kann der Holzbau zum Klimaschutz beitragen?

Die vorausgegangene Untersuchung „CO₂-Global-Budget für Gebäude“ (Vallentin 2023) hat ein klares Ergebnis:

- Sämtliche Varianten einer „Weiter-so-Wie-Bisher“-Entwicklung weisen derart hohe kumulierte Treibhausgasemissionen auf, dass es unmöglich erscheint, diese mit künftigen CO₂-Senken auszugleichen.
- Ohne eine konsequente Verfolgung der Kernstrategien Effizienz und Erneuerbare, wie dies im Klimaschutz-Plus-Szenario umgesetzt wird, ist ein deutscher Wohnbau, der wenigstens mit dem 2-Grad-Ziel kompatibel ist, nicht erreichbar.
- Unter den Bedingungen im Klimaschutzszenario oder bei schwierigen Umsetzungsbedingungen des Klimaschutz-Plus-Szenarios sind bereits zusätzliche CO₂-Senken als Ausgleich für die Einhaltung des 2-Grad-Ziels notwendig.
- Ein Paris-kompatibler Wohnbau, der das 1,7-Grad-Ziel einhält, erfordert einen Pfad, der dem Klimaschutz-Plus-Szenario entspricht und zusätzlich zu den Emissionsminderungen des Klimaschutz-Plus-Szenarios die Bildung von CO₂-Senken in Höhe von etwa einer Gigatonne CO₂ beinhaltet. Dieser Betrag kann durch eine konsequente Verfolgung von weiteren Effizienz- sowie Suffizienzstrategien um etwa ein Drittel reduziert werden.

Damit ist absehbar, dass zu den beiden oben genannten Kernstrategien Effizienz und Erneuerbare die Bildung von CO₂-Senken als dritte Strategie hinzutreten muss. In dieser Studie werden nun die offenen Punkte der konkreten Umsetzung ausgelotet. Die folgenden Fragen zu Realisierung, Bilanzierung und Anrechenbarkeit von CO₂-Senken haben von daher ein großes Gewicht bei allen künftigen Klimaschutzstrategien. Dieses Feld steht noch am Beginn der wissenschaftlichen For-

schung und einer darauf aufbauenden künftigen Praxis von Klimaschutzstandards im Wohnbau. Dabei stellen sich zunächst folgende Fragen:

- Wie kann vermieden werden, dass missbräuchlich auf CO₂-Senken als „Wette auf die Zukunft“ gesetzt wird, um klassische Klimaschutzmaßnahmen hinauszuzögern oder zu umgehen (vgl. Schellnhuber 2015, S. 584 ff.)?
- Unter welchen Kriterien und Randbedingungen dürfen Maßnahmen als effektive Senken bezeichnet und in welcher Höhe dürfen diese dann als negative Emissionen angerechnet werden?
- Wie hoch ist das Potenzial der wirtschaftlich erschließbaren natürlichen und technischen CO₂-Senken, die am Ende als Klimaausgleich gewertet werden dürfen?
- Wie kann vermieden werden, dass eine Doppelzählung der CO₂-Senken erfolgt, z.B. einmal projektbezogen und das zweite Mal in der nationalen Emissionsbilanz, wie dies z.B. derzeit bei einer Anrechnung in Form von Gutschriften regelmäßig der Fall ist?
- Wie lassen sich die Wohnnutzungen oder bauliche Maßnahmen an Wohnbauten in Verbindung mit CO₂-Senken bringen, so dass diese bilanziell in Beziehung gesetzt und entsprechend organisiert und mitfinanziert werden?
- Wie kann darauf aufbauend eine transparente Nachweiseführung erfolgen, die dem Wohnprojekt eine negative Emission zuordnet?
- In welcher Form kann eine Evaluierung organisiert werden, die die ökologische und soziale Verträglichkeit sowie die Dauerhaftigkeit der Senken sicherstellt?
- Welche Projekte sind besonders zur Senkenbildung geeignet, indem diese beispielsweise einen ökologischen und/oder sozialen Zusatznutzen stiften können?

Eine Antwort auf diese Fragen kann diese Studie nicht leisten. Im Folgenden soll jedoch wenigstens ein Rahmen für ein künftiges Senkenregime abgesteckt werden.

Im IPCC-Special Report 15 (IPCC 2018) wurde das Thema der CO₂-Senken systematisch in Bezug zu Klimaschutzszenarien und -maßnahmen gesetzt, die die Einhaltung des 1.5-Grad-Ziels anstreben. Dabei wurde herausgearbeitet, dass ambitionierte Klimaziele unterhalb des 2-Grad-Ziels sehr wahrscheinlich auf negative Treibhausgasemissionen angewiesen sein werden. Das gilt auch für fast alle nationalen Klimaschutzkonzepte, die vor 2050 Klimaneutralität erreichen wollen. Wegen der großen Trägheit der Energiesysteme, der Langwierigkeit der Dekarbonisierung von Industrie, der Landwirtschaft sowie im Verkehrssektor sind auch nach 2050 gewisse Restmengen von Treibhausgasemissionen zu erwarten, die bilanziell nur über negative Emissionen ausgleichbar sind. Teilweise handelt es sich hier um prozessbedingte Emissionen. Zu einem viel größeren Teil liegt dies jedoch an der viel zu späten Umsetzung längst bekannter Klimaschutzmaßnahmen. Hierbei spielt vor allem die jüngste Periode 2005 - 2020 eine entscheidende Rolle, in der die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern und fossil erzeugten Produkten trotz aller Bekenntnisse zum Klimaschutz immer noch weiter gestiegen ist.

Kriterien für effektive Senken und deren Anrechenbarkeit

In einem ersten Schritt ist zu klären, wie eine klare Abgrenzung zwischen effektiven Senken, die als negative Emissionen wirksam sind und klassischen Klimaschutzmaßnahmen erfolgen kann. Diese Abgrenzung ist vor allem dort schwierig, wo der Einsatz von Senken in erster Linie der Reduzierung von Treibhausgasemissionen bei Energieumwandlungs- oder Herstellungsprozesse dient. Beispiele hierfür sind „End-of-the-Pipe“-Maßnahmen, die eine Abscheidung von Kohlendioxid in fossilen Kraftwerken oder bei der Zementherstellung vorsehen, um es anschließend in sicheren Lagern zu speichern. Dies führt in der Konsequenz zu folgender strengen Definition:

Als effektive CO₂-Senken werden hier nur Maßnahmen bzw. gezielte Prozesse gewertet, die **der Atmosphäre Kohlendioxid entziehen und es sicher sowie dauerhaft einlagern**, so dass es über sehr lange Zeiträume nicht zurück in die Atmosphäre gelangen kann.

Zudem erfolgt hier noch eine Abgrenzung von bestimmten sog. „Geoengineering“-Maßnahmen, bei denen gezielt in den Strahlungshaushalt der Erde eingegriffen wird. Beispiele hierfür sind künstlich verstärkte Wolkenbildung, die Platzierung von Sonnensegeln im Weltraum zwischen Sonne und Erde oder die Aerosolausbringung in hohen Schichten der Atmosphäre. Diese Technologien sind vor allem theoretischer Natur, bislang nicht oder kaum erprobt und können daher nicht in belastbare Klimaschutzstrategien integriert werden. Zudem besteht bei einem Versagen, Absetzen oder Unterbrechen die Gefahr eines besonders schnellen Klimawandels, weil die CO₂-Konzentrationen durch ein Geoengineering, das direkt in die Strahlungsbilanz der Erde eingreift, nicht abgesenkt werden können.

1 Technische Senken

Als technische Senken werden hier Technologien bezeichnet, die geeignet sind Kohlendioxid-Negativemissionen zu erzielen (vgl. Dena 2021a). Die Möglichkeiten, CO₂ direkt aus der Atmosphäre abzuscheiden, um es anschließend zu verflüssigen, zu transportieren und schließlich in sicher einzulagern werden zurzeit zwar erprobt, sind aber mit hohen Kosten und Energieaufwand verbunden (sog. DACCS-Technologien). Daher ist es immer sinnvoll, zunächst den Treibhausgasausstoß durch Energieeffizienz, den Ersatz fossiler durch erneuerbare Energieträger oder durch Suffizienzmaßnahmen zu reduzieren.

Im Gegensatz dazu stellen das Abscheiden und Speichern aus industriellen Prozessemissionen (z.B. bei der Zementherstellung) oder in fossilen Kraftwerken keine effektive Senken dar.

Damit können nur zusätzliche CO₂-Emissionen verhindert werden. Sie gehören von daher, wie die Effizienztechnologien zu den Minderungsmaßnahmen. Vor allem bei den unvermeidlichen Industrieemissionen sind sie jedoch wichtig für den Klimaschutz insgesamt. Bestimmte Prozessemissionen können auch durch einen Technologiewechsel vermieden werden, z.B. bei einer Stahlproduktion über Direktreduktion mit Hilfe erneuerbar hergestellten Wasserstoffs.

2 Natürliche Senken

Bei den natürlichen Senken, den sog. „Natural Climate Solutions“ (NCS) werden natürliche Prozesse der Einlagerung von Kohlendioxid in Böden, Biomasse, Gestein und Gewässer genutzt, um ihre natürliche Senkenfunktion mit gezielten menschlichen Eingriffen zu verstärken oder auf neuen Standorten zu etablieren. Damit kann zusätzlich Kohlenstoff der Atmosphäre entzogen und über lange Zeiträume in der Biosphäre gespeichert werden. Der Vorteil natürlicher Senken besteht in deren ökologischen oder sozialen Zusatznutzen. Als Nachteile sind Unsicherheiten im Hinblick auf die langfristige Wirksamkeit und die Dauerhaftigkeit als wirksame CO₂-Senken zu nennen.

In einer Studie zu den „Natural climate solutions“ wird weltweit ein wirtschaftlich erschließbares Potenzial von minus 11,3 Mrd. t CO₂ - Äquivalente pro Jahr genannt (vgl. Grimsom et al. 2017). Das entspricht einem personenbezogenen Budget von ca. minus 1,2 - 1,4 t/Pa.

Die möglichen Maßnahmen bzw. Konzepte der natürlichen Senken sind breit gefächert und auf vielfältige Weise miteinander verzahnt bzw. untereinander kombinierbar:

- Neu- bzw. Wiederaufforstung aufgegebenen Waldflächen,
- Ökologisches Waldmanagement mit dem Ziel, den Holzvorrat zu erhöhen,

- Vergrößerung des Holzproduktespeichers, z.B. durch Wandel der Holznutzung von kurzlebigen hin zu langlebigen Produkten (z.B. Holzbau statt energetischer Nutzung),
- Erzeugung von Biokohle in Biomasse-Heizkraftwerke über Pyrolyseprozesse,
- Erhöhung des Kohlenstoffanteils in den Böden durch Gründüngung oder die Einbringung von Biokohle, auch um den Einsatz synthetischer Dünger zu vermeiden,
- Transformation der Landwirtschaft mittels Kombination von Wald- und Agrarnutzungen (sog. Agroforste),
- Wiedervernässung organischer Böden,
- Aufgabe Torfabbau,
- Umwandlung von Ackerflächen in Grünland.

Die Potenziale der natürlichen Senken für Deutschland wurden in (Dena 2021, S. 33 ff.) abgeschätzt und sind in Tabelle 1 als Absolutwerte in t/a sowie als personenbezogene Kennwerte in t/Pa zusammengefasst. Die Werte variieren stark und ergeben Potenziale zwischen 50 und 150 Mio t/a als Absolutwerte bzw. 0,5 - 2,0 t/Pa als personenbezogener Kennwert. Als eigene, eher vorsichtige Abschätzung erscheint nach einer Übergangszeit von etwa 10 Jahren ein Wert von einer Tonne pro Person und Jahr realistisch umsetzbar zu sein. Für die Wohnnutzungen könnte davon wiederum ein Viertel in Anspruch genommen werden.

Um für den Klimaschutz wirksam zu sein kommt es wegen der geringen Potenziale der natürlichen Senken einerseits darauf an, diese konsequent über lange Zeiträume zu verfolgen. Andererseits ist dafür Sorge zu tragen, dass die geschaffenen Senken nicht durch Landnutzungsänderungen oder ungeeignete Bewirtschaftungsmethoden wieder verloren gehen. Es besteht grundsätzlich immer die Gefahr dass sich die mühsam geschaffenen Senken in kurzer Zeit in Quellen umwandeln können (z.B. durch Brände und Windwurf in neu geschaffenen Wäldern, durch Landnutzungsänderungen, wie die Umwandlung von Wald- und Grünland in Verkehrs- und Siedlungsflä-

chen oder den frühzeitigen Abriss von Holzhäusern). Es handelt sich dabei um schwer zu kalkulierende Risiken. Daher sind natürliche Senken auf eine mittel- bis langfristige Absicherung und ein entsprechendes Monitoring angewiesen. Dies ist im Übrigen bei allen Senkenmaßnahmen, auch bei den technischen Senken, mit zu organisieren und zu finanzieren.

3 Hybride Senken

Eine Zwischenstellung zwischen natürlichen und technischen Senken nimmt die Nutzung von Biomasse zur Energiegewinnung (BE) ein, bei der das dabei entstehende Kohlendioxid, wie oben beschrieben, in einem sog. „Carbon-Capture and Storage Prozess“ (CCS) abgeschieden und dauerhaft eingelagert wird (BECCS). Weil zuvor über die Wachstumsprozesse in der Biomasse Kohlendioxid aus der Atmosphäre gebunden wird, kann auf diese Weise eine energetische Nutzung mit einer effektiven Senkenbildung kombiniert werden.

Eine weitere Möglichkeit einer hybriden Senke ist eine Biokohleproduktion in Kombination mit Gewinnung von Energie, Pyrolysegas und einem CCS-Prozess. Diskutiert wird derzeit auch die längerfristige Speicherung von Biokohle in Baustoffen anstatt in landwirtschaftlich genutzten Böden.

4 Der Wald als CO₂-Senke in Verbindung mit den energetischen und stofflichen Holznutzungen

Verschiedene Studien sehen im Holzbau eine wesentliche Strategie um im Gebäudesektor CO₂-Emissionen zu vermeiden und zugleich CO₂-Senken zu schaffen (vgl. Churkina et al. 2020 und WBW 2021). Bei der Holznutzung sind parallel mehrere Effekte und Einflussfaktoren zu betrachten, die jeweils einer zeitlichen Dynamik bzw. Variabilität unterliegen und von daher eine einfache Bewertung als Senke erschweren:

	Potenziale in Mio t/a		Potenziale in t/P	
	2030	2050	2030	2050
Aufforstung	18	120	0,2	1,6
Waldmanagement + Holzproduktespeicher	31 - 40	35 - 68	0,3 - 0,5	0,4 - 0,8
Erhöhung Kohlenstoffanteil in Böden	k.A.	7 - 22	k.A.	0,2 - 0,5
Agroforstwirtschaft	17	k.A.	0,2	k.A.
Wiedervernässung organischer Böden	25	18	0,3	0,2
Aufgabe Torfabbau	2,2	2,2	0,02	0,02
Summe	40 - 80	80 - 150	0,5 - 1,0	1,0 - 2,0

- Die Entnahme von Holz bedeutet zunächst eine Reduzierung der Senke im Ökosystem Wald,
- Der Ersatz in Form nachwachsenden Holzes benötigt Zeiträume i.H.v. 40 - 120 Jahren,
- Die Verarbeitung zum jeweiligen Bauprodukt ist mit gewissen CO₂-Emissionen für Transport, Verarbeitung, Trocknungsprozesse, Veredelung, Hilfs- und Befestigungsmittel sowie für die Montage verbunden,
- Auf der anderen Seite können durch Holzkonstruktionen andere z.B. mineralische Konstruktionen ersetzt werden, die derzeit hohe CO₂-Emissionen aufweisen,
- Die Senkenwirkung hängt zudem von der Nutzungsdauer der Baukonstruktion ab sowie von den Optionen der Weiterverwendung (Kaskadennutzung), des Recyclings oder des Rückbaus mit Entsorgung/Deponierung.
- Aus Sicht der Erhaltung bzw. Vergrößerung der CO₂-Senke im Holzproduktespeicher, ist die energetische Nutzung inklusive der späteren thermischen Verwertung am Ende der stofflichen Nutzungskaskade in Frage zu stellen.

Die häufig vorgenommene Annahme einer klimaneutralen Bereitstellung von Holz oder sonstiger Biomasse erscheint daher bei näherer Betrachtung nicht gerechtfertigt zu sein.

Tabelle 1:
Potenziale erschließbarer natürlicher Senken in Deutschland für das Jahr 2030 und 2050. Zusätzlich sind diese als personenbezogene Kennwerte angegeben. Die Abschätzung der Potenzialsommen erfolgte durch den Autor. In der Tabelle werden die Senkenpotenziale entgegen der Konvention nicht mit negativen Vorzeichen angegeben. Quelle: (Dena 2021), S. 33 ff.



Abbildung 1:
Treibhausgasemissionen und -senken des LULUCF-Sektors von Deutschland im Zeitraum 1990 - 2018. Positive Werte bedeuten Emissionen, negative Werte Senken. Quelle: (Dena 2021, S. 16).

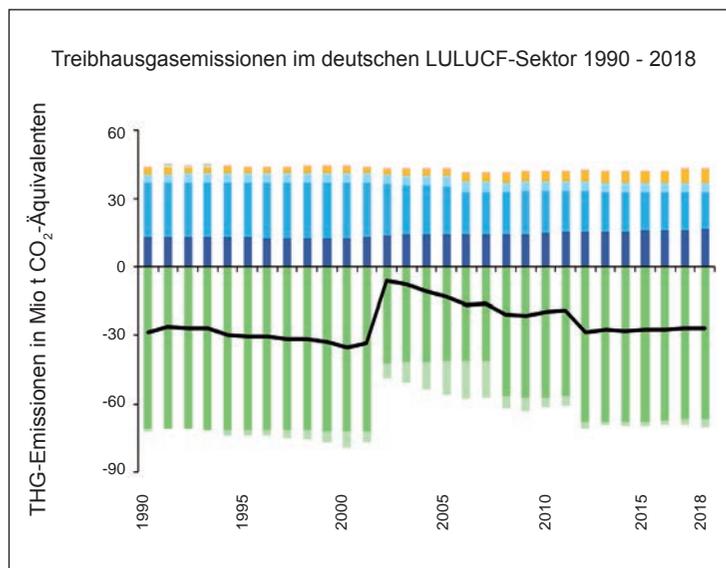
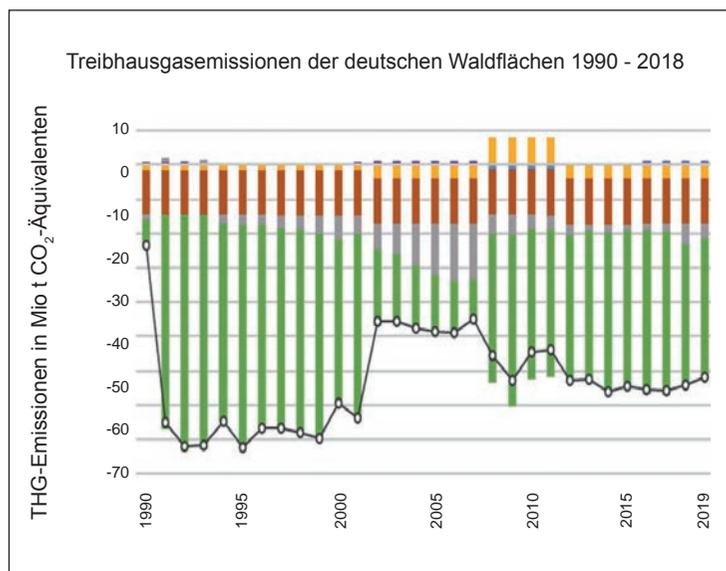


Abbildung 2:
Treibhausgasemissionen und -senken der deutschen Waldflächen im Zeitraum 1990 - 2019. Positive Werte bedeuten Emissionen, negative Werte Senken. Quelle: (Hennenberg et al. 2021, S. 335).



Hinzu kommen noch Fragen der Herkunft und der Waldbewirtschaftung sowie des notwendigen Waldumbaus als Anpassung an den Klimawandel.

Die deutsche Kohlenstoffbilanz wird in der Treibhausgas-Berichterstattung im Sektor Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft (Land-Use, Land Use Change and Forest LULUCF) zusammengefasst. In Abb. 1 wird erkennbar, dass Siedlungen und Landwirtschaft sowie die Feuchtgebiete Treibhausgasemissionen von ca. 45 Mio t/a CO₂-Äquivalenten verursachen, wobei Siedlungen und Ackerbau steigende und das Grünland eine sinkende Tendenz aufweisen. Der Wald erzeugt negative Emissionen, indem er durch den Aufbau von Biomasse der Atmosphäre Kohlendioxid entzieht und dieses im Baumbestand und im Waldboden speichert. Die Holzprodukte wirken abhängig von ihrer Nutzungszeit als CO₂-Speicher und sofern der Holzproduktespeicher zunimmt auch als CO₂-Senke. Im Vergleich zur Senkenwirkung des Waldes, die zwischen -30 und -70 Mio t/a schwankt, ist die Senkenwirkung der Holzprodukte deutlich kleiner. Beide sind stark von äußeren Randbedingungen abhängig. Der LULUCF-Sektor weist im Betrachtungszeitraum 1990-2018 in der Summe negative Emissionen auf. Zwischen 1990 und 2001 liegt der Wert bei ca. 30 Mio t CO₂-Äquivalenten.

Wie Abb. 1 und 2 zeigen, erfolgt die Senkenwirkung des LULUCF-Sektors hauptsächlich durch den Wald und untergeordnet über die Entnahme von Holz zur Erzeugung von Holzprodukten. Die dahinter stehenden Prozesse verlaufen nicht stetig, sondern unterliegen einer Dynamik. Besonders auffällig ist hier der Zeitraum 2002 - 2007, der durch starke Waldschäden (Stürme und Dürre) und damit große Holzentnahmen geprägt war. In diesen Jahren halbierte sich die Senkenleistung des deutschen Waldes und diejenige des gesamten LULUCF-Sektors näherte sich kurzzeitig Null. Hier wird erkennbar, wie sensibel CO₂-Senken auf äußere Ereignisse reagieren, die wohl zu einem bedeutenden Teil auch als Folge des Klimawandels in-

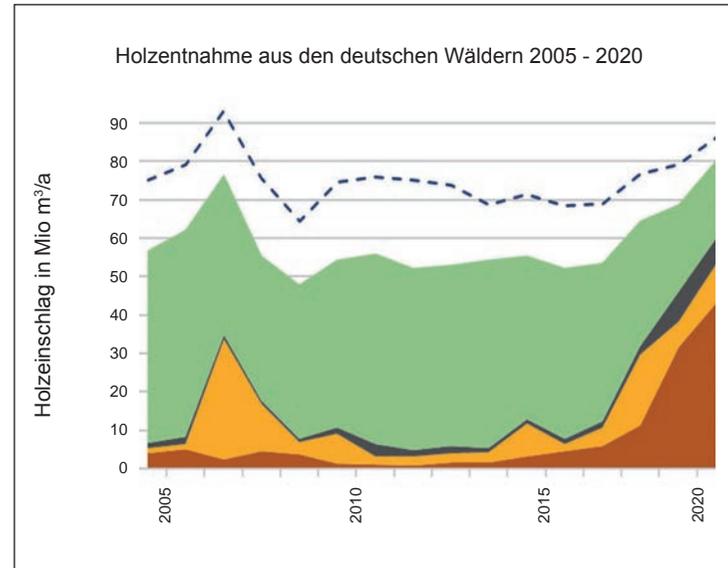
terpretiert werden können. In der Periode davor (1990 - 2001) lag die mittlere Senkelleistung der Waldflächen, der Aufforstungsflächen und der Holzprodukte im Bereich zwischen -70 und -80 Mio t/a um sich danach auf einem etwa 10 Mio t/a niedrigeren Niveau zu stabilisieren.

Durch die detailliertere Ausweisung der Senkenkomponenten in Abb. 2 wird deutlich, dass auch Streu und Böden wichtige Beiträge zur Bindung von Kohlendioxid erbringen. Beim Totholz sind sowohl negative als auch positive Emissionen zu verzeichnen. Die Senkenfunktion des Waldes betrifft somit nicht alleine den Vorratsaufbau der Bäume sondern durch das gesamte Ökosystem Wald.

Holzentnahme und ihre Nutzung

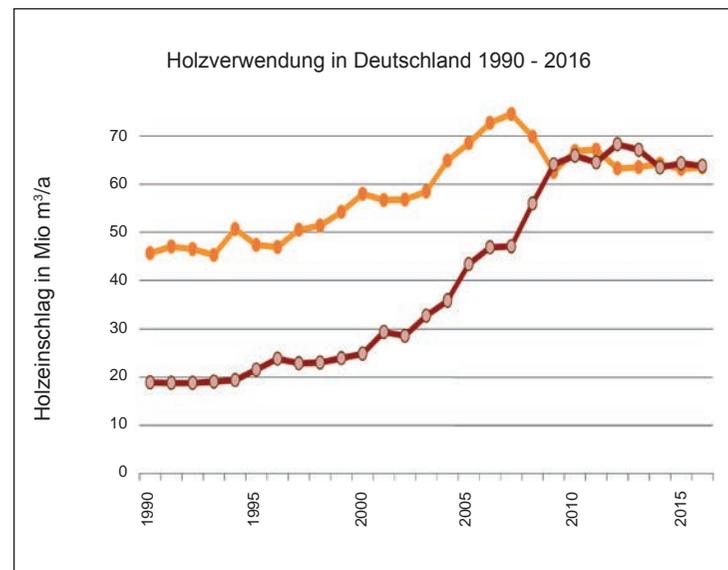
In Abb. 3 wird deutlich, wie stark einerseits die Holzentnahme aus dem Wald und andererseits der Anteil an Schadholz mit äußeren Ereignissen wie Wind- und Sturmschäden und Insektenbefall zusammenhängen. Der hohe Anteil von Schadholz ist u.a. von den Bewirtschaftungsformen der Wälder abhängig. Kalamitätsholz fällt vor allem in Monokulturen aus Nadelbäumen (Fichte, Kiefer) an, während naturnahe Laub-Mischwälder in deutlich geringerem Ausmaß betroffen sind. Das Holzaufkommen aus dem Wald variiert im Zeitraum 2005 - 2020 zwischen Werten von 65 - 90 Mio m³/a mit einem langjährigen Mittelwert um 75 Mio m³. Der Schadholzanteil schwankt mit Werten zwischen 5 und 58 Mio m³/a sehr stark.

Das Holzaufkommen und die Verwendung von Holz hat sich im Zeitraum 1990 - 2016 von ca. 65 auf 127 Mio m³ in etwa verdoppelt (siehe Tab. 2 und Abb. 4). Dabei wurde der stoffliche Einsatz von ca. 45 auf 65 Mio m³ vergrößert. Noch stärker ist der Anstieg der energetischen Nutzung ausgefallen. Im Zeitraum 1990 - 2016 hat sich diese mehr als verdreifacht. Besonders stark ist die Ausweitung der energetischen Holznutzung im Zeitraum 2000 - 2010. Dies steht in enger Verbindung mit der Privilegierung und Förderprogrammen zur energetischen



- Einschlagrückrechnung
- ohne Schaden
- Sonstige Ursachen
- Wind-/Sturmschäden
- Insektenbefall

Abbildung 3:
Holzentnahme aus den deutschen Wäldern im Zeitraum 2005 - 2020. Angegeben ist ferner der Anteil an Schadholz durch kranke bzw. abgestorbene Bäume, die vorzeitig gefällt wurden.
Quelle: (Hennenberg et al. 2021, S. 336).



- Stoffliche Verwendung
- Energetische Verwendung

Abbildung 4:
Stoffliche und energetische Holzverwendung in Deutschland im Zeitraum 1990 - 2016.
Quelle: (FNR 2018).

Holzaufkommen (in Mio m ³)	1990	2016	Verwendung (in Mio m ³)	1990	2016
Sägestammholz	24,3	36,2	Sägeindustrie	24,3	36,2
sonstiges Derbholz	16,0	30,4	Holzwerkstoffe	9,4	15,7
Waldrestholz	1,4	7,4	Holzschliff und Zellstoff	8,7	9,8
Rinde	2,9	4,3	Sonst. stoffliche Nutzung	3,2	1,7
			Summe stoffliche Nutzung	45,6	63,4
Landschaftspflege	1,2	5,4	Energetisch > 1 MW	5,4	23,0
Kurzumtriebsplantagen	0,0	0,0	Energetisch < 1 MW	2,4	8,2
Sägenebenprodukte	9,7	16,7	Hausbrand	10,9	28,3
Sonst. Ind.-Restholz	3,3	3,0	Sonst. energ. Verwendung	0,0	0,0
Schwarzlaube	2,5	3,9	Summe energ. Verwendung	18,7	59,5
Altholz	2,8	14,6	EnergieproduktHersteller	0,2	4,2
Holzenergieprodukte	0,2	4,2			
Bilanzausgleich	0,2	1,1	Bilanzausgleich	0,0	0,0
Summe	64,5	127,2	Summe	64,5	127,2

Tabelle 2:
Holzaufkommen (links) und Holz-
verwendung (rechts) in Deutsch-
land. Vergleich der Werte in den
Jahren 1990 und 2016. Quelle:
(FNR 2018).

Biomassenutzung. Der Anteil für die Heizungen in den privaten Haushalte (Hausbrand) beträgt dabei durchgängig etwa 50 %.

Interessant ist, dass das Rohholzaufkommen im Jahr 2016 nur etwa die Hälfte der gesamten Holzverwendungen ausmacht (Vergleich der Zahlen zwischen Tab. 2 und 3). Damit weist die Kaskadennutzung in Form von Rest- und Altholzverwendung bereits heute hohe Anteile auf. Dies ist mit der wichtigste Grund, warum der Holzproduktespeicher insgesamt als leichte Senke wirksam werden kann.

Im Jahr 2016 wurden vom eingeschlagenen Rohholz 3/4-tel stofflich und 1/4-tel energetisch genutzt. Im Umkehrschluss

bedeutet dies, dass bei der energetischen Nutzung vor allem Rest- und Altholz eingesetzt wird (vgl. Mantau 2018), während Schnittholz dominant in der stofflichen Nutzung landet. Im Holzbau und den anderen stofflichen Nutzungen wird dominant Nadelholz und für die energetischen Nutzungen vor allem Laubholz und anfallende Reststoffe sowie Altholz aus vorgelegerten Produktionsprozessen mit Nadelholz eingesetzt. Die Waldholznutzung im Jahr 2016 setzt sich zu 71 % aus Nadelholz und zu 29 % aus Laubholz zusammen.

Kontroverse um Waldfunktion und Waldnutzung

Schon seit längerem existiert ein Streit um die komplexen Themen der Funktionen des Waldes im Hinblick auf Ökologie, Arten- und Klimaschutz sowie Klimaanpassung auf der einen Seite und einer gesteigerten Waldnutzung für Holzbau, weitere Holzprodukte und als Energieträger auf der anderen Seite. In letzter Zeit wird dieser verstärkt geführt und dreht sich vor allem darum, welche Strategien von Waldschutz, Waldbewirtschaftung und Holznutzung am effektivsten zum Klimaschutz sowie zur Abfederung des Klimawandels beitragen können.

Auf der einen Seite lässt sich eine Position identifizieren, die Natur- und Artenschutz einen Vorrang gegenüber der wirtschaftlichen Nutzung von Wäldern einräumt. Die Kernaussagen lassen sich folgendermaßen zusammenfassen (vgl. Blumröder et al. 2020):

- Der Wald ist ein effektiver Kohlenstoffspeicher und soll als dieser erhalten bleiben. Das Belassen des lebenden und toten Holzes in Verbindung mit einer Vorratserhöhung im Wald selber wäre kurzfristig die effektivste Möglichkeit des Klimaschutzes durch Forste und Wälder.
- Die Holzverbrennung ist als nicht klimaneutral einzustufen. Die energetische Nutzung trägt vor allem kurzfristig zum Treibhausgasereffekt und zur Verschlechterung des Zustands der Laubwälder bei.
- Eine intensivere Holznutzung bedeutet nicht automatisch eine größere Kohlenstoffspeicherung in den Holzpro-

dukten. Angesichts komplexer Stoffströme in Verbindung mit dem Lebenszyklus (Waldaufbau, Holzentnahme, Ernte, Transporte, Im- und Exporte, Lebensdauern, energetische Verwertung am Ende der Nutzungskaskade) ist das Konzept, energie- und emissionsintensive Materialien durch Holz zu ersetzen, als fragwürdig einzustufen.

- Durch ungeeignete forstwirtschaftliche Strategien in Verbindung mit einer zu starken Holznutzung besteht das Risiko, dass sich der Anpassungsbeitrag der Wälder an den Klimawandel reduziert und die Wälder statt eine CO₂-Senke zu bilden künftig zu einer CO₂-Quelle werden.

Auf der anderen Seite findet sich eine Position, die in einer Ausweitung der Holznutzung einen überaus wichtigen Beitrag zum Klimaschutz sieht (vgl. Baldauf et al. 2016; Churkina et al. 2020; UBA 2020):

- Die Holzvorräte in den heimischen Wäldern vergrößern sich laut Waldnutzungsszenarien auch künftig, so dass trotz steigender Holzentnahme der künftige Holzzuwachs in den Wäldern erhalten bleibt und die Wälder ihre Senkenfunktion behalten können.
- Die Substitution von emissionsintensiven Materialien und Energieträgern trägt in erheblichen Ausmaß zur Emissionsminderung und damit zum Klimaschutz bei. Ihr Beitrag ist zumeist größer als die Senkenwirkung des stehenden Holzes im Wald.
- Durch seine langfristige Bindung in Baukonstruktionen und anderen langlebigen Produkten kann der Holzproduktespeicher vergrößert werden und somit als effektive CO₂-Senke wirksam werden. Diese kann durch eine verstärkte Kaskaden- und Altholznutzung noch weiter ausgebaut werden.
- Eine verstärkte Nutzung von Nadelholz aus Monokulturen kann den klimagerechten Waldumbau in resiliente Mischwälder beschleunigen und damit einen Beitrag zur Klimawandelanpassung der Wälder leisten.
- Strittig ist, inwieweit dies mittel- bis langfristig mit einem

Holzrohstoffbilanz (ohne Rest- und Altholz)					
Holzaufkommen 2016 (in Mio m ³)			Verwendung 2016 (in Mio m ³)		
Inlandverwendung brutto	66,7	100 %	Sägeindustrie	36,2	54,3 %
- Import	7,8	12 %	Holzwerkstoffe	7,2	10,8 %
- Export	3,5	5 %	Holzschliff und Zellstoff	6,0	9,0 %
- Lageveränderung	-0,2	-0,3 %	Sonst. stoffliche Nutzung	0,2	0,3 %
Inlandsaufkommen, netto	62,5	94 %	Summe stoffliche Nutzung	49,6	74,4 %
			Energetisch > 1 MW	0,4	0,6 %
			Energetisch < 1 MW	1,1	1,6 %
			Hausbrand	15,5	23,7 %
			Sonst. energ. Verwendung	0,0	0,0 %
			EnergieproduktHersteller	0,2	0,3 %
			Summe energ. Verwendung	18,7	25,6 %
Summe	66,7	100 %	Summe	66,7	100,0 %

Rückgang des Nadelholzaufkommens verbunden ist oder hier ein Ausgleich durch die Neupflanzung schnellwachsender Arten, z.B. Douglasie, erfolgen kann bzw. soll.

- Alternativ oder ergänzend wäre ein Ausgleich über eine stärkere stoffliche Nutzung von Laubhölzern (z.B. Schichtholz aus Buche) möglich und anzustreben.

Es überwiegen in dieser Diskussion die Zwischentöne, die einen Ausgleich zwischen Natur-, Arten- und Klimaschutz mit einer verträglichen Holznutzung suchen. Mehrheitlich wird dies mit einer nur leicht ansteigenden oder in Teilsegmenten verringerten Holznutzung in Verbindung gebracht. Als sinnvoll wird ferner angesehen, den Holzproduktespeicher durch eine bewusste Förderung langlebiger Produkte anstelle kurzlebiger Produkte bzw. der energetischen Nutzung zu vergrößern.

Tabelle 3:
Rohstoffbilanz für Holz 2016 für Deutschland. Bei der Holzverwendung (rechts) wird zwischen stofflicher und energetischer Nutzung unterschieden. Quelle: (FNR 2018).

Biodiversität in genutzten und ungenutzten Wäldern

Aus der Naturschutzperspektive steht nicht die Holznutzung sondern die Biodiversität und deren Erhalt und damit der Schutz der im Wald heimischen Arten im Vordergrund. Hier findet ein Wechsel von einer utilitaristischen Haltung, die den Nutzen (z.B. Holzverfügbarkeit, Klimaschutz, Ökofunktionen) optimieren möchte hin zu einer idealistischen Haltung, die den Selbstzweck der Natur an erste Stelle setzt, verbunden (vgl. Görke 2018). Viele Missverständnisse und gegenseitige Anschuldigungen im Konflikt zwischen Holznutzung und Biodiversität haben in diesen gegensätzlichen Haltungen ihren Ursprung.

Dominante Ursache für die unterschiedlichen Positionen dürften jedoch die unterschiedlichen Interessenslagen im Hinblick auf die Flächennutzungen und die in sie „eingeschriebenen“ Territorial- und Machtansprüche sein. Sie betreffen am Ende immer auch Eigentums- und Nutzungsrechte. Nutzungseinschränkungen bzw. Nutzungsverzicht stellen damit immer auch Angriffe auf überkommene Rechte und Ansprüche dar, die entsprechende Gegenreaktionen hervorrufen.

Aus wissenschaftlicher Perspektive ist der entscheidende Aspekt für die Biodiversität das Störungsregime als Muster der jeweiligen Störereignisse mit deren Frequenz und Stärke. Sie finden sich, allerdings in unterschiedlicher Ausprägung sowohl im genutzten als auch im ungenutzten Wald. Als besonders artenreich erweisen sich mittelstark gestörte Ökosysteme, in denen die Störungen nicht gänzlich zerstörerisch ablaufen, jedoch ausreichend stark, dass ausbreitungsstarke Pioniere nicht die Überhand über die standorttypischen sesshaften Artengemeinschaften bekommen. Als Maßstab für Biodiversität ist die bloße Artenanzahl nicht der alleinige Maßstab. Vielmehr kommt es darauf an hierbei eine Gewichtung mit gefährdeten oder spezialisierten Arten vorzunehmen, auch in Hinblick auf die Arten, für die eine besondere Schutzverantwortung existiert. In bestimmten Fällen, z.B. einem Moorwald, der eher artenarm aber reich an gefährdeten Spezialisten ist, wäre der Übergang zu

einem artenreicheren Wald, der durch Enrwässerung und Düngung erreichbar wäre, kontraproduktiv für die Biodiversität (vgl. Müller-Kroehling 2013, S. 59 f.).

Ein wissenschaftlicher Streit betrifft die Frage, ob eher genutzte oder ungenutzte Wälder der Artenvielfalt und dem Artenschutz zuträglicher sind. Während im Wirtschaftswald die Bedingungen für lichtliebende Arten günstiger sind (vgl. Schulze 2018), können nur in ungenutzten Wäldern bestimmte seltene Arten und hoch spezialisierte Arten, die z.B. von einem besonders hohen Totholzvorkommen abhängig sind oder sog. „Nutzungsflüchtlinge“ darstellen, überleben. Für diese Arten sind Ur- und Naturwälder, d.h. Wälder, die noch nie genutzt bzw. sich nach einer Naturverjüngung lange Zeit ohne menschliche Eingriffe entwickeln konnten, besonders wichtig (vgl. Luick et al. 2022).

Nachdem in Mitteleuropa genutzte Wälder flächenmäßig deutlich dominieren, erscheint es wenig zielführend zu sein, Biodiversität alleine im absoluten Nutzungsverzicht - und noch unverständlicher - nur in genutzten Wäldern verwirklichen zu wollen. Im ersten Fall fehlt aufgrund der schon genannten Flächenkonkurrenzen die Umsetzungsperspektive im zweiten Fall wird die überragende Bedeutung der letzten Ur- und Naturwälder als Genreserve für Klimaanpassungs- und sonstige ökologisch relevante Veränderungsprozesse und als Erfahrungs- und Lernorte für Natur außerhalb der menschlich geprägten Umwelt verleugnet.

Eine besondere Schutzverantwortung existiert für die letzten großflächigen Ur- und Naturwälder außerhalb Deutschlands. In Europa finden sich diese nur noch im Karpatenbogen (Rumänien, Ukraine, Polen) und auf dem Balkan. Obwohl Deutschland eine fast ausgeglichene Holzbilanz aufweist, ist der Anteil von Im- und Exporten gleichermaßen bedeutend. Daher ist auch der Holzkonsum in Deutschland verantwortlich dafür, dass in der Vergangenheit Kahlschläge in Ur- und Naturwäldern zur Produktion von importierten Holzprodukten (z.B. Holzpellets,

Holzwerkstoffplatten) stattgefunden haben. Die bestehenden Zertifizierungssysteme, die eine nachhaltige Holzbewirtschaftung belegen sollen, haben sich als Gegenmaßnahme als weitgehend wirkungslos erwiesen. Inzwischen existieren Initiativen zum Schutz der letzten europäischen Urwälder, z.B. die Foundation Conservation Carpathia (1).

Biodiversitätskonzepte finden in einem Spannungsfeld zwischen segregativen und integrativen Ansätzen statt (vgl. Zollner et al. 2019):

- Beim segregativen Ansatz stehen ein großflächiger Nutzungsverzicht oder weitgehende Nutzungsbeschränkungen im Vordergrund. Häufig wird hier zwischen Kern- und Pufferzonen unterschieden.
- Beim integrativen Ansatz werden auf Teilflächen wirtschaftlich genutzter Wälder, z.T. auch sehr kleinräumig, Uralt- oder Biotopbäume und Totholz stehen gelassen. Dies in Form von Einzelbäume oder Gruppen bzw. Naturwaldreservaten.
- Ein wesentlicher Schlüssel für beide Konzeptansätze ist deren Vernetzung, um insgesamt eine flächenhafte Wirkung im Sinne eines Biotopverbundes erzielen zu können.

Für viele bedrohte Arten ist der effektive Schutz bzw. die Wiederherstellung von Waldextremtypen, wie z.B. Schlucht-, Block-, Fels-, Moor-, Sumpf-, Auen- und Dünenwäldern der gewinnbringendste Ansatz. Die Wiedervernässung ehemals feuchter Wälder bietet darüberhinaus die Chancen einer Doppelstrategie, in der Klimaschutz und Biodiversität parallel entwickelt werden (vgl. Müller-Kroehling 2013).

In der aktuellen EU-Biodiversitätsrichtlinie für 2030 (EU 2020) werden jeweils flächenbezogene Ziele formuliert. 30 % der Landes- und Meerflächen sollen einen rechtlich verbindlichen Schutz gestellt werden. Für ein Drittel davon, also 10 % der Flächen soll ein strikter Schutz gelten, z.B. für Primärwälder und Altholzbestände. Diese Gebiete sollen darüber hinaus ein

Netzwerk bilden, in dem Austausch und Wanderungen möglich sein sollen, um die Resilienz der natürlichen Systeme zu erhöhen. Derzeit ist noch unklar, wie die konkreten Kriterien der Flächenausweisungen und deren Sicherung aussehen sollen. Die Bundesregierung geht derzeit davon aus, dass der Schwerpunkt nicht auf der Neuausweisung sondern der qualitativen Verbesserungen vorhandener Schutzgebiete liegen wird. Nach ihrer Einschätzung dürfte sich die Verfügbarkeit von Holz künftig vermindern, wozu aber auch andere Faktoren, u.a. der Klimawandel beitragen (vgl. BR 2022, S. 3 ff.). In den deutschen Wäldern sind bereits heute große Flächen als Schutzgebiete ausgewiesen, die zusammen knapp 70 % der gesamten Waldflächen ausmachen (vgl. Polley 2009). Aufgrund der vielen Schutzkonzepte und deren Überlagerungen kann derzeit noch keine Aussage zu deren Zuordnung im Hinblick auf die EU-Biodiversitätsstrategie getroffen werden.

In einer Studie des Thünen-Instituts werden die Auswirkungen der EU-Biodiversitätsstrategie auf das künftige Holzpotenzial bis 2050 abgeschätzt. Gegenüber der Referenzentwicklung würde die Rundholzproduktion bei einer moderaten Umsetzung um 9-10 % und einer maximalinvasiven Umsetzung sogar um 48 % zurückgehen. Dies löst einen Verlagerungseffekt aus, in dem zur einen Hälfte die fehlenden Mengen durch Importe aus dem außereuropäischen Ausland und zur anderen Hälfte durch einen Rückgang der Gesamtproduktion ausgeglichen würden. Die Verlagerung könnte dadurch eine Verschlechterung der Biodiversität in den Importländern sowie höhere Treibhausgasemissionen zur Folge haben (vgl. Dieter et al. 2022). In einer weiteren Veröffentlichung wird darauf hingewiesen, dass dadurch negative Auswirkungen für den Ausbau der Holzbauaktivitäten und der Bioökonomie als Ganzes resultieren könnten (vgl. Mattheis/Timm 2022). Die Studie lässt jedoch außer Acht, dass über die Verfolgung einer konsequenten Biodiversitätsstrategie ein Umdenkprozess eingeleitet werden kann, der am Ende eine stärkere Priorisierung der Holznutzungen zum Ziel hat (siehe Abschnitt 10).

Eingesetzte Holzsortimente bei der energetischen Nutzung			
Holzsortiment (in %)	Private Haushalte	Kleinf Feuerungsanlagen	Großfeuerungsanlagen
Scheitholz (Derbholz)/Wald	56,8 %	13,7 %	2,3 %
Scheitholz (Restholz)/Wald	11,5 %	31,4 %	12,3 %
Scheitholz/Garten	7,6 %	-	-
Landschaftspflegeholz	1,4 %	15,9 %	13,2 %
Rinde Derbholz	1,4 %	15,9 %	13,2 %
Schnittholzreste Sägewerk	2,9 %	18,4 %	5,9 %
Schnittholzreste Altholz	k.A.	k.A.	48,6 %
Pellets und Holzbriketts	10,1 %	7,3 %	k.A.
Hackschnitzel	1,8 %	k.A.	k.A.
Sonstiges Industriebholz	-	6,8 %	k.A.
Sonstiges	k.A.	6,6 %	4,4 %

Tabelle 4:
Eingesetzte Holzsortimente bei der energetischen Nutzung in den privaten Haushalten und in Klein- sowie Großfeuerungsanlagen. Werte in % für Deutschland im Jahr 2016. Quelle: (FNR 2018).

Künftige Waldentwicklung und Holznutzung (Szenarien)

Aussagen zur künftigen Entwicklung der Wälder und der damit verbundenen Potenziale bzw. Einschränkungen der Holznutzung erfordern i.d.R. die Modellierung und Gegenüberstellung von unterschiedlichen Szenarien. Für Deutschland sind hierzu in den letzten Jahren mehrere entsprechende Studien veröffentlicht worden. Sie unterscheiden sich im Hinblick auf den Korpus der Annahmen und Randbedingungen sowie in ihrer Methodik. Grundsätzlich bestehen erhebliche Unsicherheiten bei der Modellierung, weil es angesichts des Klimawandels und damit zu erwartenden häufigeren Störungen in wenig klimaangepassten Wäldern zu einer vermehrten Freisetzung von Kohlendioxid kommen kann. Diese Effekte sind schwierig vorherzusagen und werden von daher in den Waldszenarien nicht abgebildet.

Die sog. WEHAM-Szenarien basieren auf der Bundeswaldinventur 2012 und schätzen über ein Waldentwicklungsmodell die künftige Waldentwicklung sowie das Rohholzaufkommen in Deutschland für den Zeitraum 2012 - 2052 ab (vgl. Oemichen et al. 2018). Das WEHAM-Basisszenario (BS) beschreibt eine Trendfortschreibung, während die zwei alternativen WEHAM-Szenarien besonders gegensätzliche Entwicklungen abbilden. Auf der einen Seite ist dies das sog. Holzpräferenzszenario (HPS), das eine starke Steigerung der Holzentnahme zum Ziel hat. Auf der anderen Seite das sog. „Naturschutzpräferenzszenario“ (NPS), in dem die Belange eines nachhaltigen Waldumbaus bei gleichzeitiger Steigerung der Holzvorräte im Wald im Vordergrund stehen.

In Tabelle 5 wird das Holzaufkommen im Jahr 2016 in Deutschland den mittleren Holznutzungspotentialen im Zeitraum 2013 - 2052 der drei WEHAM-Szenarien gegenübergestellt. Gegenüber dem Stand 2016 kann das Holzaufkommen in allen Szenarien gesteigert werden:

- Im Basisszenario (BS) können jährlich ca. 78 Mio m³ genutzt werden. Davon entfallen knapp 50 Mio m³ auf Nadelholz und 28 Mio m³ auf Laubholz.
- Wie zu erwarten, weist das Holzpräferenzszenario (HPS) eine starke Ausweitung der mittleren jährlichen Holznutzung auf 105 Mio m³ auf. Auch das Nadelholzaufkommen kann hier durch die verstärkte Neupflanzung von Douglasie anstelle Fichte und Kiefer um mehr als 50 % auf 68 Mio m³/a gesteigert werden. Beim Laubholzaufkommen wird in diesem Szenario sogar eine Verdopplung auf 37 Mio m³/a ausgewiesen.
- Im Naturschutzpräferenzszenario (NPS) stehen Erhalt und Förderung der Biodiversität sowie der Klimaschutz im Vordergrund. Das soll durch eine Förderung eines Waldumbaus in Richtung der potenziell natürlichen Vegetation und Baumartenzusammensetzung sowie eine Ausweitung der Totholzvoräte im Wald erreicht werden. Die mittleren Holznutzungspotenziale sind mit 78 Mio m³/a genauso hoch

wie im Basisszenario. Das Nadelholzaufkommen ist mit 53 Mio m³/a jedoch höher, während das Laubholzaufkommen mit 25 Mio m³/a etwas geringer ausfällt.

Für drei Modellregionen in Thüringen wurde die Klimaschutzwirkung des Wald- und Holzsektors über einen Simulationszeitraum von 50 Jahren untersucht (Mund et al. 2015). Für alle drei Modellregionen wird in den Waldszenarien sowohl bei kompletter Unterschutzstellung (Schutzszenario) als auch bei einer Fortführung der Holznutzung (Holzszenario) ein positiver Beitrag zum Klimaschutz nachgewiesen. Jedoch unterscheiden sich Höhe und zeitliche Dynamik der Kohlenstoffbilanzen je nach Vegetationstyp, der Höhe der Ausgangsvorräte, der Bewirtschaftung und der Holzverwendung in den drei betrachteten Regionen:

- Die Modellregionen „Hainich“ und „Hohe Schrecke“ weisen zu Beginn der Betrachtungsperiode hohe Biomassevorräte von 152 bzw. 185 tC/ha auf. Dies ermöglicht auch künftig eine weitere Holznutzung, die dort vor allem in langlebigen Holzprodukten mit anschließender energetischer Verwertung eingesetzt werden. Am Ende der Simulationszeitraums ergab sich eine Gesamt-C-Bilanz, die um 38 bzw. 45 tC/ha höher liegt, als im Schutzszenario.
- In der Modellregion „Vessertal“, die von Nadelholzbeständen und Altklassewäldern dominiert wird, schnitt nach 50 Jahren das Holznutzungsszenario hingegen um 59 tC/ha ungünstiger ab, als das Schutzszenario. Als Ursache hierfür wurde der hohe Anteil kurzlebiger Produkte des geernteten Holzes ohne Materialsubstitution (Zellstoff, Papier, Pappe) genannt. Auch die geringen Holzvorräte im Ausgangszustand von 108 tC/ha spielen eine Rolle. Bei Nutzungsverzicht können diese jährlich um ca. 3 tC/ha gesteigert werden, so dass bereits nach 20 Jahren die Kohlenstoffbilanz höher ausfällt als im Nutzungsszenario.

Die Autoren fassen die übergeordneten Ergebnisse folgendermaßen zusammen (Mund et al. 2015, S. 16):

Holznutzungspotenziale (WEHAM - Waldszenarien für Deutschland)						
Holzaufkommen in Deutschland 2016 (in Mio m ³)			Nadelholz		Laubholz	
Inlandverwendung	66,7	107,1 %	49,4	115,5 %	17,2	96,1 %
Außenhandels saldo	4,2	6,7 %	5,1	11,5 %	- 0,7	- 3,9 %
Waldholznutzung	62,2	100,0 %	44,3	100,0 %	17,9	100,0 %
Mittlere Holznutzungspotenziale der WEHAM-Szenarien im Zeitraum 2013 - 2052 (in Mio m ³)						
Basisszenario	77,8	125,1 %	49,5	111,7%	28,3	158,1 %
Holzpräferenzszenario	104,8	167,5 %	68,0	153,5 %	36,8	205,6 %
Naturschutzszenario	78,2	125,7 %	53,3	120,3 %	24,9	139,1 %

- Synergien zwischen Naturschutz und Holznutzung bestehen dort, wo der Biodiversitätsschutz auf möglichst kleiner Fläche einen hohen Strukturreichtum des Baumbestandes zum Ziel hat, wie er oftmals in bewirtschafteten ungleichaltrigen Laubmischwäldern vorliegt.
- Konflikte entstehen, wenn Prozessschutz (natürliche Wald-

Tabelle 5:
Holzaufkommen in Deutschland 2016 und mittlere Holznutzungspotenziale der WEHAM-Szenarien im Zeitraum 2013 - 2052. Quellen: (Mantau et al. 2018 und Oemichen et al. 2018, S. 69).

Waldvision (Holzvorrat / CO ₂ -Speicherung / Holzaufkommen)			
Indikator (Einheit)	Basis	Holz	Waldvision
Holzvorrat im Jahr 2102 (Mrd. m ³)	5,0	3,8	7,1
Holzzuwachs 2012-2102 (m ³ /Jahr/ha)	9,3	8,6	9,9
CO ₂ -Speicherung 2012-2102 (Mio t/Jahr)	31,9	17,2	48,2
Totholzvorrat 2102 (m ³ /ha)	22,5	16,2	26,2
Holzaufkommen 2012-2102 (Mio m ³ /Jahr)	6,8	7,8	5,1

Tabelle 6:
Übersicht zu den wichtigsten Ergebnissen der Szenarien Basis, Holz und Waldvision. Die CO₂-Speicherung umfasst die lebende Waldbiomasse, Totholz, Streu, Boden und den Holzproduktspeicher. Die Substitutionsleistung der Holzprodukte wurde in den Szenarien nicht mit bilanziert. Quelle: (Böttcher et al. 2019, S. 7).

entwicklung) ohne stoffliche und energetische Holznutzung angestrebt wird.

- Klima- und Prozessschutz stellen in naturnahen Wäldern eher konkurrierende als sich ergänzende Ziele dar.
- Zur Kompensation der geringeren Klimaschutzwirkung nicht genutzter Wälder sollte die Holznutzung auf langlebige Produkte mit hoher Materialsubstitutionswirkung und mehrstufiger Kaskadennutzung ausgerichtet werden.

Eine weitere Szenarienstudie mit dem Titel „Waldvision“ untersucht die Möglichkeiten einer ökologischen Waldbewirtschaftung in Deutschland (Böttcher et al. 2018). Auch dieses Szenario baut auf den Bundeswaldinventuren von 2002 und 2012 auf. Analog zu den WEHAM-Szenarien werden drei Entwicklungen mit ähnlichen Zielen gegenübergestellt (Basis, Holz, Waldvision), wobei im Basiszenario die zur Zeit vorherrschende Nutzungsintensität der Holznutzung fortgeschrieben und im Holzscenario deutlich intensiviert wird. Im Szenario Waldvision wird hingegen eine ökologische Waldbewirtschaftung in ganz Deutschland umgesetzt. Dafür sollen die Holzvorräte in den Beständen ausgebaut, beim Waldumbau Laubbäume bevorzugt gepflanzt und Nadelbäume tendenziell verdrängt werden. Der Anteil der Waldflächen ohne Holznutzung wird gegenüber dem Basiszenario auf 16,6 % mehr als vervierfacht.

Die Ergebnisse des Szenarienvergleichs können folgendermaßen zusammengefasst werden (siehe Tab. 6):

- Während im Holzscenario die Holzvorräte im Wald auf dem derzeitigen Stand (3,7 Mrd. m³) bleiben, steigen sie in der Basisentwicklung um 35 % auf 5,0 Mrd. m³ und im Szenario Waldvision um 90 % auf 7,1 Mrd. m³ an.
- Entsprechend ist die CO₂-Speicherleistung im Wald im Holzscenario nur etwa halb so groß wie im Basiszenario während sie im Szenario Waldvision 77 % höher liegt.
- Wie zu erwarten ist das mittlere Holzaufkommen im Holzscenario mit 7,8 Mio m³/Jahr spürbar höher als im Basiszenario (6,9 Mio m³/Jahr). Im Szenario Waldvision sinkt

das mittlere Holzaufkommen gegenüber der Trendfortschreibung um ein Viertel auf 5,1 Mio m³/Jahr ab.

Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass eine ökologische Waldbewirtschaftung nur mit einer gegenüber heute deutlich effizienteren Holznutzung beispielsweise durch mehr stoffliche als energetische Nutzung erreicht werden kann.

Das Szenario Waldvision wurde kritisiert, weil die Substitutionseffekte der Holznutzung nicht berücksichtigt sind und daher das o.g. Resümee gerade aus Klimaschutzsicht nicht haltbar ist. Zudem wurden methodische Fragen der Waldmodellierung und die sich ergebenden Unsicherheiten durch den langen Betrachtungszeitraum bemängelt (vgl. WBW 2019).

Im Hinblick auf die Fragestellung, welchen Beitrag der Holzbau zum Klimaschutz leisten kann interessiert vor allem, mit welchen Maßnahmen die Kohlenstoffspeicherung in der Waldbiomasse gesteigert werden kann und/oder inwieweit die Holznutzungen und deren Zusammensetzung unter bestimmten Bedingungen einen größeren Klimaschutzeffekt erzielen können (vgl. Röder et al. 2023). Dabei spielt auch die Substitution CO₂-intensiver Prozesse bei der Energie- und Materialbereitstellung eine entscheidende Rolle. Dieser Substitutionseffekt ist jedoch nicht konstant, sondern wird bei einer Transformation der Wirtschaft in Richtung Klimaneutralität bis 2050 stark abnehmen. All diese Themen werden derzeit strittig diskutiert, wobei die jeweiligen Interessenslagen hinsichtlich der primären Waldfunktion (Intensivierung der Holznutzung versus Naturschutzbelange) eine große Rolle zu spielen scheinen.

5 Bilanzierung von Holz und sonstigen NAWAROS

Die Bilanzierung von Holz und sonstigen nachwachsenden Rohstoffen (Nawaros) in Bezug auf die Kohlenstoffspeicherung und als mögliche CO₂-Senke ist entscheidend, um ihren

Beitrag zum Klimaschutz abzuschätzen. Die hierbei im Raum stehenden Fragen sind alles andere als trivial und sind derzeit Bestandteil einer intensiv geführten wissenschaftlichen Debatte. Die offenen Punkte haben vor allem damit zu tun, die natürlichen Prozesse und ihre zeitliche Dynamik in Bezug zur stofflichen und energetischen Nutzung zu stellen. Angesichts der Unsicherheiten, der langen Betrachtungszeiträume und der nicht absehbaren Einflüsse des künftigen Klimawandels kann eine wissenschaftlich exakte Bilanzierung bis auf Weiteres nicht erwartet werden. Ziel sollte jedoch wenigstens eine richtungssichere Bilanzierung sein, um bei den Bewertungen ungünstige von günstigen Lösungen unterscheiden zu können.

Im Folgenden werden vier methodische Ansätze vorgestellt und miteinander verglichen (vgl. Hoxha et al. 2020):

- Die 0/0- und die -1/+1-Methode gehen von einer klimaneutralen Bereitstellung von Holz und sonstigen nachwachsenden Rohstoffen aus. Dies führt zu einer starken Vereinfachung bei der Bilanzierung. Eine Beschäftigung mit den natürlichen Prozessen und der zeitlichen Dynamik biogener Emissionen findet nicht statt.
- Die Berücksichtigung des Speichersaldos quantifiziert den Einfluss, den die Ernte von Biomasse als anfängliche CO₂-Quelle darstellt. Dies kann sowohl anhand von Datenauswertungen als auch über Szenarienvergleiche erfolgen.
- In der zeitabhängigen dynamischen Ökobilanzen (DLCA) werden die Einflüsse der Freisetzung und Bindung von Treibhausgasen gemäß ihrem Auftreten und zeitabhängigen Prozessen abgebildet. Mit dieser Methode kann die Senkenwirkung einer stofflichen Nutzung abhängig von ihrer Lebensdauer bilanziert werden
- Bei der halbstatistischen Methode werden mittels dynamischer Berechnungen Faktoren in Form eines äquivalenten GWP(bio) bestimmt. Diese drücken aus, wie groß die effektive Quelle oder Senke einer Biomassenutzung in Abhängigkeit von der Lebensdauer und der Wachstumsrate der Bäume bzw. Pflanzen ausfällt.

Klimaneutrale Bereitstellung (0/0- und -1/+1- Methode)

Eine klimaneutrale Bereitstellung von Holz oder sonstigen biogenen Materialien beruht auf der Annahme, dass die geerntete Biomasse aus dem Wald oder bewirtschafteten Feldern entsprechend wieder nachwächst. Vorausgesetzt wird eine nachhaltige Forst- und Landwirtschaft, in der sichergestellt ist, dass in einem definierten Zeitraum wenigstens so viel Holz- oder Pflanzenmasse nachwächst, wie entnommen wird. In den meisten Ökobilanzen wird diese Annahme stillschweigend vorausgesetzt. Im Falle einer stofflichen Nutzung wird damit zwar die Kohlenstoffspeicherung im Material bilanziert, nicht jedoch die CO₂-Senkenwirkung im Zusammenspiel mit dem Wald oder der Landwirtschaft. Am Ende ergibt sich ein Nullsummenspiel. Am deutlichsten kommt dies bei der 0/0-Methode zum Ausdruck, indem dort die biogenen CO₂-Emissionen gar nicht erst in die Bilanzierung einbezogen werden.

Bei der -1/+1-Methode wird der im Material vorhandene Kohlenstoff in der Phase der Rohstoffbereitstellung in Form des darin gebundenen Kohlendioxids als negative CO₂-Emission zunächst eingebucht. Am Ende der Nutzung wird der Kohlenstoff im Zuge der Entsorgung als positive CO₂-Emission wieder ausgebucht, indem angenommen wird, dass augenblicklich seine Oxidation über Verbrennung oder organische Zersetzung erfolgt. Schon anhand dieser Beschreibung wird deutlich, dass es sich bei der hier skizzierten -1/+1-Methode um eine strikt

Tabelle 7:
Zusammenstellung der Daten einer Ökobilanz-Datenbank (ÖKOBAU-DAT 2023) für vier Holzprodukte zum Global Warming Potential. Gemäß den Vorgaben der Ökobilanzierung gemäß (EN 15804) sind die Werte für verschiedene Lebenszyklusphasen separat ausgewiesen. Hierbei bedeuten:
A1: Rohstoffgewinnung
A2: Transport zum Hersteller
A3: Herstellung
C2: Transport zur Abfallbehandlung
C3: Abfallbehandlung
D: Gutschrift (therm. Verwertung)

Die zusammengefassten Werte „Wiege bis zur Bahre“ (A1-C3) betragen für 50 Jahre Nutzungszeit:
- Konstruktionsholz: 129,1 kg/m³
- Spanplatten: 217,4 kg/m³
- MDF-Platten: 269 kg/m³
- OSB-Platten: 214 kg/m³
- Zellulosedämmung: 11,4 kg/m³
- Strohdämmung: 10,8 kg/m³

Die Lebenszyklusphase D beinhaltet Gutschriften außerhalb des Bilanzraums, die i.d.R. separat ausgewiesen und nicht verrechnet werden. In der Tabelle sind die Werte für die thermische Verwertung im Vergleich zu einem fossilen Referenzsystem ausgewiesen.

Produkt	Bilanzierte Einheit	Rohdichte (kg/m ³)	C-Gehalt (kg _C /m ³)	GWP (kg _{CO2-e} /m ³)					
				Herstellung			Entsorgung		
				A1	A2	A3	C2	C3	D
Konstruktionsholz	1,0 m ³	500,4	221,1	-760,0	15,3	58,8	0,5	814,5	-329,5
Spanplatten	1,0 m ³	633,3	265,5	-873,0	8,4	104,3	0,7	977,0	-150,5
MDF-Platten	1,0 m ³	735,5	281,5	-918,6	16,5	137,3	0,8	1033	-288
OSB-Platten	1,0 m ³	607,0	263,5	-753			-	967	-549
Zellulosedämmung	1,0 m ³	45,0	19,8	-61,6			0,3	72,7	-22,3
Strohdämmung	1,0 m ³	100,0	36,5	-127			3,8	134	-63

Szenarienvergleich	Region	Modell	CO ₂ -Speichersaldo	
			t _{CO₂} /m ³	kg _{GWP} /kWh
Holzpräferenzszenario (WEHAM-HPS) versus Basisszenario (WEHAM-BS)	Deutschland	WEHAM	0,46	0,209
Holzscenario (FaBio-HS) versus Basisszenario (FaBio-BS)	Deutschland	FaBio	1,34	0,609
Basisszenario (FaBio-BS) versus Szenario „Waldvision“ (FaBio-WV)	Deutschland	FaBio	1,47	0,668
Szenario „Waldvision“ (FaBio-WV) versus Nullnutzungsszenario (FaBio-NN)	Deutschland	FaBio	1,10	0,500
Nutzungsszenario (SILVA-Hainich-N) versus Schutzszenario (SILVA-Hainich-S)	Modellregion Hainich (D)	SILVA	0,67	0,305
Nutzungsszenario (SILVA-Hohe Schrecke-N) versus Schutzszenario (SILVA-Hohe Schrecke-S)	Modellregion Hohe Schrecke (D)	SILVA	0,63	0,287
Nutzungsszenario (SILVA-Vessertal-N) versus Schutzszenario (SILVA-Vessertal-S)	Modellregion Vessertal (D)	SILVA	1,12	0,509

Tabelle 8: CO₂-Speichersaldo ausgewählter Szenarienvergleiche in t_{CO₂} je Kubikmeter aus dem Wald entnommenen Holz bei stofflicher Nutzung und als äquivalente Treibhausgasemission in kg/kWh bezogen auf einen mittleren Energieinhalt von Holz (gewählt 7.920 MJ/m³). Als Zeitraum für die Ermittlung des Speichersaldos wurden 2020 - 2050 gewählt. Quelle und weitere Erläuterungen: (Hennenberg et al. 2019).

Quellenangaben zu den Szenarien:
 WEHAM: (Oehmichen et al. 2018)
 FaBio: (Böttcher et al. 2018)
 SILVA: (Mund et al. 2015)

buchhalterische Betrachtung handelt, in der die zeitliche Dynamik der Prozesse nicht abgebildet wird. Der Faktor Zeit spielt aber überall dort eine Rolle, wo es um die Klimawirksamkeit der Holzernte, des verbleibenden Restholzes im Wald, dem Auftreten von Emissionen (plötzlich oder zeitlich verteilt) unter Berücksichtigung der natürlichen Abbauprozesse sowie der Kohlenstoffflüsse der im betrachteten Zeitraum nachwachsenden Biomasse handelt. Insbesondere wird das zeitliche Auseinanderfallen der anfallenden Emissionen und der im Wald bzw. Feld geschaffenen Senken nicht miteinbezogen:

- Bei der energetischen Nutzung werden nur die fossilen Emissionen außerhalb des Energieinhalts der Biomasse bilanziert, z.B. für Ernte, Transport, Aufbereitung und sonstige Verarbeitungs- und Entsorgungsprozesse.

- Bei der stofflichen Nutzung erfolgt im Rahmen der Ökobilanzierung das Einbuchen des im Material enthaltenen Kohlenstoffs über Umrechnung des darin gebundenen Kohlendioxids und das spätere Ausbuchen des im Material enthaltenen Kohlenstoffs über die Oxidation des Kohlenstoffs durch Verbrennung oder natürliche Zersetzungsprozesse. Als Konsequenz werden auch hier nur die fossilen Emissionen der Rohstoffbereitstellung, der Herstellung, des Transports und sonstiger Prozesse sowie der Abfallbehandlung einbezogen (siehe Tab. 7).

Zu beachten ist ferner, dass die Bilanzierung aller Teilschritte im Lebenszyklus immer mit den heutigen Emissionskennwerten von Materialien, Energieträgern und Bauprozessen kalkuliert werden. Eine Berücksichtigung der bis 2050 anstehenden Dekarbonisierung findet nicht statt. Bildlich kann das als „Szenario ohne Klimaschutz“ bezeichnet werden. Dies betrifft folglich auch die Bilanzierung von Erneuerungs- oder Ersatzmaßnahmen oder die spätere Abfallentsorgung und Ausweitung von Gutschriften (z.B. in Bezug auf heutige fossile Heizsysteme, die hoffentlich in 30 bzw. 50 Jahren nicht mehr vorhanden sind).

Versuchsweise Bestimmung des Speichersaldos für Holzentnahme aus dem Wald

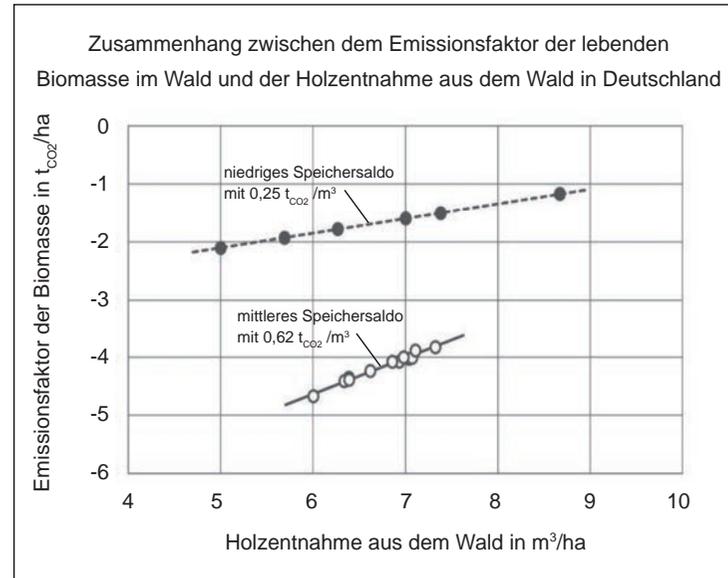
Als CO₂-Speichersaldo wird die Differenz bezeichnet, die sich aus der möglichen Speicherleistung des ungestörten Waldes gegenüber dem Wald ergibt, aus dem eine Holzentnahme stattgefunden hat. Berücksichtigt wird, dass im Fall stärkerer Holznutzung der Holzproduktespeicher größer wird. Das Saldo wird in Tonnen CO₂ je Kubikmeter Holzentnahme bzw. kg CO₂ je kg Holz(produkt) angegeben.

Zur Bestimmung des Speichersaldos der Holzernte können Szenarienvergleiche herangezogen werden, die gegensätzliche Arten der Waldbewirtschaftung und/oder Holznutzungsinintensivität miteinander vergleichen. Methodisch gesehen wird

hierbei in erster Näherung abgeschätzt, wie groß der Einfluss der Holzentnahme aus dem Wald auf die CO₂-Bilanz von Wald und Holzproduktespeicher ausfällt. In Tabelle 8 sind insgesamt sieben derartige Szenarienvergleiche zusammengestellt (vgl. Hennenberg et al. 2019). Die drei oberen stellen eine „Weiter-so-wie-bisher“-Entwicklung (Basisszenario) einer Waldnutzung gegenüber, die das Ziel einer deutlichen Ausweitung der Holzernten verfolgen. Das Speichersaldo weist hierbei Werte zwischen 0,46 - 1,47 t_{CO2}/m³ auf. Im Grunde gelten diese Werte nur für das zusätzliche Holzaufkommen gegenüber der Referenzentwicklung. Eine vielleicht zutreffendere Einschätzung des Speichersaldos für die gesamte Holzentnahme ergibt sich für die vier folgenden Vergleiche, bei denen Holznutzungsszenarien mit einem Szenario ohne Holznutzung verglichen wird. Die Werte betragen hier 0,63 - 1,13 t_{CO2}/m³ und spiegeln damit eine etwas geringere Bandbreite ab.

Erstaunlich hoch fallen die Werte für das Speichersaldo aus, wenn sie als äquivalente Treibhausgasemissionen je Energieeinheit bei einer thermischen Holznutzung ausgewiesen werden. Mit einer Spanne zwischen 0,21 - 0,67 kg CO₂-Äquivalenten je Kilowattstunde sind sie vergleichbar oder deutlich höher als die Werte fossiler Energieträger wie Erdgas (0,25) oder Heizöl (0,31). Hierbei ist noch unberücksichtigt, dass für Kultivierung, Aufbereitung, Transport zusätzliche Emissionen anfallen sowie die Umwandlungseffizienz von Biomasseheizungen deutlich geringer ausfällt als bei fossilen Heizsystemen. Diese Bilanz steht somit in deutlichen Gegensatz zur bisherigen Bewertung von Biomasseheizungen. Der Autor der Studie kommt zum Schluss, dass es nur bei einer stofflichen Nutzung gerechtfertigt erscheint, die Senkenleistung des Holzproduktespeichers bei der Berechnung des CO₂-Speichersaldos zu berücksichtigen, nicht jedoch bei einer energetischen Nutzung (Hennenberg 2019, S. 39).

Ein anderer Ansatz besteht in der Auswertung des Treibhausgasinventars der Waldflächen zur Bestimmung der Kohlenvor-



räte des Waldes im Vergleich zur Holzernte (vgl. Fehrenbach et al. 2022). Wie Abbildung 5 zeigt, stellen auch hier die natürlichen Störungen im Wald (Orkane, Dürren, Schädlingsbefall) einen wichtigen Einflussfaktor dar. In den Jahren 2002 - 2007, die durch große Schäden geprägt waren (z.B. Orkan Janette 2002, Dürre 2003, Orkan Kyrill 2007) sinkt durch geringeren Zuwachs und die größere Mortalität der Bäume die Speicherleistung des Waldes. Dies ist an den geringeren Werten für den Emissionsfaktor je Waldfläche erkennbar. Andererseits wirkt sich, wie die geringe Steigung der Ausgleichsgerade zeigt, die Holzentnahme nur in vergleichsweise geringem Ausmaß auf die CO₂-Emissionen je Kubikmeter Holz aus. In den Jahren 2009 - 2017, in denen nur geringe Schäden zu verzeichnen waren, liegt die Speicherleistung des Waldes deutlich höher und die Entnahme von Holz führt zu weitaus höheren CO₂-Emissionen.

Über die Steigung der beiden Ausgleichsgeraden in Abb. 9 lässt sich ein Speichersaldo in Höhe von 0,25 t_{CO2}/m³ bzw. 0,52

- Große Schäden (2002 - 2007)
- Geringe Schäden (2009 - 2017)

Abbildung 9: Abhängigkeit der Speicherleistung der Waldbiomasse von der Holzentnahme. Die obere Gerade stellt diesen Zusammenhang für die Jahre 2002 - 2007 dar, die durch große Schäden geprägt waren. Durch die natürlichen Störungen steigt die Mortalität der Bäume, der Zuwachs sinkt und die Holzentnahme wirkt sich vergleichsweise gering auf die Waldspeicherleistung aus. In den Jahren 2009 - 2017, in denen nur geringe Schäden zu verzeichnen waren, führte die Holzernte jedoch zu höheren CO₂-Emissionen je m³. Dies zeigt die größere Steigung der entsprechenden Ausgleichsgerade. Quelle: (Fehrenbach et al. 2022).

Einheit	niedrig	mittel	hoch
t _{CO2-eq} /m ³ _{Holz}	0,25	0,62	1,15
t _{CO2-eq} /t _{Holz}	0,52	1,28	2,37
kg _{CO2-eq} /kWh	0,12	0,30	0,55

Tabelle 9: Zusammenstellung des Speichersaldos (niedrig, mittel, hoch) für die Entnahme von Holz aus dem Wald und Umrechnung für verschiedene Bezugseinheiten (Kubikmeter, Gewicht und Heizwert jeweils für luftgetrocknetes Holz). Quelle: (Fehrenbach et al. 2022)

	Konstruktionsholz	Spanplatte	MDF-Platte
Notwendiger Holzinput aus Wald	1,04	1,09	0,64
Holzanteil im Produkt	1,00	0,95	0,56
CO ₂ -Speichersaldo (kg _{CO₂-eq} /kg _{Produkt})	niedrig	0,54	0,57
	mittel	1,33	1,40
	hoch	2,46	2,58
CO ₂ -Speicherung im Produkt (kg _{CO₂-eq} /kg _{Produkt})	-1,83	-1,74	-1,03
GWP Herstellung (kg _{CO₂-eq} /kg _{Produkt})	0,18	0,40	2,68
Substitutionseffekt (kg _{CO₂-eq} /kg _{Produkt}) im Jahr 2010	-2,02	-1,87	- 1,56
Gesamt-GWP-Bilanz (kg _{CO₂-eq} /kg _{Produkt}) unter der Annahme einer klimaneutralen Holzentnahme	-3,67	-3,21	+0,09
Gesamt-GWP-Bilanz (kg _{CO₂-eq} /kg _{Produkt}) unter der Annahme eines niedrigen Speichersaldos	-3,13	-2,64	+0,42
Gesamt-GWP-Bilanz (kg_{CO₂-eq}/kg_{Produkt}) unter der Annahme eines mittleren Speichersaldos	-2,34	-1,81	+0,98
Gesamt-GWP-Bilanz (kg _{CO₂-eq} /kg _{Produkt}) unter der Annahme eines hohen Speichersaldos	-1,21	-0,63	+1,61

Tabelle 10:
Bestimmung der Gesamt-Treibhausgasemissionsbilanz von drei Holzprodukten. Die Ergebnisse sind für vier Fälle angegeben:
1 Speichersaldo = Null
2 niedriges Speichersaldo (0,25)
3 mittleres Speichersaldo (0,62)
4 hohes Speichersaldo (1,15)
Quelle und weitere Erläuterungen: (Fehrenbach et al. 2022).

kg_{CO₂}/kg_{Holz} für die Waldperioden mit großen Schäden und von 0,62 t_{CO₂}/m³ bzw. 1,28 kg_{CO₂}/kg_{Holz} für die Waldperioden mit geringen Schäden ableiten. Ergänzend wird noch der über die Auswertung von Szenarien ermittelte Wert für ein hohes Speichersaldo von 1,15 kg_{CO₂-eq}/m³ bzw. 2,37 kg_{CO₂}/kg_{Holz} (vgl. Fehrenbach et al. 2022, S. 6) mit herangezogen. In Tabelle 9 werden die so bestimmten Werte für ein niedriges, mittleres und hohes Speichersaldo für drei Bezugsgrößen (Kubatur, Masse

und Heizwert) umgerechnet. Sie beziehen sich jeweils auf luftgetrocknetes Holz.

Bestimmung der Emissionsbilanz für verschiedene Holzprodukte unter Einbeziehung des Speichersaldos

Auf dieser Grundlage kann nun, wie in Tabelle 10 dargestellt, eine Gesamtbilanz der Klimawirksamkeit von ausgewählten Holzprodukten aufgestellt werden (vgl. Fehrenbach et al. 2022). Dafür sind zunächst die dafür notwendige Holzentnahme aus dem Wald und der Holzanteil im Produkt selber zu bestimmen. Darauf aufbauend kann das CO₂-Speichersaldo und die CO₂-Speicherung im Produkt ausgewiesen werden. Im nächsten Schritt sind die Treibhausgasemissionen entlang der Prozesskette für die Bereitstellung des Produkts (Transport, Trocknung, Herstellungsprozesse) zu bilanzieren. Schließlich ist der Substitutionseffekt zu bestimmen. Dieser bezieht sich auf ein typisches Baumaterial (z.B. Stahlbeton, Ziegel, Kunststoff, Putz), das durch das entsprechende Holzprodukt ersetzt werden kann.

Im grau hinterlegten Bereich der Tabelle 10 sind die Ergebnisse aufgelistet. Diese sind einerseits von der Emissionsintensität der Bereit- und Herstellungsprozesse des Holzproduktes abhängig. Bei Konstruktionsholz und Spanplatten ergeben sich durchgängig negative Werte, d.h. beide bilden eine effektive CO₂-Senke. Bei der besonders energie- und emissionsintensiven MDF-Platte ist dies hingegen nicht der Fall. Andererseits ist erkennbar, dass auch die angenommene Höhe des Speichersaldos eine wichtige Bilanzgröße darstellt. Für eine aussagekräftige Ökobilanzierung des Klimaeffekts von Holzprodukten wäre es daher künftig wünschenswert und notwendig, auf wissenschaftlicher Grundlage unterschiedliche Waldbewirtschaftungs- und -nutzungsformen differenziert behandeln zu können.

Analog kann nun auch die Klimawirksamkeit der Wärmebereitstellung verschiedener Holzprodukte betrachtet werden (siehe

Tabelle 11). Diese wird dort auf den Brennwert von Scheitholz, Holzhackschnitzeln und Holzpellets im Vergleich zu einem fossilen Heizsystem bezogen. Dabei wird kein Unterschied gemacht, ob es sich um Stamm- bzw. Scheitholz aus dem Wald oder um Rest- bzw. Altholz handelt. Anhand der Ergebnisse wird sichtbar, dass die Höhe des Speichersaldos (Null, niedrig, mittel, hoch) entscheidend ist, ob die Verbrennung von Holz zur Energiegewinnung einen Vorteil darstellt oder nicht: Nur unter der Annahme einer klimaneutralen Bereitstellung von Holz oder bei einem niedrigen Speichersaldo ist dies der Fall. Bereits bei einem mittleren Speichersaldo sind die resultierenden Treibhausgasemissionen der Holzheizungen höher, als in dem fossilen Referenzsystem.

Insgesamt stellt sich die Frage, ob hier überhaupt noch von einer Substitution gesprochen werden kann (2). Als Konsequenz daraus soll nun in einem weiteren Schritt eine Emissionsbewertung ohne Substitutionsbetrachtung erfolgen (siehe Tab. 12 und Abb. 10). Dabei werden die Treibhausgasemissionen einer Scheitholzheizung mit einem effizienten fossilen Heizsystem und einer Wärmepumpenanlage verglichen. Hierbei ist es sinnvoll und auch notwendig, die zeitliche Dynamik zu berücksichtigen, die aus der Transformation der Energiesysteme in Richtung der angestrebten Klimaneutralität resultiert. Sie zeigt sich einerseits bei der Umwandlungseffizienz, ausgedrückt im Jahresnutzungsgrad der Heizanlagen und andererseits beim Herstellungs- und Bereitstellungsaufwand der Energieträger.

Die größte Eigendynamik weist hierbei jedoch die Stromerzeugung auf, die sich wiederum auf die Bewertung der Wärmepumpensysteme entscheidend auswirkt. Um hier zwei besonders gegensätzliche Pfade abzubilden, wird in Anlehnung an die Szenarien in (Vallentin 2023) zwischen einer „Weiter-so-wie bisher“-Entwicklung (Referenz) und einer Klimaschutzentwicklung (Klimaschutz-Plus) unterschieden. Während im Referenzszenario eine Klimaneutralität erst im Jahr 2100 erreicht wird, ist dies im Klimaschutz-Plus-Szenario bereits 2050 der Fall.

	Scheitholz	Holzhackschnitzel	Pellets
Notwendiger Holzinput aus Wald	1,00	1,00	1,00
Holzanteil im Produkt	1,00	1,00	1,00
CO ₂ -Speichersaldo (kg _{CO₂-eq} /kWh)	niedrig	0,12	0,12
	mittel	0,30	0,30
	hoch	0,55	0,55
CO ₂ -Speicherung im Produkt (kg _{CO₂-eq} /kWh)	0,00	0,00	0,00
GWP Herstellung (kg _{CO₂-eq} /kWh)	0,02	0,01	0,04
Substitutionseffekt (kg _{CO₂-eq} /kWh) im Jahr 2010	-0,29	-0,29	-0,29
Gesamt-GWP-Bilanz (kg _{CO₂-eq} /kWh) unter der Annahme einer klimaneutralen Holzentnahme	-0,27	-0,26	-0,25
Gesamt-GWP-Bilanz (kg _{CO₂-eq} /kWh) unter der Annahme eines niedrigen Speichersaldos	-0,15	-0,14	-0,13
Gesamt-GWP-Bilanz (kg_{CO₂-eq}/kWh) unter der Annahme eines mittleren Speichersaldos	+0,03	+0,02	+0,05
Gesamt-GWP-Bilanz (kg _{CO₂-eq} /kWh) unter der Annahme eines hohen Speichersaldos	+0,28	+0,27	+0,30

Tabelle 11:

Bestimmung der Gesamt-Treibhausgasemissionsbilanz von drei Holzprodukten zur Energiebereitstellung im Vergleich zu dem Mittelwert für fossile Heizsysteme ($f_{GWP} = 0,288$ kg/kWh Endenergie). Als Heizwert wurden hierbei 15,5 MJ/kg luftgetrocknetes Holz angenommen. Das entspricht 4,3 kWh/kg. Die CO₂-Speicherung im Produkt wird für die thermische Verwendung mit Null angesetzt, was einer sofortigen Energienutzung nach der Holzentnahme aus dem Wald entsprechen würde. Die Ergebnisse werden für vier Fälle dargestellt:

- 1 Speichersaldo = Null = klimaneutrale Holzbereitstellung
- 2 niedriges Speichersaldo (0,25 kg/m³)
- 3 mittleres Speichersaldo (0,62 kg/m³)
- 4 hohes Speichersaldo (1,15 kg/m³)

Quelle und weitere Erläuterungen: (Fehrenbach et al. 2022).

	2010	2030	2050
Kohlenstoffspeicherung im Wald (kg _{CO2} /kWh)	-0,43	-0,43	-0,43
Speichersaldo Holzentnahme aus Wald (kg _{CO2} /kWh)	0,12 / 0,30 / 0,55	0,12/ 0,30 / 0,55	0,12/ 0,30 /0,55
Transport / Aufbereitungsprozess (kg _{CO2-eq} /kWh)	0,04	0,03	0,02
Emissionen Verbrennung im Kessel (kg _{CO2-eq} /kWh)	0,43	0,43	0,43
Jahresnutzungsgrad Heizsystem (-)	0,70	0,72	0,75
Emissionen bezogen auf Nutzenergie (kg_{CO2-eq}/kWh)	0,23 / 0,49 / 0,74	0,21 / 0,46 / 0,71	0,19/0,43/0,68
Zum Vergleich: Emissionen Referenzsysteme (fossiles Heizsystem / strombetriebene Wärmepumpe)			
Jahresnutzungsgrad fossiles Heizsystem (-)	0,9	0,95	1,0
Emissionen fossiles Heizsystem (kg _{CO2-eq} /kWh)	0,32	0,30	0,29
Emissionen Strom (kg _{CO2-eq} /kWh)	Referenz	0,63	0,35
	Klimaschutz +	0,63	0,22
Jahresnutzungsgrad Wärmepumpe (-)	2,5	3,0	4,0
Emissionen Wärmepumpe (kg _{CO2-eq} /kWh)	Referenz	0,25	0,12
	Klimaschutz +	0,25	0,07

Tabelle 12:

Bestimmung der Treibhausgasemissionen je Kilowattstunde Nutzenergie (Heizung, Warmwasserbereitung) für eine Scheitholzheizung unter Berücksichtigung eines niedrigen (0,25 kg_{CO2-eq}/m³), eines mittleren Speichersaldos (0,62 kg_{CO2-eq}/m³) und eines hohen Speichersaldos (1,15 kg_{CO2-eq}/m³). Darstellung der Werte 2010, 2030 und 2050, um die zeitliche Dynamik der Wärmebereitstellung abzubilden. Zum Vergleich sind im unteren Teil der Tabelle die analogen Werte für zwei Referenzsysteme (fossiles Heizsystem und eine strombetriebene Wärmepumpe) aufgeführt.

Als Heizwert wurden 15,5 MJ je Kilogramm luftgetrocknetes Holz angenommen. Der Emissionskennwert für das fossile Heizsysteme beträgt $f_{GWP} = 0,288$ kg/kWh Endenergie. Für die Wärmepumpenbilanzierung wurden die Emissionskennwerte für Strom differenziert für das Referenz- und das Klimaschutz-Plus-Szenario (vgl. Vallentin 2023, Tab. 6.14) gegenübergestellt. Bei der Wärmepumpenheizung ist die zeitliche Dynamik der Wärmebereitstellung sehr ausgeprägt.

Um unterschiedliche Annahmen zum Speichersaldo der Holzentnahme darzustellen, werden die Kennwerte in Tabelle 12.11 differenziert für ein niedriges (mit 0,25 kg_{CO2-eq}/m³ bzw. 0,12 kg_{CO2-eq}/kWh), ein mittleres Speichersaldo (mit 0,62 kg_{CO2-eq}/m³ bzw. 0,30 kg_{CO2-eq}/kWh) und ein hohes Speichersaldo (mit 1,15 kg_{CO2-eq}/m³ bzw. 0,55 kg_{CO2-eq}/kWh) ausgewiesen. Im Vergleich zwischen Scheitholzheizung und fossilem Heizsystem wird deutlich, dass selbst bei niedrigem Speichersaldo der Vorteil der Biomasseverbrennung mit Werten zwischen 28 und 34 % deutlich geringer liegt, als mit 70 % von der Europäischen Union gefordert (EU 2018). Unter der Annahme eines mittleren Speichersaldos liegen die Emissionen hingegen sogar um rund 50 %, beim hohen Saldo sogar um 130 % höher.

Noch gravierender sind die Unterschiede zu den Wärmepumpenheizungen. Fast durchgängig ergeben sich höhere Treibhausgasemissionen. Die Unterschiede werden im Zeitverlauf immer größer und liegen im Jahr 2030 um einen Faktor 0,6 - 10 und im Jahr 2050 sogar um einen Faktor 4 - 34 höher. Selbst unter der Annahme einer klimaneutralen Bereitstellung von Scheitholz schneiden Wärmepumpen bereits ab 2030 günstiger ab als die Verbrennung von Scheitholz zu Heizzwecken. Abbildung 11 zeigt den Biomasse-Brennstoffeinsatz für die Wohnnutzungen in Deutschland abhängig von den Randbedingungen in den Standardszenarien. Während im Referenzszenario der Bedarf an Biomasse auch nach 2020 weiter ansteigt, gelingt es in den beiden Klimaschutzenszenarien aufgrund der stetigen Steigerung der Energieeffizienz die energetische Nutzung kontinuierlich zurückzufahren. Damit werden neben dem Rückgang der Treibhausgasemissionen zusätzlich Potentiale für eine stoffliche Nutzung erschlossen

Abschätzung der zeitlichen Dynamik der Bereit- und Herstellung sowie der Substitutionseffekte und deren Auswirkung auf die GWP-Bilanz von Holzprodukten

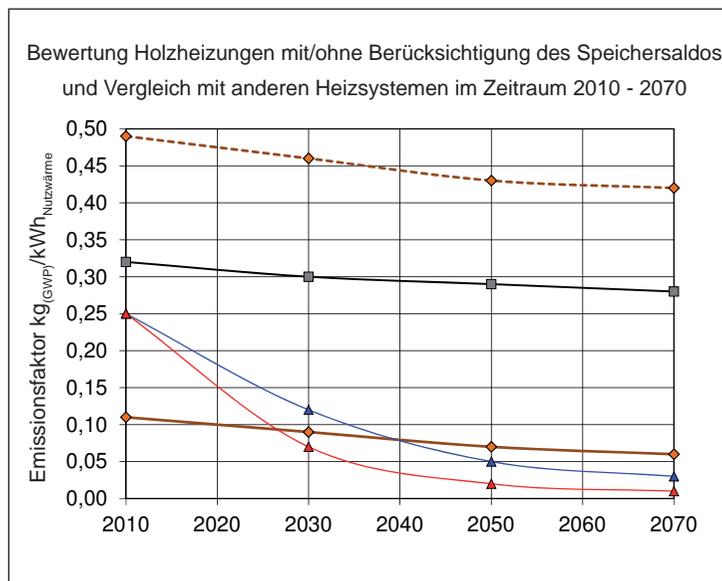
Gemäß dem Klimaschutzgesetz der Bundesregierung wird für Deutschland bis 2045 Klimaneutralität angestrebt (BR 2021).

Sollte dieses Ziel tatsächlich umgesetzt werden, führt dies zu einer konsequenten und schnellen Dekarbonisierung der deutschen Wirtschaft. Mit den sinkenden Treibhausgasemissionen bei der Bereitstellung von Baustoffen fallen dann im Gegenzug auch die Gutschriften für den Ersatz emissionsintensiver Materialien immer geringer aus. Unklar ist, in welcher Höhe hier ein Sockelbetrag unvermeidlicher Emissionen bestehen bleibt.

In Abbildung 12 wird die künftige Dekarbonisierung Deutschlands über drei unterschiedliche Entwicklungen abgeschätzt.

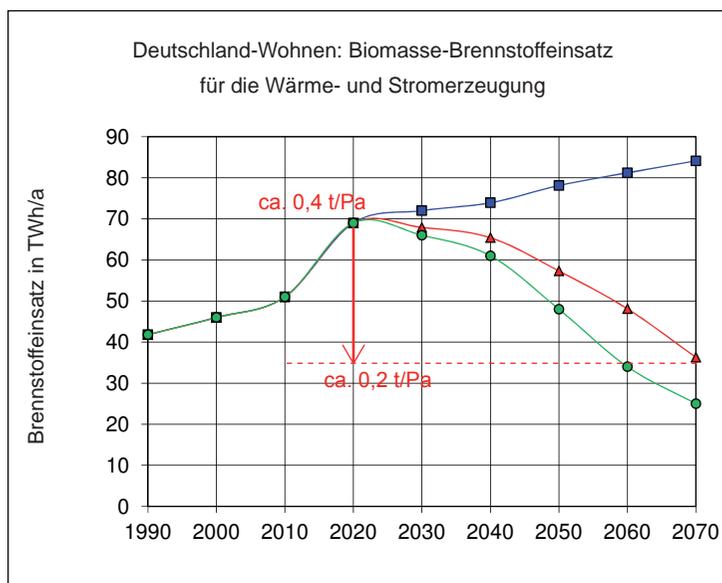
- 1 Der Referenzfall bildet eine pessimistische „Weiter-so-wie-bisher“-Entwicklung ab, in der frühestens im Jahr 2100 Klimaneutralität erreicht wird.
- 2 Für die Klimaschutzentwicklung wurde eine Studie aus der Schweiz herangezogen, die die Potentiale der Dekarbonisierung bei der Bereitstellung von Energie und Baumaterialien untersucht hat (Alig et al. 2020). Ein solcher Pfad darf bereits als sehr herausfordernd eingestuft werden.
- 3 Eine noch optimistischere Perspektive wird hingegen in der Klimaschutzentwicklung dargestellt, in der, wie von der Bundesregierung beschlossen, bereits 2045/50 Klimaneutralität hergestellt ist.

Der Dekarbonisierungserfolg wird über Faktoren abgebildet, die in Bezug auf das Jahr 2010 (= 1,0) angegeben sind. Sie sinken kontinuierlich in Richtung eines Sockelbetrags ab. Senkenausgleichs werden aus methodischen Gründen ausgeklammert, um die Emissionen der Energie- und Herstellungsprozesse der Alternativprodukte korrekt abzubilden und Doppelzahlungen zu vermeiden. Um die Dynamik in der Bewertung der drei ausgewählten Holzprodukte in erster Näherung abzuschätzen, werden die so abgeschätzten Faktoren mit den GWP-Werten für Herstellung und Substitution aus Tabelle 8 multipliziert. Dabei werden die fett markierten Werte mit einem mittleren Speichersaldo zugrunde gelegt. Die Auswirkungen auf die Treibhausgas-Gesamtbewertung der ausgewählten drei Holzbauprodukte sind in Abbildung 13 zusammengeführt:



- ◇- Holzheizung, Speichersaldo mittel (0,62 kg/m³)
- ◇ Holzheizung, klimaneutrale Bereitstellung
- Fossiles Referenzsystem
- ▲ Wärmepumpe, Strom wie Referenzszenario
- ▲ Wärmepumpe, Strom wie Klimaschutz-Plus-Szenario

Abbildung 10: Vergleich der THG-Emissionsfaktoren je kWh Nutzenergie für Holzheizungen (mittleres Speichersaldo sowie klimaneutrale Bereitstellung) mit denen eines fossilen Referenzsystems sowie Wärmepumpen (Stromerzeugung gemäß Referenz- und Klimaschutz-Plus-Szenario)

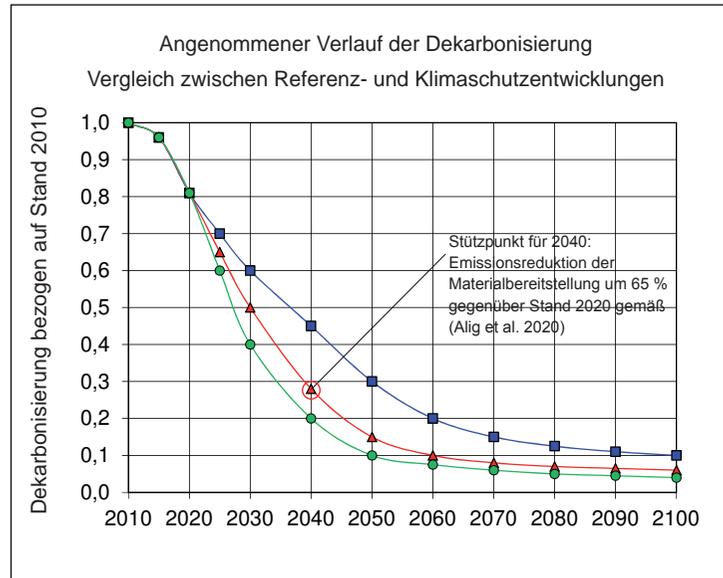


- Referenzentwicklung
- ▲ Klimaschutz-Plus-Entwicklung
- Klimaneutralität 2050

Abbildung 11: Brennstoffeinsatz für Biomasse, Müll und Reststoffe für die Wärme- und Stromerzeugung der deutschen Wohngebäude in TWh/a. Beim Strom wurde der Biomasseeinsatz anteilig bezogen auf den Endenergiebedarf der privaten Haushalte bilanziert. In den beiden Klimaschutzenszenarien gelingt es, die energetische Nutzung von Biomasse nach 2030 immer mehr zurückzudrängen und damit zusätzliche Potenziale für eine stoffliche Nutzung bzw. den Aufbau eines stärkeren Holzvorrats in Laub-Mischwäldern zu ermöglichen.

- Referenzentwicklung
- ▲ Klimaschutz-Plus-Entwicklung
- Klimaneutralität 2050

Abbildung 12:
Versuchswise Abschätzung der Dekarbonisierung Deutschlands mit Bezug auf die Ausgangssituation im Jahr 2010 (= Faktor 1,0). Im Referenzfall, der eine „Weiter so wie bisher“- Entwicklung abbildet, wird erst im Jahr 2100 Klimaneutralität erreicht. Gegenübergestellt sind zwei Klimaschutzentwicklungen, die dies bis 2045/50 bzw. 2070 erreichen. Als belastbarer Stützpunkt wird Mittelwert der Materialbereitstellung herangezogen, der eine Emissionsreduktion von 65 % bis 2040 gegenüber dem Stand 2020 für erreichbar einschätzt (vgl. Alig et al. 2020)



- Der Klimaschutzbeitrag von Konstruktionsholz und Spanplatten nimmt 2010 - 2050 kontinuierlich ab und nähert sich langfristig der effektiven CO₂-Speicherung im Produkt an. Diese entspricht dem im Produkt gespeicherten Kohlendioxid, der durch CO₂-Umwandlung im Wachstumsprozess der Biomasse eingelagert wurde, abzüglich dem Speicher-saldo, ausgelöst durch die Holzentnahme aus dem Wald.
- Bei der MDF-Platte findet dieser Prozess in umgekehrter Richtung statt. Die positiven Treibhausgasemissionen sinken, vor allem weil die energieintensive Herstellung künftig mit geringeren Emissionen erbracht werden kann. Auch hier nähert sich die Gesamtbilanz auf lange Sicht der effektiven CO₂-Speicherung des Holzanteils im Produkt an.
- In der Klimaschutzentwicklung findet dieser Prozess spürbar schneller statt als in der Referenzentwicklung.

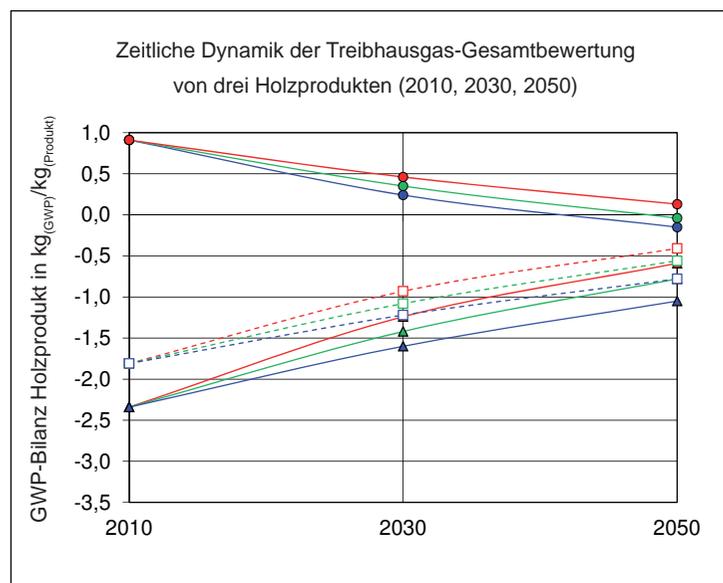
Referenzentwicklung:

- MDF-Platte
 - Spanplatte
 - ▲ Konstruktionsholz
- Klimaschutzentwicklung:
- MDF-Platte
 - Spanplatte
 - ▲ Konstruktionsholz

Entwicklung Klimaneutral 2050:

- MDF-Platte
- Spanplatte
- ▲ Konstruktionsholz

Abbildung 13:
Versuchswise Abschätzung der Treibhausgas-Gesamtbewertung von drei Holzprodukten (MDF-Platte, Spanplatte, Konstruktionsholz). Weitere Erläuterung: siehe Text.



Bei der dynamischen Bewertung von Holzbauprodukten unter Einschluss der Substitutionseffekte ist scheinbar ein Paradox wirksam: Die Klimaschutzwirkung fällt umso größer aus, je inkonsequenter der Klimaschutz insgesamt verfolgt wird. Durch den bereits mittelfristig stark abnehmenden Substitutionseffekt tritt die effektive CO₂-Speicherung in den Holzbauteilen immer mehr in den Vordergrund und dominiert ab 2050 die Klimaschutzwirkung des Holzbaus insgesamt.

Gutschriften durch Substitution bedürfen daher einer Dynamisierung, die nur anhand von Szenarien bestimmt werden kann. Eine Fortschreibung der heutigen Werte in künftige Bewertungen ist wissenschaftlich nicht vertretbar und führt zu Artefakten ohne jeglichen Realitätsbezug. Umgekehrt folgt daraus, dass die effektive Klimawirksamkeit des Bauens mit Holz und biogenen Baustoffen in der Nahperspektive bis 2030/40 am größten ausfällt, um danach immer weiter abzunehmen.

Dynamische Ökobilanz (DLCA)

Schon seit längerem wird von Wissenschaftlern der fehlende Zeitbezug bei der üblichen Lebenszyklusbilanzierung von bio-

genen Kohlendioxidemissionen bemängelt (vgl. Cherubini et al. 2011, Guest et al. 2012 und Holtsmark 2013). Denn die Grundannahme hinter der klimaneutralen Bereitstellung von Holz und sonstigen NAWAROS berücksichtigt weder die unterschiedlichen Zeitpunkte der Emissionen (z.B. im Vergleich einer sofortigen energetischen Nutzung nach der Holzentnahme mit der stark verzögerten Freisetzung von CO₂ nach einer langlebigen stofflichen Nutzung) noch die Zeiträume, die zum Nachwachsen der Biomasse im Wald oder in der Landwirtschaft je nach Baum- oder Pflanzenart und Bewirtschaftung notwendig sind. Dadurch, so die Kritik, entsteht ein stark verzerrtes Bild der tatsächlichen Prozesse.

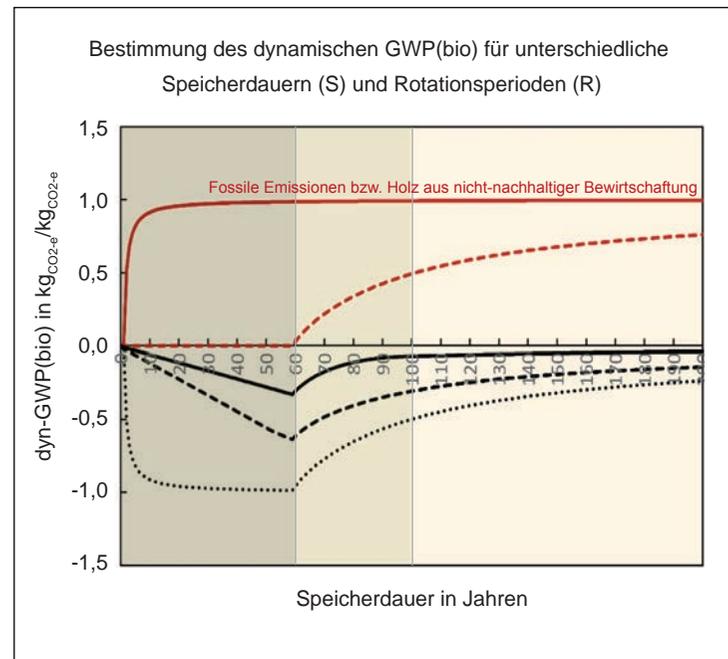
Das gilt vor allem für alle Verbrennungsprozesse, bei denen die im Material gebundenen Emissionen schlagartig freigesetzt werden. Bevor das CO₂ wieder in der Biomasse gebunden werden kann, verbleibt es zunächst in der Atmosphäre und trägt dort zum Treibhauseffekt bei. Dieser fällt umso größer aus, je länger die Rotationsperiode des nachwachsenden Holzes bzw. der nachwachsenden Biomasse ausfällt. Für alle klimarelevanten Betrachtungen der Holz- bzw. Biomassenutzungen wäre es daher hilfreich diesen Zusammenhang quantifizieren zu können.

Bei den dynamischen Ansätzen wird der Strahlungsantrieb jedes einzelnen Treibhausgases, das in die Atmosphäre gelangt, separat und unabhängig von seiner Herkunft ermittelt. Während dies bei fossilen Emissionen über die Umrechnung der Nicht-CO₂-Treibhausgase in CO₂-Äquivalente (i.d.R. mit einem Zeitbezug von 100 Jahren) i.d.R. bereits berücksichtigt wird, stellt sich dieser Sachverhalt bei den biogenen Emissionen etwas komplexer dar (vgl. Pittau et al 2022a, S. 10):

- Zunächst werden die biogenen Emissionen genauso wie fossile Emissionen behandelt.
- Bei den biogenen Emissionen besteht jedoch die Möglichkeit, dass nach der Ernte mittels nachwachsender Biomasse eine Kompensation stattfindet, die vor allem von der

Rotationsperiode abhängig ist. Bei schnellwachsenden Pflanzen geschieht dies viel schneller als bei Nadel- und Laubbäumen. Dieser Vorgang kann dann als abgeschlossen gelten, wenn die Pflanze dieselbe Biomasse aufgebaut hat wie die ursprünglich geerntete. Es ist aber auch möglich, dass bei längeren Standzeiten darüber hinausgehende CO₂-Bindungen stattfinden können (siehe Abb. 14).

- Zusätzlich können weitere Vorgänge in die Bilanzierung eingebunden werden, z.B. die biologische Zersetzung des bei der Ernte im Wald verbleibenden Restholzes mit anschließender Humusbildung oder die Veränderung der Albedo durch Holznutzung und Neupflanzungen.
- Die fossilen und biogenen Emissionen durch die Herstellungs-, Transport- und Entsorgungsprozesse werden wie in den statischen Ökobilanzen ebenfalls bilanziert, hierbei jedoch die Zeitpunkte ihres Auftretens berücksichtigt.

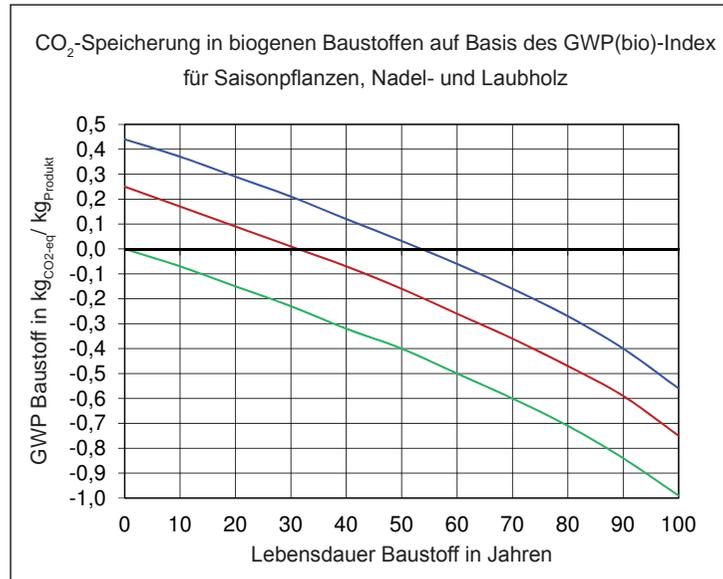


- S = 0 Jahre; R = unendlich
- - - S = 60 Jahre; R = unendlich
- S = 60 Jahre; R = 100 Jahre
- - - S = 60 Jahre; R = 50 Jahre
- S = 60 Jahre; R = 1 Jahr

Abbildung 14: Modellierung der Emission von 1,0 kg CO₂ und dem dadurch ausgelösten Beitrag zum Klimawandel unter Verwendung einer dynamischen Ökobilanz. Es werden verschiedene Speicherdauern (S = 0 bzw. 60 Jahre) und unterschiedliche Zeitdauern der Regeneration (R = 1, 50 und 100 Jahre) bzw. einer unendlichen Regenerationszeit verglichen. Die schwarzen Linien beziehen sich auf eine Emission 60 Jahre nach der Ernte. Die roten Linien stehen für eine Emission ohne Kohlendioxidabbau, was z.B. für eine Holzentnahme aus nicht-nachhaltiger Waldbewirtschaftung zutrifft. Quelle: (Pittau et al. 2022a, S. 20).

- Laubholz
- Nadelholz
- Saisonpflanzen (Stroh, Hanf)

Abbildung 14:
Zeitabhängige Bewertung der effektiven Treibhausgasemissionen in kg CO₂-Äquivalenten von biogenen Baumaterialien je kg CO₂ im Produkt mit Hilfe des GWP(bio)-Index. Hinsichtlich der Rotationsperiode wird zwischen Saisonpflanzen (1 Jahr), Nadelholz (60 Jahre) und Laubholz (100 Jahre) unterschieden. Unterhalb der hervorgehobenen Nulllinie ergibt sich rechnerisch ein Netto-Senkeneffekt. Klar erkennbar ist, dass danach eine zusätzliche Verlängerung der Nutzungsdauer einen überproportionalen Einfluss auf die Senkeneffektivität hat.



Rotation	Speicherdauer = Nutzungsdauer									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1	-0,07	-0,15	-0,23	-0,32	-0,40	-0,50	-0,60	-0,71	-0,84	-0,99
10	-0,04	-0,12	-0,20	-0,28	-0,37	-0,46	-0,57	-0,68	-0,80	-0,96
20	0,00	-0,08	-0,16	-0,24	-0,33	-0,42	-0,53	-0,64	-0,76	-0,92
30	0,04	-0,04	-0,12	-0,20	-0,29	-0,38	-0,48	-0,60	-0,72	-0,88
40	0,09	0,01	-0,08	-0,16	-0,25	-0,34	-0,44	-0,55	-0,68	-0,84
50	0,13	0,05	-0,03	-0,12	-0,21	-0,30	-0,40	-0,51	-0,64	-0,80
60	0,17	0,09	0,01	-0,07	-0,16	-0,26	-0,36	-0,47	-0,59	-0,75
70	0,22	0,14	0,06	-0,03	-0,12	-0,21	-0,31	-0,42	-0,55	-0,71
80	0,26	0,18	0,10	0,02	-0,07	-0,17	-0,27	-0,38	-0,50	-0,66
90	0,31	0,23	0,15	0,06	-0,03	-0,12	-0,22	-0,33	-0,46	-0,62
100	0,37	0,29	0,21	0,12	0,03	-0,06	-0,16	-0,27	-0,40	-0,56

Tabelle 13:
Zusammenstellung der GWP(bio)-Index-Werte für eine Betrachtungsperiode von 100 Jahren für 1kg gespeichertes CO₂ im Holzprodukt bzw. biogenen Baustoff. Berechnet ist der Effekt durch die verzögerte Emission gegenüber der sofortigen Freisetzung durch Verbrennung direkt nach der Ernte. Dabei wird angenommen, dass die Bindung von CO₂ durch gleichartige nachwachsende Biomasse direkt nach der Ernte beginnt. Quelle: (Guest et al. 2012, S. 26).

Bilanzierung der Nutzung von Holz und biogenen Materialien mit Hilfe des GWP(bio)-Index

Die Anwendung der dynamischen Methode im Rahmen üblicher Lebenszyklusanalysen und Ökobilanzen von Baustoffen, Bauelementen und Gebäuden ist für die Anwender zeitaufwändig und sehr anspruchsvoll. Daher wurden einfachere Ansätze entwickelt, die in der Lage sind, die zeitliche Dynamik abzubilden. Der sog. GWP(bio)-Index basiert auf einem Flussmodell der Kohlendioxidströme. Nach dem auslösenden Impuls der anthropogenen Emission (z.B. durch Verbrennung in einem Heizsystem) wird der darauf folgende Abbau des biogenen CO₂ im Wald oder auf landwirtschaftlichen Feldern als Funktion dieser Impulsreaktion abgebildet. Daraus lässt sich eine Größe ableiten, die analog zu den Emissionsfaktoren verschiedener Energieträger verwendet werden kann. Dieser steht als GWP(bio)-Index primär in Beziehung zur Rotationsperiode der eingesetzten Biomasse. Dabei spielen sowohl der Waldstandort (z.B. Tropen, gemäßigte Breiten, boreale Wälder) als auch die Baum- bzw. Pflanzenarten sowie die Bewirtschaftungsform eine Rolle (vgl. Cherubini et al. 2011). In weiteren Veröffentlichungen wurden GWP(bio)-Faktoren unter Berücksichtigung der Zersetzung der nach der Ernte im Wald verbleibenden Biomasse kalkuliert (Guest et al. 2012, Holtsmark 2013 und Liu et al. 2017). Je nach den in diesen Studien getroffenen Annahmen ergeben sich unterschiedliche Werte für den GWP(bio)-Index. Daraus lässt sich der Schluss ziehen, dass die effektive Klimawirksamkeit der Verbrennung von Holz und sonstiger Biomasse von vielen Randbedingungen abhängt (z.B. Klimaregion, Rotationsperiode, Baumart, Holzernte, Restholznutzung, Wiederaufforstung, Störungen) und sich von daher einer einfachen pauschalen Bewertung entzieht. Aus bilanzierungspragmatischen Gründen wäre jedoch eine einfache und zugleich transparente Bilanzierung wünschenswert.

In einer weiteren Studie wurde der Methodenansatz des GWP(bio)-Indexes um den Aspekt der stofflichen Speicherung in Produkten und Holzkonstruktionen erweitert (vgl. Guest et al.

2012). Der Verbrennungsprozess wird hierbei durch die vorgelegte stoffliche Holznutzung hinausgezögert. Daraus resultiert eine Zeitverlängerung, in der die geerntete Biomasse zwischengespeichert und die zeitgleich nachwachsende Biomasse Kohlendioxid aus der Atmosphäre aufnehmen kann. Am Ende der Nutzungsdauer wird, so wie es in den meisten Ökobilanzen der Fall ist, die Biomasse energetisch genutzt und damit der darin enthaltene Kohlenstoff oxidiert und als CO₂ zurück in die Atmosphäre emittiert.

Abhängig von der Rotationsperiode und Nutzungsdauer kann zunächst der Zeitpunkt bestimmt werden, an dem sich rechnerisch eine Treibhausgasneutralität einstellen würde. Dies ist in etwa nach der Hälfte der Rotationsperiode der Fall. Wird die Nutzungsdauer darüber hinaus verlängert ergibt sich ein Netto-Senken-Effekt, der mit einem negativen GWP(bio)-Index quantifiziert wird. Es ist gut erkennbar, dass je länger die Nutzungsdauer und je kürzer die Rotationsperiode der Biomasse ausfällt, umso größer kann der klimaentlastende Gesamteffekt einer Baukonstruktion mit biogenen Materialien ausfallen (siehe Abb. 14 und Tab. 13). Von besonderer Bedeutung für ein erfolgreiches Senkenregime ist, dass bei dieser Betrachtung eine Verlängerung der Nutzungsdauer eines Bauteils einen überproportionalen Effekt auf die Senkenwirkung hat. In diesem Zusammenhang sind die viel zu kurzen Nutzungsdauern, wie sie i.d.R. in Ökobilanzen angenommen werden, als kontraproduktiv einzuschätzen. Wenn der Holzbau als Klimaschutzstrategie Erfolg haben soll, ist es unverzichtbar, die Senkenpotentiale des Bauens mit biogenen Baustoffen in den Bilanzen auch angemessen darstellen zu können.

Im Folgenden soll die Bewertung von Holz und Stroh für energetische und stoffliche Nutzungen, wie sie im Gebäudepark sowohl separat als auch in kombinierter Form vorliegen, mit Hilfe des GWP(bio)-Index nachvollziehbar dargestellt werden. Für die Bilanzierung der Treibhausgasemissionen einer Holzheizung ermöglicht dieser Ansatz die Unterscheidung verschiede-

	GWP(bio) Index	GWP Heizsystem (kg _{CO2-e} /kWh _{Nutzenergie})		
		2010	2030	2050
Scheitholzheizung mit Laubholz (RP = 100a)	0,44	0,37	0,34	0,32
Scheitholzheizung mit Nadelholz (RP = 60 a)	0,25	0,21	0,19	0,17
Strohpelletheizung (RP = 1 a)	0,01	0,08	0,06	0,05
Fossiles Referenzsystem	k.A.	0,32	0,30	0,29
Wärmepumpe (Referenz)	k.A.	0,25	0,12	0,05
Wärmepumpe (Klimaschutz +)	k.A.	0,25	0,05	0,02

Tabelle 14: Bestimmung der Treibhausgasemissionen je Kilowattstunde Nutzenergie (Heizung, Warmwasserbereitung) für zwei Scheitholzheizungen und eine Strohpelletheizung unter Heranziehung von GWP(bio)-Faktoren für einen Zeithorizont von 100 Jahren und Berücksichtigung der unterschiedlichen Rotationsperioden von Laub-Nadelholz und Stroh (vgl. Pittau et al 2022a, S. 21). Ansonsten erfolgt der Rechengang wie in Tab. 12.13 dargestellt. Zum Vergleich sind unten die Werte für drei Referenzsysteme angeführt.

Art der Baukonstruktion	Nutzungsdauern in Jahren		
	Bandbreite	Durchschnitt	Ökobilanz
Bauschaden (z.B. Flachdach mit Feuchteschaden)	5 - 15	10	k.A.
Frei bewitterte liegende Bauteile, z.B. Terrassen	10 - 20	15	k.A.
Frei bewitterte stehende Bauteile, z.B. Holzstütze/Balkon	15 - 40	25	k.A.
Holzfassade, unbehandelt (Fichte/Lärche/Thermoholz)	30/40/50	40	30
Holzfassade, behandelt, mit Wartung	40 - 60	50	40
Holzfassade, behandelt, ohne Wartung	20 - 40	30	k.A.
WDVS, z.B. Holzweichfaserdämmung + Putz	40 - 60	50	40
Geschützte Kernkonstruktion (Holzrahmen/Massivholz)	60 - 120	80	> 50
Gefachedämmung in Holzrahmenkonstruktion	60 - 120	80	> 50
Steildach mit langlebiger Deckung, z.B. Blech/Ziegel	40 - 80	60	> 50
Flachdächer und Loggien mit Not- und Hauptabdichtung*	15 - 30	20	20/30/40**
Flachdächer und Loggien mit zwei vollwertigen Abdichtungen***	40 - 60	50	k.A.

Tabelle 15: Vergleich der Nutzungsdauern verschiedener Baukonstruktionen mit Holz und sonstigen biogenen Materialien. Angegeben sind die Bandbreite und Durchschnittswerte nach Einschätzung des Autors im Vergleich zu den Angaben einer typischen Ökobilanz (BNB 2019). * Nur die obere Abdichtung ist als vollwertige Abdichtung ausgeführt; ** einfache/hochwertige Abdichtung ohne/mit Dachbegrünung; ***Die obere Abdichtung ist nach ca. 25 Jahren zu erneuern.

ner Energieträger (Scheitholz aus Laub- und Nadelholz sowie Biomasse aus einjährigen Kulturpflanzen, z.B. Strohpellets) mit ihren jeweils unterschiedlichen Rotationsperioden (RP = 100a, 60a und 1a). Ansonsten werden die Emissionen entsprechend der Systematik in Tab. 14 über die vorgelagerten THG-Emissionen und diejenigen der Verbrennung im Kessel und die Jahresnutzungsgrade der Heizsysteme bestimmt:

- Bei der Scheitholzheizung mit Laubholz ergeben sich um etwa 25 % geringere Werte, wie unter der Annahme des mittleren Speichersaldos in Tab. 12. Sie sind damit immer noch höher als die spezifischen Emissionen des fossilen Referenzsystems.
- Wird in der Scheitholzheizung stattdessen Nadelholz verbrannt, liegen die spezifischen THG-Emissionen wegen der kürzeren Rotationsperiode um ca. 40 - 50 % niedriger.
- Werden anstelle von Holz(-pellets) Pellets aus Stroh eingesetzt, ergeben sich sehr niedrige Emissionswerte. Durch die kurze Rotationsperiode von nur einem Jahr wird dieser Energieträger tatsächlich nahezu klimaneutral bereitgestellt. Die verbleibenden Emissionen werden durch Ernte, Transport und Herstellung verursacht. Die Verfügbarkeit ist begrenzt ist, weil Stroh teilweise auf den Feldern zur Bodenregeneration verbleiben muss und der Einsatz als Dämmstoff für den Klimaschutz die bessere Nutzung darstellt. Darüber hinaus erfordert die Verfeuerung von Stroh spezielle Heizkessel und einen hohen Wartungsaufwand.
- Nochmals größer sind die Unterschiede zu den Wärmepumpensystemen. Mit der Dekarbonisierung der Stromerzeugung gehen deren spezifischen GWP-Werte bis 2050 stark zurück und unterschreiten bei einer Stromerzeugung, wie sie im Klimaschutz-Plus-Szenario ausgewiesen ist, selbst die Werte für die Stroh-Pelletheizung.

Insgesamt ergibt sich ein klares Bild hinsichtlich der Klimawirksamkeit von Holzheizungen und sonstigen Biomasse-Heizsystemen: Bei Einsatz von frisch geschlagenen Laubholz treten statt der versprochenen Vorteile einer klimaneutralen Bereit-

stellung sogar höhere Emissionen als im vergleichbaren fossile System.

Als nächstes sollen nun unter Zuhilfenahme des GWP(bio)-Index der Einsatz unterschiedlicher Holzprodukte unter dem Aspekt der Nutzungsdauer, d.h. des Verweildauer in entsprechenden Holzkonstruktionen, betrachtet werden. Zunächst sind hierfür in Abb. 15 die realitätsnahen Bandbreiten und Durchschnittswerte der Nutzungsdauern typischer Baukonstruktionen mit biogenen Baustoffen den Nutzungsdauern einer typischen Ökobilanz (vgl. BNB 2017) gegenübergestellt. Es fällt auf, dass die realitätsnahen Nutzungsdauern größer ausfallen als die entsprechende Festlegungen für die deutschen Ökobilanzen. Es fehlen darüber hinaus Differenzierungen, die die Feuchtebeanspruchungen und damit die Haltbarkeit von Holz berücksichtigen würden (z.B. Unterschiede zwischen frei bewitterten, im Freien geschützten und durch Schutzschichten eingehausten Holzkonstruktionen).

Hier tritt die Besonderheit der Feuchteempfindlichkeit biogener Baustoffe hervor, die darauf abgestimmte Schutzkonzepte benötigen (vgl. DIN 68800). Für eine lange Lebensdauer, die aus Gründen der Senkeneffektivität anzustreben ist, spielt offensichtlich einerseits der Einsatzort von Holz und sonstigen biogenen Materialien und andererseits die baukonstruktiven und bauphysikalischen Schutzmaßnahmen eine entscheidende Rolle.

In Tabelle 16 sind schließlich die Werte für das Global-Warming-Potential für verschiedene Holzprodukte in kg CO₂-Äquivalenten je Kubikmetern aufgeführt. Diese hängen in hohem Maße von der Nutzungsdauer in den Baukonstruktionen ab. Zusätzlich spielen die Rotationsperioden der biogenen Ausgangsmaterialien eine große Rolle sowie die fossilen Emissionen, die durch Herstellung und Transport verursacht werden. Nur für die gelb hinterlegten Fälle ergibt sich am Ende eine effektive Senkenwirkung in Höhe der ausgewiesenen negati-

ven Werte. Im Falle der Weichfaserdämmung ist die Herstellung derart emissionsintensiv (energieintensiver Produktion im Nass- bzw. Trockenverfahren bei gleichzeitig hoher Rohdichte), dass selbst nach 90 Jahren keine effektive CO₂-Senkenwirkung erzielt werden kann.

„End-of-use“-Prozesse biogener Materialien

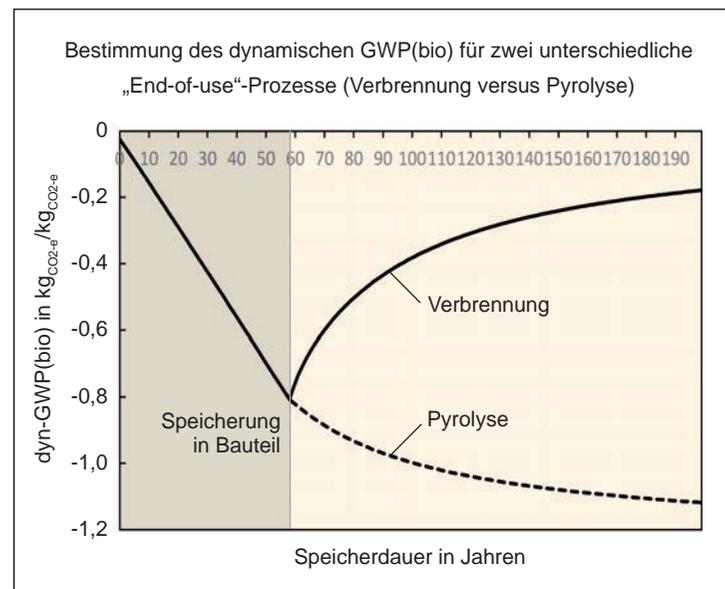
Bei allen bisherigen Betrachtungen zur Bilanzierung von Holz und sonstigen NAWAROS wird am Ende der Lebensdauer eines Produkts, Bauteils oder Gebäudes die darin enthaltene Biomasse verbrannt (thermische Verwertung). Dies hat zur Folge, dass das zuvor in den Materialien zwischengespeicherte CO₂ schlagartig freigesetzt wird. Dies ist aber angesichts der ohnehin sehr begrenzten Möglichkeiten natürliche Senken zu schaffen eine problematische Annahme. Als mögliche Alternativen sollten von daher folgende Optionen ernsthaft erwogen und als künftige Standardlösungen weiterentwickelt werden:

- Das Altholz und sonstige aus der Erstnutzung in den Stoffkreislauf rückführbare NAWAROS könnten im Sinne der Kaskadennutzung direkt weiterverwendet oder nach einer Aufbereitung in neuen Produkten stofflich genutzt werden. Die Speicherdauer erhöht sich dadurch um eine weitere Nutzungsperiode
- Sofern die Behandlung der Biomasse in Form einer Pyrolyse, d.h. unter anaeroben Bedingungen stattfindet, wird der enthaltene Kohlenstoff nicht in CO₂ und Wasser sondern in Biokohle umgewandelt. Diese hat eine große Langzeitstabilität und kann in Böden oder Baustoffen gespeichert werden und damit als CO₂-Senke und zur Verbesserung der Boden- oder Materialqualität dienen. Erfolgt dies in Biokohle-Heizkraftwerken können im Anschluss an diesen Prozess zusätzlich Pyrolyseöl sowie Strom und Wärme ausgekoppelt werden.
- Eine weitere Möglichkeit, die Biomasse als CO₂-Senke teilweise zu erhalten ist die thermische Nutzung mit anschließender Abscheidung und Speicherung des CO₂ in sicheren geologischen Lagern (BECCS).

Produkt	Bilanzierte Einheit	Rohdichte (kg/m ³)	C-Gehalt (kg _C /m ³)	GWP(bio)-Index			GWP (kg _{CO2-e} /m ³)		
				Nutzungsdauer			Nutzungsdauer		
				30	60	90	30	60	90
Konstruktionsholz	1,0 m ³	500,4	221,1	0,01	-0,26	-0,59	137,2	-81,9	-349,6
Spanplatten	1,0 m ³	633,3	265,5	0,11	-0,16	-0,49	324,6	61,5	-260,0
MDF-Platten	1,0 m ³	735,5	281,5	0,11	-0,16	-0,49	382,6	103,7	-273,2
OSB-Platten	1,0 m ³	607,0	263,5	0,11	-0,16	-0,49	320,4	59,3	-259,9
Weichfaser	1,0 m ³	140,0	109,4	0,01	-0,26	-0,59	291,8	183,4	50,9
Zellulosedämmung	1,0 m ³	45,0	19,8	0,01	-0,26	-0,59	11,8	-7,9	-31,8
Holzfaserdämmung	1,0 m ³	40,0	16,1	0,01	-0,26	-0,59	4,7	-11,2	-30,7
Strohämmung	1,0 m ³	100,0	36,5	-0,23	-0,50	-0,84	-20,0	-56,2	-101,7

Tabelle 16:

Ermittlung der GWP-Emissionen in CO₂-Äquivalenten je Kubikmeter für verschiedene Holzprodukte in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer der Baukonstruktion. Die Werte basieren zunächst auf den Daten einer Ökobilanz-Datenbank (ÖKOBAUDAT 2023), wie in Tab. 7 dargestellt. Anders als dort wird der Kohlenstoff nicht buchhalterisch ein- und ausgebucht, sondern mittels der in Tab. 14 aufgeführten GWP(bio)-Index-Werte abhängig von der Speicherdauer und der Rotationsperiode bilanziert. Am Ende der Nutzung erfolgt eine thermische Verwertung. Nur für die gelb hinterlegten Fälle ergibt sich am Ende eine effektive Senkenwirkung der eingesetzten Biomasse.



— Thermische Nutzung
 - - - Pyrolyse und anschließende Mineralisierung

Abbildung 15: Modellierung der biogenen Emissionen von 1,0 kg Nadelholz (Rotationsperiode 60 Jahre) und dem dadurch ausgelösten Beitrag zum Klimawandel unter Verwendung der dynamischen Ökobilanz. Nach dem Ende der Nutzungsdauer (60 Jahre) des Bauteils werden zwei verschiedene „End-of-use“-Prozesse verglichen: 1) Thermische Nutzung (Verbrennung in Heizkessel o.ä.) 2) Pyrolyse und anschließende Einlagerung in Böden oder Baustoffe. Quelle: (Pittau et al. 2022a, S. 26).

In Abb. 15 wurde mittels dynamischer Bilanzierung der klimalentlastende Effekt der Pyrolyse kalkuliert. Hierdurch können 50 - 70 % der Emissionen der üblichen thermischen Verwertung am Ende des Lebenszyklus vermieden werden (vgl. Pitau et al. 2022a, S. 26). In ähnlicher Größenordnung liegen die Einsparungen bei der BECCS-Variante. Bei der Kaskadennutzung hängt die (zusätzliche) Senkenwirkung von der Lebensdauer der Folgenutzungen ab. Zusammengefasst kann insgesamt ein Vorrang der stofflichen vor den energetischen Biomassennutzungen abgeleitet werden. Dies gilt auch am Ende der Nutzungszeit von Baukonstruktionen. Neben der Umstrukturierung der bislang etablierten Stoffflüsse erfordert dies an vielen Stellen neue technologische Entwicklungen, die sich zur Zeit lediglich im Erprobungsstadium befinden.

Senkenjahre

Auf der Grundlage der GWP(bio)-Methode kann nun eine weitere Größe abgeleitet werden, die einen direkten Vergleich unterschiedlicher Anwendungen von Holz- und Nawaroprodukten ermöglicht. Um den Zeitaspekt angemessen zu berücksichtigen, ist die hier vorgeschlagene Größe als Produkt aus Kohlenstoffspeicher und Speicherdauer definiert, wobei die Speicherdauer erst ab der Hälfte der Rotationsperiode angerechnet werden darf:

$$SJ = C \times (D-R/2)$$

mit:

SJ = Speicherjahre (kga oder ta)

C = In der Konstruktion eingelagerte Kohlenstoffmasse (kg bzw. t CO₂-Äquivalente)

D = Speicherdauer bzw. Nutzungszeit der Konstruktion (a)

R = mittlere Rotationsperiode der biogenen Ressource (a)

Mit dieser Größe kommt zum Ausdruck, dass erst ab einem bestimmten Schwellenwert der Speicherdauer überhaupt ein Netto-Senkeneffekt eintritt. Damit wird vermieden, dass durch die Annahme einer klimaneutralen Bereitstellung in Verbindung

mit einer zeitunabhängigen Speicherung kurz- und langfristige Nutzungen gleichgesetzt werden. Die Größe ist dabei so bestimmt, dass sie einerseits ein erstes Verständnis der Zusammenhänge erleichtert und andererseits eine noch gut handhabbare Größe für die CO₂-Senkenfunktion bildet. Sie wäre z.B. für die Förderung des Holzbaus deutlich besser geeignet als die verbaute Holzmenge.

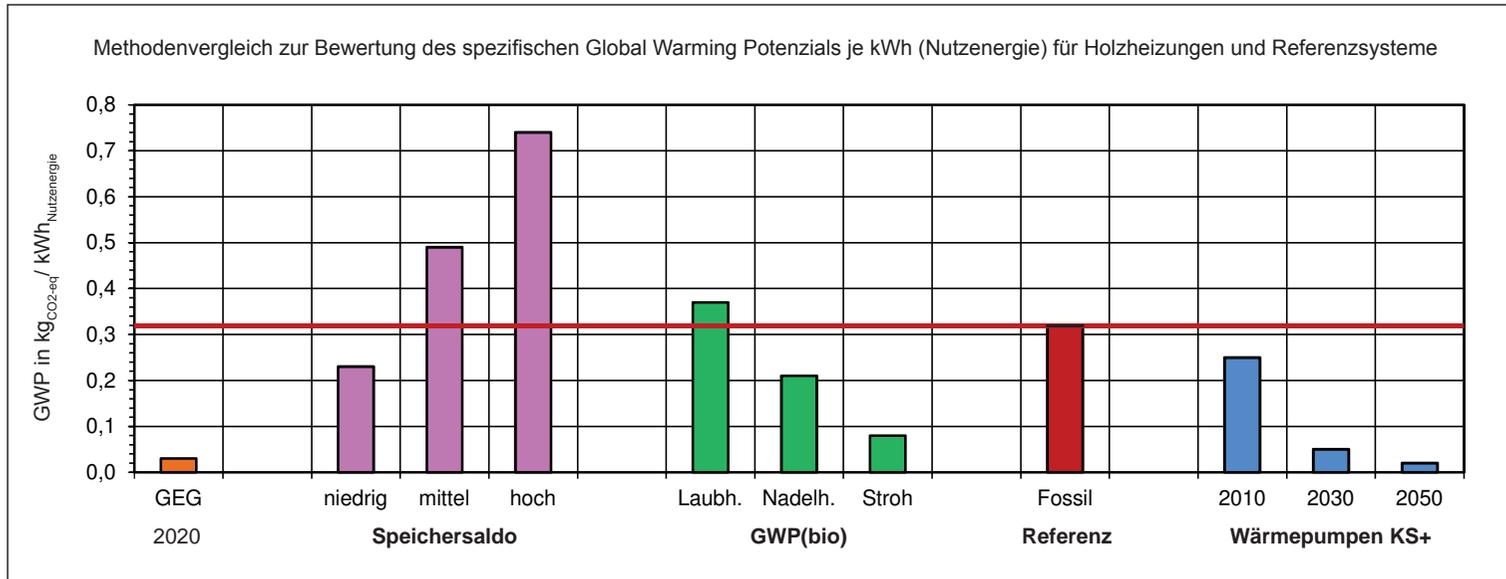
Das GWP(bio) ist jedoch überall dort die bessere Größe, wo fossile und biogene Emissionen miteinander verglichen und verrechnet werden müssen (z.B. in Ökobilanzen). Durch den inneren Zusammenhang zwischen Senkenjahren und GWP(bio) ist immer auch die Möglichkeit der Umrechnung gegeben, denn zwischen beiden Größen besteht ein näherungsweise linearer Zusammenhang (siehe auch Abb. 14).

Methodenvergleich

Anhand eines Methodenvergleichs sollen die zum Teil sehr großen Unterschiede bei der Bilanzierung von Energieholz oder den stofflich genutzten Holzprodukten aufgezeigt werden.

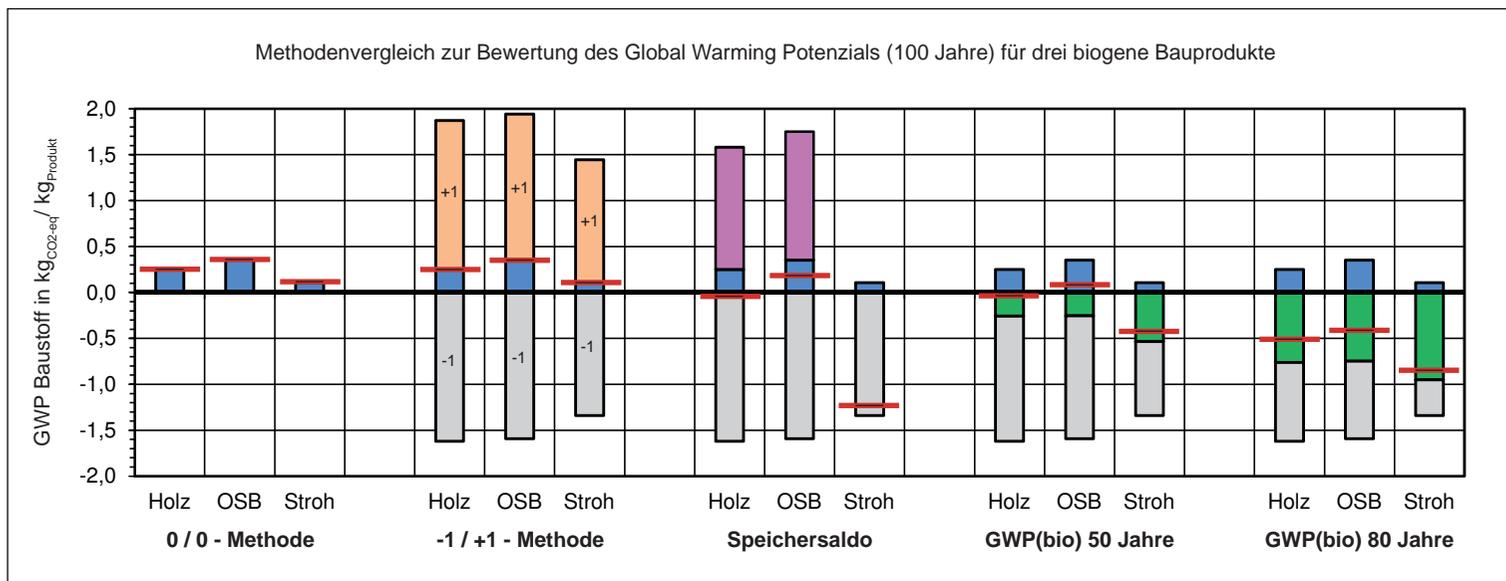
Methodenvergleich Heizsysteme (Abb. 16)

Als Kennwert für den Vergleich wird der spezifische Emissionskennwert je kWh Nutzenergie (Raumwärme) in kg_{CO₂-eq}/kWh verwendet. Zur besseren Orientierung und Einordnung ist der Wert des fossilen Referenzsystems in Höhe von 0,32 kg_{CO₂-eq}/kWh durch eine rote Linie besonders hervorgehoben. Auf der linken Seite sind drei unterschiedliche Bewertungen von Holzheizungen nebeneinander gestellt. In der nationalen Bilanzierung gemäß GEG, die auch in den Ökobilanzen Anwendung findet, wird eine klimaneutrale Bereitstellung und ein niedriger pauschaler Wert für fossile Emissionen für Holzbewirtschaftung und -ernte sowie Transporte und die Aufbereitung bzw. Verarbeitung in Höhe von 0,02 kg_{CO₂-eq}/kWh Endenergie angenommen. Bei einem mittleren Jahresnutzungsgrad von 0,75 ergibt sich ein nutzenergiebezogener Emissionskennwert von 0,027 kg_{CO₂-eq}/kWh.



- Holzheizung gem. GEG 2020
- Holzheizung mit Speichersaldo
- Holzheizung mit GWP(bio)
- Fossiles Referenzsystem
- Wärmepumpen mit dynamischer Bilanzierung (KS +)

Abbildung 16: Methodenvergleich zur Bewertung der treibhausgasbezogenen Emissionsfaktoren für verschiedene Heizsysteme. Verglichen wird die klimaneutrale Bereitstellung gemäß Gebäudeenergiegesetz 2020 mit der Bewertung mit Hilfe des Speichersaldos und dem GWP(bio)-Index. Auf der rechten Seite ist ein fossiles Referenzsystem und die dynamische Entwicklung einer Wärmepumpe über 4 Jahrzehnte gegenübergestellt.



- Ausspeicherung CO_2
- Speichersaldo (mittel)
- Fossiles GWP
- Biogenes GWP
- Einspeicherung CO_2
- Netto - GWP

Abbildung 17: Methodenvergleich zur Bewertung der treibhausgasbezogenen Emissionen für zwei Holzprodukte (Konstruktionsholz, OSB-Platte) und Stroh. Verglichen wird die klimaneutrale Bereitstellung gemäß der 0- und der -1/+1-Methode mit der Bewertung mit einem mittleren Speichersaldo sowie gemäß GWP(bio)-Index für zwei unterschiedliche Nutzungsdauern (50 und 80 Jahre).

Deutlich höhere Emissionen ergeben sich, wenn man die Entnahme des Holzes aus dem Wald als CO₂-Quelle bilanziert. Die Höhe des entsprechenden Speichersaldos hängt davon ab, ob es sich um Schadh Holz (niedriges Speichersaldo) oder ungeschädigtes Holz (mittleres Speichersaldo) handelt. Ein hohes Speichersaldo ergibt sich z.B. bei der Holzentnahme aus Naturwäldern, die sich in der Optimierungsphase der CO₂-Aufnahme in der Biomasse und in den Böden befinden. Bezogen auf das mittlere Speichersaldo, ergibt sich ein Emissionskennwert von 0,49 kg_{CO₂-eq}/KWh. Dieser liegt um einen Faktor 18 über dem entsprechenden Wert gemäß GEG 2020 und zugleich höher als derjenige des fossilen Referenzsystems.

Eine andere Systematik der Bilanzierung ergibt sich beim GWP(bio)-Index-Ansatz. Hier bestimmen die Speicherdauer und die Rotationsperiode die Höhe der biogenen Treibhausgasemissionen. Dahinter steht die Überlegung, dass, wie beim Speichersaldo, die Entnahme von Holz eine CO₂-Quelle darstellt, die dann jedoch anschließend durch die Neubildung einer CO₂-Senke durch nachwachsende Biomasse z.T. wieder ausgeglichen wird. Weil am Ende der Nutzung eine energetische Verwertung steht, kann der GWP(bio)-Index auch für die Bewertung von Heizsystemen angewendet werden. Als Speicherdauer kann dabei einheitlich ein Jahr zugrundegelegt werden. Als neuer Aspekt kommt gegenüber dem Speichersaldo hinzu, wie schnell der Aufbau neuer Biomasse abhängig von der Pflanzenart erfolgen kann. Die Emissionen einer energetischen Nutzung sind somit abhängig von der Holz- oder Pflanzenart des Energieträgers. Der höchste Wert mit 0,37 kg_{CO₂-eq}/KWh weist die Scheitholzheizung mit Laubholz, z.B. Buche auf. Er liegt damit höher als der Wert des fossilen Referenzsystems. Die Nadelholz-Scheitholzheizung liegt bei 0,21 kg_{CO₂-eq}/KWh. Wird eine Heizung mit Strohpellets betrieben ergibt sich ein vergleichsweise niedriger Emissionsfaktor von 0,08 kg_{CO₂-eq}/KWh. Zu klären wäre die Bewertung von Holzpellets, die aus verschiedenen Holzarten und zumindest bei deutscher Herstellung größtenteils aus Restholz hergestellt werden **(3)**.

Zusätzlich werden in Abb. 12.16 die Emissionskennwerte einer Wärmepumpenheizung bei Zugrundelegung der Stromerzeugung im Klimaschutz-Plus-Szenario für die Jahre 2010, 2030 und 2050 eingefügt. Hier wird die starke Dynamik bei den stromgestützten Wärmeversorgungen deutlich. Bereits im Jahr 2030 schneiden Wärmepumpen günstiger ab, als alle Holzheizungsvarianten mit Ausnahme des realitätsfernen Emissionskennwert im GEG 2020. Im Jahr 2050 weisen Wärmepumpen nur noch sehr geringe Emissionen auf, sofern bis dahin eine erneuerbare Stromerzeugung umgesetzt worden ist.

Methodenvergleich Holzprodukte und Stroh (Abb. 17)

Abschließend erfolgt ein Vergleich der verschiedenen Bilanzierungsmethoden anhand von zwei Holzprodukten (Konstruktionsholz und OSB-Platte) mit Stroh. Als Kennwert wird hierbei der baustoffspezifische Emissionskennwert in kg_{CO₂-eq}/kg_{Produkt} verwendet.

Bei Anwendung der 0/0-Methode werden nur die fossilen Emissionen durch den Herstellungsprozess, Ersatz- und Erneuerungsmaßnahmen und den Rückbau- bzw. Entsorgungsprozess (blau markiert) bilanziert, weil hier eine klimaneutrale Bereitstellung zugrundegelegt wird und von daher die biogenen Emissionen mit Null angenommen werden.

Bei der -1/+1-Methode werden die biogenen Emissionen mit deren kalorischen Wert in der Herstellungsphase eingebucht (Einspeicherung) und am Ende der Nutzung wieder ausgebucht (Ausspeicherung). Zugrundeliegt hierbei die Annahme, dass Holz und sonstige Nawaros sowie alle brennbaren Baustoffe am Ende der Nutzung einer thermischen Verwertung zugeführt werden. Auf die Problematik dieser Annahme wurde bereits hingewiesen. Durch die rein buchhalterische Behandlung der Speichereffekte ergibt sich ein Nullsummenspiel, als Netto-Emission bleiben am Ende des Lebenszyklus die fossilen Emissionen der Materialbereitstellung übrig (Konstruktionsholz: 0,25 ; OSB: 0,35, Stroh: 0,11 kg_{CO₂-eq}/kg).

Wird die Holzentnahme aus dem Wald als CO₂-Emission bewertet ergeben sich unter der Annahme eines mittleren Speichersaldos für die Holzprodukte deutlich höhere Werte bei den spezifischen Emissionen zur Materialbereitstellung. Jedoch wurden hier die biogenen Emissionen einer denkbaren Verbrennung am Ende der Nutzungsphase nicht angerechnet, weil die Holzentnahme aus dem Wald bereits am Anfang als CO₂-Emission behandelt worden ist. Bei der Systematik des Speichersaldos bleibt dadurch jedoch unberücksichtigt, dass dies dennoch zu hohen Emissionen führen würde, die dann dem nachgelagerten Prozess selbst zuzurechnen wären. Bei Stroh wurde das Speichersaldo mit Null angenommen, weil der Ersatz-Biomasseaufbau nahezu ohne Verzögerung in der nächsten Pflanzsaison stattfindet und die stoffliche Strohverwendung ohnehin als Beiprodukt des landwirtschaftlichen Produkts emissionsfrei gestellt werden kann, um Doppelzählungen zu vermeiden. Gegenüber den beiden Methoden, die eine klimaneutrale Bereitstellung annehmen, ergeben sich hier mit - 0,04 und - 0,16 kg_{CO₂-eq}/kg etwas niedrigere Netto-Emissionskennwerte für die beiden Holzprodukte, während für Stroh mit - 1,23 kg_{CO₂-eq}/kg ein stark negativer Wert ausgewiesen wird.

Bei der halbstatistischen Methode unter Zugrundelegung des GWP(bio)-Ansatzes wird die zeitliche Dynamik des Speichereffekts von biogenen Baustoffen berücksichtigt. Je länger ein Bauprodukt in der Konstruktion erhalten bleibt, desto mehr Zeit steht zur Verfügung, in der die biogene Ressource im Wald oder auf dem Feld nachwachsen kann, um dann wieder für eine neue Ernte zur Verfügung zu stehen. Um dies zu verdeutlichen, wurden in Abb. 17 die drei Nawaro-Produkte mit unterschiedlichen Nutzungsdauern kalkuliert. Bei einer Nutzungsdauer von 50 Jahren, wie sie in der Ökobilanz gem. BNB zugrundegelegt wird, ist eine effektive Senkenwirkung nur für Stroh nachweisbar. Mit einer Verlängerung der Lebensdauer von 50 auf 80 Jahren kann die Senkenwirkung der biogenen Emissionen (grün markiert) deutlich erhöht und damit alle drei Produkte, trotz der für die Bereitstellung notwendigen fossi-

Methodenvergleich im Hinblick auf Bilanzierung biogener Emissionen (Quellen und Senken)					
Methode	Bilanzierung berücksichtigt				
	Emissionen durch Holzentnahme	Ein-/Auspeicherung Kohlenstoff	Rotationsperiode Bäume/Pflanzen	Speicher- bzw. Nutzungsdauer	Dyn. Simulation biogener Emissionen
0 / 0					
-1 / +1		x			
Speichersaldo	x	x			
GWP(bio)-Index	x	x	x	x	(x)
DLCA	(x)	x	x	x	x

len Emissionen, als effektive CO₂-Senke wirksam werden. Die Werte sinken durch die zusätzliche Nutzungszeit von 30 Jahren beim Konstruktionsholz von - 0,01 auf - 0,51, bei der OSB-Platte von 0,10 auf - 0,40 und bei der Strohdämmung von - 0,42 auf - 0,84 kg_{CO₂-eq}/kg. Eine weitere Vergrößerung der CO₂-Senke wäre durch eine Kaskadennutzung oder einen Pyrolyseprozess als Nachnutzungsprozess möglich (nicht dargestellt).

Schlussfolgerungen: Wie sollen wir bilanzieren?

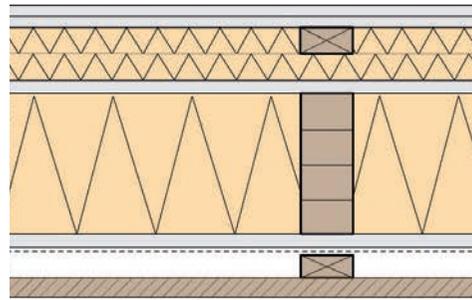
Bei den Bilanzfragen geht es nicht um methodische Spitzfindigkeiten ohne praktische Bedeutung. Bilanzen versuchen ein abstraktes datenbasiertes Abbild der Realität bzw. einer künftigen Entwicklung oder eines künftigen Zustands zu erzeugen. Sehr häufig ist das konkrete Handeln auf diese Informationen angewiesen. Unmittelbar einsichtig ist dies bei Kostenaufstellungen, Energiebedarfsrechnungen und Kalkulationen zu vorhandenen bzw. künftigen Umweltauswirkungen. Es gilt der Grundsatz: So, wie wir bilanzieren, so denken und entscheiden wir.

Beim Klimaschutz spielen Transformationsprozesse die entscheidende Rolle. Die notwendigen Veränderungen betreffen alle Handlungsfelder und Sektoren gleichzeitig. Der Umfang und das notwendige Tempo sind ohne historisches Vorbild. Sie

Tabelle 17: Methodenvergleich im Hinblick auf die Bilanzierung biogener Emissionen. Um hierbei das Zusammenspiel von Quellen und Senken abbilden zu können, ist die Berücksichtigung der zeitabhängigen Prozesse von besonderer Bedeutung. Diese werden nur in den dynamischen Lebenszyklusanalysen (DLCA) modelliert. Die Methode des GWP(bio)-Index basiert auf einer dynamischen Bilanzierung und analysiert deren Ergebnisse bezogen auf die zwei Hauptparameter Rotationsperiode und Speicherdauer. Das Speichersaldo bilanziert die Emission, die durch die Holzentnahme aus dem Wald stattfindet. Bei der -1/+1-Methode werden nur die Ein- und Ausspeichervorgänge entlang des Lebenszyklus bilanziert. Bei der 0/0-Methode werden die biogenen Emissionen nicht bilanziert, weil dort von einer klimaneutralen Bereitstellung von Holz und Nawaros ausgegangen wird. Quellen: (Windsperger 2015, Hoxha et al. 2020, Pittau et al. 2022)

Abbildung 18 / Tabelle 18:
Vergleich einer typischen Außenwand in Holzrahmenbauweise mit mittlerer energetischer Qualität (links) mit zwei Konstruktionen mit hoher energetischer Qualität. Dabei wird aufgezeigt, dass die bessere energetische Qualität in Verbindung mit einer holzsparenden Bauweise vor allem durch den Einsatz von biogenen Recyclingmaterial (Zellulose) bzw. einer einjährigen Kulturpflanze (Stroh) erreicht werden kann. Neben der Energieeinsparung in der Nutzungsphase wird dabei gleichzeitig die effektive Senkenwirkung der Konstruktion gesteigert.

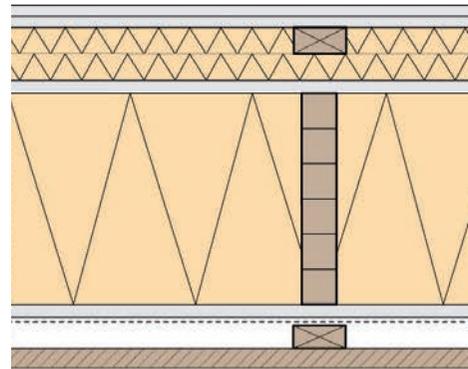
In der zugehörigen Tabelle unten sind die Ergebnisse zu den THG-Emissionen von zwei Methoden (Ökobilanz mit -1/+1-Methode versus Bewertung mit GWP(bio)-Index) gegenübergestellt.



A) Holzrahmen 6/16 + Zellulose

U-Wert: 0,23 W/m²K
Wärmeverlust: 19,3 kWh/m²a

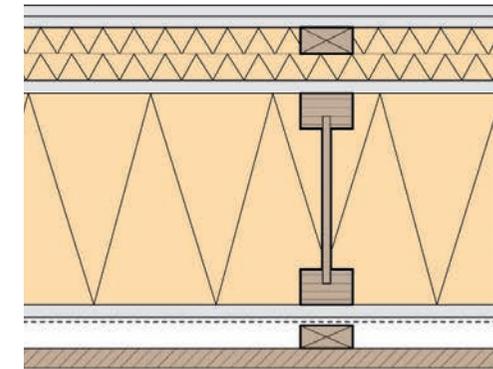
Biogene Masse: 46,3 kg/m²
Kohlenstoffspeicherung: 20,2 kg/m²
Verbautes Holz: 28,7 kg/m²
Biogene Dämmung: 8,3 kg/m²



B) Holzrahmen 4/24 + Zellulose

U-Wert: 0,15 W/m²K
Wärmeverlust: 12,6 kWh/m²a

Biogene Masse: 49,9 kg/m²
Kohlenstoffspeicherung: 21,8 kg/m²
Verbautes Holz: 28,7 kg/m²
Biogene Dämmung: 11,9 kg/m²



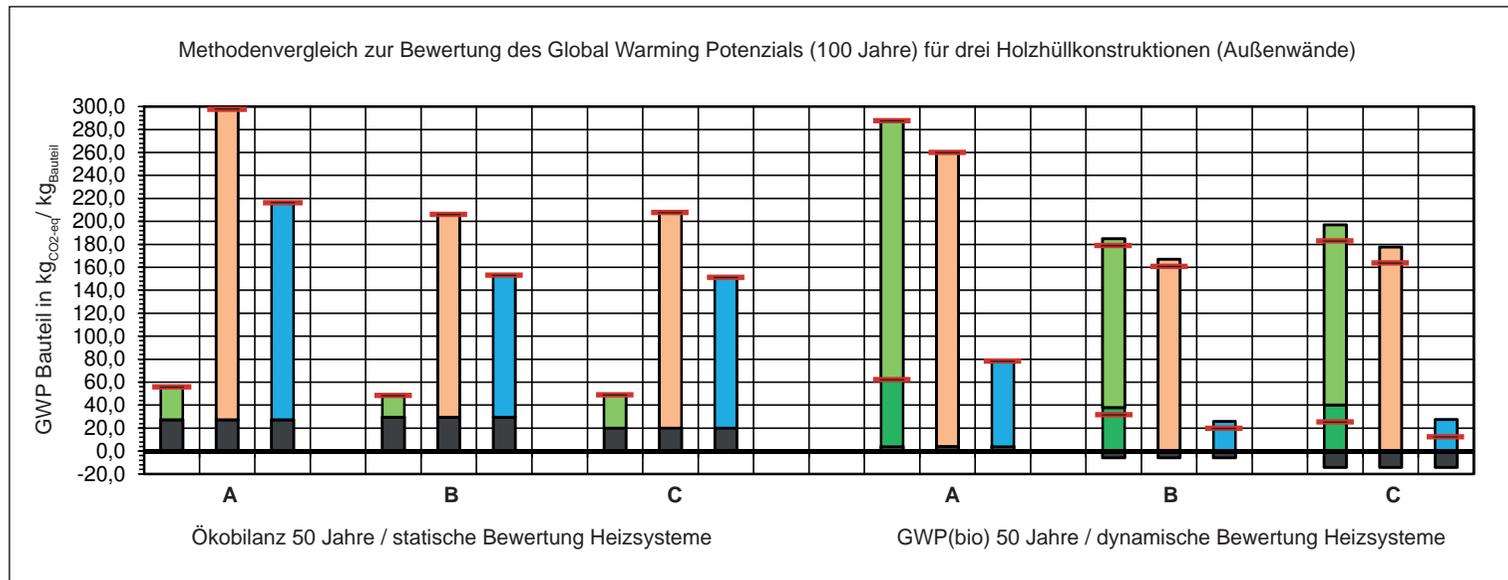
C) Holzstegträger 6/24 + Stroh

U-Wert: 0,16 W/m²K
Wärmeverlust: 13,4 kWh/m²a

Biogene Masse: 66,6 kg/m²
Kohlenstoffspeicherung: 29,0 kg/m²
Verbautes Holz: 24,4 kg/m²
Biogene Dämmung: 32,9 kg/m²

Ökobilanz (-1/+1-Methode) - Treibhausgasemissionen in kg (CO ₂ -Äquivalente) je m ²						
Herstellung (Module A1 - A3)	- 55,7		- 61,5		- 78,2	
Nutzung - Ersatz (Modul B4)	+ 2,0		+ 2,0		+ 2,0	
Entsorgung (Modul C4)	+ 81,1		+ 89,0		+ 96,2	
Konstruktion (50a)	+ 27,4		+ 29,6		+ 20,1	
Heizung (Modul B6) / Summe LCA	Heizung	Summe (50a)	Heizung	Summe (50a)	Heizung	Summe (50a)
Scheitholzheizung (50a)	+ 29,0	+ 56,4	+ 18,9	+ 48,5	+ 29,0	+ 49,1
Gas-Brennwertheizung 50a)	+ 270,2	+ 297,6	+ 176,4	+ 206,0	+ 187,6	+ 207,7
Wärmepumpe (50a)	+ 189,1	+ 216,6	+ 123,5	+ 153,1	+ 131,3	+ 151,4
Halbstatische Methode mit GWP(bio) + dynamische Bewertung Heizsysteme - Treibhausgasemissionen in kg (CO ₂ -Äquivalente) je m ²						
Konstruktion, GWP, fossil (50a)	+ 15,3		+ 15,5		+ 15,1	
Konstruktion, GWP, biogen (50 a)	- 11,4		- 21,3		- 29,2	
Konstruktion, Summe (50 a)	+ 3,9		- 5,8		- 14,1	
Heizung / Summe LCA	Heizung	Summe (50a)	Heizung	Summe (50a)	Heizung	Summe (50a)
Scheitholzheizung (50a)	+ 283,7	+ 287,6	+ 185,2	+ 179,4	+ 197,0	+ 182,9
Gas-Brennwertheizung 50a)	+ 256,0	+ 259,9	+ 167,1	+ 161,3	+ 177,7	+ 163,6
Wärmepumpe (50a)	+ 74,3 (REF)*	+ 78,2	+ 25,8 (KS +)*	+ 20,0	+ 27,5 (KS +)*	+ 13,4

* Hinweis: Bei der Bilanzierung der Wärmepumpen wird im Fall A) passend zur mittleren Qualität der Dämmung bei der Strombereitstellung eine Referenzentwicklung zugrundegelegt; im Fall B) und C) jedoch eine Klimaschutzentwicklung. Siehe hierzu auch Tabelle 14.



- Konstruktion
- Heizung, Scheitholz
- Heizung, Strohpellets
- Heizung, fossil
- Heizung, Wärmepumpe
- Netto - GWP

Abbildung 19: Methodenvergleich zur Bewertung der treibhausgasbezogenen Emissionen für drei Holzfassadenkonstruktionen (A, B und C gemäß Abb. 18 und Tab. 18). Verglichen wird die Bewertung gemäß Ökobilanz und der dort angenommenen klimaneutralen Bereitstellung mit der Bewertung gemäß GWP(bio)-Index und einer dynamischen Bewertung der Heizsysteme. In beiden Fällen wird eine Nutzungsdauer von 50 Jahren angenommen

lassen sich weder „aus dem Blick in den Rückspiegel“ noch über die „Vorwegnahme des Wünschenswerten“ bilanzieren. Der einzig mögliche Ausweg sind szenariengestützte Bilanzen, bei denen die Bandbreite des Möglichen zumeist mit zwei Extrem- und einem oder mehreren Mittelwegszenerarien abgebildet wird. Sie stellen „Testanordnungen“ für mögliche Zukünfte dar, indem dort anhand von „Quasi-Experimenten“ die Konsequenzen verschiedener Handlungsoptionen durchgespielt werden. Nur über diesen Zwischenschritt lassen sich belastbare Mittelwerte für ausgewählte Zeitperioden (z.B. 2020 - 2050) herleiten, die für einfachere Bilanzierungen herangezogen werden können. Diese Mittelwerte müssen in bestimmten Zeitabständen immer wieder kritisch geprüft und ggf. angepasst werden.

Aus dem Methodenvergleich können Schlüsse für die künftigen Klimaschutzbilanzierungen gezogen werden:

- Sowohl bei der Energie- als auch bei der Materialbereitstellung ist es notwendig, die Dynamik der Dekarbonisierung angemessen einzubeziehen.
- Das Zusammenspiel von fossilen und biogenen Emissionen wird nur in den dynamischen Simulationen angemessen abgebildet. Idealerweise werden Grundgesamtheiten modelliert, für den Bausektor wäre dies das Materiallager in Kopplung mit der Energiebereitstellung für Gebäude.
- Um die Senkeneffekte des Einsatzes von biogenen Baustoffe bilanzieren zu können, sind Nutzungsdauer und die Rotationsperiode der eingesetzten Holzarten und Nawaros methodisch zu berücksichtigen. Beispielsweise ermöglicht der GWP(bio)-Index eine relativ einfache Implementierung in die üblichen Lebenszyklusverfahren.
- Die Nutzungsdauern der Konstruktionen sind realitätsnah zu bestimmen und nicht künstlich zu verkürzen.
- Die Verbrennung von Biomasse in Heizsystemen und am Ende der Nutzungsphase sind klimaschädlich. Bilanzen sollten in der Lage sein, dies entsprechend abzubilden.
- Die Anrechnung von Substitutionen und Gutschriften birgt die Gefahr unzutreffender Vergleiche und Doppelzählungen, vor allem, falls dies ohne zeitliche Dynamisierung erfolgt.

Drei Außenwandkonstruktionen			
GWP (kg/m ²) - Konstruktion			
Nutzungsdauer	A	B	C
50 a	3,9	-5,8	-14,1
80 a	-12,0	-21,2	-37,5
100 a	-26,2	-34,9	-58,6

GWP (kg/m ²) - Wärmepumpe			
Nutzungsdauer	A	B	C
50 a	74,3	25,8	27,5
80 a	78,7	28,2	30,0
100 a	81,1	29,0	30,8

GWP (kg/m ²) - Gesamt			
Nutzungsdauer	A	B	C
50 a	78,2	20,0	13,4
80 a	66,7	7,0	-7,5
100 a	54,9	-5,9	-27,8

Tabelle 19:
Treibhausgasemissionen der drei Holz-Außenwandkonstruktionen, wie in Abb. 18 / Tab.18 dargestellt für unterschiedliche Nutzungsdauern von 50, 80 und 100 Jahren. Die biogenen Emissionen wurden mit der GWP(bio)-Methode bestimmt und sind als CO₂-Äquivalente je m² Bauteil für die Konstruktion (oben), den Betrieb der Wärmepumpe (Mitte) und die Summe (unten) ausgewiesen. Zu beachten ist, dass die Strombereitstellung für die Wärmepumpe für den Fall A gemäß der Referenzentwicklung erfolgt, während sie bei den hoch wärmedämmenden Konstruktionen gemäß der Klimaschutzentwicklung modelliert wurde (siehe Tab. 14).

Hinweis: Nur bei den gelb hinterlegten Feldern ist ein Netto-Senkeneffekt nachweisbar.

Beispiel für eine materialsparende und energie- sowie senkenorientierte Konstruktionsoptimierung

In Abb. 18 / Tab. 18 wird am Beispiel einer Fassade in Holzrahmenbauweise (Varianten A - B - C) exemplarisch erläutert, wie mit einer Verbesserung der energetischen Qualität zugleich die Senkeneffektivität erhöht wird - und dies bei einem gleichbleibenden bzw. sogar geringerem Holzeinsatz. Die Brandschutzbekleidungen bestehen aus Gipsfaserplatten, die wegen ihres Zelluloseanteils ein Beispiel einer biogenen Kaskadennutzung sind. Durch den Einsatz von Zellulose bzw. Stroh als Dämmmaterialien ergeben sich Einsatzmöglichkeiten biogener Recyclingmaterialien und Reststoffe einjähriger Kulturpflanzen, die sich in Form von Einblasdämmung besonders gut für eine weitere Kaskadennutzung eignen.

Interessant ist es nun, die statische Kalkulation des Ein- und Ausbuchens des Kohlenstoffs (-1/+1) in den Ökobilanzen der halbstatistischen Bilanzierung mittels der GWP(bio)-Methode in Verbindung mit der dynamischen (= szenariengestützten) Bewertung der Heizsysteme (siehe Abb. 18 und Abb. 19) gegenüberzustellen. Analog dazu wird die Klimawirksamkeit der Wärme- und Stromversorgung in den statischen Ökobilanzen mit den heutigen THG-Emissionsfaktoren kalkuliert, während bei einer dynamischen Bilanzierung die Dekarbonisierung der Energiesysteme mit zeitvariablen Emissionsfaktoren bestimmt werden (siehe hierzu auch Tab. 14). Dieser Punkt spielt auch bei den Ersatzmaßnahmen eine Rolle: während in den statischen Ökobilanzen die entsprechenden grauen Emissionen mit den heutigen Werten kalkuliert werden (quasi als würden die entsprechenden Bauteile bereits heute produziert und zwischengelagert), wird bei der dynamischen Bilanzierung die Dekarbonisierung der Materialbereitstellung und der Bauprozesse berücksichtigt (siehe Abb.12). Um einen direkten Vergleich zu ermöglichen, wurde die Nutzungsdauern bei beiden Methoden mit 50 Jahren gleichlang gewählt. Die Ergebnisse beider Methoden sind in Abb. 19 zur besseren Vergleichbarkeit nebeneinander dargestellt:

- Mit Abstand die größten Unterschiede ergeben sich bei der Bewertung der Scheitholzheizung. Während in der Ökobilanz besonders niedrige Werte ausgewiesen werden, liegen diese bei der Anwendung des GWP(bio)-Ansatzes höher als beim fossilen Referenzsystem.
- Genau umgekehrt verhält es sich bei der Wärmepumpenheizung. Durch den heute noch vergleichsweise hohen Emissionskennwert für Strom ergibt sich in der Ökobilanz nur ein kleiner Vorteil gegenüber dem fossilen Heizsystem. Bei dynamischer Bewertung der künftigen Stromerzeugung auf Grundlage des Klimaschutz-Plus-Szenarios (KS +) erweist sich diese Versorgungslösung als den beiden anderen Varianten gegenüber als deutlich überlegen. Das gilt übrigens auch unter den Bedingungen des Referenzszenarios mit dann jedoch in etwa doppelt so hohen Werten, die zwischen 44,2 - 63,7 kg/m² Bauteil zu liegen kommen.
- Nur geringe Unterschiede treten bei der Bewertung des fossilen Heizsystems zu Tage, weil hier die Dynamisierung nur die Betriebseffizienz des Heizsystems selbst betrifft.
- Die Werte für die THG-Emissionen der Baukonstruktionen über den Lebenszyklus werden in der statischen Ökobilanz spürbar höher kalkuliert als in der halbstatistischen GWP(bio)-Methode. Bei einer Nutzungszeit von 50 Jahren, ergeben sich hier nur für die beiden besser gedämmten Varianten insgesamt negative Emissionen. Bei einer realistischen Nutzungszeit von 80 bzw. 100 Jahren nimmt der Senkeneffekt dann sogar überproportional zu (siehe Tab. 19 oben).
- In Verbindung mit der Versorgungslösung Wärmepumpe sind bei den Varianten B und C bei langen Nutzungsdauern sogar insgesamt negative Emissionswerte erzielbar (siehe gelb hinterlegte Felder in Abb. 19 unten)
- Als Ergebnis der Analyse wird ein überraschender Kombinationseffekt erkennbar: Langlebige hochwärmedämmte biogene Hüllkonstruktionen haben einen klimapositiven Effekt, sofern bei ihnen die Verringerung der Wärmeverluste mit einer erneuerbaren Wärmeversorgung und einer senkenorientierten Bauweise verknüpft werden.

Nur bei einer dynamischen Bilanzierung bzw. der daraus abgeleiteten GWP(bio)-Methode kann die Nutzungsdauer und damit die CO₂-Senkenwirkung der Baukonstruktion berücksichtigt werden. Weil in den GWP(bio)-Faktoren ebenfalls eine thermische Verwertung am Nutzungsende einbezogen ist, sind die Werte der beiden methodischen Ansätze am Ende direkt vergleichbar. Es ist festzustellen, dass mit den bisherigen Rechenansätzen der Ökobilanzen eine senkenoptimierte Optimierung von Hüllkonstruktionen (A-B-C) in Verbindung mit deren energetischen Wechselwirkungen in der Nutzungsphase nicht möglich ist. Die GWP(bio)-Methode bietet hierfür einen einfach umsetzbaren Ausweg. Dafür ist es notwendig, in Lebenszyklusanalysen zwischen fossilen und biogenen Emissionen zu unterscheiden und diese separat zu bilanzieren.

Exkurs: Statische Ökobilanzen und die ihnen zugrundeliegende Annahme eines „Szenarios ohne Klimaschutz“

Abschließend sollen an dieser Stelle die problematischen Annahmen und Randbedingungen der üblichen statischen Ökobilanzen aufgeführt werden:

- Die Annahme einer klimaneutralen Bereitstellung von Holz und sonstiger biogener Stoffe setzt sehr lange Betrachtungszeiträume voraus, die angesichts der eingetroffenen Klimakrise und der Dringlichkeit drastischer Klimaschutzmaßnahmen nicht angemessen erscheint.
- Die Bilanzierung des Kohlenstoffs im Sinne einer neutralen Ein- und Ausspeicherung ist keine geeignete Methode, um die unterschiedliche Klimawirksamkeit von energetischen und stofflichen Nutzungen abzubilden. Es werden Ansätze benötigt, die die Lebensdauer und Rotationsperioden der eingesetzten biogenen Rohstoffe angemessen berücksichtigen. Nur so können die Senkeneffekte mit hinreichender Richtungssicherheit ermittelt werden. Der GWP(bio)-Ansatz stellt hierfür eine vergleichsweise einfach zu implementierende Methode bereit.
- In den Ökobilanzen fehlt eine Berücksichtigung der besonderen Schutzanforderungen beim Bauen mit biogenen

Baustoffen. Weil diese feuchteempfindlich sind, sind hier besondere bauphysikalische Konzepte gegenüber Baufeuchte, Schlagregen, Luftleckagen (Luft- und Winddichtigkeit) und unzulässigen Wasserdampfdiffusionseinträgen zu entwickeln und zu realisieren. Erfolgt dies bei kritischen Konstruktionen (z.B. Flachdächern) nicht, ergeben sich sehr kurze Nutzungsdauern, die in etwa der mittleren Zersetzungszeit von Totholz im Wald entsprechen.

- Die Annahme kurzer Nutzungsdauern von Bauteilen und Technik in Verbindung mit einer Lebensdauer von nur 50 Jahren (z.B. BNB 2017) führt zu häufigen Ersatzmaßnahmen, die ein falsches Bild der eigentlichen Materialaufwendungen und damit verbundenen Emissionen ergeben. Eine materialsparende Reperatur (z.B. Tausch von Ventilatoren bei Lüftungsanlagen) ist nicht vorgesehen.
- Bei biogenen und sonstigen brennbaren Baustoffen wird am Ende der Nutzungsphase automatisch eine thermische Verwertung angenommen. Dies führt zu weiteren Verzerrungen und rechnerischen Emissionen, die aus Sicht des Klimaschutzes unbedingt vermieden werden müssen.
- Sowohl bei den Ersatz- und Erneuerungsmaßnahmen als auch bei den Gutschriften wird mit den heutigen Emissionskennwerten kalkuliert. Durch die fehlende Berücksichtigung der künftigen Dekarbonisierung der Material- und Energiebereitstellung wird hier ein „Szenario ohne Klimaschutz“ unterstellt, das so ganz sicher nicht eintreten wird und schon gar nicht wünschenswert ist. Daraus folgen fast zwangsläufig Fehloptimierungen bis hin zur Verhinderung der Umsetzung sinnvoller Klimaschutzstrategien.
- Die klimaschutzbezogenen Vorteile eines senken-, material- und energieeffizienten Holzbaus können mit den normgerechten Bilanzierungsmethoden und den darin getroffenen Annahmen, Randbedingungen nicht abgebildet werden. Am Ende wird damit auch die eigentlich beabsichtigte Zielsetzung, nämlich die Förderung zukunftsfähiger Bauweisen und der Kaskadennutzungen als Einstieg in eine biogene Kreislaufwirtschaft konterkariert.

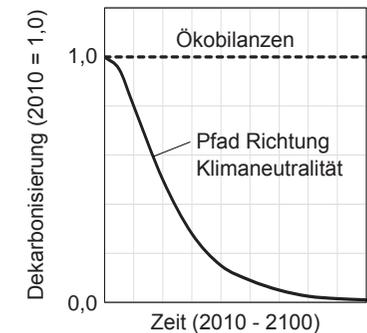


Abbildung 20: Schematischer Vergleich einer statischen Bilanzierung, wie dies in den nationalen Ökobilanzen der Fall ist, (mit: $D = 1 = \text{const.}$) im Gegensatz zu einer dynamischen Bilanzierung mit nahezu vollständiger Dekarbonisierung bis 2100 ($D = 0$). Es ist gut erkennbar, dass den Ökobilanzen ein „Szenario ohne Klimaschutz“ zugrundeliegt.

Dadurch werden in den Ökobilanzen die Emissionen deutlich überschätzt. Das beginnt bereits bei der Herstellung, weil die Ausgangsdaten i.d.R. veraltet sind und nicht mehr die aktuellen Emissionen widerspiegeln. Im weiteren Verlauf werden auch die Instandsetzungs- und Ersatzmaßnahmen weiterhin mit den Ausgangsdaten bilanziert. Ebenso werden bei der Entsorgung heutige Emissionswerte und nicht die künftigen verwendet. Handelt es sich um brennbare Baustoffe werden diese im Regelfall thermisch verwertet, was nochmals hohe Emissionen erzeugt. Auch bei der Energieversorgung werden heutige Emissionsfaktoren über die gesamte Nutzungsdauer verwendet. Das führt insbesondere bei allen stromgestützten Anwendungen zu völlig unrealistischen Ergebnissen.

Tabelle 20 a+b:
Verwendung von Holz im Baubereich im Hochbau im Jahr 2012 in Baukubikmeter-Äquivalenten.
a) nach Holzarten
b) Zuordnung zu Holzhalbwaren
Quelle: (Mantau et al. 2013)

Die statischen Ökobilanzen ignorieren auf fahrlässige Art die zeitliche Dynamik, die absolut notwendiger Bestandteil aller Klimaschutzkonzepte ist. Das betrifft einerseits die Dekarbonisierung der fossil gestützten Energie- und Materialbereitstellung und andererseits die zeitlichen Faktoren, die bei der Bildung von CO₂-Senken in biogen gestützten Baukonstruktionen zu berücksichtigen sind. Sie sind daher nicht in der Lage, Klimaschutzkonzepte für Gebäude bewerten zu können. Letztlich scheitern sie am eigenen Anspruch einer „ganzheitlichen Bilanzierung“, weil sie den Transformationsprozess, der ausgerechnet während der anvisierten Lebensdauer stattfinden müsste, nicht angemessen abbilden können.

Einsatz von Holz in 1000 m ³ (b)	Nadelholz		Laubholz		Tropenholz		Insgesamt	
	Summe	%	Summe	%	Summe	%	Summe	%
Eigenheime	2.979	88,7	324	9,7	54	1,6	3.356	100,0
Mehrfamilienhäuser	417	82,0	85	16,7	7	1,3	509	100,0
Modernisierungen	5.622	82,5	1.047	15,4	149	2,2	6.817	100,0
Wohnbau gesamt	9.018	84,4	1.456	13,5	209	2,0	10.683	100,0
Nichtwohnbau gesamt	2.458	90,2	239	8,8	28	1,0	2.726	100,0
Insgesamt	11.476	85,6	1.696	12,6	237	1,8	13.409	100,0

Einsatz von Holz- halbwaren in 1000 m ³ (b)	Wohnungsbau				Nichtwohnungsbau		Hochbau	
	Neubau		Modernisierung		gesamt		insgesamt	
	Summe	%	Summe	%	Summe	%	Summe	%
Schnittholz	2.386	61,7	3.779	55,4	1.914	70,2	8.079	60,2
Spanplatten	53	1,4	149	2,2	60	2,2	509	100,0
MDF-/HDF-Platten	52	1,3	734	10,8	34	1,2	6.817	100,0
OSB-Platten	158	4,1	129	1,9	204	7,5	10.683	100,0
LDF	637	16,5	1.090	16,0	175	6,4	10.683	100,0
Furnierholz	22	0,6	99	1,4	12	0,4	2.726	100,0
Sperrholz	47	1,2	83	1,2	24	0,9	13.409	100,0
Sonstiges	510	13,2	755	11,1	303	11,1	10.683	100,0
Insgesamt	3.866	100,0	6.818	100,0	2.725	100,0	13.409	100,0

6 Abschätzung der Potenziale des Bauens mit Holz und biogenen Materialien

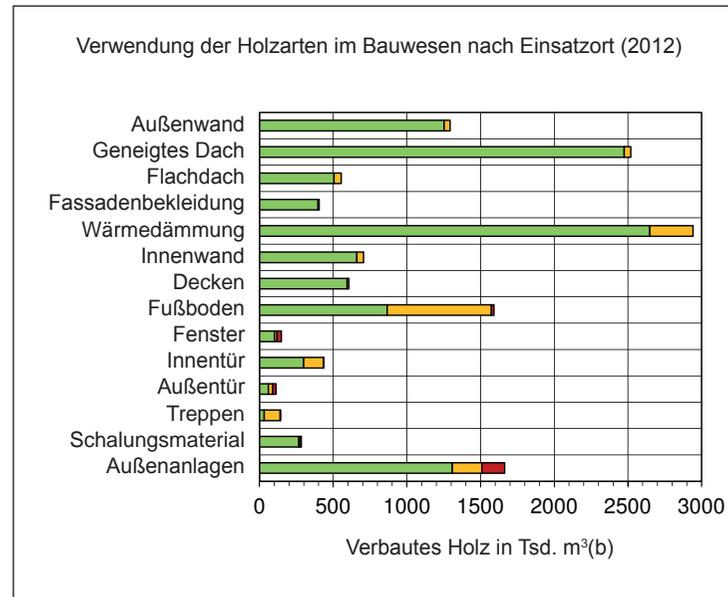
Der bisherige Einsatz von Holz im Baubereich macht nur etwa 10 - 15 % der Holznutzungen aus. Im Jahr 2012 wurden in Deutschland 13,4 Mio m³(b) und im Jahr 2015 16,4 Mio m³(b) Holzprodukte im Bausektor eingebaut (vgl. Mantau et al. 2013 und Mantau 2017). Die genannten Kubikmeter (m³(b)) entsprechen den im Gebäude eingebauten Volumen ohne Verschnitt und sonstige Verluste. Dieses entspricht ungefähr 0,16 - 0,20 m³/Pa. bzw. einer Kohlenstoffeinspeicherung von 40 - 50 kg_C/Pa bzw. einer äquivalenten CO₂-Speicherung in den Gebäuden von 0,13 - 0,20 t_{CO2}/Pa.

Zumindest für das Jahr 2012 liegen differenzierte Daten für die Verwendung im Hochbau vor, die Rückschlüsse auf die eingesetzten Holzarten und Holzhalbwaren zulassen (vgl. Mantau et al. 2013 und Tab. 20 a+b):

- Der Einsatz von Nadelholz ist mit ca. 85% dominierend. Laubholz hat einen Anteil von etwa 12,5 %
- Im Wohnungsbau erfolgte 80% des Holzeinsatzes, während im Nichtwohnungsbau 20 % verbaut wurden.
- Etwa 64 % der Holzverwendung entfallen auf die Modernisierung, 36 % auf den Neubau. Die Modernisierung im Wohnbau beansprucht am Ende alleine ca. 51 % des Holzeinsatzes im Hochbau.
- Schnittholz macht 60% der eingesetzten Holzmasse aus. Der Rest verteilt sich auf Holzwerkstoffe und Dämmungen.
- Erwartungsgemäß fällt der Schnittholzanteil bei Modernisierungen im Wohnbau mit 55 % geringer aus als mit etwa zwei Dritteln im Neubau.
- Der Einsatz von Holzfaserdämmungen machte ungefähr 1,5 Mio m³(b) pro Jahr aus. Hier sind viele Produkte erst seit wenigen Jahren marktverfügbar.
- Insgesamt kommen noch ca. 20 % Verschnitt hinzu, wodurch im Jahr 2012 der Verbrauch von Holzhalbwaren im Hochbau insgesamt 16,6 Mio m³ betrug.

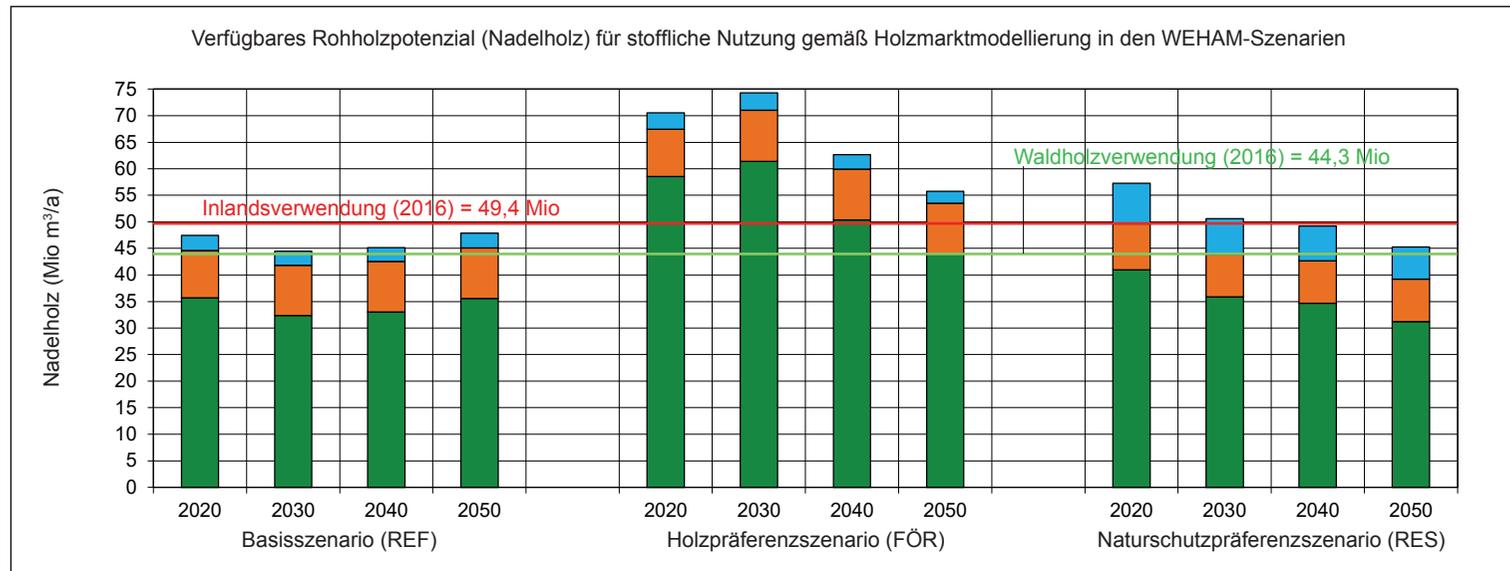
- Wurden im Jahr 2012 17 % der deutschen Eigenheime überwiegend in Holzbauweise errichtet, war dies bei Mehrfamilienhäusern nur bei etwa 2 % der Fall.

In Abb. 21 erfolgt nun eine Zuordnung des im Jahr 2012 im Hochbau verbauten Holzes auf die unterschiedlichen Einsatzorte im Gebäude (vgl. Mantau et al 2013). Im Bereich der langlebigen Hauptkonstruktionen (Außenwand, Dächer, Innenwände, Decken mit Nutzungsdauern von 60 - 120 Jahren) wird mit einem Anteil von fast 88% hauptsächlich Nadelholz eingesetzt. Hier findet zudem etwa 42 % des gesamten Holzeinsatzes im Hochbau statt. Holzbasierte Wärmedämmung macht 22% des eingesetzten Volumens aus. Fassadenbekleidungen und Fenster weisen zwar eine kürzere Lebensdauer von ca. 30 - 50 Jahren auf, weil sie der Witterung ausgesetzt sind, machen aber nur 5 % des verbauten Holzvolumens aus. Nur im Innenausbau (Treppen, Fußböden und Innentüren) findet sich ein höherer Anteil von Laubholz mit 43,8 % und dies in Verbindung mit kürzeren Nutzungsdauern von 15 - 40 Jahren. Hier werden 16 % des gesamten Holzvolumens verwendet. Nochmals kurz-



■ Nadelholz
 ■ Laubholz
 ■ Tropenholz

Abbildung 21: Verwendung von Holzsortimenten im Bauwesen im Jahr 2012 nach Einsatzorten. Angabe des im Bauwesen verbauten Holzes in 1000 m³(b). Quelle: (Mantau et al. 2013)



■ Totholz
 ■ Energieholz
 ■ Roh-Nadelholzpotenzial (stoffliche Nutzung)

Abbildung 22: Künftig verfügbares Nadelholzpotenzial für die stoffliche Nutzung (Rohholzbilanz) nach Abzug des im Wald verbleibenden Totholz und des Bedarfs für Energieholz. Die Werte wurden mittels Modellierung des Holzmarktes auf der Basis der drei WEHAM-Waldszenarien (Basis, Holzpräferenz und Naturschutzpräferenz) in Kombination mit den drei WEHAM-Holzverwendungsszenarien (REF, FÖR und RES) ermittelt. Quelle: (Schier/Weimar 2017, S. 27).

Holznutzungspotenziale (WEHAM - Waldszenarien für Deutschland)						
Derbholzverwendung in Deutschland 2016 (in Mio m ³)			Nadelholz		Laubholz	
Inlandverwendung	66,7	107,1 %	49,4	115,5 %	17,2	96,1 %
Außenhandelsaldo	4,2	6,7 %	5,1	11,5 %	- 0,7	- 3,9 %
Waldholznutzung	62,2	100,0 %	44,3	100,0 %	17,9	100,0 %
Mittleres Rohholznutzungspotenzial inkl. Totholz der WEHAM-Szenarien im Zeitraum 2013 - 2052 (in Mio m ³)						
Basisszenario - REF	66,0	106,1 %	43,0	97,1%	23,0	128,5 %
Holzpräferenzszenario - FÖR	95,8	154,0 %	62,0	140,0 %	33,8	188,8 %
Naturschutzszenario - RES	63,8	102,6 %	44,4	100,2 %	19,4	108,4%

Tabelle 21:
Vergleich der Derbholzverwendung im Jahr 2016 mit dem mittleren jährlichen Rohholznutzungspotenzial in WEHAM-Holzverwendungsszenarien unter Berücksichtigung des im Wald verbleibenden Totholzes. Dieses wurde in den WEHAM-Szenarien unterschiedlich hoch angesetzt (siehe auch Abb. 12.18).

Die Werte wurden mittels Modellierung des Holzmarktes auf der Basis der drei WEHAM-Waldszenarien (Basis, Holzpräferenz und Naturschutzpräferenz) in Kombination mit den drei WEHAM-Holzverwendungsszenarien (REF, FÖR und RES) ermittelt.

Quelle: (Schier/Weimar 2017).

lebiger ist der Einsatz von Holz als Schalungsmaterial und in Außenanlagen mit Nutzungsdauern von 5 - 20 Jahren. Dort werden knapp 15 % des produzierten Holzvolumens für den Hochbau eingesetzt, dominant Nadelholz. Nur in diesem Anwendungssektor spielt Tropenholz neben Fenstern und Fußböden eine gewisse Rolle. Insgesamt wird sichtbar, dass im Hochbau Holzprodukte vielfältige Anwendungen kennen. Die Verteilung zwischen Gebäudehülle, Innenausbau und Außenanlagen beträgt ca. 60 / 26 / 14 %.

Auch wenn die Untersuchung schon etwas länger zurückliegt und nur ein Momentbild vermittelt, lassen sich daraus einige relevante Schlüsse für den künftigen Holzbau ableiten:

- Der Wohnbau ist ein überaus wichtiges Anwendungsfeld für den Holzbau und damit für die stoffliche Holznutzung.
- In der bisherigen Wahrnehmung dominiert der Neubau, während in der gebauten Praxis die Modernisierungen ein deutlich höheres Gewicht haben.
- Auch im Massivbau und Mischbauweisen wird in relevantem Umfang Holz eingesetzt.

- Dämmstoffe aus Holzwerkstoffplatten haben eine zunehmende Bedeutung.
- Insgesamt dominiert im Hochbau der Einsatz von Nadelholz. Tropenholz spielt eine untergeordnete Rolle. Laubholz könnte künftig eine größere Rolle spielen.
- Die Einsatzmöglichkeiten von Holzprodukten im Hochbau sind besonders vielfältig. Für die Bestimmung des Gesamtpotentials sollte nicht alleine die Tragstruktur, sondern auch nicht-tragende Fassaden und Wände, Fassadenbekleidungen, Fenster und Türen sowie der Innenausbau mit berücksichtigt werden.

Künftig verfügbare Holzpotentiale für den Holzbau

Eine entscheidende Frage für eine Ausweitung der stofflichen Nutzung im Wohnungsbau ist, inwieweit geeignetes Holz für den Hochbau künftig verfügbar ist. Hierbei spielen die Art und Weise der Waldbewirtschaftung und die künftige Waldentwicklung eine entscheidende Rolle. Über eine Modellierung des Holzmarktes wurde in (Schier/Weimar 2017) das künftige Nadelrohholzaufkommen im Zeitraum 2020 - 2050 ermittelt und der entsprechenden Waldholz- und Inlandsverwendung im Jahr 2016 gegenübergestellt (siehe Abb. 22 und Tab. 21). Anders als in Tab. 5 ist hier der Totholzverbleib im Wald jeweils abgezogen, wodurch sich die Potentiale vor allem im Naturschutzpräferenzszenario spürbar verringern. Auf der Basis der schon vorgestellten WEHAM-Szenarien wurden hier drei mögliche Entwicklungen der Waldbewirtschaftung und Holznutzung gegenübergestellt. Dabei wurden die bereits vorgestellten WEHAM-Waldbehandlungsszenarien (Basis, Holzpräferenz und Naturschutzpräferenz) mit drei Holzverwendungsszenarien kombiniert (vgl. Schier/Weimar 2017, S. 7):

REF: Das Holzreferenzszenario geht von einer Steigerung der stofflichen Nutzung aus, während gleichzeitig die energetische Nutzung zurückgeht.

FÖR: Im Holzförderszenario steigt die stoffliche Nutzung stark an und gleichzeitig wird eine moderate Steigerung der energetischen Nutzung unterstellt.

RES: Das Holzrestriktionsszenario modelliert nur eine leichte Steigerung der stofflichen Nutzung, während die energetische Nutzung stark zurückgeht.

Die Totholz mengen, die im Wald verbleiben, unterscheiden sich in den Szenarien erheblich. Während im Basisszenario im Zeitraum 2013 - 2050 im Mittel 2,7 Mio m³/a Nadelholz und 1,7 Mio m³/a Laubholz als Totholz im Wald verbleiben, steigen diese Werte im Naturschutzpräferenzszenario auf 6,8 Mio m³/a Nadelholz und 4,5 Mio m³/a Laubholz auf mehr als das Doppelte. Im Holzpräferenzszenario liegen die Totholzwerte mit 2,7 Mio m³/a und 1,8 Mio m³/a ähnlich hoch wie im Basisszenario.

In Bezug auf die Waldholznutzung im Jahr 2016 lässt sich im Basis- und Naturschutzpräferenzszenario auch künftig ein im Betrachtungszeitraum in etwa gleichbleibendes Rohholznutzungspotenzial erschließen. Im Holzpräferenzszenario ergibt sich hingegen eine Steigerung um mehr als 50 %. Nimmt man die Inlandsverwendung im Jahr 2016 als Vergleichsmaßstab besteht beim Naturschutzpräferenzszenario hingegen bereits ein geringer Netto-Importbedarf in Höhe von etwa 4 %. Bei den für den Holzbau entscheidenden Nadelholzpotenzialen ergibt sich ein davon abweichendes Bild:

- Im Holzpräferenzszenario (HPS-FÖR) lässt zumindestens bis 2040 ein gleichbleibender Nadelholzbedarf ohne Netto-Importe abdecken.
- Im Basis- (BAS-REF) und im Naturschutzpräferenzszenario (NPS-RES) ist dies jedoch nicht der Fall.

In den Holzverwendungsszenarien wurden darüberhinaus auch der künftige Holzeinsatz modelliert, der gegenüber dem Jahr 2016 jeweils eine szenarienabhängige Dynamik aufweist. Von besonderem Interesse ist hierbei der Verbrauch von Nadel-schnittholz, der sich als Leitindikator für die künftigen Holzverfügbarkeit im Hochbau eignet (siehe Abb. 23):

- In allen Szenarien wird im Zeitraum 2013 - 2050 von einem ansteigenden Nadelholzverbrauch ausgegangen. Hierbei

ist die unterschiedliche Skalierung der y-Achse zu beachten.

- Im Basisszenario wird eine vergleichsweise moderate Steigerung des Nadel-schnittholzverbrauchs in Höhe von ca. 50 % angenommen.
- Besonders stark fällt dieser Anstieg mit einem Faktor von ca. 2,5 im Holzpräferenzszenario aus.
- Differenzierter ist der Verlauf im Naturschutzpräferenzszenario. Bis zum Jahr 2030 erhöht sich der Nadel-schnittholzverbrauch um etwa 50 % um danach auf diesem Niveau zu verbleiben.

Gleichzeitig bleibt die Produktion von Nadel-schnittholz auf einem in etwa gleichbleibenden Niveau von ca. 21,5 Mio m³/a. Die grauen Flächen in Abb. 12.20 zeigen den Netto-Importbedarf an, der sich in den drei Szenarien ergibt. Im Basisszenario belaufen sich die Netto-Importe im Zeitraum 2013 - 2050 auf ca. 220 Mio m³. Im Holzpräferenzszenario sind die Netto-Importe mit Abstand am höchsten und summieren sich im Betrachtungszeitraum auf ca. 600 Mio m³. Die Netto-Importe im Naturschutzpräferenzszenario liegen mit ca. 390 Mio m³ dazwischen.

Direkte Schlüsse auf die künftigen Holzbaupotenziale für den Holzbau können aus der bis hier erfolgten Analyse nicht gezogen werden. Um hier mit allen notwendigen Vorbehalten zu einem abschließenden Fazit zu gelangen, sind folgende Punkte diskussionswürdig:

- In den drei Holzverwendungsszenarien unterscheidet sich der Energieholzeinsatz nur geringfügig voneinander (siehe hierzu Tab. 3.2 und 3.3 in Schier/Weimar 2017, S. 23 f.). In den Szenarien dieser Arbeit zu den energiebedingten Emissionen der Wohngebäude im Betrieb wurde herausgearbeitet, dass hier ganz erhebliche Einsparpotenziale bestehen (siehe Abb. 11). Gegenüber dem Stand heute ist alleine durch Verbesserungen der Energieeffizienz eine Halbierung der Emissionen der energetisch genutzten Bio-für die Wohnnutzungen bis 2060 bzw. 2070 erreichbar.

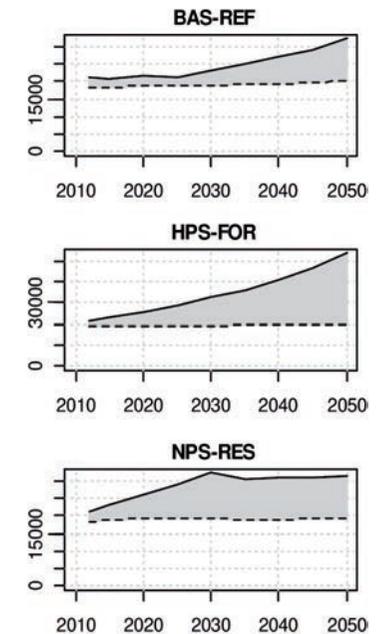


Abbildung 23: Ergebnisse der Rohholzmodellierung zu Verbrauch (durchgezogene Linien), Inlandsproduktion (gestrichelte Linien) und Bedarf an Netto-Importen (graue Flächen) von Nadel-schnittholz in den drei Holzverwendungsszenarien. Angabe der Werte für Deutschland in 1000 m³. In allen Szenarien besteht ein Netto-Importbedarf. Dieser ist im Holzpräferenz-FOR-Szenario am größten und stetig zunehmend (unterschiedliche Skalierung beachten!). Im Naturschutzpräferenz-RES-Szenario endet der Zuwachs im Jahr 2030 um danach auf diesem Niveau zu verbleiben. Quelle: (Schier/Weimar 2017, S. 37).

- IST-Entwicklung 2000 - 2021
- ▲ Klimaneutralität 2050
- Klimaschutz-Plus-Entwicklung
- Referenz-Entwicklung

Abbildung 24:
Entwicklung der Holzbauquote im Wohnungsneubau im Zeitraum 2000-2021 und Projektion der künftigen Holzbauquoten in drei Entwicklungen. Für die IST-Entwicklung wurden die statistischen Erhebungen (Statistikbögen) der Baugenehmigungen nach dem Anteil der Gebäude mit überwiegender Baustoff Holz ausgewertet. Die Projektionen wurden vom Autor modelliert. Informativ sind unten die jährlichen Neubau-Wohnflächen im Zeitverlauf 2020 - 2050 angegeben. Quelle: (Statista 2023)

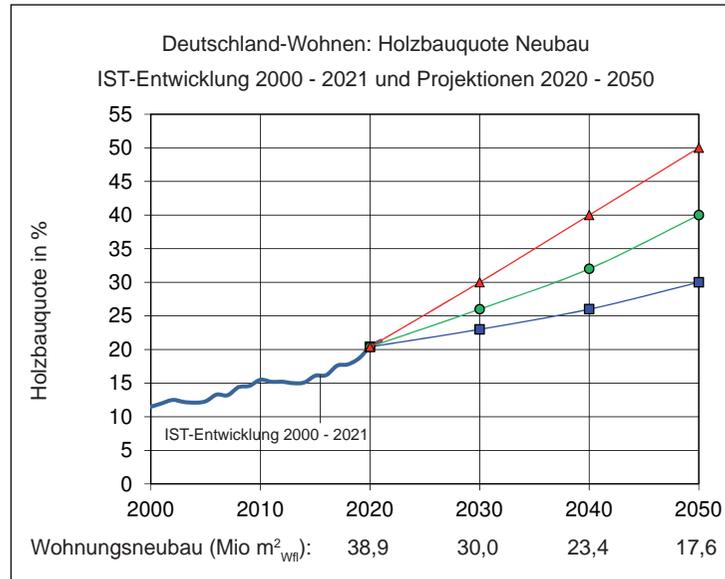


Tabelle 22:
Holzbauquote im Wohnungsneubau für die Jahre 2012, 2018 und 2021 getrennt für Einfamilienhäuser (EFH) und Mehrfamilienhäuser (MFH). Quelle: (Statista 2023)

Holzbauquote Deutschland			
	2012	2018	2021
EFH	16,6	20,3	23,1
MFH	2,1	3,2	4,5
Gesamt	15,2	17,8	21,3

- Der Holzbau selber kann einen entscheidenden Beitrag zur Steigerung der Energieeffizienz beitragen, indem dieser künftig immer in hoher anstelle mittlerer energetischer Qualität ausgeführt wird. Dies betrifft den Neubau und in perspektivisch noch größerem Umfang energetische Modernisierungen. Die hiervon betroffenen Hüllbauteile weisen i.d.R. zudem hohe Nutzungsdauern auf, wenn sie gute Schutzkonzepte aufweisen, z.B. indem diese als hinterlüftete Konstruktionen ausgeführt werden.
- Auch im Hinblick auf die künftigen Holznutzungen ist es daher sinnvoll, Gebäude und deren Baukonstruktionen sowie Versorgungssystemen als integralen Bestandteil des Energiesystems zu interpretieren.
- Gelingt es, den Gebäudepark mit dem gezielten Einsatz von Holz und Nawaros hin zu einem höheren energetischen Standard zu transformieren, können sowohl die energie- und materialbezogenen Emissionen reduziert und durch die gleichzeitig erfolgende langlebige Speicherung von Kohlenstoff in den Hüllkonstruktionen eine Vergröße-

rung der CO₂-Senke im Holzproduktespeicher erreicht werden (sog. Kombinationsstrategie).

- Bereits mittelfristig vergrößert sich dadurch das verfügbare Holzpotenzial für weitere stoffliche Nutzungen. Hier liegt also ein sich selbst verstärkender Effekt vor.
- Von besonderer Bedeutung hierfür ist die Anwendung von Holz und Nawaros in hochwärmedämmten Konstruktionen bei energetischen Modernisierungen.
- Das Naturschutz-Präferenzszenario erscheint nicht alleine aus der Perspektive des ohnehin notwendigen Waldumbaus (vgl. Bolte et al. 2021) und der Berücksichtigung von Biodiversitätsaspekten (z.B. Ausweisung neuer Schutzgebiete) das zu bevorzugende und wahrscheinlichere Waldentwicklungsszenario darzustellen. In Verbindung mit dem Holzrestriktionsszenario ergibt sich eine künftige Holzverwendung, die in deutlich besserer Übereinstimmung mit den Klimaschutzzielen und Nachhaltigkeit steht, als die beiden anderen Varianten. Dazu mehr im Abschnitt 9.

Steigerung der Holzbauquote

In letzter Zeit wird verstärkt diskutiert, inwieweit der Holzbau in Deutschland größere Marktsegmente erschließen kann, um damit einen zusätzlichen Beitrag zum Klimaschutz und zur CO₂-Senkenbildung zu leisten. Wie die Statistik zu den Neubauten mit überwiegender Baustoff Holz zeigt, ist dieser Prozess bereits seit längerem im Gange (siehe IST-Entwicklung in Abbildung 24 und Tabelle 22). Unklar ist, ob hierbei auch Neubauten im Holzhybridbau miteingefasst sind, die in letzter Zeit gerade bei Mehrfamilienhäusern immer häufiger realisiert werden. Die Projektionen bis 2050 in Abb. 24 stammen vom Autor. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass der Wohnungsneubau künftig in seinem Umfang deutlich abnehmen wird. Das bedeutet, dass nur bei der hohen Projektion („Klimaneutralität 2050“) eine Netto-Zuwachs an Wohnflächen in Gebäuden mit überwiegender Holzbauweise zu verzeichnen ist. In den anderen Szenarien tritt hingegen eine Stagnation bzw. ein leichter Rückgang ein. Für die Modernisierung existieren derartige Daten nicht, wobei

hier vermutet werden kann, dass in diesem Anwendungsfeld bereits heute in einem deutlich höherem Umfang als im Neubau Holz zum Einsatz kommt (siehe Tab. 20 a+b). Hier liegt also künftig das größte Potenzial für eine Ausweitung der Holznutzung. Ursache ist u.a. der vorliegende Sanierungsstau, insbesondere bei den energetischen Modernisierungen, der eine bedeutende Herausforderung für die erfolgreiche Umsetzung des künftigen Klimaschutz darstellt.

Substitutionseffekte durch Holzprodukte und Holzbau

Sofern man ein nicht-biogenes bzw. konventionell hergestelltes Material durch ein Holz- bzw. Recyclingprodukt ersetzt, ergibt sich i.d.R. eine Minderung der Treibhausgasemissionen oder des Primärenergieeinsatzes. In Berechnungen zu den materialbedingten Treibhausgasemissionen („grauen Emissionen“) oder Primärenergieaufwänden („grauen Energie“) wird der Substitutionseffekt direkt sichtbar, wenn man die betrachtete Konstruktion mit der konventionellen Alternative vergleicht. Darin drückt sich der bilanzielle Vorteil der gewählten Konstruktionsvariante aus. Es ist jedoch nicht immer einfach eine repräsentative Referenzkonstruktion zu bestimmen, die in allen Aspekten eine vollwertige funktionelle Übereinstimmung (z.B. im Hinblick auf Wärme-, Schall- und Feuchteschutz sowie Nutzungsdauer) aufweist. Dies ist aber für einen Vergleich unter „Ceteris-paribus“-Bedingungen notwendig.

Die Kalkulation von Substitutionseffekten gehört bilanztechnisch in den Bereich der Gutschriften. Hier ist immer Vorsicht geboten, weil deren mißbräuchliche Anwendung in vielen Bereichen (z.B. Bewertung von Fernwärme und Photovoltaik in Energiebilanzen) zu einer starken Verzerrung der tatsächlichen Verhältnisse führt, die oftmals nur erkennbar wird, wenn man statt des isolierten Prozesses das Gesamtsystem (in diesem Fall das Energiesystem) betrachtet. Ein besonderes Problem hierbei ist die quasi unendliche Anrechnung der Gutschriften, obwohl unmittelbar erkennbar ist, dass der aufgezeigte Vorteil einer zeitlichen Dynamik unterliegt und perspektivisch

immer kleiner wird (gilt z.B. für die Kraft-Wärmekopplung und Photovoltaik). Eine bilanztechnische Berücksichtigung dieser Veränderungen kann nur szenariengestützt erfolgen, was einen hohen Aufwand bedeutet und daher häufig unterbleibt. Die hier kurz angerissenen Probleme der Gutschriftmethoden gelten auch für die Bewertung von Materialien, Konstruktionen und Gebäuden. Dies nicht zuletzt, weil bei der Materialbereitstellung Energieprozesse eine große Rolle spielen.

Bei der Kalkulation der Substitutionswirkungen von Holzprodukten kommen zwei unterschiedliche Ansätze in Frage:

- 1 Anwendung von pauschalen Gutschriften in Höhe der durchschnittlichen Emissionsminderungen über die ganze Produktpalette hinweg oder gegliedert in unterschiedliche Anwendungsbereiche (z.B. Energie, Konstruktion, Innenausbau). Diese Werte werden dann als repräsentative Werte auch im besonderen Einzelfall verwendet.
- 2 Man unterzieht sich der Mühe, und kalkuliert den konkreten Einzelfall eines Holzproduktes oder eines Holzhauses und führt dies parallel für die jeweilige konventionelle Alternative durch. Die Werte für (1) werden i.d.R. über die Auswertung vieler repräsentativer Fälle aus (2) generiert.

Beim Ansatz (1) wird der Substitutionseffekt zumeist über einen Faktor ausgedrückt, der folgendermaßen berechnet wird (vgl. Sathre/O'Connor 2010, S. 107):

$$SF = (GHG_{\text{non-wood}} - GHG_{\text{wood}}) / (WU_{\text{wood}} - WU_{\text{non-wood}})$$

mit:

SF = Substitutionsfaktor (Einheit: kg_c/kg_c oder t_c/t_c)

$GHG_{\text{non-wood}}$: Treibhausgasemission des Nicht-Holz-Produkts

GHG_{wood} : Treibhausgasemission des Holz-Produkts

$WU_{\text{non-wood}}$: Holz-Masse des Nicht-Holz-Produkts

WU_{wood} : Holz-Masse des Holz-Produkts

Sowohl die Treibhausgasemissionen als auch die Holzmasse beziehen sich auf die Kohlenstoffäquivalente der Emissi-

Substitutionsfaktoren			
	REF	KS+	KN
2010	2,1	2,1	2,1
2020	1,7	1,7	1,7
2030	1,3	1,1	0,8
2040	1,0	0,6	0,4
2050	0,6	0,3	0,1
2060	0,4	0,2	0,1
2070	0,2	0,1	0,0

Tabelle 23:

Versuch einer Dynamisierung der Substitutionsfaktoren auf Basis des Durchschnittswerts von 2,1 nach (Sathre/O'Connor 2010) als Ausgangswert für das Jahr 2010. Die Dynamisierung erfolgt mit Hilfe der Dekarbonisierungsfaktoren der Abb. 12. Die Anwendung des Orientierungswertes für 2040 gemäß (Alig et al. 2020) in diesem Kontext wird dadurch erleichtert, dass der Durchschnittswert aller dort betrachteten Baumaterialien mit 0,65 exakt mit denjenigen für Holz (BSH) übereinstimmt.

Es sind aber auch andere Entwicklungen denkbar, in denen z.B. am Ende nicht bis 2070 - 2100 Klimaneutralität hergestellt ist, sondern die Annäherung an einen Sockelbetrag (z.B. das Niveau der prozessbedingten Emissionen von Zement aller Stahlbetonkonstruktionen inkl. eines Restbetrag aller sonstigen Baukonstruktionen) erfolgt.

Legende (mit Bezug zu den Dekarbonisierungsfaktoren Abb. 12):

REF: Referenzentwicklung

KS+: Klimaschutz-Plus-Entwicklung

KN: Klimaneutralität 2050

Indikator	Referenz	Alternativzenario 1		Alternativzenario 2	
		a	b	a	b
Holzbedarf (Mio. m ³ /a)	44,23	+ 0,43	+ 0,86	+ 1,92	+ 3,90
Kohlenstoffspeicherung (Mio. t _{CO2-e} /a)	-0,96	- 0,15	- 0,28	- 0,65	- 1,25
Substitutionswirkung (Mio. t _{CO2-e} /a)	11,31	- 0,19	- 0,38	- 0,78	- 1,59
Pro-Kopf-Werte (bezogen auf mittlere Bevölkerung 2016 - 2030 = 83,4 Mio.)					
Holzbedarf (m ³ /Pa)	0,530	+ 0,005	+ 0,010	+ 0,023	+ 0,046
Kohlenstoffspeicherung (t _{CO2-e} /Pa)	-0,012	- 0,002	- 0,003	- 0,008	- 0,015
Substitutionswirkung (t _{CO2-e} /Pa)	0,136	- 0,002	- 0,005	- 0,009	- 0,019

Tabelle 24:
Jahresdurchschnittliche Werte für den Industrie- und Stammholzbedarf, die biogene Kohlenstoffspeicherung und die stoffliche Substitutionswirkung für drei Szenarien mit unterschiedlicher Holzbauquote im Wohnungsneubau. Zu beachten ist, dass sich die Werte für das Referenzszenario nicht auf den Wohnungsneubau sondern auf alle Anwendungen in Deutschland beziehen. Die Werte für die Alternativszenarien sind als Differenzwerte zum Referenzszenario zu verstehen. Weitere Erläuterungen: siehe Text. Quelle: (Hafner et al. 2017, S. 71)

onen bzw. der im Produkt vorhandenen Holzmasse. Die Kohlenstoffäquivalente der Treibhausgasemissionen werden mit dem Faktor 12/44 aus den CO₂-Äquivalent-Emissionen ermittelt. Der Kohlenstoffanteil von Holz wird mit 50 % des getrockneten Holzes (Holzfeuchte:15-Massen%) und der Annahme eines spezifischen Gewichts von 500 kg/m³ kalkuliert. Der Substitutionsfaktor gibt an, wie groß die zusätzliche Emissionseinsparung bezogen auf den Kohlenstoffanteil des Produkts in kg_C/kg_C bzw. t_C/t_C ausfällt. Durch diese allgemeine Form kann dieser für alle möglichen Anwendungen bestimmt werden und ermöglicht einen direkten Vergleich unterschiedlicher Holzverwendungen. In der schon erwähnten Metastudie wurden die Substitutionsfaktoren einer Vielzahl von Studien ausgewertet bzw. neu bestimmt. Als Durchschnittswert für die stoffliche Holznutzung im Vergleich zu konventionellen Alternativprodukten wird ein Wert von 2,1 genannt. Die Bandbreite reicht von -2,3 bis 15, wobei die Mehrzahl der Werte zwischen 0,4 bis 6,0 zu liegen kommt mit einer Häufung zwischen 1,0 und 3,0 (vgl. Sathre/O'Connor 2010, S. 107).

Eine jüngere Veröffentlichung wirft - ebenfalls in Form einer Metastudie - einen eher kritischen Blick auf die bisherige Methodik der Ermittlung von Substitutionsfaktoren (Myllyviita et al. 2021, S. 3 und S.14 f.):

- Momentan existieren keine allgemein anerkannten Regeln, wie Substitutionsfaktoren ermittelt werden sollen.
- In der überwiegenden Zahl der geprüften Studien wird nur beschrieben, wie hoch die vermiedenen fossilen Emissionen ausfallen. Damit können sie aber keine Aussage zur Klimawirksamkeit der Verwendung von Holz treffen.
- Falls bei der Berechnung der Substitutionsfaktoren auch die Flüsse des biogenen Kohlenstoffs berücksichtigt werden, sollte dies folgende Prozesse beinhalten:
 - Änderungen der Kohlenstoffvorräte im Wald
 - Änderungen des Holzproduktespeichers
 - Einbeziehung der Nach-Nutzungsprozesse, weil diese i.d.R. mit der Freisetzung des biogenen Kohlenstoffs verbunden sind (z.B. energetische Verwertung).
- In den meisten Studien wird angenommen dass sich die Substitutionsfaktoren in Zukunft nicht ändern, obwohl offensichtlich ist, dass bei einem erfolgreichen Klimaschutz die energiebedingten Emissionen und damit auch diejenige der Holz- und Referenzprodukte rapide sinken werden.
- Recycling und Kaskadennutzungen werden als wichtige Bestandteile der Kreislaufwirtschaft zu einem Absinken der künftigen materialbedingten Emissionen führen.

In einer weiteren Veröffentlichung (Leturcq 2020) wurde untersucht, ob der Einsatz von Holzprodukten automatisch einen Substitutionseffekt erzeugt. Neben der Infragestellung der klimaneutralen Bereitstellung spielen hier auch die Marktbedingungen eine Rolle. Denn nur wenn es dadurch gelingt, die Einsatz von Nicht-Holzprodukten tatsächlich zu verringern, könnte man von einer Netto-Substitution sprechen. Angesichts der stetigen größer werdenden Nachfrage an Bauprodukten kann derzeit jedoch nicht von einem Ersatz sondern bestenfalls von einer Befriedigung der Nachfrage mit emissionsärmeren Produkten gesprochen werden. Die Emissionen der Holzprodukte sind gemäß dieser Logik zu den Emissionen der Nicht-Holzprodukte hinzuzuaddieren. Dies gilt insbesondere für die energetischen Nutzungen.

Eine ausführliche Studie für Deutschland aus dem Jahr 2017 untersuchte die Möglichkeiten einer Vergrößerung des Anteils von Holzgebäuden im Zeitraum 2016 - 2030 (vgl. Hafner et al. 2017). Auf der Basis von normkonformen Ökobilanzen (4) wurden dort zunächst die Substitutionspotenziale des Holzbaus im Vergleich zum Massivbau anhand repräsentativer und funktionell gleichwertiger Wohnbauten im Hinblick auf das Global-Warming-Potential untersucht. In diesem Vergleich wurden Keller, Tiefgaragen und Außenanlagen jedoch nicht berücksichtigt, obwohl diese einen bedeutenden Sockelbeitrag zu den materialbedingten Emissionen stellen. Daher ist zu erwarten, dass die Substitutionseffekte in der Tendenz deutlich überschätzt werden. Mischbauweisen (z.B. Holzhybridbau) wurden nicht in die Betrachtungen einbezogen, obwohl diese (künftig) gerade bei Mehrfamilienhäusern ein bedeutendes Anwendungsfeld darstellen.

Die Ergebnisse wurden in Form von Substitutionsfaktoren SF_G mit der Einheit kg_{CO_2-e}/kg_{CO_2-e} für Gebäude (mit den o.g. Einschränkungen) angegeben. Diese drücken die Emissionsminderung der Holzbauvariante im Vergleich zur gleichwertigen Massivbauvariante aus (vgl. Hafner et al. 2017, S. 59):

- Der Wertekorridor für die Hauptkonstruktionen beträgt bei Einfamilienhäusern $SF_G = 0,35 - 0,56$ und bei den Mehrfamilienhäusern $SF_G = 0,09 - 0,48$ kg_{CO_2-e}/kg_{CO_2-e} .
- Für die Ausbaugewerke wurden Substitutionsfaktoren von 0,17 - 0,27 bei Einfamilienhäusern und von 0,18 - 0,31 bei den Mehrfamilienhäusern errechnet. Ohne Fassadenbekleidungen liegen die Werte um 0,06 - 0,07 niedriger.

Die materialbedingten Emissionen können somit durch die Holzbauweise in den Hauptkonstruktionen (ohne Keller, Tiefgaragen, Innenausbau und Außenanlagen usw.) im Vergleich zum konventionellen Massivbau um 9 - 56 % verringert werden. Durch den konsequenten Einsatz von Holz im Innenausbau und als Fassadenbekleidung sind weitere Einsparungen möglich, die allerdings auch im Massivbau umsetzbar wären.

Die Auswertung von (Mantau et al. 2013) lässt den indirekten Schluss zu, dass auch im klassischen Massivbau - und hier insbesondere bei den Einfamilienhäusern - in spürbarem Umfang Holz verbaut wird. Im Grunde könnte man hier die Aussage treffen, dass alle Gebäude mehr oder weniger ausgeprägt als Holzhybridbauten ausgeführt werden. Bei den überwiegend aus Holz gebauten Gebäuden sind in fast allen Fällen wenigstens die Bodenplatte bzw. die Keller und Tiefgaragen im Massivbau hergestellt, während viele Massivbauten gleichwohl Holzkonstruktionen (typischerweise Dächer) aufweisen. Die Ausweitung des Holzbaus hauptsächlich in den klassischen Holzbauten zu sehen, stellt daher nur eine der Möglichkeiten dar und lässt das große Potenzial der Mischbauweisen unberücksichtigt. Bei den ebenfalls nicht betrachteten Modernisierungen sind weitere noch erheblich größere Holzbaupotenziale vorhanden (siehe Tab. 20 a+b).

Im zweiten Teil wird anhand von Szenarien untersucht, inwieweit durch eine Steigerung der Holzbauquote im Neubau im Zeitraum 2016 - 2030 eine Minderung der nationalen Treibhausgasemissionen stattfinden könnte. Die Methodik unterscheidet sich vom ersten Teil, indem hier anstelle der Ökobilanzen ein Modell Anwendung findet, das die Substitutions- und die Kohlenstoffspeichereffekte mit dem auch für nationale Berichterstattung gemäß der Klimarahmenkonvention (UNFCCC) und dem Kyoto-Protokoll verwendeten Computerprogramm „WoodCarbonMonitor“ (Rüter 2017) kalkuliert.

Abweichend von nationalen THG-Berichterstattung für den LU-LUCF-Sektor wird hier der sog. „stock-change“-Ansatz eingesetzt, durch den alle verwendeten Holzprodukte anhand ihres rechnerischen Verbrauchs und ihren Wirkungen als Quelle bzw. Senke bilanziert werden können. Gegenüber dem Referenzszenario können so zusätzlich zu den Speichereffekten auch die Substitutionswirkungen des erhöhten Holzeinsatzes in den anderen Szenarien abgebildet werden (vgl. Hafer et al. 2017, S. 66). Für die gesamte Wohnbauentwicklung wurde die

Kumulierte THG-Emissionen Neubau Wohnen 2020-2030			
	REF	KS	KS +
2015	0,0	0,0	0,0
2020	72,0	72,0	72,0
2025	179,1	166,4	159,0
2030	306,7	249,0	230,7
Minderung	0,0	-57,7	-75,0

Tabelle 25:
Kumulierte Treibhausgasemissionen der Neubauten im deutschen Wohnbau im Zeitraum 2020 - 2030. Angegeben sind die energiebedingten Emissionen im Betrieb (Heizen, Lüften, Warmwasser und sämtliche Stromwendungen in den Haushalten) in Mio t/a CO₂-Äquivalenten im Referenz (REF)- Klimaschutz (KS)- und im Klimaschutz-Plus (KS+)-Szenario. Unten sind die Minderungsbeträge der beiden Klimaschutzenszenarien im Vergleich zum Referenzszenario angegeben.

- Wald
- Holzprodukte
- Gesamtwert Wald + Holz

Abbildung 25:
Netto-Treibhausgasemissionen der WEHAM-Szenarien für den Wald und den Holzproduktespeicher im 5-Jahresmittel 2016 - 2050.

- B: Basisszenario
(Ø 2016 - 2050 = -20,6 Mio t/a)
- H: Holzpräferenzszenario
(Ø 2016 - 2050 = -4,5 Mio t/a)
- N: Naturschutzpräferenzszenario
(Ø 2016 - 2050 = -29,4 Mio t/a)

Quelle: (Rüter et al. 2017, S.31)

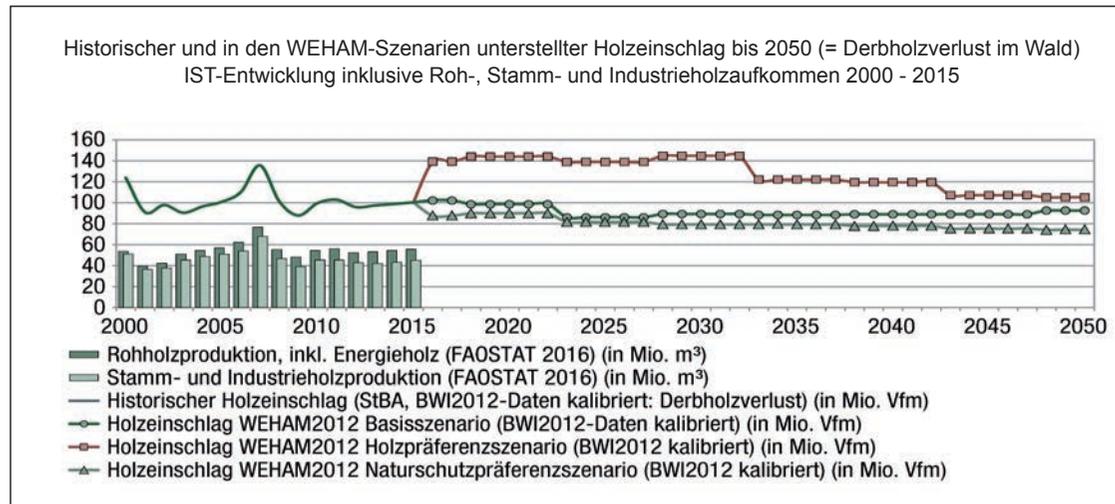
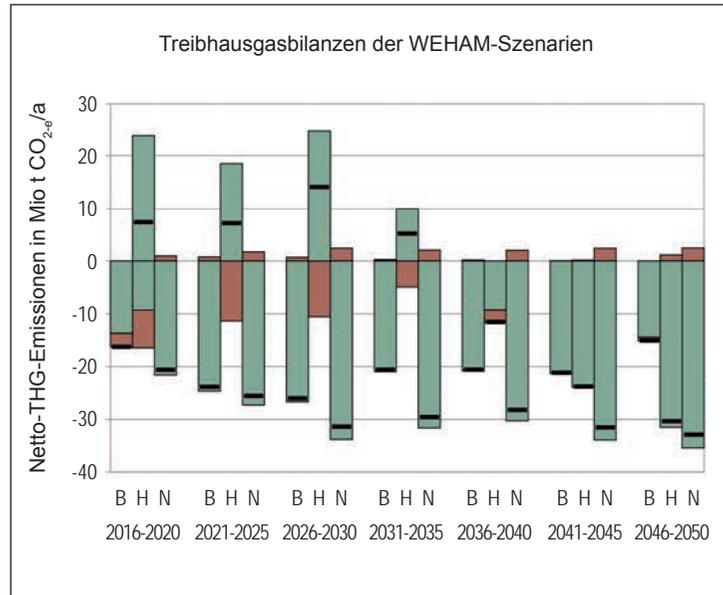


Abbildung 26: IST-Entwicklung des historischen Holzeinschlags und künftig unterstellter Holzeinsatz in den drei WEHAM-Szenarien bis 2050 in Mio Voratsfestmeter. Für die Jahre 2000 - 2015 sind ferner die Rohholzproduktion inklusive Energieholz und die Stamm- und Industrieholzproduktion in Mio m³ angetragen. Quelle: (Rüter et al. 2017, S.30).

Wohnungsmarktprognose 2030 (BBSR 2015) zugrundegelegt, die auch in dieser Arbeit Verwendung findet. Es wurden zwei Alternativszenarien entwickelt:

- 1 Einhaltung der Holzbauquote für Ein- und Zweifamilienhäuser (26 %) sowie für Mehrfamilienhäuser (1,9%), wie in dem Bundesland mit der höchsten Holzbauquote in den Jahren 2011-2015 für Gesamtdeutschland.
- 2 Erzielen einer Holzbauquote in Höhe von 55 % für Ein- und Zweifamilienhäuser sowie von 15 % für Mehrfamilienhäuser nach schwedischem Vorbild.

Zusätzlich wurden zwei Umsetzungsvarianten gerechnet:

- a Kontinuierliche Steigerung der Holzbauquote ausgehend vom IST-Zustand bis zu den Zielquoten im Jahr 2030.
- b Sofortige Steigerung der Holzbauquote auf die definierten Zielquoten ab 2016 und danach gleichbleibend bis 2030 im Sinne einer realitätsfernen Sprungfunktion.

Ausgewiesen werden der Stamm- und Industrieholzbedarf, die biogene Kohlenstoffspeicherung sowie die stoffliche Substitutionswirkung (siehe Tab. 24). Über den gesamten Projektionszeitraum von 2016 bis 2030 kann bei den tatsächlich umsetzbaren Szenarien 1a und 2a durch die dort stattfindende verstärkte Holzverwendung im Wohnungsneubau mit klimapositiven Effekten zwischen -5,0 und -21,5 Mio t CO₂-Äquivalenten gerechnet werden (5).

Die Auswirkungen eines verstärkten Holzeinsatzes im Zeitraum von 15 Jahren bis 2030 sind im Vergleich zu den gesamten Treibhausgasemissionen für Baumaterialien und Bauprozesse für Wohngebäude in Höhe von ca. 65 Mio t bzw. ca. 0,8 t/Pa im Jahr 2014 (abgeleitet für den abgeschätzten Anteil der Wohngebäude aus BBSR 2015, S.17) jedoch relativ gering und liegen im Bereich zwischen 0,5 und 4,7 Prozent. Vergleicht man damit die Minderungspotenziale, die durch eine höhere energetische Qualität im Wohnungsneubau erreichbar sind, wie sie sich als Differenz der Treibhausgasemissio-

nen zwischen Referenz- und Klimaschutzszenarien ergeben, so liegen diese im Zeitraum 2015 - 2030 mit -58 bzw. -75 Mio t/a um einen Faktor 2,7 - 15 deutlich höher, obwohl hier modellbedingt erst ab 2020 mit einem wirksamen Klimaschutz begonnen wird (siehe Tab. 24).

Fazit

In den letzten Jahren hat bereits eine kontinuierliche Steigerung der Holzbauquote stattgefunden, die mit großer Wahrscheinlichkeit auch in Zukunft anhalten dürfte. Die Ausbaupotenziale des Holzbaus betreffen neben dem Neubau auch die energetischen Modernisierungen mit hoher energetischer Qualität und die vielfältigen Möglichkeiten der Holzhybridbauweise.

Die Substitutionseffekte des Holzbaus sind mit Werten für SF_G zwischen 0,09 - 0,83 (vgl. Hafner et al. 2017, S. 59) im Vergleich zu dem mittleren Wert über alle stoffliche Nutzungen von 2,1 (vgl. Sathre/O'Connor 2010, S. 107) spürbar geringer. Auch in einem Holzbau kommt demnach ein beträchtlicher Anteil von Nicht-Holzprodukten zum Einsatz.

Die kurzfristigen CO₂-Minderungspotenziale durch einen verstärkten Wohnungsbau mit Holzbauweisen sind im Vergleich zu denen der klassischen Minderungsstrategien Energieeffizienz und Ausbau der erneuerbaren Energien deutlich geringer. Kurzfristig kann der Holzbau daher nur als ergänzende Klimaschutzmaßnahme in Ansatz gebracht werden. Mittel- und langfristig verspricht vor allem eine Kombinationsstrategie erfolgversprechend zu sein, in der parallel ein Ausbau der Holzwendungen vor allem im Bereich der Gebäudehüllen im Neubau und bei Modernisierungen mit hoher energetischer Qualität mit einem Ausstieg aus der energetischen Holznutzungen verbunden wird. Besonders zielführend erscheint der Konzeptansatz der „doppelten Substitution“ bei den Hüllkonstruktionen durch gleichzeitige Minderung der Emissionen bei Material- und Energieaufwendungen.

7 Projektion der künftigen CO₂-Senkenpotenziale des Waldes in Verbindung mit dem Holzproduktespeicher

Für die Klimaschutzwirkung der Holznutzungen ist es entscheidend, nicht alleine die Speicher- und Substitutionseffekte der Holznutzungen zu bilanzieren, sondern auch die Kohlenstoffbilanz der Wälder miteinzubeziehen. Die Senkenfunktion der deutschen Wälder beruht vor allem auf dem Holzzuwachs und der CO₂-Speicherung in den Waldböden durch die Kohlendioxid aus der Atmosphäre gebunden wird. Ein Teil dieses Zuwachses wird als Rohholz geerntet und kann bei langlebigen Nutzungen die Wiederfreisetzung von CO₂ hinauszögern oder im Falle einer fortlaufenden Kaskadennutzung sogar dauerhaft verhindern. Die Emissionen der thermischen Verwertung können ferner durch Pyrolyse und/oder Abscheidung des Kohlendioxids und sichere Lagerung in geologischen Speichern (BECCS) weitgehend vermieden werden.

Für die in diesem Kapitel schon öfter herangezogenen WEHAM-Szenarien wurde in einer eigenen Teiluntersuchung die CO₂-Senkenwirkung des deutschen Waldes und Holzproduktespeichers als Projektion bis 2050 fortgeschrieben (vgl. Rüter et al. 2017a). Methodisch wurden hierbei die Verbuchungsregeln für deren Bilanzierung im LULUCF-Sektor verwendet. Die Holzverwendungs- bzw. Nutzungsstruktur des Basiszeitraums (2011-2015) wird künftig unverändert fortgeführt. Dabei werden die drei WEHAM-Szenarien (BAS, HPS und NPS) miteinander verglichen. In Abb. 26 ist die IST-Entwicklung des Holzeinschlags und der Rohholzproduktion inklusive Energieholz und die Produktion von Stamm- und Industrieholz im Zeitraum 2000 - 2015 aufgetragen. Der künftige Holzeinschlag erfolgt in den drei WEHAM-Szenarien unterschiedlich. Vor allem im Holzpräferenzszenario (HPS) wird ein künftig stärkerer Holzeinschlag und damit verbunden eine stärkere Holznutzung unterstellt, während diese im Basisszenario (BAS) in etwa auf heutigem Niveau verbleiben. Das Naturschutzpräferenzszenario (NPS) wird hingegen ein leichter Rückgang angenommen.

Die Auswirkungen auf die Netto-Treibhausgasemissionen sind in Abb. 25 abgebildet:

- Wie zu erwarten, führt die intensivere Holznutzung im HPS zu einer Vergrößerung der CO₂-Senke im Holzproduktespeicher (Ø 2016 - 2050: - 6,4 Mio t/a), während der Wald bis 2035 statt einer Senke zu einer Quelle wird.
- Bei einer Reduzierung der Holznutzung, wie im NPS dargestellt, findet eine dazu gegenläufige Emissionsentwicklung statt. Der Holzproduktespeicher weist im Durchschnitt mit + 2,0 Mio t/a einen positiven Wert auf, d.h. die Speicherwirkung des Holzproduktespeichers wird abgebaut. Gleichzeitig steigt die Senkenwirkung des Waldes sehr stark an.
- Im Basisszenario zeigt sich ein gemischtes Bild. Die Waldsenke und Holzproduktespeicher bleiben auf dem derzeitigen Niveau mit gewissen Schwankungen erhalten.

Interessant ist nun die Gesamtbilanz von Wald und Holznutzung der drei Szenarien als Durchschnittswert im Zeitraum 2015 - 2050 miteinander zu vergleichen:

- Der niedrigste Wert mit - 4,5 Mio t/a wird im Holzpräferenzszenario ausgewiesen,
- Im Basisszenario wird mit 20,6 Mio t/a ein 4,5-fach höherer Wert als im HPS erreicht,
- Nochmals höher ist der Netto-Senkeneffekt im Naturschutzpräferenzszenario. Dieser liegt mit - 29,4 Mio t/a um einen Faktor 6,5 höher als im HPS und einem Faktor von 1,4 über dem Wert im Basisszenario.

In der Veröffentlichung wird - allerdings ohne quantitativen Nachweis - zu Recht darauf hingewiesen, dass bei Fortführung der heutigen Nutzungsmuster ein Rückgang der Holzverfügbarkeit mit höheren Emissionen durch die Alternativprodukte zu rechnen wäre. Die dabei entstehende Ressourcenlücke würde wahrscheinlich durch Holzimporte ausgeglichen werden. Die dabei getroffenen statischen Annahmen zur Holznutzung und den Substitutionseffekten lassen jedoch folgende Aspekte unberücksichtigt:

- Aus Klimaschutzgründen erscheint es unverzichtbar eine Umlagerung der Holzverbrauchsmuster weg von den energetischen und kurzlebigen Nutzungen hin zu langlebigen stofflichen Verwendungen zu etablieren.
- Die Substitutionseffekte gehen mit dem Umbau der Bauwirtschaft hin zur Klimaneutralität immer mehr zurück.
- Klimawandel und der dadurch notwendige Waldumbau beinhalten Risiken, die einer verstärkten Holznutzung u.U. im Wege stehen. Bei einer Reduzierung der energetischen Nutzung könnte vor allem mehr Laubholzbestände im Wald verbleiben, die eine relativ höhere Senkenwirkung und Klimaresilienz aufweisen als die Nadelholzbestände.
- Angesichts der derzeitigen Waldschäden ist die langfristige Verfügbarkeit von Nadelholz, die für eine Ausweitung des Holzbaus benötigt wird, eine offene Frage.

8 Abschätzung der CO₂-Minderungs- und Senkenpotenziale im Holzbau

Eine Abschätzung der CO₂-Senkenpotenziale im Holzwohnbau setzt voraus, das gesamte Materiallager des heutigen und künftigen Wohngebäudeparks über längere Zeiträume von (z.B. 30 - 80 Jahren) zu bilanzieren. Dies kann nur szenariobasiert erfolgen. Einfachere Abschätzungen mit Teilbereichen (z.B. Neubau ohne Keller und Tiefgaragen) und über kurze Zeiträume sind nur bedingt aussagefähig, weil die restlichen Anwendungsbereiche und die künftigen Potenziale kaum vernünftig ergänzt bzw. hochskaliert werden können.

Derartige Untersuchungen zu Deutschland liegen derzeit nicht vor. Für die Schweiz wurden jedoch kürzlich zwei Studien veröffentlicht, die parallel entstanden und von den Autoren zueinander in Bezug gesetzt worden sind (Pittau et al. 2022):

- A** Die Studie „Kohlenstoffspeicherung im Holzbau: Potenzial des Gebäudeparks in der Schweiz“ (Savi/Klingler 2022) betrachtet den schweizerischen Hochbausektor über ein

Stoffflussmodell, um daraus die stofflichen CO₂-Emissionen der Gebäuden im Zeitraum 2013 - 2050 abzuschätzen.

Zum Einsatz kommt hierbei die +1/-1-Methode.

- B** Zeitgleich wurden die Ergebnisse zum „Carbon storage project“ veröffentlicht (Pittau et al. 2022a), bei dem eine dynamische Lebenszyklusbilanz (DLCA) angewendet wurde. Dabei kann der zeitabhängige Effekt der Regenerierung des Kohlenstoffaufbaus im nachwachsenden Wald nach der Holzentnahme während dem Verbleib im Gebäude berücksichtigt werden. Zusätzlich wurde ein halbstatistischer Ansatz mit dem GWP_{bio}-Index durchgerechnet.

Alleine die Offenlegung der Unterschiede verschiedener methodischer Ansätze und die Darlegung der Uneinigkeit der Projektpartner bezüglich der Methoden (vgl. Pittau et al 2022, S.12 ff.) machten den besonderen Wert dieser Doppelstudie aus. Darin kommt zum Ausdruck, dass die zutreffende Bilanzierung von biogenen Emissionen (z.B. Wald, Landwirtschaft, Holzprodukte, Nawaros) eine wissenschaftlich strittige Frage ist, die von sehr großer Bedeutung für die anzustrebenden Entwicklungen der künftigen Land- und Ressourcennutzungen und damit auch für die darauf bezogenen Nachhaltigkeitsbewertungen sind. Dadurch wird nebenbei auch der vorschnelle Schluss, dass normenkonformes Bilanzieren mit wissenschaftlicher Evidenz gleichzusetzen sei, widerlegt und durch eine offene Diskussion verschiedener Bilanzmethoden ersetzt **(4)**.

Für die beiden Untersuchungen wurden drei Szenarien der Holznutzung im Hochbau gebildet:

- 1 Im Basisszenario wird der bisherige Anteil von Holzbauten auch künftig fortgesetzt
- 2 Das Szenario „Holzbauförderung“ beruht auf einer schrittweisen Steigerung des Holzbauanteils ab 2021 bis zum Jahr 2050. Von da ab werden alle Neubauten aus Holz erstellt.
- 3 Im Szenario „Maximaler Einsatz“ werden bereits ab 2021 alle Neubauten als Holzbauten realisiert. Dies stellt ein Ex-

Global Warming Potential 2050 verschiedener Holzbauszenarien in der Schweiz in Mio t CO _{2e} -Äquivalente						
Szenario	Methode	CO _{2e} -Quelle		CO _{2e} -Senke		Summe
		fossil	biogen	Beton	biogen	
Basisszenario	-1/+1	276,7	44,5	-1,4	-46,0	276,7
	DLCA	178,6	26,0	-0,6	-37,2	166,8
	GWP _{bio}	276,7	44,5	-1,1	-57,0	263,2
Holzbauförderung	-1/+1	264,7	63,3	-1,3	-90,0	236,8
	DLCA	174,7	33,0	-0,6	-49,9	157,2
	GWP _{bio}	264,7	63,3	-0,9	-109,0	218,2
Maximaler Holzeinsatz	-1/+1	247,7	80,9	-1,1	-130,0	198,6
	DLCA	164,7	43,7	-0,5	-77,8	130,6
	GWP _{bio}	247,7	80,9	-0,8	-156,0	172,2

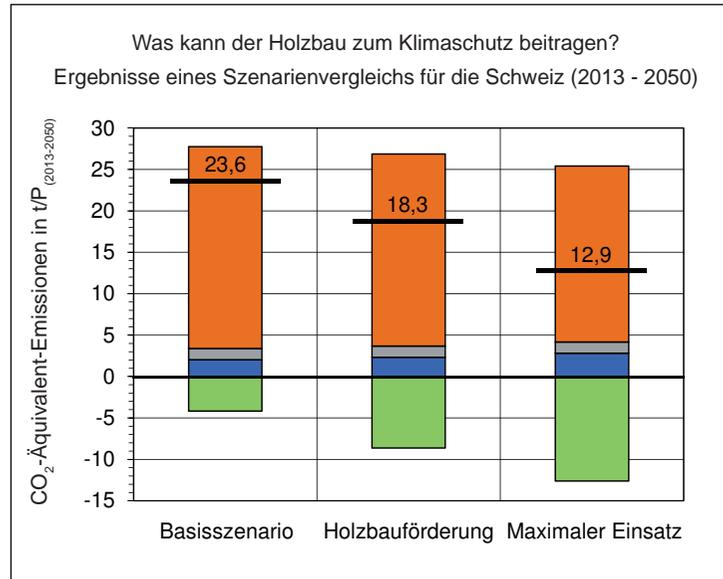
trenszenario ohne realistische Umsetzungsperspektive dar und dient dem Aufzeigen der theoretischen Potenziale.

Das Hochbau-Materiallager der Schweiz wird aufbauend auf den Materialflussrechnungen des Bundesamtes für Statistik für die Vergangenheit modelliert und als Lagerentwicklung anhand der prognostizierten Bevölkerungsentwicklung weitergeführt. Dies ist dadurch gerechtfertigt, dass in letzter Zeit der Wohnflächenkonsum pro Kopf kaum mehr angestiegen ist (Sättigung bei etwa 45 - 48 m²/P). Pro Zeitabschnitt werden der Zufluss, der Lagerbestand und der Abfluss bilanziert. Dies erfolgt auf der Basis von für die Schweiz in hinreichend guter Qualität verfügbarer Daten für den Ausgangszustand. Die Vielfalt an Baumaterialien wird über eine begrenzte Zahl von Leitmaterialien (Beton, Mauerwerk, Metalle, brennbare Materialien, Holz und die gemischte Stoffgruppe Keramik, Gips, Glas usw.) abgebildet. Dabei können auch die Flüsse von Sekundärrohstoffen (z.B. Wiederverwendung, Recycling) und Outputs (Stoffe, die das System verlassen) mitbilanziert werden. Der Holzanteil in Neubauten wurde anhand von ausgewählten Beispielgebäuden bestimmt. Für diese erfolgte die Stoffbilanz detailliert, um

Tabelle 26:
Vergleich der Werte für das Global-Warming-Potential im Zeitraum 2013 - 2050 mit drei Methoden (-1/+1, DLCA und GWP_{bio}) für drei verschiedene Szenarien zum Ausbau des Holzbaus in der Schweiz. Dabei werden die kumulierten Emissionen für das Stofflager, das der schweizerische Hochbau darstellt, bilanziert. Es wird zwischen CO₂-Quellen (fossil und biogen) und CO₂-Senken (Karbonisierung Beton und biogen) unterschieden. Quelle: (Pittau et al. 2022a, S. 49)

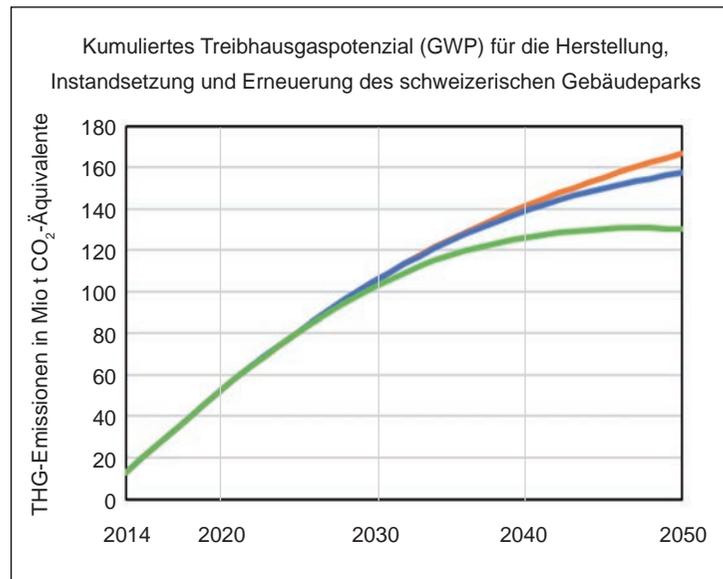
- Fossiles + geogenes GWP Herstellung
- Fossiles + geogenes GWP Entsorgung
- Biogenes GWP, Entsorgung
- Biogenes GWP, Herstellung

Abbildung 27:
Kumulierte Treibhausgasemissionen für die Materialbereitstellung (Herstellung, Instandsetzung, Erneuerung und Rückbau) im Schweizer Gebäudepark. Es werden drei Holznutzungsszenarien (Basis, Holzbauförderung und maximaler Holzeinsatz) gegenübergestellt. Die Werte sind mittels -1/+1 - Methode berechnet. Quelle: (Savi/Klingler 2022, S. 37 f.).



- Basisszenario
- Holzbauförderung
- Maximaler Holzeinsatz

Abbildung 28:
Kumuliertes Treibhausgaspotenzial für die Materialbereitstellung (Herstellung, Instandsetzung, Erneuerung und Rückbau) im Schweizer Gebäudepark 2013 - 2050. Es werden drei Holznutzungsszenarien (Basis, Holzbauförderung und maximaler Holzeinsatz) gegenübergestellt. Die Werte sind mittels dynamischer Ökobilanzierung DLCA berechnet. Quelle: (Pittau et al. 2022, S. 28).



daraus auch die Vereinfachungen für die restlichen Materialgruppen abzuleiten (vgl. Savi/Klingler 2022, S. 7 ff.).

In Tabelle 26 findet sich die Gegenüberstellung der Ergebnisse zur den kumulierten Treibhausgasemissionen im Zeitraum 2013 - 2050 differenziert nach CO₂-Quellen und -Senken für die drei Szenarien und drei Methodenansätze (vgl. Pittau et al. 2022, S. 27 f. und Pittau et al. 2022a, S. 49 f.):

- Die Ergebnisse der -1/+1-Methode und des halbstatistischen GWP_{bio}-Ansatzes liegen mit Abweichungen zwischen 4 und 13 % nahe beieinander.
- Mit der dynamischen Methode werden gegenüber der statischen Methode um 34 - 39 % geringere Emissionswerte ermittelt. Die -1/+1 Methode hat die Tendenz, sowohl die fossilen Emissionen als auch die biogene Kohlenstoffaufnahme zu überschätzen. Dies, weil die DLCA-Methode die CO₂-Aufnahme der nachwachsenden Bäume berücksichtigt.

In Abbildung 27 sind die Ergebnisse der statischen Methode als kumulierte Pro-Kopf-THG-Emissionen aufgetragen. Das CO₂-Minderungspotenzial ergibt sich aus den Differenzbeträgen der THG-Emissionen zum Basisszenario. Im Szenario „Holzbauförderung“ beträgt dieses im Zeitraum 2013-2050 ca. 5,5 t/P und im Szenario „Maximaler Holzeinsatz“ ca. 10,7 t/P. Zugleich lassen sich die Werte für die Netto-Senke durch das Bauen mit Holz bestimmen, die sich als Betrag der biogenen CO₂-Senke abzüglich der biogenen CO₂-Quelle ermitteln lassen. Diese summiert sich bis 2050 auf -2,3 t/P (Basis), bzw. -6,7 t/P (Holzförderung) und -10,3 t/P (Maximaler Holzeinsatz).

Die Simulation mit Hilfe der dynamischen Ökobilanz zeigen auf, dass mit einem maximalen Holzeinsatz theoretisch sogar eine Stabilisierung der kumulierten Treibhausgasemissionen bis 2050 möglich wäre (siehe Abb. 28). Weil in den Szenarien nur der Neubau ohne biogene Fassaden und Dämmstoffe behandelt wurde, sind für die Schweiz zusätzliche Holzbaupotenziale erschließbar. Zu beachten ist ferner, dass auch hier

das wichtige Anwendungsfeld der energetischen Modernisierungen nicht betrachtet wurde.

Die Autoren kommen zu dem gemeinsamen Schluss, dass eine deutliche Steigerung des Holzeinsatzes im Bauwesen die CO₂-Emissionen für die Materialbereitstellung im Hochbau stark reduziert. Dieser Effekt wird zwar in den Bilanzierungsverfahren unterschiedlich quantifiziert. Aber hier ist in jedem Falle eine prinzipielle Richtungssicherheit gegeben. Auch wenn diese Strategie in den beiden Studien nicht untersucht wurde, sind sich beide Autorentteams darin einig, dass eine Kombination des Einsatzes biobasierter Materialien für die Renovierung im Bestand und für den Neubau besonders zielführend wäre. Dabei wird die Chance eröffnet, auch für den Fall eines langsameren Übergangs zum Bauen mit nachwachsenden Materialien, eine Stabilisierung der Emissionen bis 2050 erreichen zu können (vgl. Pittau et al. 2022, S. 31 ff.)

Die Ergebnisse der schweizerischen Studien lassen sich nicht unmittelbar auf die deutschen Verhältnisse übertragen. Beispielsweise wird für die Schweiz ein stetiges Ansteigen der Bevölkerung von ca. 8,0 Mio. im Jahr 2013 auf 10,4 Mio. Einwohner prognostiziert, während in Deutschland im selben Zeitraum die Bevölkerung in etwa konstant bleibt (siehe Vallentin 2023, Tab. 3.1). Die Holzverfügbarkeit in der Schweiz ist mit ca. 0,55 m³/P (2015) deutlich geringer als in Deutschland mit ca. 0,86 m³/P (2015). Dadurch spielen Importe in die Schweiz eine deutlich größere Rolle als nach Deutschland und die Holzverfügbarkeit nimmt künftig wegen des Bevölkerungswachstums tendenziell sogar noch ab.

Im Vergleich der schweizerischen Studie mit der -1/+1-Methode zu den THG-Minderungspotenzialen der schon vorgestellten deutschen Studie (Hafner et al. 2017) sind die mittleren jährlichen Pro-Kopfwerte ungefähr um einen Faktor 8,5 - 8,8 höher (Schweiz: 0,15 - 0,29 t/Pa versus Deutschland: 0,017 - 0,034 t/Pa). Im Hinblick auf die biogene Kohlenstoffspeiche-

rung unterscheiden sich die Werte sogar um einen Faktor 14 (Schweiz: 0,11 - 0,21 t/Pa versus Deutschland: 0,008 - 0,015 t/Pa). Für die Differenzen könnte neben dem unterschiedlichen Bevölkerungs- und damit auch Wohnflächenwachstum auch die unterschiedlichen Betrachtungszeiträume sowie methodische Unterschiede eine Rolle spielen.

Eine Abschätzung der CO₂-Minderungs- und -Senkenpotentiale des Holzbaus ist auf Grundlage der vorliegenden Studien aus folgenden Gründen nur unter Vorbehalten möglich:

- Es wurde jeweils nur der Neubau betrachtet. Die energetischen Modernisierungen, die künftig eine immer größere Rolle spielen dürften, wurden nicht mituntersucht.
- Ebenso sind wichtige Einsatzgebiete (Fassaden, Innenausbau, biogene Dämmungen) nicht einbezogen worden.
- Das mit Abstand wichtigste Feld für eine Vergrößerung der CO₂-Minderung und -Senkenbildung ist der Ausstieg aus der thermischen Nutzung von Holz und Nawaros. Dieser steht in unmittelbarem Bezug zu den wärmetechnischen Eigenschaften der Gebäude selbst (Hülle, Lüftung). Sowohl im Neubau als auch bei energetischen Modernisierungen im Bestand kann der Einsatz von biogenen Materialien immer mit der Senkung der Energiebedarfswerte im Betrieb gekoppelt werden (doppelte Substitution).

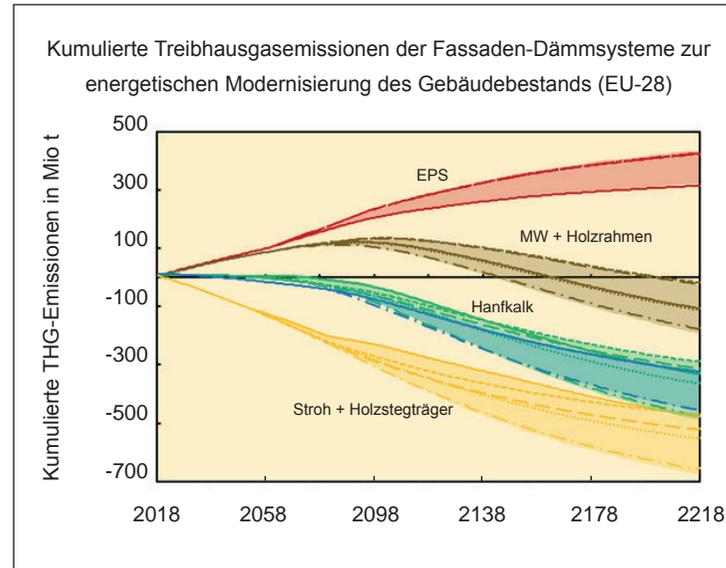
Einsatz von biogenen Dämmungen und Holz bei der energetischen Modernisierung

Für Deutschland existieren bislang keine Studien, die die Möglichkeiten des Einsatzes von Holzkonstruktionen zur Verbesserung der Energieeffizienz im Bestand untersucht haben. Dabei ist aus quantitativer Sicht klar, dass die Potenziale für den Einsatz derartiger Konstruktionen in diesem Bereich deutlich größer sind, als im künftigen Neubau.

In einer Studie zum Potenzial der energetischen Modernisierungen in Europa als CO₂-Senke, wurden die dadurch ausgelösten materialbedingten Emissionen für fünf unterschiedliche

- EPS-WDVS
- Mineralwolle / Holzrahmen
- Hanfkalk-Dämmstein
- Hanfkalk-Spühdämmung
- Stroh / Holzstegträger

Abbildung 29:
Kumulierte Treibhausgasemissionen in Mio t CO₂-Äquivalente, wie sie sich ergeben, wenn die Fassaden-Dämmsysteme mit unterschiedlichen Konstruktionen mit/ohne biogenen Baustoffen im Gebäudebestand der EU-28-Staaten im Zeitraum 2018 - 2218 durchgeführt werden. Nur die Varianten mit biogenen Dämmstoffen von Saisonpflanzen (Stroh, Hanf) lassen sich von Anfang an negative Emissionen realisieren. Quelle: (Pittau et al. 2018).



Fassadenkonstruktionen mit Hilfe einer dynamischer Bilanzierung - speziell auch für die biogenen Emissionen - ermittelt (vgl. Pittau et al 2018). Folgende Varianten wurden untersucht:

- 1 Wärmedämmverbundsystem mit EPS-Dämmung (rot)
- 2 Holzrahmenwerk mit Mineralwollämmung (braun)
- 3 Holzrahmenwerk mit Hanfkalk-Sprühdämmung (grün)
- 4 Vormauersteine aus Hanfkalk (blau)
- 5 Holzstegträger mit Strohdämmung (gelb)

Anhand der Entwicklung der kumulierten Treibhausgasemissionen in Abb. 29 wird erkennbar, dass nur diejenigen Konstruktionen mit biogenen Dämmstoffen von Beginn an als effektive CO₂-Senken wirksam werden können. Dies lenkt den Fokus weg vom Einsatz von Holz hin zu den Dämmstoffen. Und zwar hin zu denjenigen mit schnell nachwachsenden Ressourcen. Umfangreiche Senkenpotentiale sind offensichtlich nur in diesem Bereich erschließbar. Deutlich wird dies an der Variante Holzrahmen mit Mineralwolle, bei der sich ein Senkeneffekt erst sehr spät (ab etwa 2150 - 2200) zeigt.

Hinsichtlich Senkenwirksamkeit schneidet die Konstruktion mit Strohdämmung am günstigsten ab, während die Variante mit EPS-Dämmung erwartungsgemäß die höchsten materialbedingten Emissionen aufweist. Jedoch ist an dieser Stelle zu bedenken, dass Dämmmaßnahmen nahezu materialunabhängig einen positiven Klimaschutzeffekt aufweisen. Dies ist jedoch nur dann erkennbar, wenn parallel zu den material- auch die energiebedingten Emissionen im Betrieb mitbilanziert werden. Dies war jedoch nicht Bestandteil der Studie, stellt aber vor allem in der Anfangsphase bis 2050 den dominanten Effekt dar. Der spezielle Erkenntniswert der Studie besteht darin, dass bei einer biogen gestützten Dämmstrategie anstelle zusätzlicher materialbedingter CO₂-Emissionen in erheblichem Umfang negative Emissionen und damit ein zusätzlich klimaentlastender Effekt realisierbar ist.

Die unterschiedlichen Verläufe innerhalb eines Konstruktions-typs in Abb. 29 repräsentieren verschiedene Nachnutzungspfade (Deponierung, Kaskadennutzung, Verbrennung, Recycling, Schnellkompostierung plus Methannutzung). Die sich hier zeigende Bandbreite weist darauf hin, dass diese Prozesse einen erheblichen Einfluss auf die langfristige Senkeneffektivität und damit für den Klimaschutz insgesamt haben. Die Option der Pyrolyse mit paralleler Erzeugung von Biokohle, Pyrolyseöl in Verbindung mit einer prozessbedingt besonders emissionsarmen Strom- und Wärmeerzeugung wurde jedoch in dieser Untersuchung nicht einbezogen, stellt jedoch nach derzeitigem Stand die gewinnbringendste Technologie dar.

Zusätzlich wurde über Varianten der Einfluss der Nutzungsdauer und Sanierungsrate analysiert. Beide Einflussfaktoren sind bedeutend. Sowohl eine Verlängerung der Nutzungsdauer als auch eine Erhöhung der Sanierungsrate vergrößern die CO₂-Senke von Dämmmaßnahmen mit schnellwüchigen biogenen Materialien. In der entscheidenden Anfangsphase ist somit eine möglichst schnelle Umsetzung der Dämmstrategie entscheidend, während auf lange Sicht der Erhalt der CO₂-

Senke in der Gebäudestruktur zu einer neuen Aufgabe wird. Dazu zählt beispielsweise, dass künftig bei Erneuerungsmaßnahmen eine vorhandene Holzfassade oder ein Holzhaus wieder durch eine Holzfassade oder ein Holzhaus ersetzt werden; und dies, soweit möglich, in Verbindung mit einer weiteren Vergrößerung der CO₂-Senke (vgl. Pittau et al 2022, S. 26 f.).

Ein weiterer spannender Aspekt biogener Dämmungen ist, dass bei ihnen eine hohe energetische Qualität in der Güte von Passivhaushüllen geradezu die Voraussetzung darstellt, um eine insgesamt klimaneutral herstellbare Hüllkonstruktion überhaupt erreichen zu können. Oftmals wären hier sogar Dämmstärken sinnvoll, die weit über dem noch irgendwie praktisch Umsetzbaren liegen (vgl. Carcassi et al. 2022).

Aus Klimaschutzgründen stellen damit besonders gut gedämmte Hüllkonstruktionen aus schnellwachsenden biogenen Dämmmaterialien in Verbindung mit Holz oder Bambus o.ä. als Stützmaterialien einen strategieübergreifenden Lösungsansatz dar. Dabei können im Sinne einer mehrfachen Optimierung hohe Energieeffizienz, geringe Herstellungsemissionen und die Bildung von CO₂-Senken miteinander verbunden werden. Sie sind sowohl im Neubau als auch bei Modernisierungen einsetzbar und bilden damit einen wichtigen Baustein für die Gesamtstrategie eines Paris-kompatiblen Bauens.

Potentialabschätzung der CO₂-Minderungs- und Senkenpotenziale im Wohnbau

Abschließend soll nun versucht werden, die Bandbreite der mittels biogener Baumaterialien erreichbarer CO₂-Minderungen und Senken im Wohnbau abzuschätzen. Einschränkend muss darauf hingewiesen werden, dass bislang keine Studie dieses Gesamtpotential zusammengeführt hat. Weil hierbei aber Wechselwirkungen zwischen baulichen Gelegenheiten (Neubau und Modernisierungen) mit den begrenzten Verfügbarkeit von Holz und sonstigen Nawaros existieren, kann dies momentan nur in Form einer groben Schätzung erfolgen.

Die größte Unbekannte dabei stellt das Verhältnis zwischen stofflicher und energetischer Nutzung dar. Alleine das Zurückfahren der energetischen Nutzung von Biomasse durch Verbesserung der Energieeffizienz der Wohngebäude kann bis 2060 bzw. 2070 ein Minderungspotential von 0,2 t/Pa generieren (siehe Abb. 11). Im Neubau ist, sofern sich die Ergebnisse der in diesem Abschnitt vorgestellten Studien für die Schweiz auf Deutschland übertragen lassen, ein Minderungspotenzial durch eine konsequent verfolgte Holzbaustrategie von 0,06 - 0,25 t/Pa vorhanden. Zu dem großen Anwendungsfeld der energetischen Modernisierungen liegen bislang keine Ergebnisse vor. Jedoch sind diese Potenziale, vor allem auf längere Sicht, vermutlich deutlich höher als im Neubau.

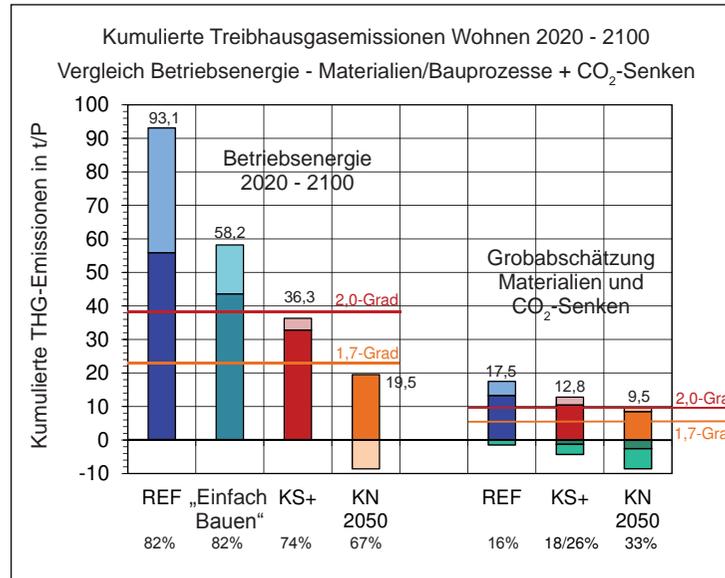
Die Potenziale für effektive CO₂-Senken des Neubaus mit Holzbauweisen für die Schweiz im Zeitraum 2013 - 2050 liegen je nach Umsetzungsintensität und Bilanzierungsmethode zwischen 0,05 - 0,21 t/Pa.

9 Versuchsweise Zusammenführung der Klimaschutzstrategien bei Betriebsenergie, Materialien/Bauprozessen und CO₂-Senken

In Abb. 30 sind die kumulierten Treibhausgasemissionen der Betriebsenergie durch die deutschen Wohnnutzungen (linke Seite) einer groben Abschätzung der zeitgleich zu erwartenden Emissionen durch die Materialbereitstellung und Bauprozesse (rechte Seite) gegenübergestellt. Generell wird zwischen zwei Zeitperioden, nämlich 2020-2050 und 2050-2100 unterschieden. Bei den Baumaterialien sind neben den fossilen und prozessbedingten Treibhausgasemissionen mit positiven Werten auch negative Werte ausgewiesen. Letztere stellen CO₂-Senken dar, die sich durch den Einsatz biogener Materialien erzielen lassen. Klar erkennbar ist, dass in der Treibhausgasbilanz die Betriebsenergie mit einem Anteil von 67 - 84 % gegenüber den Baumaterialien und Bauprozessen mit An-

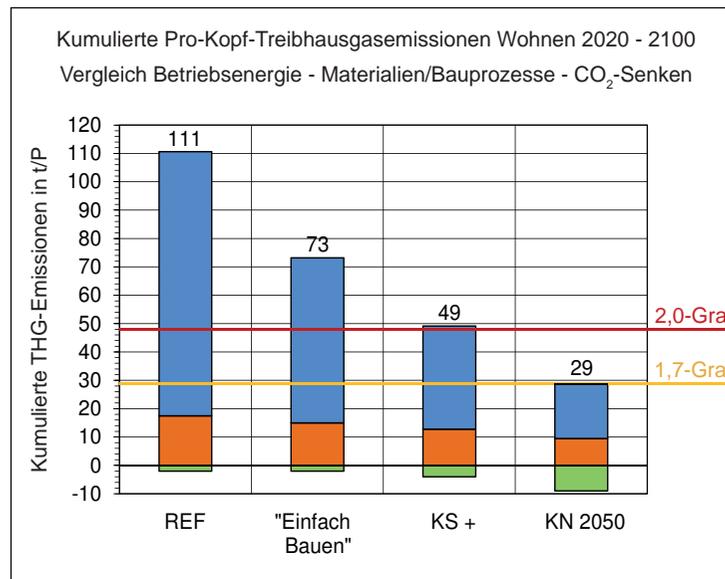
- Referenzszenario 2050-2100
- Referenzszenario 2020-2050
- Einfach Bauen 2050 - 2100
- Einfach Bauen 2020-2050
- Klimaschutz-Plus 2050-2100
- Klimaschutz-Plus 2020-2050
- Klimaneutral 2050-2100
- Klimaneutral 2020-2050
- CO₂-Senken 2020-2050
- CO₂-Senken 2050-2100

Abbildung 30:
Vergleich der kumulierten Treibhausgasemissionen durch die Betriebsenergie der Wohnnutzungen in Deutschland (vgl. Vallentin 2023) im Vergleich zu den Baumaterialien und CO₂-Senken im Zeitraum 2020 - 2100.



- Betriebsenergie
- Materialien / Bauprozesse
- CO₂-Senken

Abbildung 31:
Kumulierte Treibhausgasemissionen der Wohnnutzungen in Deutschland (Betriebsenergie / Materialbereitstellung / Schaffung von CO₂-Senken) im Zeitraum 2020 - 2100. Die Ergebnisse sind für das Referenzszenario, das Konzept „Einfach Bauen“, das Klimaschutz-Plus-Szenario und das Szenario, in dem im Jahr 2050 Klimaneutralität erreicht wird, ausgewiesen. Angabe der personenbezogenen Emissionen in Tonnen CO₂-Äquivalente. Zur besseren Einordnung sind die Schwellen für das 2,0 und das 1,7-Grad-Limit aufgetragen.



teilen zwischen 16 und 33 % eindeutig dominiert. Damit wird deutlich, wie wichtig es für den Klimaschutz der Wohngebäude zunächst ist, die direkten energiebedingten Emissionen im Betrieb zu reduzieren. Dies gelingt nur bei konsequenter Verfolgung des Ausbaus der erneuerbaren Energieerzeugung in Verbindung mit einer großen Steigerung der Energieeffizienz.

Betriebsenergie

Der Schritt vom Referenzszenario (93 t/P) zum Konzept des sog. „Einfach Bauen“ (58 t/P) lässt die Potenziale der Energieeffizienz ungenutzt und setzt ausschließlich auf den Umstieg von der fossilen zu einer erneuerbaren Energieversorgung (vgl. Nagler et al. 2020). Damit lässt sich nicht einmal das 2-Grad-Limit (38 t/P) einhalten. Dies gelingt erst im Klimaschutz-Plus-Szenario (36 t/P), bei dem durch die konsequente Umsetzung des Passivhauskonzeptes zusätzlich auch die Potenziale der Energieeffizienz erschlossen werden. Erst mit weiteren Anstrengungen im Hinblick auf die Effizienz- und Suffizienzstrategien in Verbindung mit umfangreichen CO₂-Senken ist schließlich ein Paris-kompatibles Bauen erreichbar, in dem das 1,7-Grad-Limit (23 t/P) eingehalten wird. Diese Strategie wird im Szenario Klimaneutral 2050 modelliert (19,5 t/P).

Baumaterialien und Bauprozesse

Die Grobabschätzung zu den kumulierten Treibhausgasemissionen für die Materialbereitstellung der Wohngebäude basiert auf folgenden Überlegungen:

- Die Dekarbonisierung von Materialien und Bauprozessen wurden unter Zuhilfenahme der künftigen Materialkennwerte in (Alig et al. 2020) dynamisiert (siehe Abbildung 12).
- Starker Rückgang der Neubauaktivitäten nach 2040.
- Die Mehraufwendungen für hohe statt mittlerer energetischer Qualität in den Klimaschutzstandards wurden über pauschale Aufschläge berücksichtigt.
- Die Senkenbeiträge wurden mit Hilfe grob überschlagener Pro-Kopf-Werte für die Zeiträume 2020-2050 und 2050-2100 abgeschätzt.

Die Werte wurden für drei Entwicklungen abgeschätzt, indem die Ausgangswerte im Jahr 2010 mit den Dekarbonisierungsfaktoren aus Abbildung 12 multipliziert und anschließend aufaddiert wurden:

- In der Referenzentwicklung liegen die materialbedingten Emissionen mit 15,5 t/P spürbar über dem anteiligen 2,0-Grad-Limit von ca. 10 t/P.
- Auch im Klimaschutz-Plus-Szenario wird mit einem Wert von 12,8 t/P das 2-Grad Limit immer noch überschritten.
- Erst wenn das Ziel der Klimaneutralität 2050 auch in der Bauwirtschaft umgesetzt wird, gelingt es, wenigstens das anteilige 2-Grad-Limit zu unterschreiten. Hierbei wird angenommen, dass gewisse Emissionen bis dahin nicht gänzlich auf Null geführt werden können. Das betrifft vor allem die prozessbedingten Emissionen, z.B. bei der Zement- und Kalk- sowie Stahlherstellung.

Effektive CO₂-Senken

Je ambitionierter der Klimaschutz auf der Materialseite verfolgt werden soll, um so bedeutender müssen die effektiven CO₂-Senken ausfallen. Die Spanne der Werte liegt zwischen 2 und 9 t/P. In den Klimaschutzentwicklungen wird daher ein deutlicher Ausbau des Holzbaus und des Bauens mit biogenen Baustoffen unterstellt. Im Szenario Klimaneutral 2050 erfolgt dies auf einem ambitionierten Niveau, wobei gut erkennbar ist, dass hier die wesentlichen Beiträge erst ab 2050 erschlossen werden können.

Zusammenführung der Ergebnisse

Mit Hilfe der Abb. 31 kann nun eine Gesamtstrategie für das Paris-kompatible Wohnen formuliert werden. Dabei werden alle dem Wohnen zugeordneten Emissionen verursachergerecht zusammengeführt. In der Darstellung sind die Szenarien so angeordnet, dass die Teilstrategien Schritt für Schritt quantifiziert werden können. Erst in der Kombination im Sinne einer „Sowohl-als-auch“-Strategie kann am Ende das 1,7-Grad-Limit eingehalten werden:

- Im Referenzszenario werden die bisher beobachtbaren Trends im Sinne eines „Weiter-so“ fortgeführt. Es bildet damit den Ausgangspunkt der „Strategiekaskade“. Auffällig sind die hohen energiebedingten Emissionen im Betrieb, die 84 % der Gesamtmenge ausmachen. Das 2-Grad-Limit wird um einen Faktor 2,3 überschritten.
- Beim Konzeptansatz „Einfach Bauen“ (Nagler et al. 2020) werden gegenüber dem Referenzszenario keine weiteren Energieeffizienzanstrengungen unternommen. Jedoch findet ein Ausbau der erneuerbaren Energieversorgung statt. Durch die angestrebten einschaligen Konstruktionen gehen die materialbedingten Emissionen zwar leicht zurück. Am Ende liegen die kumulierten Treibhausgasemissionen mit 73 t/P immer noch um 50 % über dem 2-Grad-Limit (48 t/P).
- Im Klimaschutz-Plus-Szenario werden neben dem Ausstieg aus der fossilen Wärme- und Stromerzeugung zeitgleich die wirtschaftlich umsetzbaren Energieeffizienzmaßnahmen realisiert. Mit Hilfe der Dekarbonisierung der Baumaterialien und der Bildung von CO₂-Senken in den Baukonstruktionen können auch die materialbedingten Emissionen soweit abgesenkt werden, dass insgesamt das 2-Grad-Limit nicht mehr überschritten wird.
- Erst im Szenario „Klimaneutral 2050“ wird mit der Einhaltung des 1,7-Grad-Limits ein Paris-kompatibles Wohnen nachgewiesen. Dies wird durch zusätzliche Effizienzsteigerungen, die Verfolgung von Suffizienzstrategien in Verbindung mit einer konsequenten Dekarbonisierung der Materialbereitstellung und einem starken Ausbau der CO₂-Senken in Baukonstruktionen erreicht.

Daraus folgt eine klare Prioritätenbildung:

- 1 Reduzierung der energiebedingten Emissionen im Betrieb durch einen Neubau und energetische Modernisierungen mit hohen energetischen Qualitäten
- 2 Dekarbonisierung der Materialbereitstellung
- 3 Biogenes Bauen mit Schwerpunkt CO₂-Senkenbildung
- 4 Zusatzstrategien (Suffizienz, Zirkuläres Bauen)

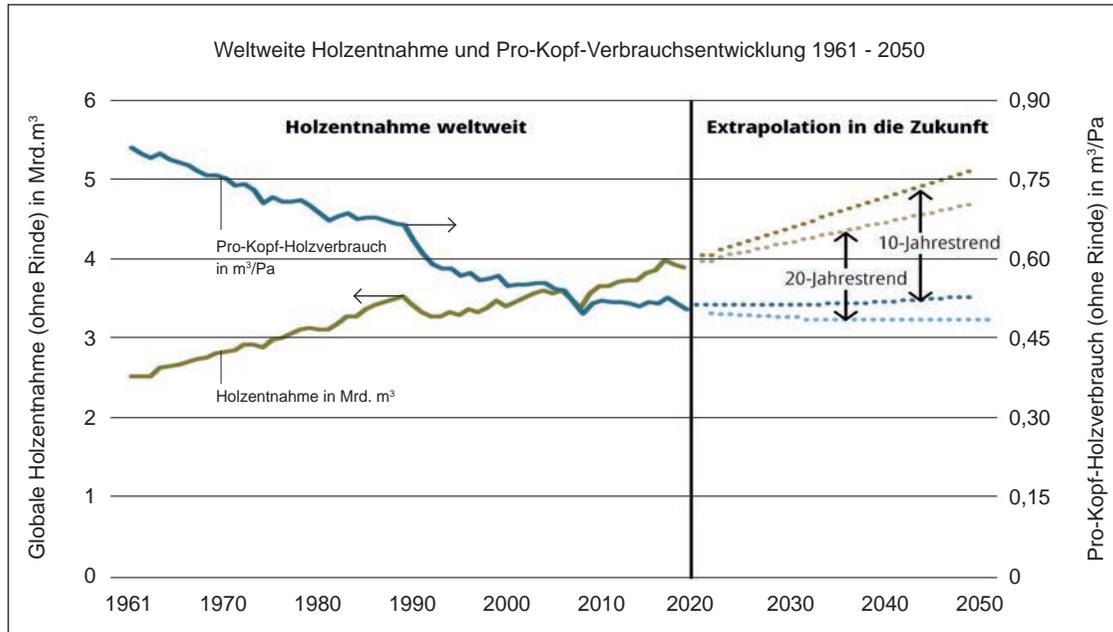


Abbildung 32:
Weltweite jährliche Holzentnahme und Pro-Kopf-Verbrauchsentwicklung im Zeitraum 1961 - 2050. Angabe der Werte als Rundholz-äquivalente ohne Rinde. Quelle: (WWF 2022, S. 13).

10 Holz-Global-Jahresbudget und seine Auswirkungen auf die künftigen Holznutzungen

Wurden im vorherigen Unterabschnitt vor allem die Möglichkeiten einer Ausweitung der stofflichen Nutzung von Holz und Nawaros im Holzbau betrachtet, geht es in diesem Unterabschnitt vor allem um die Grenzen der Holznutzung und die Konsequenzen, die sich daraus ergeben. Dies erfordert als Zwischenschritt, zunächst den Blick auf die globale Holzverwendung zu richten und abzuklären, in welchem Umfang diese nachhaltig vertretbar, d.h. im Rahmen der planetaren Grenzen, fortgeführt werden kann.

Holzfußabdruck und Risikokorridor

In der Studie „Alles aus Holz – Rohstoff der Zukunft oder kommende Krise?“ (WWF 2022) wird die Frage nach der global verträglichen Holznutzung in Beziehung zum Holzkonsum in Deutschland und anderen Ländern gestellt. Als Schlüsselgrö-

ße beschreibt der „Holzfußabdruck“ die jährliche Holznutzungsmenge pro Kopf. Holz wird hier weniger als Potenzial und von seinen Verfügbarkeiten sondern als begrenzte und endliche Ressource interpretiert. Klar benannt wird das Problem der Übernutzung, das sich auch als interner Nachhaltigkeitskonflikt zwischen dem Erhalt der Wälder unter Berücksichtigung des Eigenwerts der Natur versus dem (künftigen) Ausbau der Bioökonomie als Beitrag zum Klimaschutz lesen lässt.

In Abb. 32 ist die weltweite Holzentnahme (ohne Rinde) als Absolutwert im $\text{Mrd. m}^3/\text{a}$ und der zugehörige Pro-Kopf-Verbrauch in m^3/Pa im Zeitraum 1961 - 2020 gegenübergestellt. Die derzeitige jährliche Holzentnahme, ausgedrückt in Rohholzäquivalenten ohne Rinde liegt derzeit bei 4 Mrd. Kubikmetern. Sie hat seit 1961 um nahezu 60 % zugenommen. Die Pro-Kopf-Werte zeigen im selben Zeitraum eine abnehmende Tendenz, weil die Weltbevölkerung noch weitaus stärker angestiegen ist. Auf der rechten Seite der Grafik sind jeweils zwei Projektionen bis 2050 aufgetragen, die eine lineare Fortsetzung der 10- bzw. 25-Jahretrends zeigen. Bei der absoluten Holzentnahme bedeutet dies einen starken Anstieg zwischen 0,25 - 0,40 Mrd. Kubikmetern pro Dekade, während die Pro-Kopf-Werte in etwa konstant bleiben, bei Werten um $0,5 \text{ m}^3/\text{Pa}$. In etwa die Hälfte des geernteten Holzes wird momentan weltweit für Kochen und Heizen eingesetzt, während die andere Hälfte als Industrieholz (z.B. für Zellstoffherstellung, Papier, Schnittholz und Holzwerkstoffe sowie Chemikalien) genutzt wird. In Ländern mit geringem Einkommen wird Holz zum allergrößten Teil zur Gewinnung von Brenn- und Feuerholz verwendet, während es in den Ländern mit hohem Einkommen vor allem industriellen Zwecken dient (vgl. WWF 2022, S. 13).

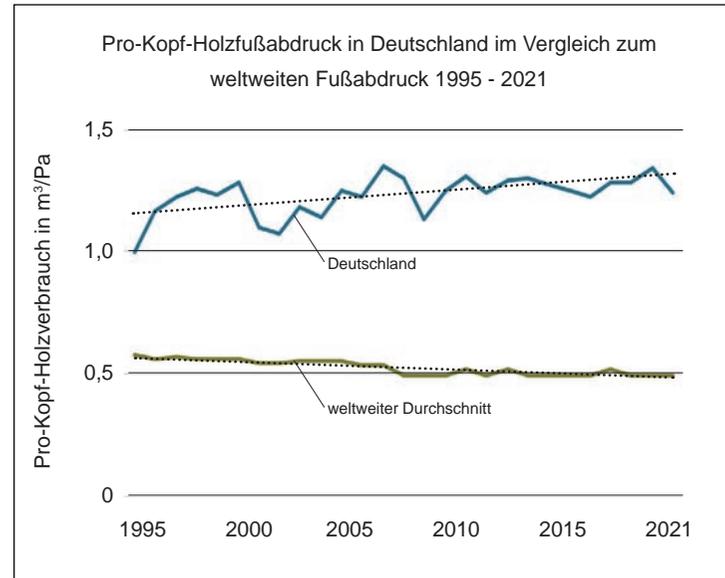
Im Vergleich zum weltweiten Durchschnitt beansprucht ein deutscher Bewohner im Schnitt mit etwa $1,2 \text{ m}^3/\text{Pa}$ mehr als doppelt so viele Holzressourcen. Die Entwicklung zeigt eine steigende Tendenz, während der weltweite Trend eine leichte Abwärtsbewegung aufweist (siehe Abb. 33).

Um Risiko-Leitplanken für die künftige Holznutzung entwickeln zu können wurden in der Studie fünf Szenarien gebildet, die den Einfluss verschiedener Waldentwicklungsstrategien bzw. zusätzlicher externer Faktoren berücksichtigen (vgl. WWF 2022, S. 28 ff.):

- 1 Stopp Entwaldung: Erfüllung der internationalen Ziele und länderspezifischen Verpflichtungen.
- 2 Erfüllung der Ziele zur Wiederherstellung der Waldlandschaften: Erfüllung der entsprechenden Ziele auf 350 Mio. ha Land gemäß sog. Bonn Challenge und der New York Declaration on Forests (NYDF).
- 3 Weltweite Expansion der Plantagenflächen: Aufgrund der Konkurrenz zur Landwirtschaft ist die Flächenverfügbarkeit mit großen Unsicherheiten versehen.
- 4 Ausdehnung der Wirtschaftswälder
- 5 Auswirkungen des Klimawandels auf das Holzaufkommen

Die szenariengestützten Abschätzungen haben ein klares Ergebnis: Während gemäß der Trendentwicklung der weltweite Holzverbrauch im Zeitraum 2020 - 2050 um 20 - 30 % ansteigen dürfte, kann das weltweite Holzaufkommen nicht im selben Ausmaß gesteigert werden. Aufgrund der sich bereits abzeichnender Holznutzungstrends (z.B. Energie, Papier und Pappe, Bauen, Biokunststoffe, Textilien, Chemie) könnte sogar eine noch stärkere Nachfrage entstehen. Zwei der Szenarien deuten hingegen auf stark sinkende Holzangebotskapazitäten hin. Dies gilt für das Szenario, das einen Stopp der Entwaldung abbildet und das Szenario, das den Einfluss des künftigen Klimawandels miteinbezieht.

Die Versorgungslücken betragen 1,4 - 3,9 bzw. 2,6 - 4,5 Mrd. Kubikmeter pro Jahr (6). In den anderen Szenarien zeigen sich nur leichte Anstiege der Holzverfügbarkeit im Bereich von 1,9 - 12,8 %, die aber in keinem Falle ausreichen, um die Versorgungslücke zu schließen. Selbst bei Verzicht auf eine nachhaltige Nutzung wächst die Diskrepanz zwischen Nachfrage



— Holzfußabdruck Deutschland
— Globaler Durchschnittswert
..... Näherungsgerade

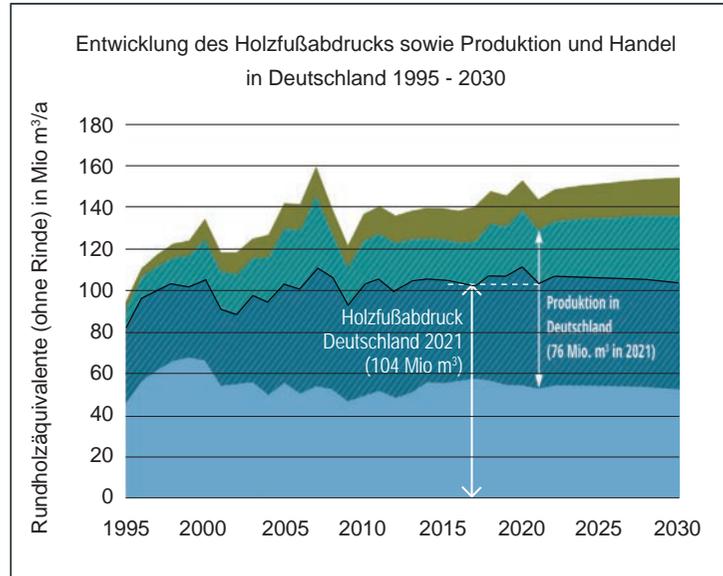
Abbildung 33:
Jährlicher Pro-Kopf-Holzfußabdruck in Deutschland und Vergleich zum weltweiten jährlichen Durchschnittsverbrauch im Zeitraum 1995 - 2021.
Quelle: (WWF 2022, S. 33).

und Angebot. Werden stärkere Nachhaltigkeitskriterien angelegt, wird die Lücke nur unwesentlich größer. Eine Verringerung der künftigen weltweiten Holznutzung ist somit unabdingbar, um die vorhandenen Wälder zu erhalten und nachhaltig bewirtschaften zu können (vgl. WWF 2022, S. 29).

Als nächstes soll nun ein Blick auf den deutschen Pro-Kopf-Holzverbrauch im Vergleich zum Risikokorridor für die europäische Union bzw. für Deutschland geworfen werden. Der Risikokorridor wurde hierbei so festgelegt, dass er eine praktische, robuste und sozialverträgliche Definition der Leitplanken für eine ökologisch verträgliche Waldnutzung darstellen kann. Dies beinhaltet eine Abwägung der unterschiedlichen Interessenslagen, erfordert aber am Ende auch Wertungen und Prioritätensetzungen. Besonders schwierig sind diese im Falle von grundsätzlichen Fragestellungen (z.B. dem Eigenwert der Natur und der menschlichen Kultur bzw. von Traditionen). Dabei wurde in der Studie folgendermaßen vorgegangen (vgl. WWF 2022, S. 22 ff.):

- Wiederausfuhr
- Holzernte für Export
- Holzernte für inländischen Verbrauch
- Holzeinfuhr

Abbildung 34:
Entwicklung des deutschen Holzfußabdrucks (beide untere blaue Flächen) sowie der Produktion von Holzprodukten und Holzhandel im Zeitraum 1995 - 2030. Angabe in Rundholzäquivalenten ohne Rinde. Die künftigen Projektionen basieren auf historischen Trends und spiegeln daher nicht unbedingt den potenziellen Anstiege wieder, der sich durch eine forcierte Bioökonomiepolitik ergeben würde. Quelle und nähere Erläuterungen: (WWF 2022, S. 32).

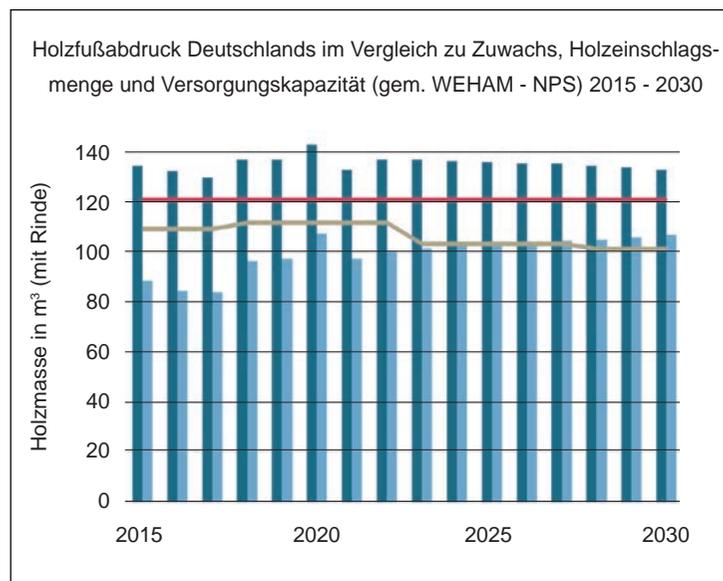


- Wieviel Wald steht für eine nachhaltige Holzversorgung bereit (Bestimmung der Verfügbarkeitsgrenzen)?
- Definition der nachhaltig möglichen Holzentnahme, wobei 50 % des Zuwachses als untere Grenze (geringes Nachhaltigkeitsrisiko) und 80 % als obere Grenze (hohes Nachhaltigkeitsrisiko) festgesetzt wurde.
- Abgleich mit den bisherigen Verbrauchsmustern inklusive sektorweiser Differenzierungen gemäß den bisher beobachtbaren Trends und szenariengestützte Prognosen des Holzverbrauchs bis 2050.
- Der Risikokorridor für Deutschland wurde nicht auf der Basis von weltweiten sondern von deutschen Waldszenarien (gewählt: WEHAM-NPS) festgelegt.

Aufschlussreich ist nun, den Holzfußabruck mit der heimischen Verfügbarkeit abzugleichen. Im Zeitraum 2015 - 2030 liegt der tatsächliche bzw. prognostizierte Verbrauch stetig über der Einschlagmenge und der Versorgungskapazität des WEHAM-Naturschutzpräferenzszenarios (siehe Abb. 35). Dieses wurde als Referenz gewählt, weil es als einziges der WEHAM-Szenarien eine nachhaltige Waldbewirtschaftung mit einem angemessenen Totholzanteil aufweist (vgl. auch Reise et al. 2017). Zu beachten ist, dass die Rundholzäquivalente um die Rindenteile (+12%) und Ernteverluste (+10%) ergänzt wurden, um eine Vergleichbarkeit zwischen den Mengenangaben der unterschiedlichen Studien zu ermöglichen. Die Entwicklung des Holzfußabdrucks (= Frischholzbedarf pro Kopf) in Deutschland zeigt im Zeitraum 2015 bis 2030 ein in etwa gleichbleibendes Niveau, während gleichzeitig ein Anstieg der Produktion und der Ausfuhren vorausgesagt wird (Abb. 34). Allerdings basiert diese Darstellung auf historischen Trends, die den künftig möglichen Ausbau der Bioökonomie nicht berücksichtigen.

- Holzfußabdruck Deutschland
- Holzeinschlagmenge
- Jährlicher Zuwachs
- Holzkapazität gemäß WEHAM Naturschutzpräferenzszenario

Abbildung 35:
Entwicklung des deutschen Holzfußabdrucks im Vergleich zur heimischen Versorgungskapazität im Zeitraum 2015 - 2030. Die Versorgungskapazität wurde anhand des WEHAM-Naturschutzpräferenzszenario und der jährliche Zuwachs gemäß der dritten Bundeswaldinventur bestimmt und konstant weitergeführt. Alle Werte verstehen sich als Rundholzäquivalente inklusive Rinde (+12%) und Ernteverluste (+10%). Quelle und nähere Erläuterungen: (WWF 2022, S. 33).



In Abbildung 36 werden die Pro-Kopf-Risiko-Korridore für Deutschland, die EU und weltweit den Holzverbräuchen in Deutschland und weltweit gegenübergestellt. Zu beachten ist, dass in dieser Abbildung die Verbrauchswerte in m³ mit Rin-

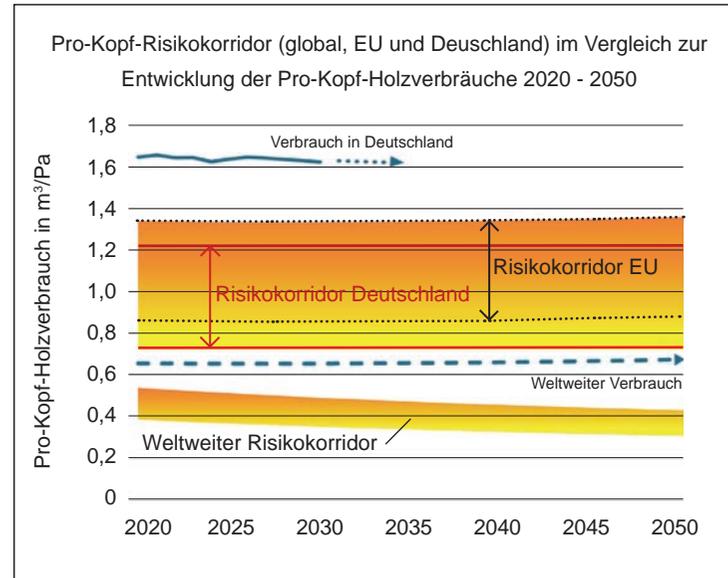
de angegeben sind. Sie enthalten die Umwandlungsfaktoren Rinde (+ 12%) und für Ernteverluste (+ 10%). Es zeigt sich, dass der momentane und der prognostizierte Verbrauch deutlich über der nachhaltig vertretbaren Holzressourcen liegt. Die Überschreitung liegt bezogen auf den nationalen Risikokorridor bei einem Faktor 0,3 - 2,3 und bezogen auf den globalen Risikokorridor bei einem Faktor 3,2 - 4,0.

Wenn man die Produktionsperspektive (Abb. 34 und 35) mit der Verbrauchsperspektive (Abb. 35 und 36) abgleicht, ist zu erkennen, dass der Holzverbrauch weder heute noch künftig mit dem nachhaltig verfügbaren heimischen Holzaufkommen gedeckt werden kann. Daher ist es notwendig die Waldfläche zu vergrößern und/oder den Holzverbrauch zu reduzieren. Hinzu kommt, dass es durch den Klimawandel wahrscheinlich zu einer zunehmenden Baum- und Waldsterblichkeit und damit zu einem Rückgang des nachhaltigen Holzpotenzials in Deutschland kommen wird (vgl. WWF 2022, S. 36).

Priorisierung der Holznutzung

Angesichts der begrenzten künftigen Verfügbarkeit von Holz ist es unverzichtbar, die Holznutzungen im Hinblick auf sinnvolle Verwendung, Holzeffizienz, Senkenoptimierung, Langlebigkeit und Wiederverwendung auszurichten (vgl. WWF 2022, S. 42):

- Förderung einer Holznutzung, die die nachhaltigen Versorgungskapazitäten als Leitplanken beachtet,
- Etablierung einer Kreislaufwirtschaft mit entsprechenden Nutzungskaskaden,
- Holzfasern möglichst lange im Verwendungskreislauf halten und Anreize zur Holzverbrennung beseitigen,
- Förderung langlebiger Holzprodukte und Einschränkung kurzlebiger, konsumorientierter Holznutzungen (z.B. Werbewerksendungen, Einwegverpackungen, auf Kurzlebigkeit hin gestaltete Möbel und Ausstattungen),
- Einführung eines Monitoring des Holzverbrauchs mit Festlegung von Richtwerten in Form von Leitplanken und einer darauf abgestimmten regelmäßigen Berichterstattung.



— Holzverbrauch Deutschland
 - - Weltweiter Holzverbrauch

Abbildung 36: Pro-Kopf-Risikokorridor (global, EU und Deutschland) im Vergleich zur Entwicklung des Pro-Kopf-Holzverbrauchs in Deutschland und dem prognostizierten weltweiten Holzverbrauch im Zeitraum 2020 - 2050. Die Verbrauchswerte sind in m³ mit Rinde angegeben und enthalten die Umwandlungsfaktoren Rinde (+ 12%) und für Ernteverluste (+ 10%). Quelle: (WWF 2022, S. 35).

Holz-Global-Jahresbudget

Aus Gründen der Verteilungsgerechtigkeit ist zu hinterfragen, ob die großen Unterschiede beim Holzkonsum zwischen den Menschen in Industrieländern und Menschen in Ländern mit geringem Einkommen gerechtfertigt sind. Wälder sind wie die Ozeane und die Atmosphäre einer Allmende analoge Allgemeingüter, auf die alle Menschen gleichermaßen Anspruch erheben dürfen. Angesichts der nun immer stärker zutage tretenden länderübergreifenden und global wirksamen Nachhaltigkeitsprobleme ist es von großer Bedeutung eine Antwort für die gerechte Verteilung globaler Allgemeingüter zu finden.

Um für derartige Fragen eine Bezugsgröße zu erhalten, macht es Sinn, analog zu den Treibhausgasen (CO₂-Global-Budget) ein angemessenes Pro-Kopf-Holzbudget zu bestimmen. Anders als bei den klimawirksamen Gasen, bei denen bis auf weiteres die zulässige Menge insgesamt zu begrenzen ist, wäre beim Holzbudget die nachhaltig verträgliche Jahresmenge

festzulegen. Es bietet sich an, dafür den Holzfußabdruck zu verwenden. Er wird so berechnet, dass die Gesamtmenge des im Inland gernteten Holzes und die Menge des im Ausland gernteten Holzes zur Inlanddeckung addiert und davon die Menge der für den Export herangezogenen Holzernte wieder abzieht (siehe Abb. 34). Der so bestimmte Holzfußabdruck wird in einem Leitplankenansatz mit dem Risikokorridor (untere und obere Grenze) verglichen.

Der Risikokorridor für Deutschland wurde in (WWF 2022) zwischen 0,9 und 1,2 m³/Pa mit Rinde bestimmt und beträgt ohne Rinde 0,8 - 1,1 m³/Pa. Es handelt sich um mengenbezogene Grenzen, wobei die obere sich in erster Linie auf die Erhaltung des Holzvorrats und der Waldfläche bezieht, während die untere auch Aspekte des Erhalts der Biodiversität und Ökostabilität berücksichtigt (vgl. WWF 2022, S. 25).

Wechselt man auf die Perspektive einer globalen Verteilungsgerechtigkeit, wäre der Risikokorridor sehr viel geringer gefasst: Für das Jahr 2020 liegt dieser im Bereich zwischen 0,38 und 0,55 m³/Pa mit Rinde und bei 0,34 - 0,49 m³/Pa ohne Rinde und nimmt mit steigender Weltbevölkerung immer mehr ab. Damit erhält man einen Maßstab für die Ungleichverteilung der Verbrauchsmuster und die sich dahinter verbergenden Ressourcenverteilungen im globalen Maßstab. Aus Gründen der Fairness und Nachhaltigkeit erscheint es zumindest geboten, für einen Ausgleich zu sorgen. Dieser könnte z.B. in der Finanzierung einer nachhaltigen Waldbewirtschaftung und Aufforstung in Ländern mit geringem mittleren Einkommen liegen, um dadurch einen Beitrag zur Verteilungsgerechtigkeit zu leisten.

Im Sektor der privaten Haushalte wurden im Jahr 2015 ca. 0,35 m³/Pa für Heizzwecke verbrannt und 0,16 m³/Pa für Holzprodukte im Wohnungsbau eingesetzt. Für eine verursachergerechte Bilanzierung fehlen noch bestimmte Beträge (z.B. anteiliger Holzeinsatz für die Aufbereitung, Produktion sowie bei der Strom- und Fernwärmeerzeugung). Damit haben Wohn-

nutzungen alleine mit ca. 0,5 - 0,6 m³/Pa einen Holzfußabdruck erzeugt, der höher liegt als der weltweite Riskokorridor (0,34 - 0,49 m³/Pa ohne Rinde). Bezogen auf den nationalen Risikokorridor (0,8 - 1,1 m³/Pa) beanspruchen die privaten Haushalte bereits deutlich mehr als die Hälfte des nachhaltig vertretbaren Holzkonsums.

Im Kontext dieser Arbeit ergibt sich somit ein Spannungsfeld zwischen dem CO₂-Global-Budget und dem Holz-Global-Jahresbudget, durch das am Ende auch der Beitrag der Holznutzungen zu den CO₂-Senken begrenzt wird. Die künftige Holzverwendung kann nur mit Hilfe von gut hergeleiteten Leitplanken und eingebettet in eine vernunftgeleitete Risikobegrenzung in eine Klimaschutz-Gesamtstrategie eingebunden werden.

Waldentlastung

Ziel der waldentlastenden Strategien ist es, den Flächen- und Nutzungsdruck, der auf den deutschen und ausländischen Wäldern lastet, substanziell zu reduzieren. Der Klimawandel und die dadurch erfolgende Anpassungen des Waldes selbst bzw. der damit verbundene Waldumbau verringern wahrscheinlich zusätzlich das künftig verfügbare Holzaufkommen. Gemäß dem zuvor vorgestellten Leitplankenansatz ist der Pro-Kopf-bezogene Holz-Jahreskonsum gegenüber dem heutigen Stand um 20 - 50 % zu reduzieren. Das kann nicht ohne Konsequenzen auf den Holzbau und die sonstigen stofflichen und energetischen Holznutzungen im deutschen Wohnbau bleiben. Im Kern geht es darum, trotz reduziertem Holzeinschlag in den Wäldern am Ende die dauerhaften Holzdienstleistungen und CO₂-Senken zu vergrößern. Um das nachhaltige Holzbudget mittel- und langfristig einhalten zu können, sind vor allem folgende Strategien erfolgversprechend:

- Durch konsequente Energieeffizienzmaßnahmen kann der Holzbedarfs für Heizzwecke bis 2070 mehr als halbiert werden (siehe Abb. 11).
- Weitere Einsparungen sind durch den Umstieg von Holzheizungen auf Wärmepumpen oder Solaranlagen möglich.

- Der Quasi-Automatismus der thermischen Verwertung von Altholz am Ende der Nutzungszeit ist in Frage zu stellen. Denn dies ist mit hohen Emissionen und einer Zerstörung der im Holz gespeicherten CO₂-Senke verbunden. Wenn eine Fortsetzung der stofflichen Nutzung durch Wiederverwendung oder Recycling nicht in Frage kommt, sind Prozesse, die die CO₂-Senke größtenteils erhalten, zu bevorzugen, z.B. über eine davor geschaltene Biokohleerzeugung. Alternativ könnte die thermische Verwertung, sofern sie im großtechnischen Maßstab erfolgt, mit einer CO₂-Sequestrierung verbunden werden (BECCS).
- Auf längere Sicht ist die Etablierung von senkenerhaltenden Strategien besonders wichtig, z.B. in Form einer Kaskadennutzung im Sinne eines holz- und nawarobasierten zirkulären Bauen. Das beinhaltet auch, Erneuerungs- und Ersatzmaßnahmen von Holzkonstruktionen bzw. Holzbauten wieder mit Holzkonstruktionen bzw. Holzbauten vorzunehmen. Dafür ist es notwendig, die Demontage und die künftige Wiederverwendung bereits in der Erstkonstruktion mitzudenken (z.B. Verwendung von Holz- anstelle von Stahlverbindungsmiteln).
- Soweit möglich, sind holzsparende Konstruktionen zu realisieren. Der aktuelle Trend hin zum Holzmassivbau ist aus Sicht der Waldentlastung kritisch zu bewerten; insbesondere überall dort, wo dieser aus statischen oder sonstigen Gründen nicht zwingend erforderlich bzw. sinnvoll ist.
- Aus Ressourcen- und Senkensicht ist der Einsatz von landwirtschaftlichen Reststoffen und der potenziell nachhaltig verfügbaren und schnellwachsenden agrarischer Biomasse der beste Ansatz zum Ersatz von Holz in Bauprodukten.
- Neben den bislang kaum genutzten Potenzialen von Stroh und Hanf sowie Gräsern bietet sich der Anbau von schnell wachsenden Hölzern (z.B. Pappeln und Weiden) in Kurzumtriebsplantagen oder in Agroforsten an.
- Durch die Rückführung der Fleischproduktion auf das ökologisch und gesundheitspolitisch vertretbare Maß könnte die stoffliche Nutzung von landwirtschaftlichen Reststoffen

und Produkten nochmals vergrößert werden. Diese Strategie erschließt weitere Senkenpotenziale, die zu den mit einer reduzierten Fleischproduktion verbundenen Treibhausgasminderungen noch hinzukommen.

- Der Einsatz von Holz in hochwärmegeprägten Hüllkonstruktionen mit biogenen Dämmungen ermöglicht die Umsetzung einer Tripel-Strategie. Erstens werden durch die hochwertige Dämmung die Wärmeverluste und damit die heizbedingten Emissionen stark reduziert. Diese Dämmmaßnahmen erfolgen mit minimalem Einsatz grauer Energie und Emissionen. Werden hierbei biogene Dämmstoffe schnellwachsender Pflanzen eingesetzt, lassen sich damit darüberhinaus CO₂-Senken schaffen. Bei einer langen Nutzungsdauer von größer 80 Jahren resultiert daraus ein insgesamt klimaentlastender Effekt, der mit sonstigen Holzkonstruktionen nicht erreichbar ist. Ein weiterer Vorteil ist der universelle Einsatz im Neubau und Modernisierungen sowie im Holz-, Holzhybrid- und im Massivbau.
- Bei weitem nicht alle Baukonstruktionen erfolgen mit Holzkonstruktionen. Daher ist parallel zum Holzbau und dem Bauen mit sonstigen Nawaros eine Dekarbonisierung mineralischer Baustoffe, insbesondere von Zement und Beton sowie von Metallen und allen sonstigen nicht-biogenen Baumaterialien notwendig. In diesem Zusammenhang ist besonders auf die Vielfalt von Mischbauweisen, z.B. des Holzhybridbaus hinzuweisen. Gerade in nichttragenden Fassaden können biogene Dämmstoffe bereits heute problemlos zum Einsatz kommen. Im Bestand ergeben sich künftig weitere Kombinationen von Massivbau und biogenen Dämmsystemen. Insgesamt kann dadurch das Bauen mit Nawaros ohne Holz bzw. mit stark reduziertem Holzeinsatz gefördert werden.
- Schließlich haben auch Suffizienzstrategien, z.B. die Reduzierung der Wohnfläche pro Person oder ein gewisser Komfortverzicht beim Heizen und den Warmwasseranwendungen in den privaten Haushalten einen waldschonenden Effekt, der bislang kaum diskutiert wurde.

Reststoffart	Wassergehalt	Menge (Mio t/a)	
		Frischmasse	Trockenmasse
Getreidestroh (z.B. Weizen, Roggen, Gerste, Triticale, Hafer)	14%	30	25,8
Rapsstroh	14%	7,5	6,4
Körnermaisstroh	14%	4	3,1
Ernterückstände Hackfrüchte (Kartoffel, Zuckerrübe)	82 - 85 %	19	3,1
Rapspresskuchen	10%	3	2,7
Rinder- und Schweinegülle	88 - 97 %	122	12,2
Festmist (z.B. Rinder, Schweine, Pferde, Geflügel)	40 - 75 %	30	7,5
Summe		215	60,8

Tabelle 27:
Aufkommen landwirtschaftlicher Reststoffarten. Angabe in Mio Tonnen pro Jahr Frischmasse bzw. Trockenmasse als Mittelwerte der Jahre 1999 - 2007. Quelle: (DBFZ 2012, S. 10).

Landwirtschaftliche Reststoffe und ihre Verwendung als Bau- und Dämmstoffe

Im Gegensatz zum Holzbau findet der Einsatz von agrarischer Biomasse als Baumaterial bislang kaum Beachtung. Das liegt vor allem daran, dass diese Stoffgruppe im derzeitigen Baugeschehen kaum eine Rolle spielt. Dabei ist die Menge an Reststoffen, die in der Landwirtschaft jährlich anfällt, wenigstens vergleichbar mit Holzaufkommen in den deutschen Wäldern (siehe Vergleich der Tabelle 6 und 27). Sie sind demnach eine bislang kaum erschlossene, ja geradezu „vergessene Ressource“ zur Senkenbildung im Hochbau.

Für die stoffliche Nutzung in Gebäuden ist vor allem das Getreidestroh von Interesse. Es fällt als Nebenprodukt an, benötigt wenig Aufbereitungsaufwand und fällt jährlich in großen Mengen an. Zudem weist es eine geringe Wärmeleitfähigkeit auf und eignet sich daher vor allem als Dämmstoff, kann aber auch konstruktiv eingesetzt werden (vgl. Hon/Kraniotis 2020). Jedoch ist zu beachten, dass die Nutzung von Ernterückständen auch mit ökologischen Risiken verbunden sein kann, z.B. Minderung der Kohlenstoffbindung und eine reduzierte Humusbildung in den Böden sowie ein eingeschränkter Erosi-

onsschutz. Das tatsächlich energetisch bzw. stofflich nutzbare Strohpotenzial hängt neben saisonalen Schwankungen vor allem davon ab, wieviel Stroh auf den Feldern verbleiben soll. Bezieht man diese Faktoren mit ein, liegt das nachhaltig nutzbare Strohpotenzial in Deutschland bei ca. 8 - 13 Mio t/a (siehe Abb. 37). Das entspricht 27 - 43 % der jährlich nachwachsenden Getreidestrohmenge (vgl. DBFZ 2012, S. 174). Weitere Studien zeigen, je nach den dort getroffenen Annahmen davon abweichende Ergebnisse, die für das künftige Reststrohaufkommen Werte zwischen 4 und 15 Mio t Frischmasse ausweisen (vgl. UBA 2018, S. 77). Verglichen mit dem jährlichen Dämmstoffeinsatz, der im Jahr 2021 40,6 Mio m³ ausmachte (vgl. Branchenradar 2023), ist das nachhaltig nutzbare Strohpotenzial riesig. Bei einer mittleren Rohdichte von 100 kg/m³ kommt man auf ein theoretisches Dämmvolumen von 40 - 150 m³. Das reicht in jedem Fall für eine konsequent biogen gestützte Dämmstrategie und ermöglicht weitere umfangreiche stoffliche und energetische Nutzungen jenseits davon.

11 Umsetzungsphasen

Wie die Szenarien zum deutschen Wohngebäude zeigen, ist die Schaffung von CO₂-Senken ein notwendiger Bestandteil der Klimaschutzstrategien. Von daher ist ein langfristiges Senkenregime unverzichtbar, um in einer Art Reperaturmechanismus eine Unterschreitung des 2-Grad-bzw. des 1,7 Grad-Limits gerade noch erreichen zu können. Nach dem derzeitigen Stand ist dies jedoch nur in sehr langen Zeiträumen umsetzbar. Die Zeitskala des Klimaschutzes verschiebt sich dadurch weg von wenigen Dekaden hin zu noch längeren Zeitperioden. Dabei lassen sich folgende drei Phasen unterscheiden:

Vorbereitungs- und Einführungsphase (bis 2030)

Durch den hohen Neubaubedarf ist es sinnvoll die Holzbaquote zu erhöhen. Dies jedoch nur unter der Bedingung, dies mit hohen energetischen Qualitäten zu verbinden. Damit lässt

sich ein doppelter Substitutionseffekt erreichen, der sowohl die Material- als auch die Energieeffizienz erhöht. Der Fokus sollte auf der Realisierung von kostengünstigen Holzhüllen liegen. Hier stellt auch der Holzhybridbau eine gute Option dar. Auch bei den energetischen Modernisierungen existieren Chancen mit Holz und Nawaro-Dämmungen hochwertige Gebäudehüllen zu schaffen. Besonders interessant sind hierbei Konzepte, die eine serielle Sanierung zum Ziel haben.

In der ersten Phase sollten auch die Bilanzierungsfragen geklärt werden, damit die Einbeziehung von CO₂-Senken in die übergreifenden Klimaschutzstrategien gelingt. Die bisher üblichen Ökobilanzen sind dafür ungeeignet und zu überarbeiten.

Für ein übergeordnetes Senkenregimes sind auch Klimakompensationen außerhalb der Gebäude zu entwickeln (z.B. Aufforstung, Moorbewässerung) und Möglichkeiten zu schaffen, wie diese in die Gebäudebilanzierungen einzubinden. Eine wesentliche Voraussetzung dafür sind faire Finanzierungsmodelle (z.B. negativer CO₂-Preis für CO₂-Senken und die Vergütung von Naturschutzleistungen). Zur Sicherung der langfristigen Senkenfunktion sind ferner geeignete Bilanzierungen und Monitoringprozesse notwendig (vgl. Joosten et al. 2013).

Klassische Klimaschutzmaßnahmen (2030 - 2050)

Die Jahre 2030 - 2050 entscheiden darüber, ob überhaupt noch eine rechtzeitige Umsetzung des gebäudebezogenen Klimaschutzes gelingt. Wie die Szenarien in (Vallentin 2023) zeigen, stehen die beiden Strategien Energieeffizienz und der Ausstieg aus den fossilen Energiesystemen im Vordergrund. Zusätzlich spielt eine Rolle, ob es gleichzeitig gelingt, die Dekarbonisierung der Materialbereitstellung bis 2050 voranzutreiben. Mit entscheidend ist, die energetische Nutzung von Holz und sonstiger Biomasse zurückzudrängen. Dies gelingt vor allem durch eine konsequente Energieeffizienzsteigerung des Wohngebäudeparks und den Umstieg auf dominant stromgestützte erneuerbare Energieversorgungen. Während die Neu-

bautätigkeit immer stärker zurückgeht liegt der Schwerpunkt in dieser Phase auf den energetischen Modernisierungen. Der Einsatz von schnellwüchsigen biogenen Dämmstoffe, idealerweise in Verbindung mit Holzkonstruktionen ermöglicht eine ressourcen-, energie- und senkeneffiziente Umsetzung.

In diesem Zeitraum ist es wichtig, die nächste Phase vorzubereiten, indem die Konzepte, Technologien und strukturellen Voraussetzungen geschaffen werden, um eine möglichst lange stoffliche Nutzung im Materiallager, den die Wohnbauten darstellen, sicherzustellen. Neben der Kaskadennutzung sind Alternativen zur emissionsfreisetzen Verbrennung zu entwickeln und als Standardtechnik einzuführen (z.B. Biokohleherstellung, BECCS, Biochemie). Der Substitutionseffekt nimmt immer mehr ab, um ab 2050 kaum noch eine Rolle zu spielen – zumindest falls bis 2045 Klimaneutralität erreicht sein sollte.

Nachlaufphase mit Schwerpunkt Senkenbildung (ab 2050)

Die Nachlaufphase hat vor allem das Thema des Erhalts und der Ausweitung der CO₂-Senken. Es kann derzeit nicht abgesehen werden, wie lange diese Strategie aufrecht erhalten werden muss, um eine Stabilisierung des Klimawandels auf vertretbarem Niveau zu erreichen. Ganz sicher wird es sich nicht nur um wenige Dekaden handeln sondern um deutlich längere Zeiträume. Voraussetzung hierfür ist, dass der Gebädepark durch seinen Energie- und Materialbedarf kaum noch THG-Emissionen verursacht, weil die Senkenpotenziale insgesamt gering sind (maximal 1t/Pa). Von besonderer Bedeutung ist hierfür, dass eine Senkenbildung nur in Bauteilen mit langer Lebensdauer (> 50 Jahren) gelingt bzw. wenn durch Kaskadennutzung kurzlebige Bauteile weitere Nutzungsperioden durchlaufen.

Besondere Bedeutung bekommt hier der Senkenerhalt in Gebäuden aus biogenen Baustoffen. Sobald diese instandgesetzt oder erneuert werden, ist dafür Sorge zu tragen, dass der Ersatz/Neubau wieder mit biogenen Materialien erfolgt (vgl. Pit-

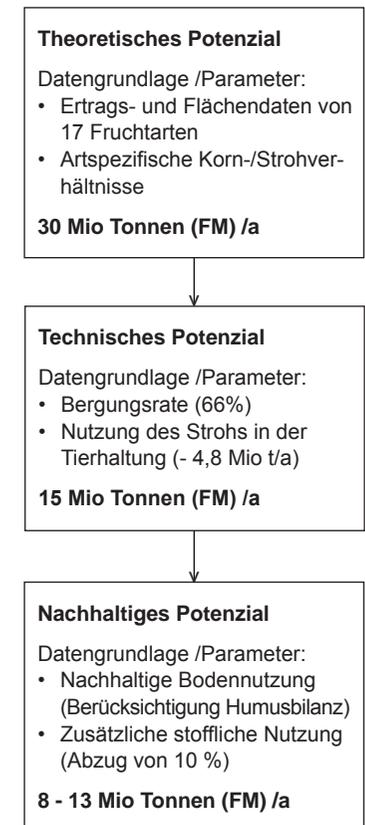


Abbildung 37: Bestimmung des nachhaltig verfügbaren Strohpotenzials für die energetische Nutzung. Angabe der jährlich anfallenden Getreidestrohmengen in Tonnen Frischmasse. Quelle: (DBFZ 2012, S. 17).

tau et al. 2022, S. 26 f.). In dieser Phase kann schließlich beurteilt werden, ob der klimaresiliente Umbau der Wälder rechtzeitig eingeleitet wurde. Dann erst wird deutlich, inwieweit die künftige Holznutzung und der Einstieg in die Bioökonomie auf globaler und nationaler Ebene auf ein ausreichend nachhaltig verfügbares Aufkommen zurückgreifen kann oder nicht.

12 Risikobegrenzende Strategien der künftigen Holznutzung bei den Energieanwendungen und im Holzbau

Die Ziele der Biodiversität und des Klimaschutzes beinhalten Zielkonflikte und sind daher nicht deckungsgleich. Daraus resultieren unterschiedlichen Einschätzungen zur Senken- und Klimaschutzwirkung der deutschen Wälder in Verbindung mit den Holznutzungen. Somit erscheint es sinnvoll, eine Strategie der Risikobegrenzung zu entwickeln. Diese könnte als Grundlage des anstehenden Interessensausgleichs dienen und soll im Folgenden in ihren Grundzügen angedeutet werden:

Sicherung der ökologischen Funktionen des Waldes

- Die vielfältigen Funktionen der Wälder in Hinsicht auf Artenvielfalt und -schutz, Regulierung des Wasserhaushaltes, Erosionsschutz, Verbesserungen des Regional- und Kleinklimas sind primär und durch geeignete Schutzmaßnahmen sicherzustellen (vgl. Bartsch/Röhrig 2016).
- Ein wichtiger Baustein hierfür ist die Ausweitung und räumliche Vernetzung der Flächen von geschützten Naturwäldern sowie naturnahen Wirtschaftswäldern mit ökologisch-schonender Pflege und Bewirtschaftung. Hierzu existieren konkrete Zielsetzungen in der deutschen Biodiversitätsstrategie 2020 (BfU 2007) sowie in der aktuelleren EU-Biodiversitätsstrategie 2030 (EU 2022). Bei letzterer ist jedoch noch unklar, welchen Anteil hierbei Waldflächen in der Kategorie des strengen Schutzes erhalten sollen und unter welchen Bedingungen in den Schutzgebieten eine weitere Holznutzung möglich wäre (vgl. LFW 2021, S. 6 ff).

- Die Umsetzung soll vor allem über den Prozessschutz erfolgen. Dabei geht es um weitgehenden Nutzungsverzicht zur Bewahrung und Steigerung der biologischen Vielfalt zum Schutz seltener bzw. bedrohter Arten und Lebensräume sowie um die dauerhafte Sicherung natürlicher Produktionsgrundlagen wie z.B. Genpools und seltener Artengemeinschaften (vgl. Luick et al 2021).
- Zur Anpassung an den Klimawandel ist ein Umbau der artenarmen Nadelholz-Wirtschaftswälder in klimaresiliente Laub-Mischwälder notwendig. Damit kann bei schonender Bewirtschaftung auch ohne Nutzungsverzicht ein Beitrag zur Steigerung der Biodiversität geleistet werden.

Erhalt der Senkenfunktion des Waldes

- Im deutschen LULUCF-Sektor stellt der Wald bislang als einzige Flächennutzung eine Netto-CO₂-Senke dar und dies trotz der bedeutenden Holzentnahme.
- Störungen wie Orkane, Stürme, Dürren und Insektenbefall haben in der jüngeren Vergangenheit die Kohlenstoffspeicherung im Wald zeitweise stark zurück gehen lassen.
- Kommt es künftig zu einer dauerhaften Verschlechterung der natürlichen Randbedingungen besteht in Verbindung mit einer Übernutzung durch zu starke Holzentnahme die Gefahr, dass der deutsche Wald von einer CO₂-Senke zu einer CO₂-Quelle werden könnte (vgl. Blumröder et al. 2020).

Erhalt der Senkenfunktion des Holzproduktespeichers

- Auch der Holzproduktespeicher war in der Vergangenheit als CO₂-Senke im LULUCF-Sektor wirksam, d.h. im Mittel fiel der Zuwachs größer aus als der Abgang.
- Angesichts der wirtschaftlichen Bedeutung der Holznutzungen sollten der stehende Wald und die Holzprodukte diese Funktion auch künftig gemeinsam wahrnehmen können. Nur gemeinsam können sie einen Beitrag als dauerhafte Senke in Verbindung mit einer klimagerechten Transformation der Wirtschaft erbringen.

- Um den Holzproduktespeicher in seiner Senkenwirkung zu vergrößern ist eine Verlagerung der Holznutzung weg von kurzlebigen Produkten bzw. dem Einsatz als Energieträger hin zu langlebigen Produkten sowie eine Ausweitung der bisherigen Kaskadennutzung anzustreben.

Infragestellung energetischen Holznutzung sowie der thermischen Verwendung am Ende der Nutzungskaskade

- Holz und sonstige Biomasse sind wertvolle speicherfähige Energieträger, die in hochwertigen Energieumwandlungsprozessen (Hochtemperaturanwendungen, Regelenergie, KWK, Biokohleherstellung) eingesetzt werden sollten.
- Im Gegensatz dazu ist das Heizen mit Holz in Gebäuden mit einem hohen spezifischen Wärmebedarf ein Beispiel für eine besonders ineffiziente Holznutzung. Diese Anwendung wurde ausgerechnet in den letzten 15 - 20 Jahren intensiv gefördert. Wegen dem dadurch ausgelösten „Lock-in-Effekt“ ist damit - zumindest mittelfristig - wertvolle Biomasse in diesen Systemen gebunden.
- Die direkten CO₂-Äquivalent-Emissionen bei der Verbrennung von Holz sind mit 0,43 kg/kWh deutlich höher als bei fossilen Brennstoffen. Hinzu kommt, der schlechtere Jahresnutzungsgrad der Energieumwandlung in Holzheizungen. Bezogen auf die Nutzwärme sind dadurch die direkten Emissionen in etwa doppelt so hoch, wie bei modernen Gas-Brennwertheizungen.
- Die direkten Treibhausgasemissionen durch das Verbrennen fester Biomasse liegen derzeit bei jährlich 40 - 45 Mio Tonnen Kohlendioxid. Das sind umgerechnet ca. 0,5 t/Pa. In Anbetracht des geringen Potentials der natürlichen Senken von ca. 1,0 t/Pa ist es nicht zukunftsfähig, die im Waldholz und im Holzproduktespeicher mühsam geschaffene Senke durch Verbrennungsprozesse zu zerstören.
- Durch Effizienzverbesserungen und den Umstieg auf brennstofffreie Wärmeversorgungen sollte nicht nur ein Ausstieg aus den fossilen sondern auch aus den biomassebasierten Heizsystemen erfolgen.

- Bei den Wohngebäuden ist dies wegen der dort immer noch stark verbreiteten Scheitholzverbrennung von nochmals größerer Bedeutung, weil hierbei vor allem Laubholz zum Einsatz kommt.
- In Ökobilanzen wird mit großer Selbstverständlichkeit die thermische Verwendung von Holz am Ende der Nutzungskaskade angenommen. Auch wenn dies heute die übliche Endnutzung darstellt, ist diese Setzung aus Sicht des Klimaschutzes in Frage zu stellen.
- Als Alternative dazu sind neue Konzepte für eine sinnvolle Weiternutzung oder sichere Einlagerung, anstelle der heute üblichen thermischen Verwertung zu entwickeln.
- Beispiele für derartige emissionsarme Prozesse sind Heizkraftwerke, denen eine Biokohleerzeugung vorgeschaltet ist oder die großtechnische Biomassenutzung zur Erzeugung von Prozesswärme oder in stromgeführten KWK-Anlagen bei denen im Anschluss eine Abscheidung von Kohlendioxid und die sicheren Einlagerung in geologischen Speichern erfolgt (BECCS).

Forst- und Holzwirtschaft in Ausrichtung auf den Holzbau

- Bei der stofflichen Verwendung im Holzbau dominiert Nadelholz, während bei den energetischen Nutzungen vor allem Laub- und Rest- sowie Altholz eingesetzt werden.
- Der klimaresiliente Waldumbau betrifft vor allem Monokulturen mit Fichte und Kiefer, weil diese besonders störungsanfällig für Stürme, Trockenheit und Schädlingsbefall sind. Dadurch ist vorerst das Nadelholzaufkommen gesichert.
- Die hierbei angestrebten Laub-Mischwälder führen langfristig zu einer geringeren Verfügbarkeit von Nadelholz. Dies lässt sich künftig nur teilweise durch die Anpflanzung schnellwüchsiger Baumarten (z.B. Douglasie) und den stofflichen Einsatz von Laubholz ausgleichen.
- Die Abwägung zwischen Nutzungsverzicht und Ausweitung der Holznutzung sollte differenziert nach Waldnutzungstypen erfolgen und auch eine Ausweitung der Waldflächen (Neuaufforstung, Agroforste) mit einschließen.

Sachgerechte Bilanzierung von Holz und Nawaros

- Die Annahme einer klimaneutralen Bereitstellung von Holz trifft nur für sehr langen Betrachtungszeiträume zu, die angesichts der akuten Klimakrise nicht angemessen erscheinen.
- Fossile und biogene Emissionen sollten künftig separat ausgewiesen werden, um die zeitabhängige Senkenwirkung der Zwischenspeicherung kalkulieren zu können, z.B. mittels GWP(bio)- oder einer dynamischen Methode.
- In den Ökobilanzen sind realistische Nutzungsdauern für die Einzelkomponenten und den Lebenszyklus selbst anzusetzen, weil ansonsten ein realitätsfernes Abbild entsteht und keine CO₂-Nettosenkeneffekte nachweisbar sind.
- Für eine richtungssichere Bewertung ist eine Dynamisierung der Emissionskennwerte für die Bereitstellung von Materialien und Energie auf der Basis der zu erwartenden Dekarbonisierung der Bau- und Energiesysteme in die Bilanzsysteme aufzunehmen (vgl. Alig et al. 2020).

Senken-, material- und energieeffizienter Holzbau

- Angesichts der begrenzten Verfügbarkeit von Holz ist der künftige Holzbau am übergeordneten Ziel einer möglichst großen Klimaschutz- und Senkeneffektivität auszurichten.
- Dies führt weg von einer reinen Mengenbetrachtung („Wie kann man im einzelnen Gebäude eine möglichst große Kohlenstoffspeicherung erreichen?“) hin zu einer möglichst effizienten Umsetzung der hierfür notwendigen Material- und Energiedienstleistungen („Wie können wir mit den limitierten Ressourcen möglichst viel erreichen?“).
- Generell ist die Verwendung von Holz in langlebigen Baukonstruktionen aus der Sicht des Klima- und Ressourcenschutzes der „Königsweg“ einer möglichst effektiven Biomassenutzung. Eine zügige Intensivierung des Holzbaus ist bis 2030/40 anzustreben, weil bis dahin das heimische Nadelholzaufkommen gesichert ist und in eine Phase mit erhöhten Wohnbau- und Sanierungsbedarf fällt.
- Für die Langlebigkeit der Holzbauteile sind diese bauphysikalisch zuverlässig zu konstruieren und gut zu schützen.

- Die Verwendung von Holz als Konstruktionswerkstoff sollte möglichst materialsparend erfolgen (z.B. statisch optimierter Holzrahmenbau anstelle Holzmassivbau). Hierbei können auch Mischbauweisen (z.B. Holzhybridbau mit Tragstruktur im Massivbau und nichttragenden Fassaden sowie Dächern in Holzbauweise) sinnvoll sein.
- Der Holzmassivbau ist vor allem für statisch höher beanspruchte Bauteile prädestiniert, z.B. als Tragstruktur im mehrgeschossigen Wohnbau.
- Für das zirkuläre Bauen hat der Holzbau auf zwei Ebenen große Potenziale, indem hier die Weiternutzung von Konstruktionen und Materialien mit dem Erhalt der darin gebundenen CO₂-Senken kombiniert werden kann. Technologisch steht die hier im Zentrum stehende Kaskadennutzung biogener Baumaterialien am Anfang der Entwicklung.
- Dafür ist es notwendig, die künftige Weiternutzung der Konstruktionen durch gute Zerlegbarkeit der Bauteilaufbauten und die Vermeidung von Problemstoffen vorzubereiten.
- Einen Schlüssel zur CO₂-Senkenbildung stellen schnellwüchsige biogene Dämmstoffe (z.B. Stroh, Hanf) oder Einblasdämmungen aus biogenen Recycling- bzw. Restprodukten (z.B. Zellulose, Holzfasern) dar. Diese benötigen sehr wenig Energie für die Herstellung und weisen zudem als sorptive Dämmstoffe feuchtetechnische Vorteile auf.
- Aus Klimaschutzsicht ist es auch für das Bauen mit Holz unverzichtbar, sowohl im Neubau als auch bei der energetischen Sanierung des Bestandes eine hohe Energieeffizienz mit einer erneuerbaren Energieversorgung zu koppeln.
- In der Kombination von Senken-, Material- und Energieeffizienz liegen die größten Chancen für einen zeitgemäßen Holzbau. Erstens kann damit der Klimaschutzbeitrag der Holznutzung substantiell gesteigert werden. Zweitens wird durch die Ressourcenschonung auch eine kostenoptimale Umsetzung der Klimaschutzstandards erleichtert. Nicht zuletzt kann damit auch ein konstruktiver Beitrag zur Auflösung des Konflikts zwischen Klima- und Naturschutz geleistet werden.

Fazit: Wie kann der Holzbau zum Klimaschutz beitragen?

- 1 Der Schutz der Wälder und ihrer Biodiversität, auch um ihrer selbst willen, steht an erster Stelle. Wälder erbringen vielfältige Öko- und Klimadienleistungen und dienen als Kohlenstoffspeicher und -senken dem Klimaschutz.
- 2 Für die Entnahme von Holz aus den Wäldern existieren Grenzen der nachhaltigen Verfügbarkeit. Durch den Klimawandel und die notwendige Waldanpassung wird diese künftig zusätzlich zurückgehen. Leitplanken in Form eines Risikokorridors ergeben für Deutschland ein verträgliches Pro-Kopf-Holzbudget zwischen 0,8 und 1,1 m³/Pa (6).
- 3 Das nachhaltig nutzbare Holzaufkommen liegt damit niedriger als der derzeitige Holzverbrauch. Dadurch wird eine Priorisierung der Holznutzungen notwendig.
- 4 Aus Gründen des Klimaschutzes sind kurzlebige Holzverwendungen wenig zielführend. Kritisch zu bewerten sind die meisten Energienutzungen, insbesondere die Verbrennung in Heizsystemen von Gebäuden mit hohem Wärmebedarf. Auch die thermische Verwertung von Holzprodukten am Ende der Nutzungsphase ist in Frage zu stellen, weil mit hohen Emissionen und der Zerstörung von prinzipiell erhaltbaren CO₂-Senken verbunden.
- 5 Aus der Perspektive der CO₂-Senkeneffektivität stellt der Einsatz von Holz in möglichst langlebigen Holzkonstruktionen den „Königsweg“ dar. Diese kann durch eine Kaskadennutzung noch gesteigert werden. Das anzustrebende Ideal ist der dauerhafte Erhalt des Holzes im Materialkreislauf.
- 6 Der Holzbau kann als isolierte Maßnahme nur wenig zum Klimaschutz beitragen. Erst durch seine Einbettung in eine Gesamtstrategie können die Vorteile des Holzbaus zur vollen Geltung kommen. In Verbindung mit hohen energetischen Qualitäten gelingt es, die Steigerung der Energieeffizienz und den Einsatz von erneuerbaren Energien sowie Materialien mit der Bildung von CO₂-Senken zu verknüpfen. Dann – und nur dann – ergibt sich Chance, sich aus der Klima- und Energiekrise „herauszubauen“.

- 7 Einen Schlüssel hierfür bilden holzsparende Hüllkonstruktionen, die mit schnell nachwachsenden biogenen Materialien gedämmt sind. Sie sind universell einsetzbar: sowohl im Neubau als auch bei energetischen Modernisierungen, tragend und nichttragend, im reinen Holzbau oder im Holzhybridbau sowie als Dämnhülle im Bestands-Massivbau.
- 8 Bei der Klimaschutzbilanzierung ist der Zeitfaktor zu berücksichtigen. Eine Dynamisierung ist sowohl für alle Energie- und Herstellungsprozesse aber auch für die biogenen Emissionen von Holz und Nawaros erforderlich. Die Ökobilanzen sind in diesem Sinne komplett zu überarbeiten.
- 9 Wenn dies über sehr lange Zeiträume erfolgt, kann der konsequente Einsatz biobasierter Materialien in Gebäuden als „Reperaturmechanismus“ für das Klima dienen. Dies erfolgt über den generationenübergreifenden Aufbau und Erhalt von CO₂-Senken im Materiallager der Gebäude insgesamt.
- 10 Damit dieser Mechanismus gerade noch rechtzeitig greifen kann, sind zunächst im Zeitraum bis 2050 die energiebedingten Treibhausgasemissionen aller Gebäude mit Hilfe der beiden Hauptstrategien Effizienz und Erneuerbare auf nahezu Null zu führen.



Abbildung 38:
Totholz und stehendes Holz im
Hambacher Wald.

Anmerkungen

- (1) Weitere Informationen siehe www.carpathia.org.
- (2) Das betrifft insbesondere die energetischen Nutzung von Scheitholz oder Energieträgern wie Pellets, sofern diese dominant aus Stammholz hergestellt werden. Bei Restholz spielt eine Rolle, ob dieses aus ökologischen Gründen besser im Wald verbleiben sollte oder ob es eine alternative stoffliche Nutzung gibt oder nicht.
- (3) Ein denkbarer Weg wäre hier eine produktabhängige Bilanzierung anhand der unterschiedlichen Anteile von Holzarten (Laub-/Nadelholz), Rest- und Altholz.
- (4) Die in diesem Zusammenhang oftmals geäußerte Meinung, dass normengerechtes Bilanzieren bereits wissenschaftlich sei, offenbart ein fragwürdiges Verständnis der wissenschaftlichen Methode. Normen enthalten an vielen Stellen Setzungen und Vereinbarungen, die häufig auch politisch motiviert oder auf sonstige Art und Weise interessensgeleitet sind. Aus pragmatischen Gründen enthalten Normen zudem Vereinfachungen, die die Anwendung in der Praxis erleichtern sollen. Aus wissenschaftlicher Sicht sind vor allem die zugrundeliegenden Annahmen zu Gutschriften und Substitutionen sowie zu Nutzungsdauern fragwürdig. Geradezu irreführend ist die fehlende zeitliche Dynamisierung der Energie- und Materialbereitstellung. Die Annahme von konstanten Emissionen je Energie- bzw. Materialeinheit ist völlig realitätsfern und führt bereits in der Kurzzeitperspektive zu falschen Ergebnissen.
- (5) Eine schlagartige Erhöhung der Holzbauraten, wie in den Varianten 1b und 2b modelliert, ist aufgrund der begrenzten Produktions- und Fachkräftekapazitäten nicht umsetzbar.
- (6) Die zuerst genannten Werte schätzen den Einfluss des Klimawandels auf das Holzaufkommen deutlich kritischer ein.
- (7) Angabe der Werte für Stammholz ohne Rinde (siehe Abbildung 36 und zugehörige Texterläuterung zum Pro-Kopf-Holzbudget für Deutschland).

Literatur

- (Alig et al. 2020) Alig, Martina, u.a.: Alig, Martina (u.a.): „LCA of climate friendly construction materials“, Internetveröffentlichung 2020; ULR:https://treeze.ch/fileadmin/user_upload/downloads/Publications/Case_Studies/Building_and_Construction/670_LCA_constructionMaterials_1.5C_v1.4.pdf, aufgerufen am 14.04.2023.
- (Baldauf et al. 2016) Baldauf, Thomas; Heuer, Eckhard, Rüter, Sebastian; Schmitz, Friedrich: „Was tragen Wald und Holz zum Klimaschutz in Deutschland bei?“ AFZ DerWald 15/2016, S. 22-23.
- (Bartsch/Röhrig 2016) Bartsch, Norbert; Röhrig, Ernst: „Waldökologie“; Springer Verlag, , Heidelberg, 2016.
- (BBSR 2015) Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Hrsg.): „Wohnungsmarktprognose 2030“, Eigenverlag, Bonn, 2015; Internetveröffentlichung; ULR: https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/analysen-kompakt/2015/DL_07_2015.pdf;jsessionid=CAFB24E5D4C6CCF6D71B84B915C8A458.live21302?__blob=publicationFile&v=1, aufgerufen am 27.07.2023.
- (BfU 2007) Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Hrsg.): „Nationale Strategie zur biologischen Vielfalt“; Internetveröffentlichung, Berlin, 2007; Internetveröffentlichung; ULR: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/nationale_strategie_biologische_vielfalt_2015_bf.pdf, aufgerufen am 27.07.2023.
- (Blumröder et al. 2020): Blumröder, Jeanette; Ibisch, Pierre; Sommer, Jörg; Welle, Torsten: „Wälder sind Kohlenstoffspeicher – Holzverbrennung ist nicht klimaneutral“; Internetveröffentlichung; ULR: https://naturwald-akademie.org/wp-content/uploads/2020/03/ePaper_Holzverbrennung-ist-nicht-klimaneutral_31-M%C3%A4rzt20_fin.pdf, aufgerufen am 27.07.2023.
- (BMEL 2023) Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (Hrsg.): „Waldzustandserhebung 2022“, Internet-Veröffentlichung, 2022; ULR: <https://www.bmel.de/DE/themen/wald/wald-in-deutschland/waldzustandserhebung.html>, aufgerufen am 23.03.2023.
- (BNB 2019) Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (Hrsg.): „Leitfaden Nachhaltiges Bauen“, Berlin, 2019; Internetveröffentlichung, ULR: https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/fileadmin/publikationen/BBSR_LFNB_D_190125.pdf, aufgerufen am 17.07.2023.
- (Böttcher et al. 2018) Böttcher, Hannes; Hennenberg, Klaus; Winger, Christian: „Waldvision Deutschland. Beschreibung von Methoden, Annahmen und Ergebnissen“. Öko-Institut, Berlin, 2018.

- (Bolte et al. 2021) Bolte, Andreas; et al.: „Zukunftsaufgabe Waldanpassung“; AFZ DerWald, 2/2021, S. 12 - 16.
- (BR 2021) Bundesrepublik Deutschland: „Bundes-Klimaschutzgesetz, vom 12. Dezember 2019, das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 18. August 2021 geändert worden ist“. Internetveröffentlichung; ULR: <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/KSG.pdf>, aufgerufen am 27.07.2023.
- (BR 2022) Deutscher Bundestag: „Antwort der Bundesregierung auf die kleine Anfrage der Fraktion CDU/CSU – Drucksache 20/3978 – Die EU-Biodiversitätsstrategie 2030 und ihre Auswirkungen auf die Land- und Forstwirtschaft in Deutschland und Europa.“ 28.10.2022. Internetveröffentlichung; ULR: <https://dserver.bundestag.de/btd/20/042/2004243.pdf>, aufgerufen am 27.07.2023.
- (Branchenradar 2023) Branchenradar (Hrsg.): „Dämmstoffe in Deutschland 2023“; Internetveröffentlichung; ULR: <https://www.branchenradar.com/pdf/create.aspx?id=117&typ=studie>, aufgerufen am 27.07.2023.
- (Carcassi et al. 2022): Carcassi, Olga Beatrice; Habert, Guillaume; Malignetti, Laura Elisabetta; Pittau, Francesco: „Material Diets for Climate-Neutral Construction“; in: Environmental Science & Technology, 2022, 56, 5213-5223 (2022).
- (Cherubini et al. 2011) Cherubini, Francesco; Peters, Glen P.; Berntsen, Terje; Strommann, Anders, H.; Hertwich, Edgar: „CO2 emissions from biomass combustion for bioenergy: atmospheric decay and contribution to global warming“, GCB Bioenergy, 3, 413-426 (2011).
- (Churkina et al. 2020) Churkina, Galina u.a.: „Buildings as a global carbon sink“, nature sustainability, ULR: <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0462-4>, aufgerufen am 24.04.2022.
- (DBFZ 2011) Deutsches Biomasseforschungszentrum (Hrsg.): „Basisinformationen für eine nachhaltige Nutzung landwirtschaftlicher Reststoffe zur Bioenergiebereitstellung“; Leipzig, 2011.
- (DBFZ 2023) Deutsches Biomasseforschungszentrum (Hrsg.): Digitale Biomasse-Ressourcendatenbank; ULR: <https://webapp.dbfz.de/Resources/?lang=de>, aufgerufen am 17.07.2023.
- (Dena 2021) Dena (Hrsg.): „Natürliche Senken – Kurzgutachten zur dena-Leitstudie Aufbruch Klimaneutralität“ Internetveröffentlichung 2021; ULR: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/211005_DLS_gutachten_OekoInstitut_final.pdf, aufgerufen am 14.04. 2023.
- (Dena 2021a) Dena (Hrsg.): „Technische Senken – Techno-ökonomische Analyse ausgewählter CO2-Negativemissionstechnologien“. Internetveröffentlichung; ULR: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2021/211005_DLS_Gutachten_Prognos_final.pdf, aufgerufen am 17.07.2023.
- (Dieter et al. 2020): Dieter, Matthias et al.: „Abschätzung möglicher Verlagerungseffekte durch Umsetzung der EU-KOM-Vorschläge zur EU-Biodiversitätsstrategie auf Forstwirtschaft und Wälder in Drittstaaten“; Thünen Working Paper 159a, Hamburg, 2020; Internetveröffentlichung; ULR: https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn062851.pdf, aufgerufen am 17.07.2023.
- (DIN 68800) Deutsches Institut für Normung (Hrsg.): „Hollzschutz im Hochbau“, Beuth Verlag, Berlin, Wien, Zürich, 2022.
- (EU 2018) Richtlinie (EU) des europäischen Parlamentes und des Rates vom 11. Dezember 2018 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen“ (Neufassung); Internetveröffentlichung, 2018; ULR: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32018L2001:DE:HTML>, aufgerufen am 25.01.2023.
- (EU 2022) Europäische Union (Hrsg.): „EU-Biodiversitätsstrategie 2030: Mehr Raum für die Natur in unserem Leben“; Internetveröffentlichung; ULR: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52021IP0277&from=EN>, aufgerufen am 27.07.2023.
- (Fehrenbach et al. 2022) Fehrenbach, Horst; Bischoff, Mascha; Böttcher, Hannes; Reise, Judith, Hennenberg, Klaus Josef: „The missing Limb: Including Impacts of Biomass Extraction on Forest Stocks in Greenhouse Gas Balances of Wood Use“; Forests 2022, 13, 365. (2022) ULR: <https://doi.org/10.3390/f13030365>; aufgerufen am 17.07.2023.
- (FNR 2018) Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (Hrsg.): „Rohstoffmonitoring Holz: Erwartungen und Möglichkeiten“. Kurzfassung, Internetveröffentlichung; ULR: https://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/Broschuere_Kurzfassung_Rohstoffmonitoring_Web.pdf, aufgerufen am 17.07.2023.
- (FNR 2018a) Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe (Hrsg.): „Rohstoffmonitoring Holz: Mengenmäßige Erfassung und Bilanzierung der Holzverwendung in Deutschland“. Langfassung; Internetveröffentlichung; ULR: https://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/Rohstoffmonitoring_SR38_Final_Web_20180612.pdf, aufgerufen am 17.07.2023.
- (FNR 2022) Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (Hrsg.): „Basisdaten Bioenergie Deutschland 2022“; Internetveröffentlichung, ULR: https://www.fnr.de/fileadmin/Projekte/2022/Mediathek/broschuere_basisdaten_bioenergie_2022_06_web.pdf; aufgerufen am 17.07.2023.
- (Gatti et al. 2023) Gatti, Roberto Cazzolla et al.: „Analysing the distribution of strictly protected areas toward the EU2030 target“; Biodiversity and Conservation; Internetveröffentlichung; ULR: <https://doi.org/10.1007/s10531-023-02644-5>, aufgerufen am 17.07.2023.

- (Guest et al. 2012) Guest, Geoffrey; Cherubini, Francesco; Stromman, Anders, H.: „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*, Vol. 17, Number 1, 20 - 30 (2012); ULR: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1530-9290.2012.00507.x>, aufgerufen am 17.07.2023.
- (Görke 2018) Görke, Martin: „Eigenwert der Natur“, Stuttgart, 2018.
- (Griscom et al. 2017) Griscom, Bronson W.; et al.: „Natural Climate Solutions“, *PNAS*, October 31, 2017, vol. 114, no. 44, 11645 – 11650.
- (Grossarth 2023) Grossarth, Jan: „Agrarische Biomasse für den Klimagerechten Bau“; Internetveröffentlichung; ULR: <https://www.nbau.org/category/uebersichtsaufsatz/>, aufgerufen am 17.07.2023.
- (Hafner et al. 2017) Hafner, Annette et al.: „Treibhausgasbilanzierung von Holzgebäuden – Umsetzung neuer Anforderungen an Ökobilanzen und Ermittlung empirischer Substitutionsfaktoren (TGH-Holzbau)“; Bochum, 2017; Internetveröffentlichung; ULR: https://www.ruhr-uni-bochum.de/reb/mam/content/thg_bericht-final.pdf, aufgerufen am 17.07.2023.
- (Hennenberg et al. 2019) Hennenberg, Klaus; Böttcher, Hannes; Wiegmann, Kirsten; Reise, Judith; Fehrenbach, Horst: „Kohlenstoffspeicherung in Wald und Holzprodukten“; *AFZ-DerWald* 17/2029, S. 36 - 39.
- (Hennenberg et al. 2021) Hennenberg, K. J., J. Reise, H. Böttcher; A. Bendorf (2021): „Waldbewirtschaftung und deren Wirkung auf die THG-Bilanz in Deutschland“. In: Lozán J. L., S.-W. Breckle, H. Graßl & D. Kasang (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Boden & Landnutzung*. S. 334-341. *Wissenschaftliche Auswertungen in Kooperation mit GEO*, Hamburg; Internetveröffentlichung, ULR: [10.25592/warnsignal.klima.boden-landnutzung.46](https://www.warnsignal.klima.boden-landnutzung.46), aufgerufen am 17.07.2023.
- (Hennenberg / Böttcher 2023) Hennenberg, Klaus; Böttcher, Hannes: „Biomasse und Klimaschutz“; Hrsg.: Ökoinstitut e.V., Freiburg, 2023.
- (Holtsmark 2013) Holtsmark, Bjart: „Quantifying the global warming potential of CO2 emissions from wood fuels“; doi:10.1111/geb.12110; *GCB Bioenergy*, 7, 195-206 (2013)
- (Hoxha et al. 2020) Hoxha, E.; et al.: „Biogenic Carbon in Buildings: A Critical Overview of LCA Methods“. *Buildings and Cities* 2020, 1(1), 504-524. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00507.x>, aufgerufen am 17.07.2023.
- (IPCC 2018) Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg.): *Special Report 15 “Global Warming of 1,5 °C”, Chapter 2*, ULR: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_Chapter2_Low_Res.pdf, aufgerufen am 14.07.2023.
- (Joosten et al. 2013) Joosten, Hans; et al.: „MoorFutures“, Bundesamt für Naturschutz (Hrsg.), BfN-Schriften 350, Bonn, 2013.
- (Koh/Kraniotis 2020) Koh, Chuen Hon; Kraniotis, Dimitrios: „A review of material properties and performance of straw bale as building material“; *Construction and Building Materials*, 259 (2020) 120385; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120385>.
- (Leturcq 2020) Leturcq, Philippe: „GHG displacement factors of harvested wood products: the myth of substitution“; *nature research Scientific Reports* (2020) 10:20752; <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77527-8>.
- (Liu et al. 2017) Liu, Weiguo; Zhang, Zhonghui, Xie, Xinfeng; Gadow, Klaus von; Xu, Junming; Zhao, Shanshan; Yang, Yuchun: „Analysis of Global Warming Potential of Biogenic CO2 Emission in Life Cycle Assessments“; *Scientific Reports* 7, 39857; doi: 10.1038/srep39857 (2017).
- (Luick et al. 2021) Luick, Rainer; et al.: „Urwälder, Natur- und Wirtschaftswälder im Kontext von Biodiversitäts- und Klimaschutz; Teil 1: Funktionen für die biologische Vielfalt und als Kohlenstoffspeicher“, *NATURSCHUTZ und Landschaftsplanung*, 53 (12) 2021. DOI: 10.1399/NuL.2021.12.01
- (Luick et al. 2022) Luick, Rainer; et al.: „Urwälder, Natur- und Wirtschaftswälder im Kontext von Biodiversitäts- und Klimaschutz; Teil 2: Das Narrativ von der Klimaneutralität der Ressource Holz“, *NATURSCHUTZ und Landschaftsplanung*, 54 (01) 2022. DOI: 10.1399/NuL.2022.01.02
- (LWF 2022) Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (Hrsg.): „Konsequenzen der >EU-Biodiversitätsstrategie 2030< für Wald und Forstwirtschaft in Deutschland“, *LWF-Materialien* 17, München, 2022; Internetveröffentlichung; ULR: https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/service/dateien/ma17_biodiversit%C3%A4tsstrategiebericht.pdf, aufgerufen am 27.07.2023.
- (Mantau et al. 2013) Mantau, U.; Döring, P.; Hiller, D.: „Holzeinsatz im Bauwesen - Verwendungsstrukturen nach Gebäuden und Gewerken.“ In: Weimar H., Jochem D.: „Holzwerwendung im Bauwesen - Eine Marktstudie im Rahmen der >Charta für Holz<“. Hamburg, 2013.
- (Mantau 2017) Mantau, Udo: „Rohstoffmonitoring Holz – Mengenmäßige Erfassung und Bilanzierung der Holzverwendung in Deutschland“. *FNR-Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe* Nr. 38; Internetveröffentlichung; ULR: https://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/Rohstoffmonitoring_SR38_Final_Web_20180612.pdf, aufgerufen am 27.07.2023.
- (Matthes/Timm 2022) Ulrich Matthes; Timm, Sören: „Folgen für das Projekt „Europäisches Bauhaus“ und die Umsetzung der politischen Ziele im Bereich „Holzbau“; In: Bayerische Landesanstalt für Wald und

- Forstwirtschaft (Hrsg.): „Konsequenzen der >EU-Biodiversitätsstrategie 2030< für Wald und Forstwirtschaft in Deutschland“, LWF-Materialien 17, München, 2022, S. 61 – 67.
- (Müller-Kröhling 2013) Müller-Kroehling, Stefan: „Biodiversitätskriterien für Nachhaltigkeit im Wald“. IN: LWF Wissen 72 „Wald und Nachhaltigkeit“, (2013) S. 59-71; Internetveröffentlichung; ULR: https://www.researchgate.net/publication/286923727_Muller-Kroehling_S_2013_Biodiversitätskriterien_fur_Nachhaltigkeit_im_Wald_-_LWF_Wissen_72_Wald_und_Nachhaltigkeit_59-71, aufgerufen am 27.07.2023.
- (Mund et al. 2015) Mund, Martina; Frischbier, Nico; Richter, Fritz; Profft, Ingolf: „Klimaschutzwirkung des Wald- und Holzsektors: Schutz - und Nutzungsszenarien für drei Modellregionen in Thüringen.“; BfN-Skripten 396, 2015. Hrsg.: Bundesamt für Naturschutz, Bonn, 2015.
- (Myllyviita et al. 2021) Myllyviita, Tanja; Soimakallio, Sampo; Judl, Jáchym; Seppälä, Jyri: „Wood substitution potential in greenhouse gas emission reduction – review on current state and application of displacement factors“ *Forest Ecosystems* (2021) 8:42, DOI: <https://doi.org/10.1186/s40663-021-00326-8>
- (Nagler et al. 2020) Nagler, Florian; u.a.: „Einfach Bauen“. Internetveröffentlichung 2020; ULR: <https://www.einfach-bauen.net/wp-content/uploads/2019/04/einfach-bauen-schlussbericht.pdf>, aufgerufen am 14.04.2023.
- (ÖKOBAUDAT) Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (Hrsg.): „ÖKOBAUDAT – Informationsportal Nachhaltiges Bauen – Datenbank“; Internetveröffentlichung, ULR: https://www.oekobaudat.de/no_cache/datenbank/suche.html, aufgerufen am 17.07.2023.
- (Oemichen et al. 2018) Oehmichen, Katja; et al.: „Die alternativen WEHAM-Szenarien: Holzpräferenz, Naturschutzpräferenz und Trendfortschreibung. Szenarienentwicklung, Ergebnisse und Analyse. Thünen Report, No. 59, Eigenverlag, Braunschweig, 2018, <https://doi.org/10.3220/REP1527686002000>
- (Pittau et al. 2018) Pittau, F.; Krause, F.; Lumia, G.; Habert, G.: „Fast-Growing Bio-Based Materials as an Opportunity for Storing Carbon in Exterior Walls“. *Building and Environment* 2018, 129 (August 2017), p. 117-129. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.12.006>.
- (Pittau et al. 2022) Pittau, Francesco; Habert, Guillaume; Savi, Daniel; Klingler, Matthias: Holzbau als Kohlenstoffspeicher – Potenzial des Schweizer Gebäudeparks“; Stadt Zürich (Hrsg.), Eigenverlag, 2022; Internetveröffentlichung; ULR: <file:///C:/Users/VR/Downloads/2022-05-nb-Holzbau-als-Kohlenstoffspeicher-Synthesebericht.pdf>, aufgerufen am 17.07.2023.
- (Pittau et al. 2022a) Pittau, Francesco; Habert, Guillaume; Savi, Daniel; Klingler, Matthias: „Carbon storage project“, Hrsg.: Stadt Zürich, Amt für Hochbauten. Internetveröffentlichung; ULR: <file:///C:/Users/VR/Downloads/2022-05-nb-Carbon-Storage-Project.pdf>, aufgerufen am 17.07.2021
- (Polley 2009) Polley, Heino: „Wald in Schutzgebieten – Ein Überblick“, *Landbauforschung – vTI Agriculture and Forestry Resaerch Sonderheft 327* 2009: 75-82; Internetveröffentlichung; ULR: https://literatur.thu-enen.de/digbib_extern/dk041611.pdf, aufgerufen am 27.07.2023.
- (Pomponi et al. 2020) Pomponi, Francesco; Hart, Jim; Arehart, Jay, D´Amico, Bernardino: „Buildings as a Global Carbon Sink? A Reality Check on Feasibility Limits“; *On Earth* 3, August 21, 2020;S. 157-161; <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.07.018>.
- (QNG 2023) Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (Hrsg.): „Bilanzierungsregeln des QNG für Wohngebäude, Stand 01.01.2023“, Internetveröffentlichung, ULR: https://qng.tack-digital.de/app/uploads/2023/01/QNG_Handbuch_Anlage-3_Anhang-311_LCA_Bilanzregeln-WNG_v1-2.pdf, aufgerufen am 17.07.2023.
- (Reise et al. 2017) Reise, Judith; Wenz, Elena; Kukulka, Florian; Linde, Andreas; Winter, Susanne: „Bewertung der Waldbiodiversität der WEHAM-Szenarien“. *AFZ-DerWald*, 13/2017, S. 32 – 34.
- (Röder et al. 2023)Röder, Helmut; Fühst, Stefan; Brunner, Johanna; Stanek, Philipp: „KlimaHolz - Abschlussbericht zur Analyse der klimaoptimalen Bewirtschaftung der Wälder und der Verwendung von Holz in Europa und Deutschland“. Internet-Veröffentlichung unter: www.hswt.de/forschung/projekt/1915-klimaholz, aufgerufen am 20.02.2024.
- (Rüter 2017) Rüter, Sebastian: „Der Beitrag der stofflichen Nutzung von Holz zum Klimaschutz – Das Modell WoodCarbonMonitor“; Dissertation, TU München, 2017; Internetveröffentlichung; ULR: <https://mediatum.ub.tum.de/?id=1295127>, aufgerufen am 27.07.2023.
- (Rüter et al. 2017) Rüter, Sebastian; Stümer, Wolfgang; Dunger, Karsten: „Treibhausgasbilanzen der WEHAM-Szenarien“; *AFZ DerWald* 13/2017, S. 30-31.
- (Sathre/O´Connor 2010) Sathre, Roger; O´Connor Jennifer: „Meta-Analysis of greenhouse gas displacement factors of wood product substitution“. *Environmental Science & Policy* 13 (2010) 104-114; DOI: [10.1016/j.envsci.2009.12.005](https://doi.org/10.1016/j.envsci.2009.12.005).
- (Savi/Klingler 2022) Savi, Daniel; Klingler, Matthias: „Kohlenstoffspeicherung im Holzbau: Potenzial des Gebäudeparks in der Schweiz“; Hrsg.: Stadt Zürich, Amt für Hochbauten. Internetveröffentlichung; ULR: <https://www.stadt-zuerich.ch/hbd/de/index/hochbau/bauen-fuer-2000-watt/grundlagen-studienergebnisse/2022-05-nb-holzbau-als-kohlenstoffspeicher.html>, aufgerufen am 17.07.2021

- (Schellnhuber 2016) Schellnhuber, Hans-Joachim: „Selbstverbrennung“, C.Bertelsmann Verlag, München, 2015.
- (Schellnhuber 2022) Schellnhuber, Hans-Joachim: „Bauhaus der Erde. Nachhaltige Nutzung von Holz im Bausektor“; In: Klaus Wiegandt (Hrsg.): „3 Grad mehr“, Oekom Verlag, München 2022, S. 169 - 208.
- (Schier/Weimar 2017) Schier, Franziska; Weimar, Holger: „Modellierung des Holzmarktes im WEHAM-Projekt“, AFZ-DerWald, 13/2017, S. 21 - 23.
- (Schier/Weimar 2018) Schier, Franziska; Weimar, Holger: „Holzmarktmodellierung – Szenarienbasierte Folgenabschätzung verschiedener Rohholzangebotsituationen für den Sektor Forst und Holz“, Thünen Working Paper 91, Thünen Institut (Hrsg.), Braunschweig, 2018; DOI: 10.3220/WP1523005251000
- (Soimakallio et al. 2022) Soimakallio, Sampo; et al.: „Closing an Open Balance: the Impact of Increased Roundwood Harvest on Forest Carbon“; Internetveröffentlichung; doi:10.20944/preprints202203.0198.v1
- (Statista 2023) Statistisches Bundesamt (Hrsg.): „Anteil der genehmigten Wohngebäude in Holzbauweise an allen genehmigten Wohngebäuden in Deutschland in den Jahren 2003 – 2021“; Internetveröffentlichung; ULR: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/456639/umfrage/quote-der-genehmigten-wohngebäude-in-holz-bauweise-in-deutschland/>, aufgerufen am 27.07.2023.
- (UBA 2018) Umweltbundesamt (Hrsg.): „Biorest: Verfügbarkeit und Nutzungsoptionen biogener Abfall- und Reststoffe im Energiesystem (Strom-, Wärme- und Verkehrssektor)“, Eigenverlag, Dessau-Roßlau, 2018.
- (UBA 2020) Umweltbundesamt (Hrsg.): „Potenziale von Bauen mit Holz“; Eigenverlag, Dessau-Roßlau, 2020.
- (UBA 2023) Umweltbundesamt (Hrsg.): „Energetischer Holzverbrauch der privaten Haushalte“; Texte 15/2023, Eigenverlag, Dessau-Roßlau, 2023.
- (Vallentin 2011) Vallentin, Rainer: „Energieeffizienter Städtebau mit Passivhäusern - Begründung belastbarer Klimaschutzstandards im Wohnbau“, Cuvillier Verlag, Göttingen, 2011.
- (Vallentin 2023) Vallentin, Rainer: „CO₂-Global-Budget für Gebäude - Aktualisierung der Klimaschutzstandards für den deutschen Wohnbau“; Internet-Veröffentlichung unter: www.vraie.de, 2023.
- (Windesperger 2015) Windesperger, Andreas; Windesperger, Bernhard: „CO₂-Bilanzierung von Bauprodukten“; Internetveröffentlichung; St. Pölten, 2015; ULR: https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/hdz_pdf/zukunftssicheres_bauen_03_co2_bilanzierung.pdf, aufgerufen am 17.07.2023.
- (WBW 2018) Wissenschaftlicher Beirat für Waldpolitik: „Waldvision Deutschland - Orientierung oder Irrweg für eine nachhaltige Forstwirtschaft?“, Internetveröffentlichung; ULR: https://franzjosefadrian.com/wp-content/uploads/2018/03/Beirat_Waldpolitik_Waldvision.pdf, aufgerufen am 17.07.2023.
- (WBW 2021) Wissenschaftlicher Beirat für Waldpolitik: „Die Anpassung von Wäldern und Waldwirtschaft an den Klimawandel“, Eigenverlag, Berlin, 2021.
- (WWF 2022) WWF Deutschland (Hrsg.): „Alles aus Holz? – Rohstoff der Zukunft oder kommende Krise?“, Internetveröffentlichung, Berlin, 2022; ULR: <https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Wald/WWF-Studie-Alles-aus-Holz.pdf>, aufgerufen am 17.07.2023.
- (Zollner et al. 2019) Zollner, Alois; Müller-Kroehling, Stefan; Kudernatsch, Thomas: „Wälder und ihre Biodiversität“, LWF aktuell, 3/2019, S. 6 - 12; Internetveröffentlichung; ULR: https://www.lwf.bayern.de/mam/cms04/biodiversitaet/dateien/a122_waelder_und_ihre_biodiversitaet.pdf, aufgerufen am 27.07.2023.