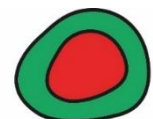


SüdSan

Sozialverträgliche und klimazielkompatible Sanierung
zweier Mehrfamilienhäuser als Modell für die Sanierung
der Südtiroler-Siedlung Bludenz

Themendokumentation

**Wie können Klimaschutzstrategien für Gebäude
bilanziert werden?**



Wie können Klimaschutzstrategien für Gebäude bilanziert werden?

Dornbirn, Dezember 2025

Dr.-Ing. univ. Rainer Vallentin
Vallentin + Reichmann Architekten Ingenieure
Infanteriestraße 19, 80797 München

Herausgeber:
Energieinstitut Vorarlberg, Fachbereich Energieeffizientes Bauen
CAMPUS V, Stadtstraße 33
6850 Dornbirn, Österreich
Tel. +43 (0)5572 / 31 202-0
info@energieinstitut.at

Inhalt

Inhalt 3

Zusammenfassung	3
1 Fragestellungen.....	4
2 Zeitabhängige Bilanzaspekte	10
3 Bilanzierung biogener CO ₂ -Emissionen	16
4 Szenariengestütztes Bilanzieren	23
5 Wie sollen wir bilanzieren?.....	24
6 Positionspapier zur Klimabilanzierung von Gebäuden	31
Quellen	33
Abbildungen.....	34
Tabellen	35

Zusammenfassung

Der Beitrag skizziert die - zum Teil auch noch offenen - Fragestellungen, um eine richtungssichere Bilanzierung von Klimaschutzstrategien für Gebäude aufstellen zu können.

1 Fragestellungen

1.1 Klimaschutz als Transformationsprozess

Klimaschutz kann vereinfachend als Wandel weg von der fossil gestützten Energie- und Materialbereitstellung hin zu einer erneuerbar gestützten Wirtschaft beschrieben werden. Zusätzlich spielen auch Land- und Forstwirtschaft sowie generell alle Landnutzungsänderungen eine Rolle. Insgesamt geht es darum, die Entwicklung von einer im Hinblick auf die Treibhausgasemissionsintensiven zu einer emissionsarmen Form des menschlichen Handelns zu gestalten. Zusätzlich spielt die Zeit eine wesentliche Rolle. Ein Handeln in Übereinstimmung mit den Pariser Klimazielen (Temperaturlimit < 1,75 Grad) bedeutet, das CO₂-Global-Budget einzuhalten. Die Menge an Treibhausgasen, die dafür weltweit noch emittiert werden darf, ist endlich und knapp bemessen. So knapp, dass nur noch ein extrem kurzer Zeitraum zur Verfügung steht, um die derzeit viel zu hohen globalen Emissionen auf Null zu führen:

Temperaturlimit Temperature limit	Eintrittswahrscheinlichkeit Probability of occurrence	Globales CO ₂ -Budget ab 2020 Global CO ₂ budget, from 2020 onward	Pro-Kopf-Budget Deutschland ab 2020 German CO ₂ budget per capita, from 2020 onward	Pro-Kopf-Budget Deutschland für Wohnen, ab 2020 German CO ₂ budget per capita for housing, from 2020 onward	Reichweite bei gleichbleibenden Emissionen wie 2020 (Jahr) Range, unchanged emissions from 2020 onward (year)
2,0°C	50 %	1350 Gt	180 t	45,1 t	2038
2,0°C	67 %	1150 Gt	154 t	38,5 t	2035
1,75°C	67 %	700 Gt	93 t	23,3 t	2029
1,5°C	67 %	400 Gt	53 t	13,3 t	2025

Tabelle 1: CO₂-Global-Budgets ab 2020 in Tonnen CO₂-Äquivalente pro Person und Jahr für verschiedene Klimaziele und Eintrittswahrscheinlichkeiten. Daraus lassen sich Pro-Kopf-Budgets für einzelne Staaten (beispielhaft dargestellt für Deutschland) sowie für die Bereiche Bauen und Wohnen ableiten. Quelle: (Vallentin 2022, S. 104)

Die Zuordnung der Pro-Kopf-Budgets auf Länder und Sektoren erfolgt hier gemäß dem Anteil an der Weltbevölkerung und dem derzeit vorhandenen Anteils der Sektoren an den länderspezifischen Gesamtemissionen. Bei gleichbleibenden Emissionen, wie im Jahr 2020 (ca. 2,5 t/Pa) beträgt die Reichweite des Pro-Kopf-Budgets für die Wohnnutzungen für das 1,75-Grad-Limit in Deutschland noch 4 Jahre und für das 2-Grad-Limit 10 Jahre.

Damit sind die wesentlichen Merkmale der Dynamik des Klimaschutzes bereits charakterisiert:

- Es sind wirksame Minderungspfade für die klimawirksamen Emissionen einzuschlagen.
- Ohne Zeitangaben können keine Aussagen zur Klimawirksamkeit gemacht werden.
- Die Aufteilung des CO₂-Global-Budgets kann nach unterschiedlichen Gesichtspunkten erfolgen, z.B. nach pragmatischen, gerechtigkeitsorientierten Prinzipien oder gemäß der historischen Verantwortung.

Der letzte Punkt wurde im Vorfeld der Pariser Klimakonferenz intensiv diskutiert. Entsprechend wurden unterschiedliche Verteilmodelle entwickelt. Der einfachste Ansatz besteht darin, das bestehende Budget an Treibhausgasemissionen den einzelnen Ländern gemäß dem Bevölkerungsanteil an der Weltbevölkerung zuzuordnen. Die Pro-Kopf-Emissionen unterscheiden sich jedoch nach Land oder Weltregion stark. Um realistisch umsetzbare Minderungspfade bestimmen zu können, ist noch ein Zeitpunkt festzulegen, an dem sich die Pro-Kopf-Emissionen auf einem niedrigen Niveau einander annähern („Contraction & Convergence“, vgl. Meyer 2000).

Dabei bleibt jedoch der Aspekt der historischen Verantwortung (z.B. in Form der Emissionen seit 1990) unberücksichtigt. Würde man diesen Ansatz verfolgen, müssten die meisten Industrieländer und andere Länder mit hohen Pro-Kopf-Emissionen in der Vergangenheit, bereits heute negative Emissionen nachweisen (vgl. WBGU 2009). Andere Gerechtigkeitsaspekte, z.B. in Form der wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit bzw. der Armutsbekämpfung würden ebenfalls zu einer viel stärkeren Minderungsleistung der wohlhabenden Länder als beim ersten Ansatz führen (vgl. Den Elzen 2006).

Im Folgenden wird allerdings nur der erste Ansatz weiterverfolgt, auch weil er relativ einfach bestimmbar ist, pragmatisch erscheint und (gerade noch) umsetzbare Klimaschutzpfade für die entwickelten Länder zulässt.

1.2 Grundsätzliche Charakterisierung von wirksamen Klimaschutzpfaden

Für die weitere Diskussion macht es Sinn, den grundsätzlichen Verlauf von Klimaschutzpfaden darzulegen. Dies erfolgt zunächst am Beispiel des deutschen, im Anschluss am Beispiel des österreichischen Wohngebäudeparks.

Klimaschutzpfad Wohngebäudepark Deutschland

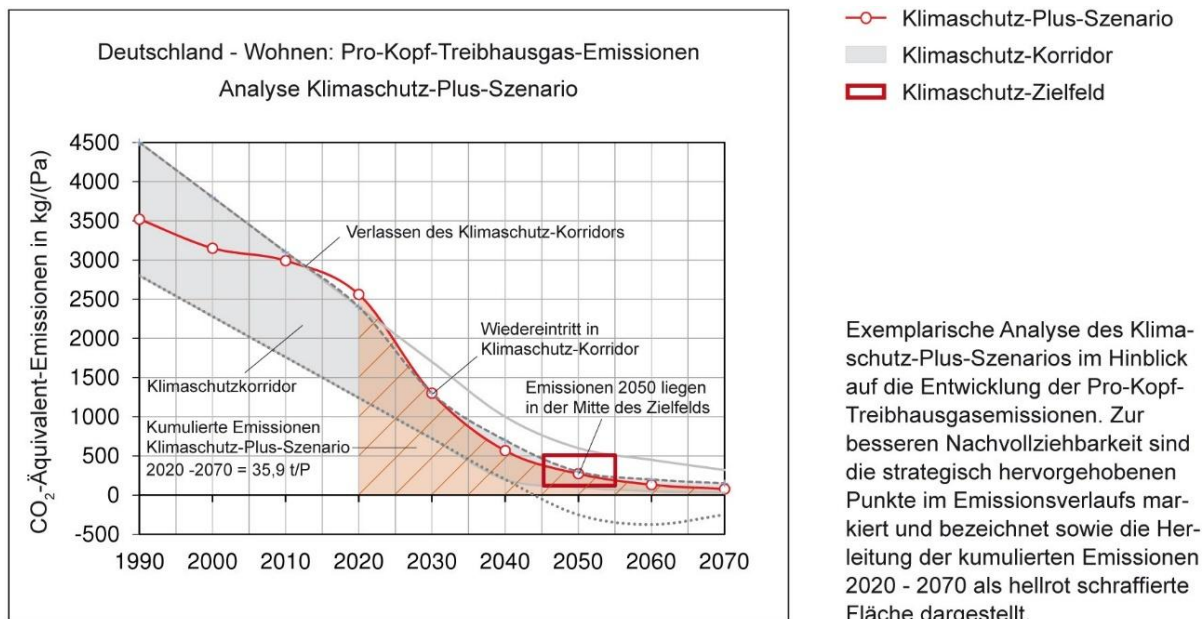


Abbildung 1: Analyse des Klimaschutz-Plus-Szenarios bezüglich der Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen. Zusätzlich sind strategisch bedeutsame Zeitpunkte hervorgehoben und die Herleitung der kumulierten Emissionen 2020-2070 als hellrot schraffierte Fläche dargestellt. Quelle: (Vallentin 2023, S. 21)

- Für eine generelle Orientierung wurde ein Klimaschutzkorridor und ein Zielfeld bestimmt, die in Übereinstimmung mit dem 2-Grad-Limit stehen (vgl. Kern 2016).
- Zunächst werden die Pro-Kopf-Emissionen in der Vergangenheit ermittelt. Hierzu existieren recht zuverlässige Daten. Auf dieser Basis können nun die Modelle zum Wohngebäudepark, die den Szenarien zugrunde liegen, einem ersten Test unterzogen werden. Nur wenn diese die Entwicklungen in der Vergangenheit hinreichend genau abbilden können, können sie für das Abbilden künftiger Entwicklungen verwendet werden.
- In diesem Zeitraum sind die Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen von ca. 3,5 auf 2,5 t/Pa gesunken. Gleichwohl wird im Jahr 2015 der Klimaschutzpfad verlassen, um erst im Jahr 2030 wieder in den Klimaschutz-Korridor einzutreten.
- Durch weitere Anstrengungen gelingt es, dass im Jahr 2050 die Pro-Kopf-Emissionen in der Mitte des Zielfelds ankommen¹. Danach sinken sie weiter, jedoch in geringem Maße.

Betrachtet man im Vergleich hierzu die Ist-Entwicklung im Zeitraum 1990 – 2018 ist eine gute Übereinstimmung zwischen den veröffentlichten Daten und den szenariobasierten Kalkulationen gegeben. Im Gegensatz zum Klimaschutz-Plus-Szenario führt die Trendentwicklung im Jahr 2050 zu Pro-Kopf-Emissionen in Höhe von ca. 1,5 t/Pa. Damit liegen die Emissionen für

¹ Das Jahr 2050 ist das Zieljahr der Klimapfade der EU. Das aktuelle, im Klimaschutzgesetz von 2024 festgelegte nationale Ziel der Klimaneutralität im Jahr 2045 steht derzeit in Kritik. Daher wird das Klimaschutz-Zielfeld für Deutschland auf das Jahr 2050 zentriert.

die Wohnnutzungen bei der Trendentwicklung deutlich höher, als sie insgesamt für Deutschland zulässig wären (1,0 t/Pa), um gerade noch das 2-Grad-Limit einzuhalten.

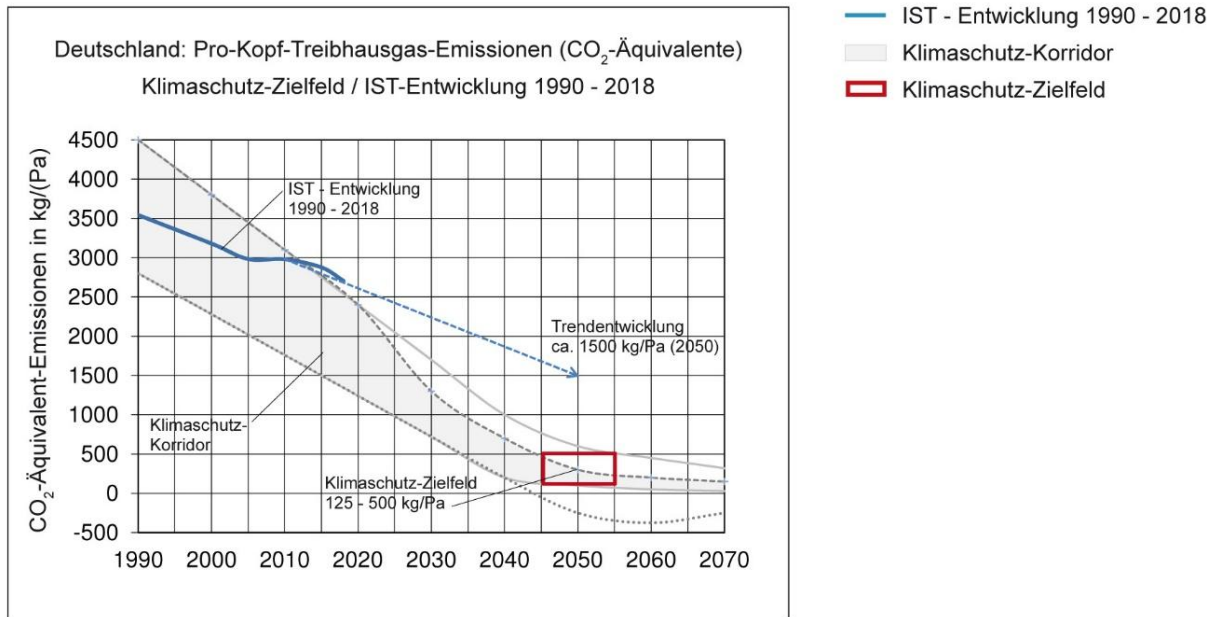


Abbildung 2: Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen der privaten Haushalte im Zeitraum 1990 - 2018. Zur besseren Einordnung sind eine Trendentwicklung bis 2050 und der Klimaschutz-Korridor sowie das Klimaschutz-Zielfeld mit dargestellt. Quellen: (UBA 2018), (Kern 2016) und (Vallentin 2023).

Es ist deutlich erkennbar, dass es beim Klimaschutz nicht um eine mehr oder weniger unbestimmte CO₂-Reduktion geht, sondern um definierte Absinkpfade mit klaren zeitbezogenen Zielmarken bzw. die Einhaltung von endlichen Budgets für den Ausstoß von Treibhausgasen. Dabei spielen nicht nur die künftigen Klimaschutzmaßnahmen, sondern auch die Entwicklungen in der Vergangenheit eine große Rolle. Hintergrund ist, dass Gebäude mit im Mittel über 100 Jahren (vgl. Feist/Krick 2024) sowie die Gebäude- und Technikkomponenten mit 20 - 100 Jahren eine sehr lange Lebensdauer aufweisen. Veränderungen lassen sich aus wirtschaftlichen Gründen nur im Rahmen ohnehin anstehender Erneuerungen und Instandsetzungen sowie über Ersatzbauten umsetzen (sog. Kopplungsprinzip). Der Gebäudesektor ist daher ein besonders träges System.

Klimaschutzpfad Wohngebäudepark Österreich

Analog zum Verfahren für Deutschland werden die globalen CO₂-Budgets gemäß des Anteils Österreichs an der Weltbevölkerung bestimmt und danach über einen pauschalen Faktor der Anteil für die Wohnnutzungen festgelegt. Grundlage bildet auch hier der 6. Sachstandsbericht des IPCC (IPCC 2021).

Pfad	Klimaschutzziel (Wahrscheinlichkeit)	CO ₂ -Global-Budget ab 2020 [IPCC 2021]	Pro-Kopf-CO ₂ -Budget Österreich	Pro-Kopf-CO ₂ -Budget Österreich - Wohnen
A	2-Grad (50%)	1.350 Gt	174 t/P	34,8 t/P (118 %)
B	2-Grad (67%)	1.150 Gt	148 t/P	29,6 t/P (100%)
C	1,75 Grad (67%)	700 Gt	103 t/P	20,6 t/P (61 %)
D	1,5 Grad (67%)	400 Gt	52 t/P	10,4 t/P (35 %)

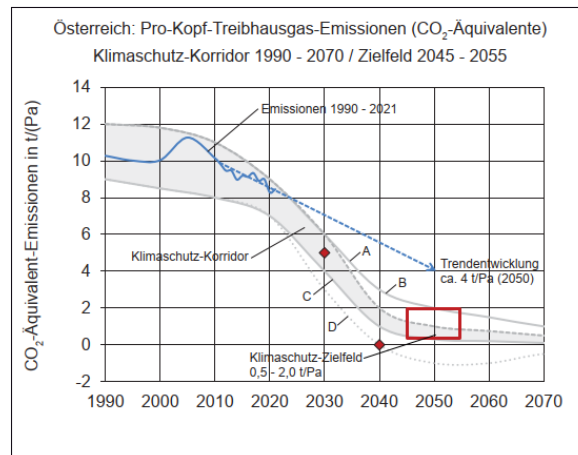
Tabelle 2: CO₂-Global-Budgets ab 2020 für verschiedene Klimaschutzziele und Eintrittswahrscheinlichkeiten. Zuordnung der Pro-Kopf-CO₂-Budgets für Österreich durch Zuweisung des 0,00115%-Anteils an der Weltbevölkerung. Für die Wohnnutzung wird ein in etwa gleichbleibender Ansatz von einem Fünftel in Anspruch angesetzt (aktueller Wert AT: 17%). Quellen: (IPCC 2021, SfP S. 41) und eigene Berechnungen. Nähere Angaben finden sich in (Vallentin 2021).

Während das aus dem Globalbudget ermittelte pro-Kopf-Budget Österreichs in Summe aller Verbrauchssektoren gleich hoch ist wie in Deutschland, ergibt sich für die pro-Kopf-Emissionen der Wohnnutzungen ein etwas geringerer Wert. Grund ist der im Vergleich zu Deutschland etwas geringere Anteil der Wohnnutzungen an den Gesamtemissionen. Zur Abschätzung der pro-Kopf Emissionen der Wohnnutzungen wurde für Österreich ein pauschaler Wert von 20% (anstelle des Wertes von 25% für Deutschland) verwendet. Als aktueller Wert konnte auf Basis der Nutzenergieanalyse ein Anteil von 17 % bestimmt werden. Die Gründe für den im Vergleich zu Deutschland geringeren Anteil können nur teilweise nachvollzogen werden. Ein Grund dürfte in der Stromversorgung liegen, die in Österreich deutlich emissionsärmer als in Deutschland erfolgt, ein weiterer Grund der höhere Anteil erneuerbarer Heizsysteme.

Die derzeitigen Pro-Kopf-Emissionen für Wohnnutzungen betragen daher in Österreich derzeit 1,5 t/Pa, während sie in Deutschland bei 2,5 t/Pa liegen. In Bezug auf das CO₂-Budget für Gebäude ergibt sich dadurch einerseits eine größere Robustheit für die kritische Anfangsphase.

Jedoch sind damit andererseits im Vergleich zur Situation in Deutschland bereits gewisse Potenziale für die Emissionsminderung ausgeschöpft: Da die spezifischen Emissionen des Verbraucherstroms schon deutlich geringer sind als in Deutschland, ist das Potenzial zur Reduktion der Emissionen durch weitere Verbesserungen der spezifischen Emissionen des Verbraucherstroms geringer. Umso bedeutender wird die Rolle der Verbrauchsminderung, d.h. der Effizienz von Gebäudehülle und technischen Systemen.

■ Klimaschutz-Korridor
 ■ Klimaschutz-Zielfeld
 — IST-Emissionen 1990 - 2021
 ◆ Ziele Bundesregierung im Vergleich zum Stand 2005
 2030: - 55%
 2040: Klimaneutral



■ Klimaschutz-Korridor
 ■ Klimaschutz-Zielfeld
 — IST-Emissionen 1990 - 2021
 ◆ Ziele Bundesregierung im Vergleich zum Stand 2005
 2030: - 55%
 2040: Klimaneutral

Abbildung 3: Entwicklung der Pro-Kopf-CO₂-Äquivalent-Emissionen in Österreich 1990 – 2021. Zur besseren Einordnung sind die o.g. 4 Pfade A – D sowie der daraus gebildete Klimaschutz-Korridor (grau hinterlegter Bereich) und das Zielfeld (rotes Rechteck) eingetragen. Darüber hinaus sind eine Trendentwicklung und die Klimaschutzziele der österreichischen Bundesregierung eingetragen.

Da Österreich die Klimaneutralität bereits 2040 anstrebt, ergibt sich ein noch steilerer Verlauf des grau hinterlegten Klimaschutz-Korridors.

1.3 Vorläufiges Leistungsbild zur Bilanzierung von Klimaschutzstrategien für Gebäude

Als Ergebnis der Vorbetrachtungen lassen nun erste Schlüsse ziehen, die ein Leistungsbild für das Bilanzieren von Gebäuden aus der Sicht des Klimaschutz ergeben:

- Abbilden der künftigen Emissionsentwicklungen des Gebäudeparks und richtungssicheres Quantifizieren der Hauptstrategien Energie- und Materialeffizienz, Einsatz von erneuerbaren Energieträgern und Baustoffen sowie der Bildung von CO₂-Senken durch die Einlagerung von Holz und Nawaros im Materiallager der Gebäude.
- Der Faktor Zeit ist dabei angemessen zu berücksichtigen, z.B. mit zeitabhängigen Emissionsfaktoren.
- Auch Nebenstrategien wie Suffizienzansätze, induzierte Emissionen und Kreislaufwirtschaft sollten prinzipiell mit abgebildet werden können.

1.4 Größen und Kriterien für Klimaschutzstrategien

Im Folgenden werden die wichtigsten Größen und Kriterien für die Bestimmung von Klimaschutzstrategien zusammengestellt:

- Die fossilen Treibhausgasemissionen werden über CO₂-Äquivalente oder gleichbedeutend das Global-Warming-Potential (GWP₁₀₀) ausgewiesen. Üblicherweise werden die Nicht-CO₂-Treibhausgase anhand ihrer Klimawirksamkeit über 100 Jahr hinweg in CO₂-Emissionen umgerechnet.
- Als Bezugsgrößen wird einerseits die Nutzfläche (z.B. die beheizte/gekühlte/temperierte Energiebezugsfläche) und andererseits die Person verwendet. Über den Pro-

Kopf-Bezug können die gebäudebezogenen Emissionen mit denen in anderen Sektoren oder Handlungsfeldern verglichen werden.

- Die Betrachtungszeiträume können nach unterschiedlichen Gesichtspunkten gewählt werden. Typisch in Ökobilanzen sind 30 – 50 Jahren, weil diese noch überschaubar werden können. Es gibt allerdings eine Reihe von Gründen, warum längere Zeiträume sinnvoll wären. Dazu zählen die lange Lebensdauer von Gebäuden (z.B. Wohngebäude im Mittel über 120 Jahre) und die notwendige lange Speicherdauer von biogenen Materialien, um einen Netto-Senken-Effekt erzielen zu können.
- Als einfache und übersichtliche Größe ist das Pro-Kopf-CO₂-Budget besonders gut geeignet, um eine verständliche und transparente Beurteilung von Klimaschutzpfaden zu ermöglichen. Hierfür hat die Klimaforschung Werte in Abhängigkeit von unterschiedlichen Klimazielen und Eintrittswahrscheinlichkeiten veröffentlicht. Durch eine sektorale Zuordnung können daraus auch die CO₂-Budgets für die Wohnnutzungen oder Gebäude insgesamt abgeleitet werden (siehe Tabelle 1).

2 Zeitabhängige Bilanzaspekte

Werden bei Bilanzierungen, z.B. zu Energie, Umweltaspekten oder Kosten nur ein momentaner Stand (z.B. Fertigstellung oder Bezug des Gebäudes) betrachtet, spielt der Zeitaspekt nur insofern eine Rolle, als man eine möglichst aktuelle Datengrundlage verwenden möchte, um Fehler zu vermeiden.

Ganz anders gelagert sind Bilanzierungen über lange Zeiträume, z.B. Lebenszyklusanalysen. Hier sind Veränderungen über die Zeit ein entscheidendes Thema. Umso erstaunlicher, dass in den heute üblichen Ökobilanzen viele offenkundig zeitabhängige Bilanzaspekte statisch, d.h. ohne Veränderungen im Zeitverlauf bilanziert werden. Das ergibt ein falsches Bild der Zusammenhänge.

Dieser Punkt benötigt auf jeden Fall besondere Aufmerksamkeit. In einem ersten Schritt werden nun die Aspekte behandelt, bei denen die zeitliche Dynamik aus Perspektive des Klimaschutzes eine größere Rolle spielt.

2.1 Strombereitstellung

Die Strombereitstellung ist ein besonders anschauliches Beispiel einer dynamischen Technologieentwicklung in Richtung Klimaschutz. Diese wurde in der Vergangenheit primär durch den Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung vorangetrieben und erst in zweiter Linie durch Effizienzverbesserungen und andere Entwicklungen. Der Pfad weg von einer fossilen hin zu einer erneuerbaren Stromerzeugung wird in Deutschland somit innerhalb weniger Jahrzehnte vollzogen. In Österreich ist die Entwicklung hin zu einer rein erneuerbaren Stromerzeugung aufgrund des hohen Wasserkraftanteils schon deutlich weiter gediehen.

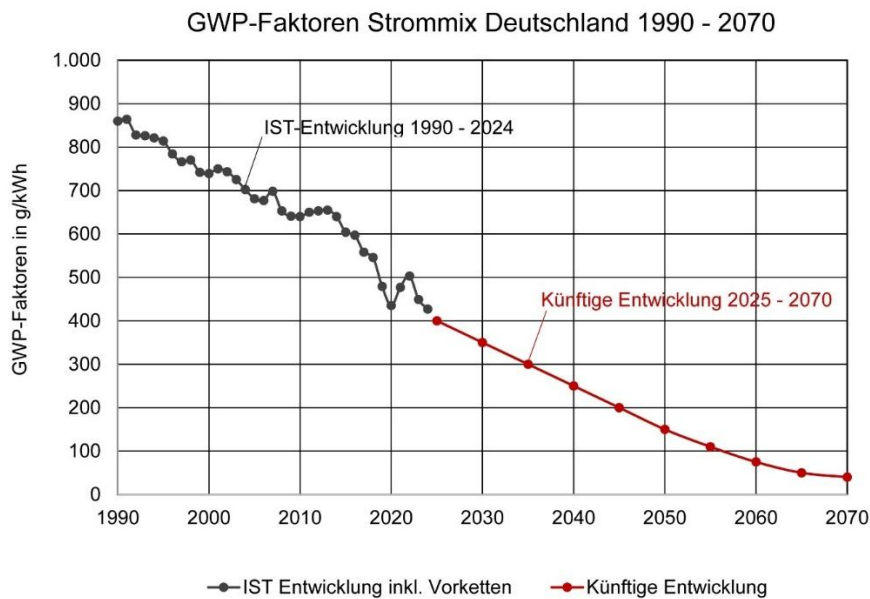


Abbildung 4: Entwicklung der $\text{CO}_2\text{-eq}$ -Faktoren der Strombereitstellung in Deutschland (Strommix) inklusive Berücksichtigung der Vorketten 1990 – 2024. Zusätzlich ist die künftige Entwicklung bis 2070 abgeschätzt. Der Pfad weg von der fossilen hin zur erneuerbaren Stromerzeugung findet hier innerhalb von acht Jahrzehnten statt. Quelle: (UBA 2025, S. 11 ff.) und eigene Berechnungen.

Ein zweiter Aspekt betrifft die jahreszeitlichen Schwankungen der Stromerzeugung in verschiedenen Ländern. Während die Konversionsfaktoren für die fossile Erzeugung von Strom im Jahresverlauf in etwa konstant sind, schwanken diejenigen der erneuerbaren Stromerzeugung (Wind- und Wasserkraft, PV) stark. Dies erklärt sich einerseits aus dem Jahrgang der Solarstrahlung sowie des Wind- und Wasserangebots und andererseits aus der Konkurrenz der Energieträger für die Stromerzeugung untereinander (z.B. indem den jeweils kostengünstigsten Systemen ein Vorrang eingeräumt wird).

In Zeiten des Strommangels treten Stromimporte aus anderen Ländern, in Zeiten des Stromüberschusses Stromexporte in andere Länder hinzu. Damit findet im verursacherbezogenen Strommix eine Überlagerung der Stromzusammensetzung verschiedener Länder statt.

Ein typisches Beispiel hierfür ist der Verbraucherstrommix in Österreich, der im Sommer durch die heimische stark erneuerbare gestützte Stromerzeugung geprägt ist. Im Winter werden jedoch Stromimporte vor allem aus Deutschland und der Tschechischen Republik ins Netz eingespeist, die zu relevanten Anteilen aus fossilen Kraftwerken stammen und damit hohe Konversionsfaktoren aufweisen (Abbildung 5).

Erst in der Überlagerung von inländischer und ausländischer Stromerzeugung lassen sich realitätsnahe Konversionsfaktoren im Jahresverlauf ermitteln (Abbildung 4).

In Abbildung 4 ist ferner erkennbar, dass die Stromerzeugung in direkt benachbarten Ländern im Hinblick auf ihre Klimawirksamkeit sehr unterschiedlich ausfallen kann. Während sie bereits heute in Österreich dominant erneuerbar erfolgt, ist dies in der Tschechischen Republik noch nicht der Fall. Deutschland befindet sich mitten im Übergang.

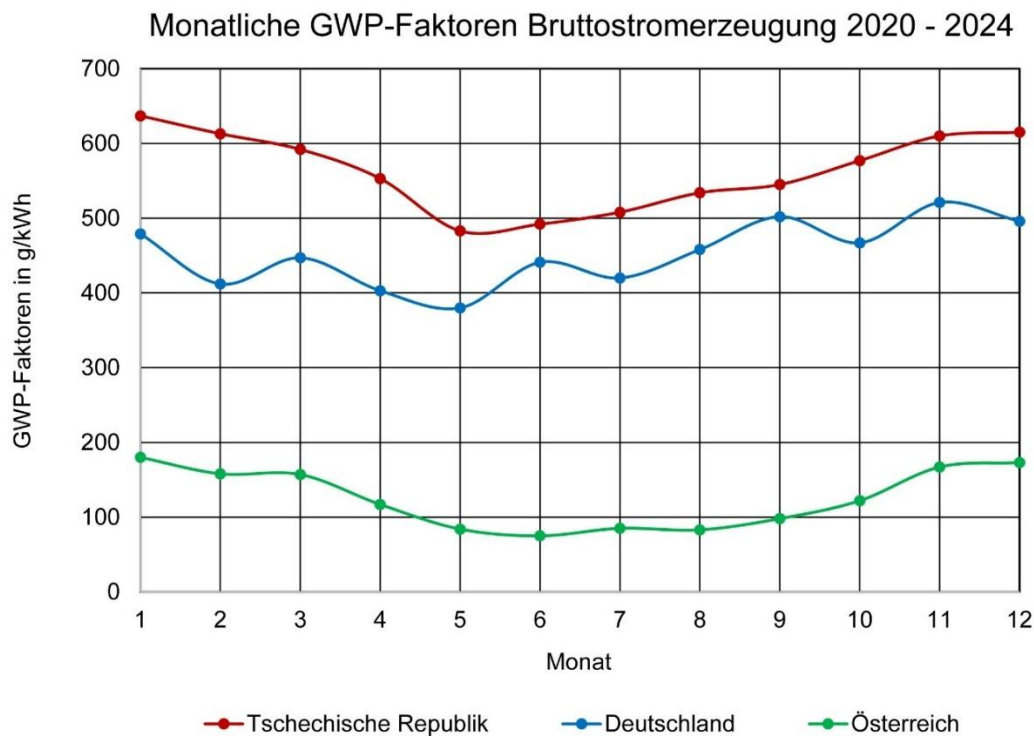


Abbildung 5: Monatlicher Verlauf der CO_{2-eq}-Faktoren der Bruttostromerzeugung in der Tschechischen Republik, in Deutschland und in Österreich im Mittel der Jahre 2020 – 2024. Quellen und weitere Erläuterungen: (ENTSO-E 2025 und EIV 2025). Wichtiger Hinweis: In der Darstellung sind nur die Konversionsfaktoren der inländischen Stromerzeugung abgebildet. Importe spielen hier vorerst keine Rolle. Erst in der folgenden Abbildung 5 wird dies berücksichtigt (siehe unten).

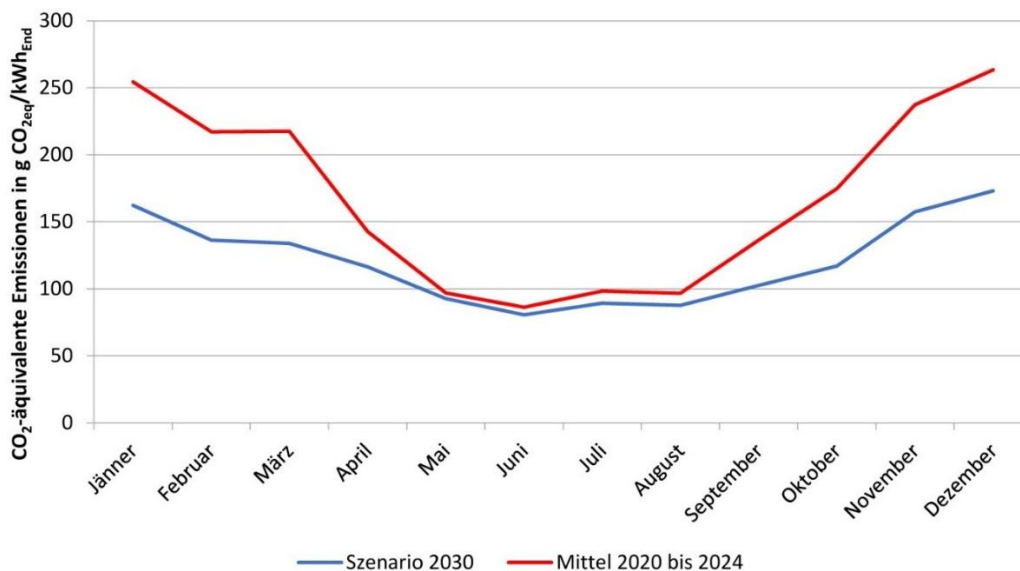


Abbildung 6: Monatlicher Verlauf der CO_{2-eq}-Faktoren des Verbraucherstrommixes in Österreich im Mittel der Jahre 2020 – 2024 (rot) und im Szenario für 2030. Quelle: (EIV 2025, S. 8)

2.2 Wärmebereitstellung

Aus Sicht des Klimaschutzes muss auch bei der Wärmebereitstellung eine konsequente Dekarbonisierung stattfinden. Dies findet gleichermaßen durch Energieeffizienzverbesserungen der Gebäude und den Ausstieg aus den fossilen Heizsystemen statt. Betrachtet man nur die $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Konversionsfaktoren der Wärmebereitstellung je kWh Endenergie, fällt auf, dass bei den fossilen Heizsystemen im Betrachtungszeitraum 2020 – 2070 nur geringfügige Verbesserungen stattfinden, die lediglich die Heiztechnik selbst betreffen. Beim Netzstrom, dem PV-Strom, den Wärmepumpen und der Fernwärme ist jedoch eine ausgeprägte Dynamik festzustellen (Abbildung 7).

Für den Gesamterfolg ist dann natürlich der Wandel innerhalb der Heizstruktur, d.h. die Verteilung der Heizsysteme im Gesamtbestand über der Zeit der entscheidende Faktor.

Eine direktelektrische Beheizung ist zwar kostengünstig in der Erstellung führt aber zu hohen Kosten für die Nutzer/Mieter, verlangt einen starken Netzausbau und in einem erneuerbaren Energiesystem die Vorhaltung großer saisonaler Speicher. Saisonale Speicher, z.B. auf Basis von Wasserstoff oder erneuerbar hergestellten Methan können zwar auf die vorhandenen Erdgasnetze und -Kavernen zurückgreifen, sind jedoch nicht beliebig ausbaubar und wie schon aufgeführt ein relevanter Kostenfaktor. Deren Rückverstromung erfolgt idealerweise in den Metropolen in stromgeführten Heiz-Kraftwerken. Hier zeigt sich eine Sektorenkopplung zwischen Heiz- und Stromversorgung sowie Gebäuden und Energiesystem, die typisch für ein dominant erneuerbares Energiesystem ist. Zusätzlich spielt die Energieeffizienz des künftigen Gebäudebestandes eine entscheidende Rolle, um Kosten und den notwendigen Ausbau des erneuerbaren Energiesystems in technisch und wirtschaftlich leistbarer Größenordnung sicher zu stellen.

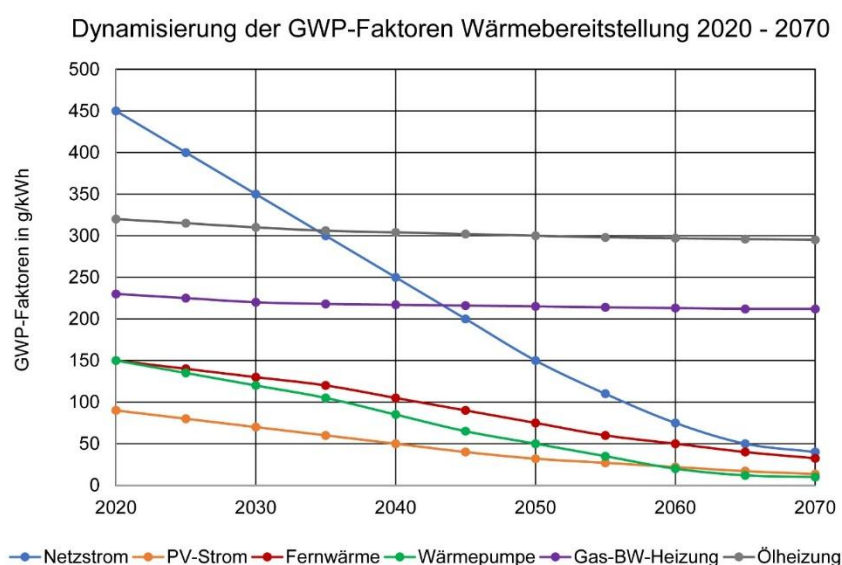


Abbildung 7: Entwicklung der $\text{CO}_{2\text{eq}}$ -Faktoren der Wärmebereitstellung in Deutschland inklusive Berücksichtigung der Vorketten 2020 – 2070 in Gramm CO_2 -Äquivalente je kWh Endenergie. Als Beispiel für die Fernwärme wurde die Erdinger Fernwärmeversorgung herangezogen.

2.3 Kühlenergiebereitstellung

Die Bereitstellung von Kühlenergie unterliegt ebenfalls einer zeitlichen Dynamik. Der Ausbau erneuerbarer Energiesysteme führt hier jedoch im Gegensatz zur Wärmebereitstellung nicht zu einem Konflikt, weil an sommerlichen Strahlungstagen mit hohem Kühlbedarf der Tagesverlauf der PV-Produktion sehr gut mit den Anforderungen der Kühlenergiebereitstellung übereinstimmt. Dies ist wiederum ein Hinweis, gerade bei der Strombereitstellung einen Unterschied in der Wertigkeit zwischen Sommer- und Winterstrom zu machen.

2.4 Materialbereitstellung

Auch die Materialbereitstellung durchläuft eine Dekarbonisierung. Auch hier finden stetig Effizienzverbesserungen und die Umstellung von einer fossilen auf eine erneuerbare Material- und Energiebereitstellung statt. Ein anschauliches Beispiel ist der Austausch eines Fensters in 50 Jahren. Er wird ganz sicher nicht mit den heutigen THG-Emissionen stattfinden. Zwischen verschiedenen Material- und Produktgruppen bestehen jedoch große Unterschiede:

- Besonders hohe Treibhausgasemissionen treten bei mineralischen Baustoffen, Beton und Metallen auf
- Geringe Emissionen finden sich bei Holz, Holzwerkstoffen und sonstigen Nawaros.
- Eine weitere Emissionsreduzierung kann durch zirkuläres Bauen und eine konsequente Kreislaufwirtschaft erreicht werden.
- Materialeffizienz wird auch durch kompaktes Bauen, eine Haustechnik der kurzen Wege, optimierte Tragwerke und flächeneffiziente Grundrissbildungen erreicht. Damit bekommt der städtebauliche, architektonische und konstruktive Entwurf ein besonderes Gewicht innerhalb der Klimaschutzstrategien von Gebäuden.

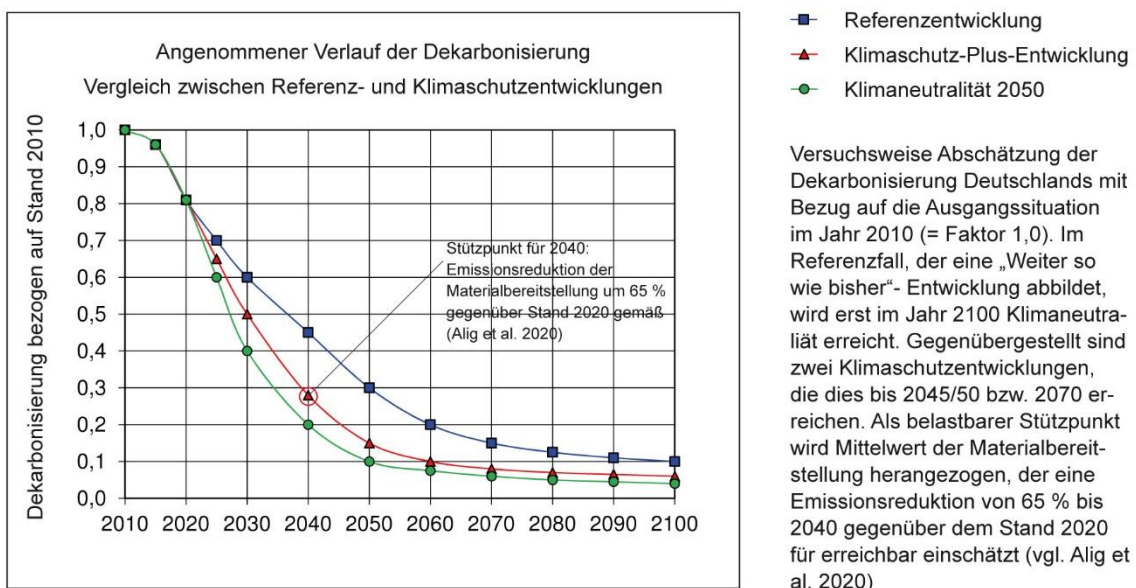


Abbildung 8: Versuchsweise Abschätzung der Dekarbonisierung der Materialbereitstellung im Zeitraum 2010 – 2100 über Dekarbonisierungsfaktoren, wobei der Wert von 1,0 für das Jahr 2010 festgelegt ist. Quelle: (Alig et al. 2020 und Vallentin 2024, S. 24)

2.5 Erneuerungszyklen und Betrachtungszeiträume

In Ökobilanzen werden die Erneuerungs- und Instandsetzungszyklen mit Hilfe von Nutzungsdauern für Materialien, Bauteile bzw. Bauelemente bestimmt. Die zugehörigen Vorgaben sind in den meisten Ökobilanzen zu kurz gewählt und orientieren sich eher an Abschreibungszeiträumen als an empirisch bestimmten Nutzungsdauern. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Frage, ob bei langlebigen Baukonstruktionen, deren Lebensdauer über den Bilanzzeitraum deutlich hinausragt, Restwerte bilanziert werden oder nicht. Auch dies unterbleibt in den meisten Ökobilanzen.

Zu beachten ist ferner, dass die Dauer des Lebenszyklus von Gebäuden nicht mit dem Betrachtungszeitraum der Ökobilanz übereinstimmen muss.

Es ist unmittelbar verständlich, dass Annahmen zur Nutzungsdauer und den Betrachtungszeiträumen erheblichen Einfluss auf die Ökobilanzierung von Gebäuden haben müssen.

2.6 Substitution

Sofern man ein konventionell gefertigtes Material oder Bauteil durch ein Holz-, Nawaro- bzw. Recyclingprodukt ersetzt, ergibt sich in der Regel eine Minderung der spezifischen Treibhausgasemissionen. Man spricht hier allgemein von einem Substitutionseffekt. Die Kalkulation einer Substitution gehört bilanztechnisch in den Bereich der Gutschriften. Bei Gutschriften ist jedoch generell Vorsicht geboten, weil deren missbräuchliche Verwendung weit verbreitet ist (z.B. Bewertung von Fernwärme, KWK-Prozessen und PV). Speziell die quasi unendliche Anrechnung der Gutschriften in alle Zukunft ist häufiger festzustellen, obwohl unmittelbar einsichtig ist, dass der aufgezeigte Vorteil mit der Zeit stark abnehmen wird. Analoges gilt auch für die Materialbereitstellung (siehe Tabelle 2). Es spielt eine große Rolle, wann die Materialbereitstellung erfolgt (z.B. bei der Ersterstellung oder erst in 50 Jahre im Zuge einer Erneuerung):

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

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
 REF: Referenzentwicklung
 KS+: Klimaschutz-Plus-Entwicklung
 KN: Klimaneutralität 2050

Tabelle 3: Versuch einer Dynamisierung von Substitutionsfaktoren. Erläuterungen zu den Szenarien siehe Abbildung 8. Quelle (Vallentin 2024, S. 45)

2.7 Biogene Emissionen

In Ökobilanzen wird üblicherweise eine klimaneutrale Bereitstellung von Holz und sonstiger nachwachsender Rohstoffe (Nawaros) angenommen: Der im Rohstoff gebundene Kohlenstoff wird im Zuge der Nutzung oder nach der Nutzung wieder freigesetzt. Übliche Prozesse hierfür sind die Verbrennung im Zuge einer energetischen Nutzung oder die Verrottung im Wald oder auf dem Feld.

Der Speichereffekt und die dadurch mögliche CO₂-Minderung wird im Landnutzungssektor (LULUCF) bilanziert, spielt aber in den Ökobilanzen für Gebäude bislang keine Rolle. Als Hauptargument hierfür wird angeführt, dass damit eine Doppelzählung dieses Vorteils vermieden werden soll.

Dies führt jedoch zu einer Gleichsetzung der energetischen und stofflichen Nutzung in Gebäuden. Daher wurden in den letzten Jahren Methoden zur dynamischen Bilanzierung entwickelt, die die biogenen Emissionen abhängig von deren zeitlichen Aufkommen und gemäß den ebenfalls zeitlich gestaffelten Abbauprozessen kalkulieren. Das erfordert gegenüber den heute üblichen statischen Ökobilanzen eine Erweiterung der Bilanzgrenzen um die Biosphäre (Wald und Landwirtschaft) und die Atmosphäre/Ozeane/Böden/Gesteine als terrestrische CO₂-Senken.

Im Grunde geht es vereinfacht gesagt darum, Gebäude als Bestandteil des Kohlenstoffkreislaufs abzubilden. Wegen der Komplexität wird diese Art Bilanzierung im folgenden Abschnitt dargestellt.

3 Bilanzierung biogener CO₂-Emissionen

3.1 Ausgangspunkt

Die Bilanzierung von Holz und sonstigen nachwachsenden Rohstoffen (Nawaros) in Bezug auf die Kohlenstoffspeicherung und als mögliche CO₂-Senke oder als CO₂-Quelle ist entscheidend, um ihren Beitrag zum Klimaschutz abschätzen zu können. Die hierbei im Raum stehenden Fragen sind alles andere als trivial und 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 Biomassennutzung in Abhängigkeit von der Lebensdauer und der Rotationsperiode der Bäume bzw. Pflanzen ausfällt. Letztere beschreibt den Zeitraum, bis nach einer Entnahme von Holz oder sonstigen NAWAROS auf der gerade gernteten Fläche dieselbe Menge nachgewachsen ist. Beim GWP(bio) wird generell eine Verbrennung am Ende der Nutzung bilanziert.

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

Tabelle 4: Schematischer Methodenvergleich zur Bilanzierung biogener Emissionen im Hinblick auf Berücksichtigung der Emissionen durch die Holzentnahme aus dem Wald, die Ein- und Ausspeicherung von Kohlenstoff bei einer stofflichen Nutzung, der Rotationsperiode für Bäume bzw. Pflanzen, der Speicher- und Nutzungsdauer und der dynamischen Simulation der biogenen Emissionen. Quelle: (Vallentin 2024, S. 33 unter Heranziehung von (Windsperger 2015), (Hoxha et al. 2020) und (Pittau et al. 2022)).

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

Die Annahme einer klimaneutralen Bereitstellung von Holz und sonstigen NAWAROS hat vor allem den Vorteil der Einfachheit. Die dahinterstehende Vorstellung ist, dass im Wald oder Feld während des Aufwuchses der Biomasse exakt die Kohlenstoffmenge aus der Atmosphäre aufgenommen wird, die später im Energieträger oder Produkt enthalten ist. Durch die direkte Verbrennung bei der Energieerzeugung nach der Ernte oder erst später am Ende der Nutzungsdauer wird der Kohlenstoff durch Oxidation in Form von CO₂ wieder freigesetzt. Hier

wird bereits erkennbar, dass der Faktor Zeit keine Rolle spielt. Es wird kein Unterschied zwischen der sofortigen energetischen und einer langlebigen stofflichen Nutzung gemacht. Erst recht wird nicht berücksichtigt, wie lange sich ein Bauprodukt in der Nutzung befindet und damit das gebundene CO₂ zwischengespeichert wird.

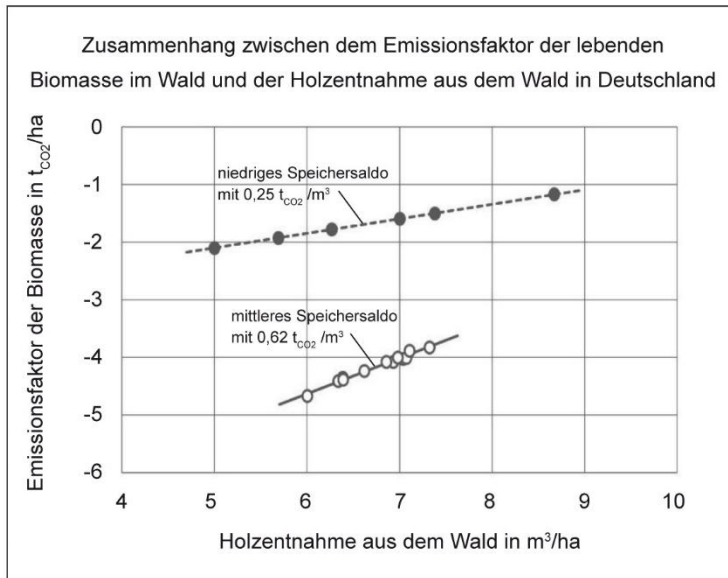
Während bei der 0-0-Methode das biogene CO₂ gar nicht erst in die Bilanzierung einbezogen wird, wird bei der -1/+1-Methode der im Material enthaltene Kohlenstoff in Form des eingelagerten Kohlendioxids in der Phase der Rohstoffbereitstellung als negative Emission gutgeschrieben. Am Ende der Nutzung wird der Kohlenstoff im Zuge der Entsorgung als CO₂-Quelle bilanziert, indem seine sofortige Oxidation über Verbrennung (energetische Nutzung) erfolgt. Es handelt sich also um eine strikt buchhalterische Betrachtung, in der die zeitliche Dynamik keine Rolle spielt.

3.3 Speichersaldo

Als CO₂-Speichersaldo wird die Differenz bezeichnet, die sich zwischen der künftigen Speicherleistung des ungestörten Waldes gegenüber dem Wald ergibt, aus dem eine Holzentnahme stattgefunden hat. Berücksichtigt wird, dass durch die Holzernte der Holzproduktespeicher größer wird. Beim Speichersaldo wird somit die Entnahme von Holz als CO₂-Quelle interpretiert. Das Speichersaldo fällt unterschiedlich hoch aus und ist beispielsweise davon abhängig, ob ein vitaler Baum noch lange Zeit hätte, CO₂ aufnehmen zu können oder ob es sich um Schadholz handelt. Das Speichersaldo hängt von vielen weiteren Faktoren ab, z.B. Baumart und Alter der Bäume, Art des Waldbodens (organisch oder mineralisch), Bewirtschaftungsform, Klimarandbedingungen usw.;

Es wird entweder über Waldszenarien oder über empirische Untersuchungen ermittelt. Die Spannweite der Werte fällt entsprechend der unterschiedlichen Randbedingungen, wie Zusammensetzung und Altersstruktur der Baumbestände, der klimatischen und geoökologischen Standortbedingungen sowie der Bewirtschaftung groß aus. Das Speichersaldo berücksichtigt nicht die unterschiedliche Nutzungs- und damit Speicherdauern von Holzprodukten und entspricht damit einer dauerhaften Sequestrierung. Typische Werte für deutsche Wälder liegen zwischen 0,52 und 2,37 kg_{CO₂-e}/kg_{Holz} (vgl. Fehrenbach et al. 2022).

In (Feist/Ebel 2024) wurde über eine Datenanalyse mehrerer Studien zum Speichersaldo ein Mittelwert von 0,74 (± 34 %) kg_{CO₂-e}/kg_{Holz} für den Senkeneffekt langlebiger Holzprodukte hergeleitet. Das entspricht einem durchschnittlichen Wert für das Speichersaldo von 1,09 (NR: 1,83 - 0,74 = 1,09).



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

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).

Abbildung 9: Bestimmung des Speichersaldos für die Entnahme von Holz aus dem Wald. Quelle: (Fehrenbach et al. 2022).

3.4 Dynamische Bilanzierung von Holz und Nawaros

Schon seit längerem wird von Wissenschaftlern der fehlende Zeitbezug bei der üblichen Lebenszyklusbilanzierung der biogenen Treibhausgasemissionen kritisiert (vgl. Cherubini et al. 2011, Guest et al. 2012 und Holtsmark 2013). Die Grundannahme der statischen klimaneutralen Bereitstellung von Holz und Nawaros berücksichtigt weder die unterschiedlichen Zeitpunkte der Emissionen (z.B. zwischen sofortiger Freisetzung bei energetischer Nutzung nach der Ernte im Vergleich zu der stark verzögerten Freisetzung nach einer langlebigen stofflichen Nutzung) noch die Zeiträume, die zum Nachwachsen der Biomasse im Wald oder in der Landwirtschaft notwendig sind.

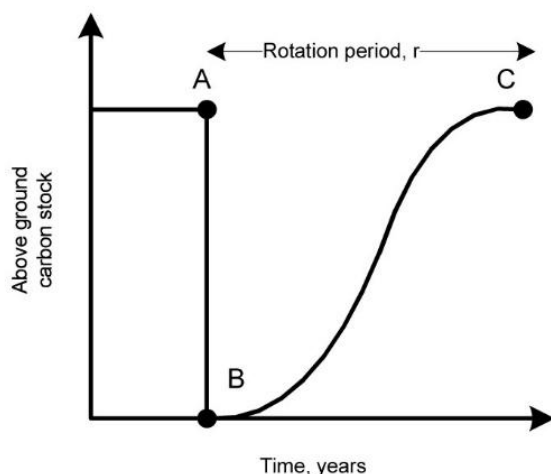


Abbildung 10: Idealisertes Schema der Entnahme von Biomasse und des Nachwuchsprozesses.

A: CO₂-Gehalt der Biomasse zum Zeitpunkt der Ernte.

B: Die gesamte Biomasse über dem Erdboden wurde geerntet und über einen energetischen Prozess freigesetzt. Gleichzeitig hat die Nachpflanzung stattgefunden. Damit beginnt der Prozess der Sequestrierung erneut.

C: Am Ende der Rotationsperiode ist die gesamte Menge der zum Zeitpunkt B entnommenen Biomasse nachgewachsen und der zuvor entnommene Kohlenstoffpool wieder aufgebaut. Der Wachstumsprozess wird mathematisch über eine Gauss'sche Verteilung abgebildet.

Quelle: (Cherubini et al. 2014).

Bei den dynamischen Ansätzen wird der Strahlungsantrieb jedes einzelnen Treibhausgases, das in die Atmosphäre gelangt, separat und unabhängig von seiner Herkunft ermittelt. Dabei spielt vor allem die unterschiedliche Verweildauer in der Atmosphäre und deren Abbauraten eine Rolle. Methan ist ein stark wirksames Klimagas, wird jedoch innerhalb von 50 Jahren fast vollständig abgebaut. Beim Stickstoffdioxid ist eine klassische Abklingkurve zu erkennen. Nach 500 Jahren sind nach dem auslösenden Impuls kaum noch Moleküle in der Atmosphäre vorhanden. Ganz anders verhält es sich mit dem Haupttreiber des Klimawandels, dem Kohlendioxid. In den ersten 50 Jahren sind zwar 56 % aus der Atmosphäre verschwunden, nach 100 Jahren sind jedoch noch immer 37 %, nach 500 Jahren 24 % und nach 1000 Jahren ca. 22 % der Moleküle in der Atmosphäre vorhanden. Der Grund hierfür ist, dass in den ersten 25 - 50 Jahren nur ein bestimmter Anteil von den Ozeanen und der Biosphäre an Land aufgenommen wird, während ein – allerdings geringerer Anteil – nur sehr langwierig über Verwitterungsprozesse und Sedimentierung im Ozean abgebaut werden kann (vgl. Archer et al. 2009). Wenn es um die Stabilisierung des Klimawandels auf ein bestimmtes Temperaturlimit gegenüber vorindustriellem Niveau geht (z.B. + 1,5, + 1,7 oder + 2,0 Grad) sind diese Aspekte wichtig. Dabei spielt es zunächst keine Rolle, ob es sich um fossile oder biogene Quellen handelt.

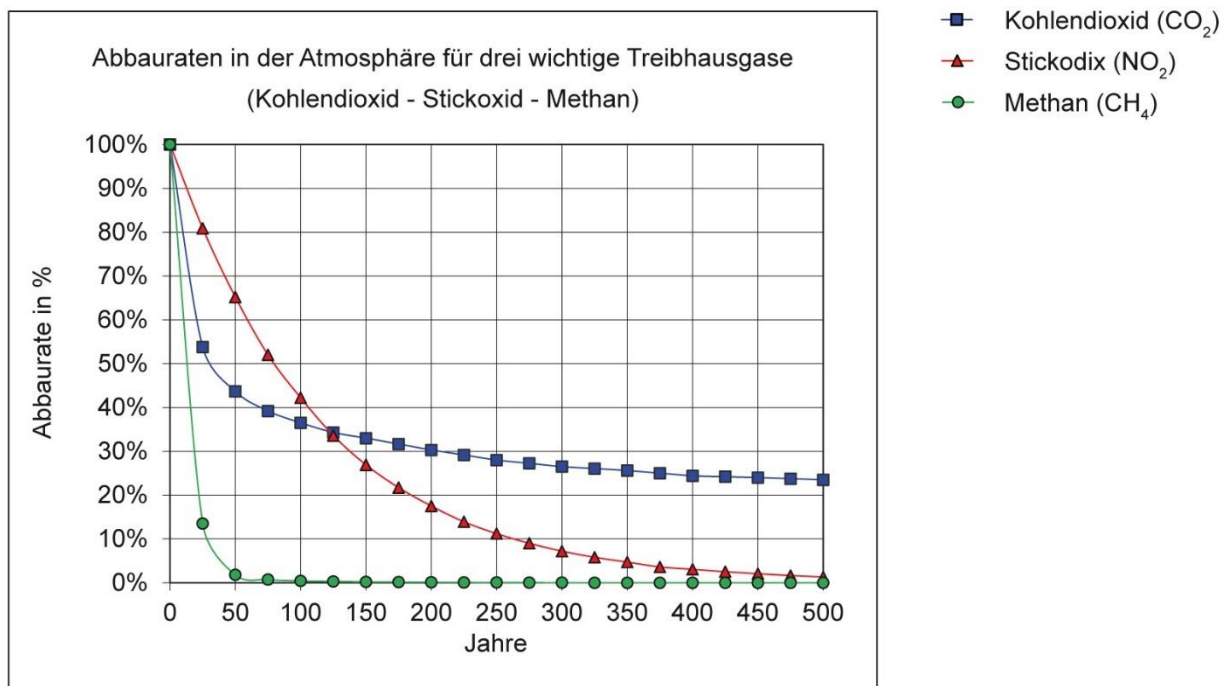


Abbildung 11: Abbauraten in der Atmosphäre für drei Treibhausgase (Kohlendioxid – Stickstoffdioxid – Methan). Kohlendioxid wird auch in längeren Zeiträumen nicht vollständig abgebaut. Auch nach 1000 Jahren ist immer noch über 20 % in der Atmosphäre vorhanden. Quelle: (Cherubini et al. 2014, eigene Darstellung).

Die berücksichtigten Vorgänge der dynamischen Bilanzierung sind zudem deutlich komplexer als bei den statischen Methoden:

- Zunächst werden die biogenen genauso wie fossile Emissionen behandelt.
- Bei den biogenen Emissionen besteht jedoch die Möglichkeit, dass nach der Ernte mittels Neupflanzung gemäß dem Prinzip der Nachhaltigkeit die Biomasse nachwächst und damit eine Kompensation stattfindet, die 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 Pflanzen dieselbe Biomasse aufgebaut haben wie die ursprünglich geerntete. Bei längeren Standzeiten können darüber hinaus gehende CO₂-Bindungen stattfinden.
- 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 Herstellung, Transport, Entsorgung werden wie in den statischen Ökobilanzen bilanziert, hier jedoch die Zeitpunkte ihres Auftretens berücksichtigt.

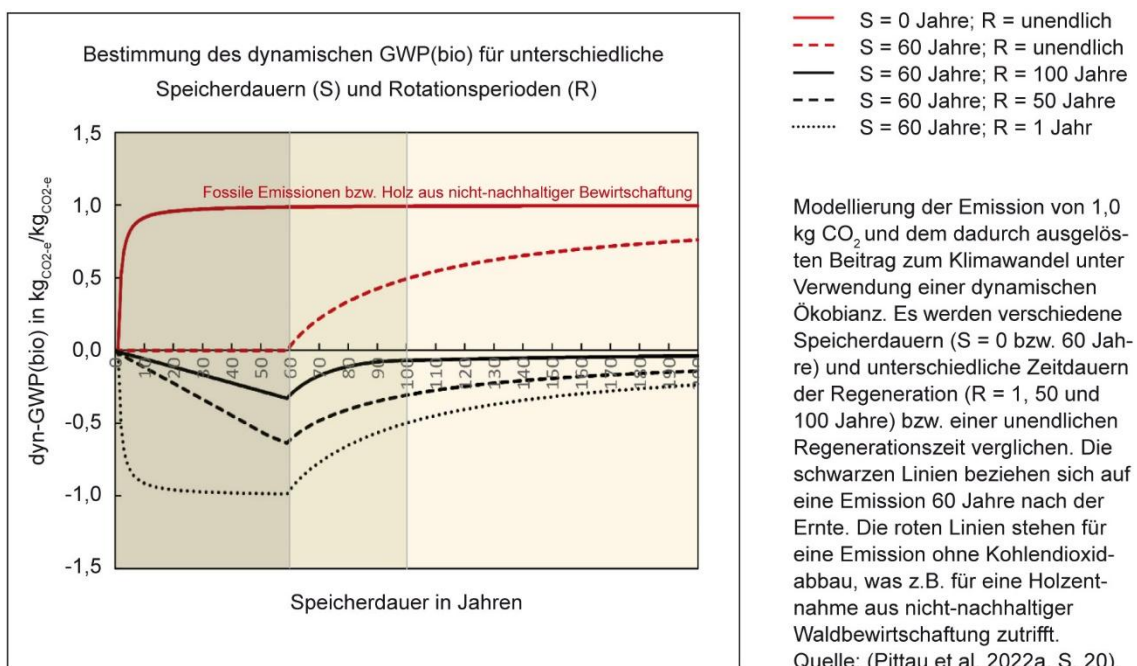


Abbildung 12: Dynamische Bilanzierung von Holz für verschiedene Speicherdauern S und Rotationsperioden R. In allen Fällen wird angenommen, dass nach der Nutzungszeit (= 60 Jahren) das Holz (R = 50 bzw. 100 Jahre) oder die landwirtschaftliche Biomasse (R = 1 Jahr) energetisch genutzt wird. Angabe der Werte in kg CO₂-Äquivalente je kg des im Produkt gebundenen CO₂.
 Quelle: (Pittau et al. 2022).

3.5 GWP(bio) - Index

Die Anwendung der dynamischen Methoden im Rahmen üblicher Lebenszyklusanalysen und Ökobilanzen von Baustoffen, Bauelementen und Gebäuden ist für 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 Treibhausgase gemäß der Impulsantwort-Methode. Nach dem auslösenden Impuls (z.B. durch Verbrennung in einem Heizsystem) wird der nachfolgende Abbau des biogenen CO₂ im Wald oder Feld einerseits und in der Atmosphäre andererseits zeitabhängig abgebildet. Aus der Analyse der Kombinationseffekte wird eine Größe abgeleitet, die analog zu den üblichen Emissionsfaktoren verschiedener Energieträger verwendet werden kann. Der GWP(bio)-Index ist eine dimensionslose Größe, der mit dem im Material bzw. Energieträger gespeicherten Kohlendioxid multipliziert wird. Der Index wird abhängig von der Speicherdauer (= Nutzungsdauer) und der Rotationsperiode, d.h. der Zeit bis dieselbe Menge Biomasse auf der Erntefläche wieder nachgewachsen ist, angegeben.

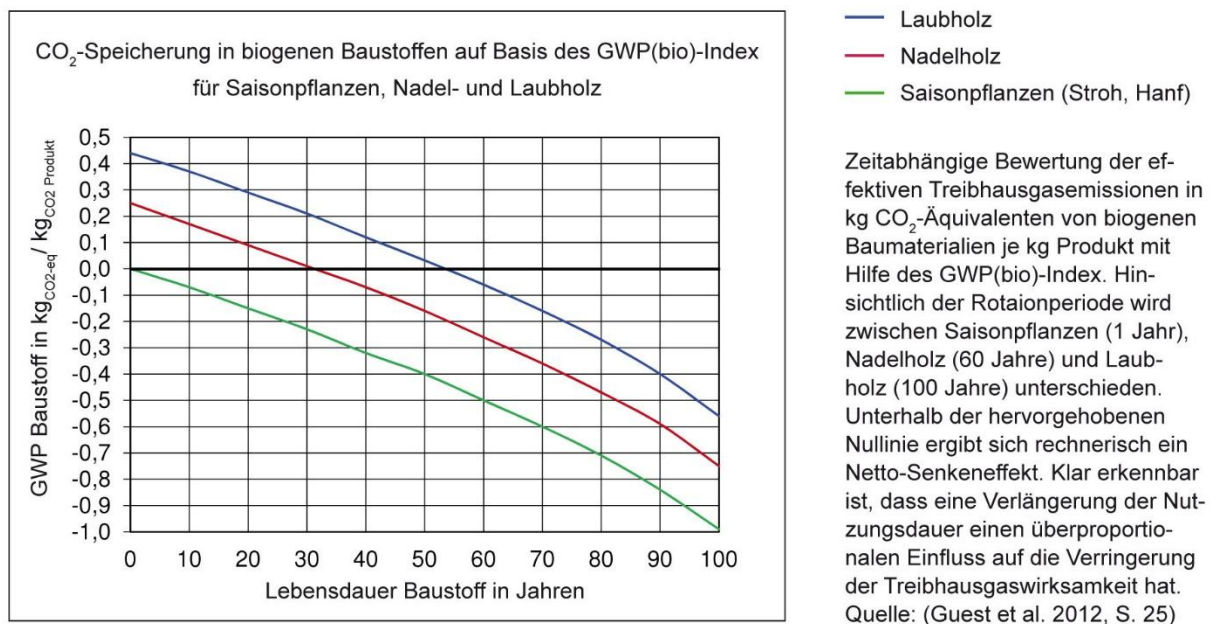


Abbildung 13: Dynamische Bilanzierung von Holz für verschiedene Speicherdauern S und Rotationsperioden R . In allen Fällen wird angenommen, dass nach der Nutzungszeit (= 60 Jahren) das Holz ($R = 50$ bzw. 100 Jahre) oder die landwirtschaftliche Biomasse ($R = 1$ Jahr) energetisch genutzt wird. Angabe der Werte in kg CO₂-Äquivalente je kg des im Produkt gebundenen CO₂. Quelle: (Guest et al. 2012, eigene Darstellung).

Der GWP(bio) - Index wurde zunächst für die Verbrennung von Biomasse entwickelt (vgl. Cherubini et al. 2011 und Cherubini et al. 2014) und später um den Aspekt der stofflichen Zwischenspeicherung in Produkten und Baukonstruktionen erweitert (vgl. Guest et al. 2012). Der Verbrennungsprozess wird hier, analog zu den üblichen Ökobilanzen, durch die vorgelagerte stoffliche Nutzung hinausgezögert.

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 ausgedrückt wird. Es ist gut erkennbar, dass der klimaentlastende Effekt umso größer ist, je länger

die Nutzungsdauer und je kürzer die Rotationsperiode der Biomasse ausfällt. Von besonderer Bedeutung für ein erfolgreiches Senkenregime ist, dass eine Verlängerung der Nutzungsdauer eines Bauteils über die Mitte der Rotationsperiode hinaus einen überproportionalen Effekt auf die Senkenwirkung hat. Dies kann weder über die 0/0- und die -1/+1-Methode noch über das Speichersaldo abgebildet werden.

	Speicherdauer = Nutzungsdauer									
Rotation	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 5: Dynamische Bilanzierung von Holz für verschiedene Speicherdauern S und Rotationsperioden R. In allen Fällen wird angenommen, dass nach der Nutzungszeit die Biomasse energetisch genutzt wird. Angabe der Werte in kg CO₂-Äquivalente je kg des im Produkt gebundenen CO₂. Die Fälle bei denen sich ein Netto-Senkeneffekt (= Negativemission) ergibt sind zur besseren Übersicht gelb hinterlegt. Quelle: (Guest et al. 2012, eigene Darstellung).

Für eine anwenderfreundliche Berücksichtigung der Senkeneffekte in Lebenszyklusbetrachtungen erscheint der GWP(bio)-Index gut geeignet, weil er sich relativ einfach in das übliche System mit Emissionsfaktoren integrieren lässt. Für eine einheitliche Systematik sollte der GWP(bio)-Index, wie bei den sonstigen Emissionsfaktoren üblich, für eine Betrachtungszeit von 100 Jahren verwendet werden.

4 Szenariengestütztes Bilanzieren

Die Berücksichtigung der zeitlichen Dynamik erfordert Modelle, die den gesamten Gebäudebestand differenziert nach Gebäudetypen, Baualter und Eingriffsempfindlichkeit abbilden. Ebenso sind die Versorgungssysteme (Wärme- und Stromerzeugung) in ihrer Vielfalt und zeitlichen Entwicklung zu modellieren. Durch empirisch validierte Nutzungsdauern können die Erneuerungszyklen bestimmt werden. Gemäß dem Kopplungsprinzip sind energetische Verbesserungen dann wirtschaftlich umsetzbar, wenn sie mit ohnehin anstehenden Instandsetzungen und Erneuerungen gekoppelt sind.

Die entscheidenden Variablen sind, ob Neubauten und energetischen Modernisierungen mit mittlerer oder hoher energetischer Qualität (Wärmeschutz, Lüftungskonzepte) bzw. mit fossiler, teilfossiler oder erneuerbarer Energie- und Materialbereitstellung erfolgen. Weitere Faktoren sind die Wohnflächenentwicklung (Neubau, Abgang) und die Sanierungsrate.

Die Untersuchung muss immer mit mehreren Szenarien erfolgen, um die Bandbreite künftiger Entwicklungen abzubilden und die zielführenden Handlungsoptionen überhaupt erkennen zu können. Um das Rechenmodell zu prüfen, beginnen die Szenarien in der Vergangenheit (z.B. ab 1990) und es erfolgt eine kritische Prüfung der Annahmen und Randbedingungen.

Über die Auswertung von Szenarien lassen sich am Ende neben den Klimaschutzstrategien selbst auch deren Umsetzungsperspektiven im Zeitverlauf und die Bestimmung von zeitabhängigen Emissionsfaktoren ableiten.

5 Wie sollen wir bilanzieren?

Bei den Bilanzierungsfragen geht es nicht um methodische Spitzfindigkeiten ohne praktische Bedeutung. Bilanzen versuchen, ein datenbasiertes Abbild der Realität bzw. einer künftigen Entwicklung zu erzeugen. Das konkrete Handeln ist regelmäßig auf diese Informationen (Kosten, Energiebedarf, Umweltauswirkungen) angewiesen. Zudem werden Ökobilanzen immer mehr zum Standard in den Planungsprozessen und Fördermodellen. Es gilt der Grundsatz:

So wie wir bilanzieren, so denken und entscheiden wir!

5.1 Kritik der statischen Ökobilanzen

In den üblichen Ökobilanzen spielt mit Ausnahme der Nutzungsdauern der Zeitfaktor keine Rolle. Über den Lebenszyklus werden z.B. Verbesserungen der spezifischen Emissionen von Strom oder Materialien (z.B. bei Ersatzmaßnahmen) nicht berücksichtigt. Besonders unrealistisch ist dies bei Gutschriften, z.B. für PV-Strom.

Im Hinblick auf den Holzbau wird häufig betont, dass damit der Einsatz emissionsintensiver Materialien vermieden werden kann. Dies ist heute sicher der Fall, jedoch ebenfalls zeitabhängig. Denn mit fortschreitender Dekarbonisierung der Wirtschaft wird dieser Effekt immer geringer.

Fasst man diese Aspekte zusammen, so kommt man zu dem Schluss, dass die üblichen Ökobilanzen wegen fehlender Berücksichtigung der zeitlichen Dynamik nicht in der Lage sind, Klimaschutzkonzepte zu bewerten. Ihnen liegt sinnbildlich ein „Szenario ohne Klimaschutz“ zugrunde:

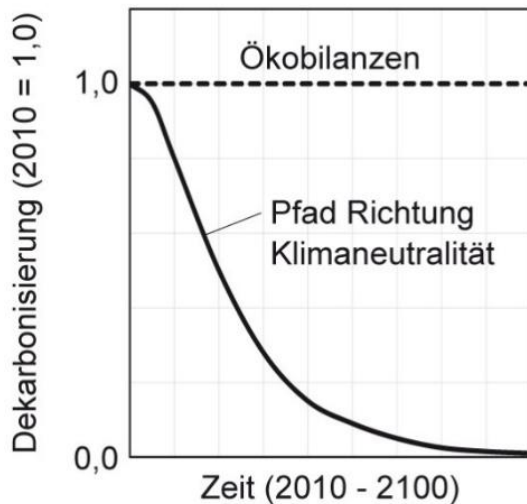


Abbildung 14: Schematischer Vergleich zwischen einer statischen Ökobilanzen (mit: $D = 1 = \text{const.}$) und einer dynamischen Bilanzierung mit nahezu vollständiger Dekarbonisierung der Wirtschaft bis 2100 ($D = 0$). Den Ökobilanzen liegt somit ein „Szenario ohne Klimaschutz. Quelle: (Vallentin 2024), S. 39.

Ein weiterer für uns wichtiger Beitrag der Klimawissenschaften betrifft die Bilanzierung biogener Emissionen. Auch hier spielt der Faktor Zeit eine Rolle, sogar gleich in mehrfacher Hinsicht:

Erstens über die Rotationsperiode (Zeit, in der die entnommene Biomasse nachgewachsen ist), zweitens über die Nutzungs- bzw. Speicherdauer (Zeit, in welcher der in den Produkten enthaltene Kohlenstoff nicht zurück in die Atmosphäre gelangt) und drittens über die „End-of-Use“-Prozesse (abrupte Freisetzung des CO_2 über Verbrennung oder weitere Nutzungszyklen bis hin zu einer dauerhaften Kaskadennutzung).

Diese Prozesse lassen sich über eine dynamische oder eine halbstatische Bilanzierung biogener Emissionen abbilden [Guest et al. 2012]. Ausgangspunkt ist zumeist, dass die Ernte von Holz oder sonstigen NAWAROS eine CO_2 -Quelle darstellt und nicht einfach klimaneutral gestellt werden kann. Für die Verbrennung von Scheitholz oder für kurzlebige Holzprodukte ergeben sich positive THG-Emissionen (klimabelastender Effekt), während für langlebige Holzprodukte ab einer Nutzungszeit, die in etwa der Hälfte der Rotationsperiode entspricht, negative Emissionswerte ausgewiesen werden (klimaentlastender Effekt). Sofern sich bei Herstellung, Transport und Einbau fossile Emissionen ergeben, werden diese selbstverständlich zusätzlich in Ansatz gebracht, jedoch separat bilanziert.

5.2 Dynamische Bilanzierung der Energie- und Materialbereitstellung

Über die Auswertung von Langzeit-Klimaschutzszenarien ist es möglich, den Wandel der Emissionsfaktoren der wichtigsten Energieträger abzuschätzen. Die folgenden Werte verdeutlichen dies am Beispiel Deutschlands (vgl. Vallentin 2024):

Referenz	GWP-Faktoren in $g_{CO_2\text{-eq}}/kWh_{EE}$											Mittelwert	
	Jahr	2025	2035	2045	2055	2065	2075	2085	2095	2105	2115	2125	50a
Netzstrom	400	300	200	110	50	30	20	15	10	8	5	175	95
PV-Strom	80	60	40	27	17	12	10	8	6	4	3	38	23
Fernwärme	140	120	90	60	40	30	20	15	10	8	5	79	47
Wärmepumpe	135	105	65	35	12	8	6	4	3	2	1	58	31
Gas-BW-Heizung	225	218	216	214	212	210	209	208	207	206	205	216	212
Ölheizung	315	306	302	298	296	295	294	293	292	291	290	301	297

Klimaschutz +	GWP-Faktoren in $g_{CO_2\text{-eq}}/kWh_{EE}$											Mittelwert	
	Jahr	2025	2035	2045	2055	2065	2075	2085	2095	2105	2115	2125	50a
Netzstrom	400	250	100	40	25	15	10	8	5	3	2	125	66
PV-Strom	80	45	30	20	12	9	7	5	3	2	2	30	17
Fernwärme	140	100	70	40	25	15	10	8	5	4	3	63	35
Wärmepumpe	135	70	30	10	7	4	2,5	2	1,2	0,7	0,5	37	20
Gas-BW-Heizung	225	218	216	214	212	210	209	208	207	206	205	216	212
Ölheizung	315	306	302	298	296	295	294	293	292	291	290	301	297

Tabelle 6: Zeitliche Entwicklung der $CO_{2\text{eq}}$ -Konversionsfaktoren der Endenergiebereitstellung je Kilowattstunde Strom bzw. Wärme. Eigene Berechnung unter Heranziehung der Ergebnisse in (Vallentin 2023).

Für die Materialbereitstellung kann ein analoges Verfahren angewendet werden. Als Größe wird hierbei allerdings ein allgemeiner Dekarbonisierungsfaktor verwendet. Dieser beschreibt, in welchem Ausmaß über den Zeitverlauf der nächsten Jahrzehnte für Bauprodukte eine allgemeine Emissionsminderung bei der Herstellung erwartet werden kann. Auch hier werden zwei mögliche Entwicklungen modelliert, die dem Referenz- und dem Klimaschutz-Plus-Szenario entsprechen:

Materialbereitstellung	Jahr	Dekarbonisierungsfaktoren bezogen auf Stand 2025 (= 1,0)											
		2025	2035	2045	2055	2065	2075	2085	2095	2105	2115	2125	
	Nutzungsdauer	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
Dekarbonisierungsfaktor	Referenz	1,00	0,80	0,60	0,45	0,30	0,20	0,15	0,13	0,11	0,10	0,09	
Dekarbonisierungsfaktor	Klimaschutz +	1,00	0,60	0,30	0,20	0,15	0,12	0,10	0,08	0,05	0,04	0,03	

Tabelle 7: Versuchsweise Abschätzung der Dekarbonisierung der Materialbereitstellung für zwei Entwicklungen (Referenz- und Klimaschutz-Plus-Szenario). Als belastbarer Stützpunkt für einen Klimaschutzpfad wird der Mittelwert einer schweizerischen Studie herangezogen, der eine Emissionsreduzierung von 65 % im Jahr 2050 gegenüber dem Stand 2020 für erreichbar einschätzt (vgl. Alig et al. 2020).

Auf den ersten Blick ist dieses Vorgehen sehr undifferenziert. Denn es wäre zu erwarten, dass die Dekarbonisierung zwischen verschiedenen Materialgruppen und Bauelementen unterschiedlich ausfällt. In einer schweizerischen Studie (Alig et al. 2020), die sich ausführlich mit den möglichen Emissionsminderungen der wichtigsten Baumaterialien beschäftigt, ist dies jedoch weit weniger der Fall, als man zunächst annehmen würde.

Gleichwohl steht fest, dass künftige Emissionsminderungen in hohem Maße von den Entwicklungen der Energiebereitstellung und von nicht vorhersehbaren technologischen Fortschritten

abhängig sind. Insofern ist die Anwendung der Dekarbonisierungs-Faktoren mit großen Unsicherheiten verbunden. Das kommt auch in der erheblichen Spreizung der Werte zwischen Referenz- und Klimaschutz-Plus-Entwicklung in Tabelle 6 zum Ausdruck.

5.3 Neubewertung von Holz- und Nawao-Nutzungen in Gebäuden

Die Anwendung dynamischer anstelle der bislang üblichen statischen Bilanzierungsmethoden führt am Ende auch zu einer Neubewertung von Holz und sonstigen Nawaros in Gebäuden.

Ein wesentlicher Unterschied zu statischen Ökobilanzen besteht darin, dass mit den dynamischen Lebenszyklusmethoden über die Speicherung hinaus die effektive Senkenwirkung von Holz- bzw. Nawao-Nutzungen abgeschätzt werden kann. Das hat nun erhebliche Auswirkungen für die künftige Bewertung von Holzheizungen und Holzkonstruktionen:

Wie Tabelle 8 aufzeigt, schneiden Holzheizungen hinsichtlich der Treibhausgasemissionen je Nutzeneinheit nicht zwingend besser ab als fossile Heizsysteme. Das gilt insbesondere, wenn Waldholz (Scheitholz, Hackschnitzel) zum Einsatz kommt. Neben den hohen direkten Emissionen (ca. 0,43 kg/KWh) tragen hierzu auch die schlechten Jahresnutzungsgrade bei. Am Ende liegen die effektiven GWP-Emissionsfaktoren bei Scheitholzheizungen mit 0,21 - 0,37 kg/kWh im Bereich von heutigen fossilen Heizsystemen. Deutlich günstiger schneiden Heizsysteme ab, die Rest- oder Altholz einsetzen. Eindeutig ist dies bei der Verwendung von Altholz, während bei der energetischen Restholznutzung die Allokationsfrage (Zuordnung zu Haupt- und Nebenprodukten) zu klären ist. Dazu gehören z.B. auch Pellets mit geringem Frischholzanteilen. Bei Pellets aus Stroh wirkt sich hingegen die kurze Rotationsperiode günstig aus.

	GWP(bio) Index	GWP Heizsystem (kgCO ₂ -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
Strohpellettheizung (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

Bestimmung der Treibhausgasemissionen je Kilowattstunde Nutzenergie (Heizung, Warmwasserbereitung) für zwei Scheitholzheizungen und eine Strohpellettheizung 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).

Tabelle 8: Treibhausgasemissionen je kWh Nutzenergie für zwei Scheitholz- und eine Stroh-Pellet-Heizung unter Heranziehung von GWP(bio)-Index-Werten aus Abb. 12. Zum Vergleich sind die Werte für ein fossiles Referenzsystem und eine Wärmepumpe aufgeführt. Bei den Wärmepumpen werden zudem zwei Stromszenarien verglichen (Referenz versus Klimaschutz). Durch technologische Verbesserungen sinken die Emissionswerte im Zeitraum 2010 - 2050 ab, besonders stark bei den

Wärmepumpen in einem Klimaschutzszenario, weil hier zunehmend erneuerbarer Strom bereitgestellt wird. Quelle: (Vallentin 2024), S.27.

Komplexer gestaltet sich die Bestimmung der „grauen Emissionen“ von Holz, Holzwerkstoffen und biogenen Dämmstoffen mit Hilfe des GWP(bio)-Index (Tab. 8). Zunächst ist hierzu der Kohlenstoffgehalt des Holz- oder Nawaro-Produkts zu bestimmen. Abhängig von der Nutzungsdauer des Baustoffs ergeben sich unterschiedliche Werte für die Treibhausgasemissionen (Global Warming Potential GWP) je bilanzierter Einheit.

Selbst für das wenig verarbeitete Konstruktionsholz ist erst nach 40 - 50 Jahren ein CO₂-Senkeneffekt nachweisbar, der jedoch bei noch längeren Standzeiten überproportional anwächst. Bei den Holzwerkstoffplatten wirken sich die energieintensiven Verarbeitungsschritte deutlich auf die materialbedingten Emissionen aus. Erst bei langen Nutzungsdauern stellt sich hier ein Netto-Senken-Effekt ein. Bei Holzweichfaserplatten ist der Herstellungsprozess auch aufgrund der hohen Rohdichte dann derart emissionsintensiv, dass sich nicht einmal nach 90 Jahren Standzeit eine negative Emissionsbilanz ergibt.

Eine wirklich neue Erkenntnis ist, dass schnell nachwachsende Rohstoffe (z.B. Stroh, Hanf, Schilf) sowie holzbasierte Recycling- bzw. Restprodukte (z.B. Zellulose- und Holzfaserdämmung) bereits unmittelbar nach deren Einbau z.B. als Dämmstoffe, als Netto- Negativemissionen wirksam sind (Abb. 13 sowie Tab. 3 und 5). Hier tritt nun bei den grauen Emissionen ein Effekt auf, der sich bei einer Betrachtung der grauen Energie nicht zeigt: Je größer das Dämmvolumen und die Rohdichte ist, desto größer wird der klimaentlastende Effekt. Es sind dann praktische sowie ökonomische Faktoren, wie Platzbedarf und Kosten, die die Dämmstärke begrenzen. Aus ökologischen Gründen hingegen können die Dämmstärken gar nicht zu groß gewählt werden, sofern eine entsprechende Materialverfügbarkeit aus nachhaltiger Produktion gegeben ist.

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
Strohdämmung	1,0 m ³	100,0	36,5	-0,23	-0,50	-0,84	-20,0	-56,2	-101,7

Tabelle 9: Treibhausgasemissionen je Kubikmeter Holzprodukt unter Heranziehung von GWP(bio)-Index-Werten aus Abb.12 und Tab. 2. Angabe der Werte für verschiedene Nutzungsdauern von 30, 60 und 90 Jahren. Am Ende der Nutzung erfolgt eine thermische Verwertung. Nur für die gelb hinterlegten Felder ergeben sich negative Emissionen und damit ein klimaentlastender Effekt. Quelle und weitere Erläuterungen siehe (Vallentin 2024), S. 29.

5.4 Nutzungsdauern von Holzkonstruktionen und die Notwendigkeit besonderer Schutzkonzepte

Ein häufig wenig beachteter Punkt ist, dass die Nutzungsdauern neben dem grundsätzlichen Einsatzgebiet auch von den Schutzkonzepten abhängig sind. Dabei existiert zunächst ein grundsätzlicher Unterschied, ob die Holzoberflächen frei bewittert werden oder nicht. Insbesondere ungeschützte liegende Bauteile und frei bewitterte Holz-auf-Holz-Konstruktionen haben sich als kritisch erwiesen.

Ein weiteres Problemfeld betrifft alle Abdichtungen von liegenden Holzkonstruktionen (Flachdächer, Dachterrassen, Loggien, Balkone, Laubengänge). Die Übertragung der im Massivbau bewährten Abdichtungskonzepte, wie sie in mehreren Normen und der Flachdachrichtlinie festgelegt sind, auf den Holzbau ist nicht automatisch gegeben. Im Holzbau erscheint es grundsätzlich angeraten, das sog. „Hosenträgerprinzip“ anzuwenden, d.h. die Umsetzung von zwei vollwertigen Abdichtungen anstelle nur einer Abdichtung, u.U. ergänzt um eine Notabdichtung/Dampfbremse. Als besonders kritisch haben sich Flachdächer, Loggien und Dachterrassen erwiesen, bei denen die Dämmung in der Tragebene liegt, ohne dass eine zusätzliche Aufdämmung (sog. Duodach) vorgesehen ist.

Weitere Anforderungen sind an den Schutz der Holzkonstruktionen während der Bauzeit zu stellen, z.B. in Form von Schutzbahnen und -abdeckungen wie diffusionsoffenen Bauzeit- bzw. dampfdichten Notabdichtungen oder durch besondere Schutzdächer. Hier sind im Holzbau immer besondere Maßnahmen mitzuplanen und in der Baurealisierung umzusetzen.

Warum werden diese Punkte hier besonders angesprochen?

- Die Langlebigkeit der Holzkonstruktionen hängt direkt von den o.g. Schutzkonzepten ab. Diese verursachen zwar einerseits gewisse Mehrkosten; andererseits ist ein Verzicht darauf u.U. mit hohen wirtschaftlichen Risiken (Schäden bis hin zum Totalverlust) verbunden.
- Die Wirkung als wirksame CO₂-Senke ist, wie schon dargelegt, in hohem Maße von einer wirklich langen Lebensdauer der Konstruktionen aus Holz und Nawaros abhängig. Sollten Konstruktionen frühzeitig versagen, sind die Nutzungsdauern häufig so kurz, dass das Holz besser im Wald verblieben wäre.
- Bestimmte frei bewitterte Konstruktionen weisen von Haus aus sehr kurze Nutzungsdauern auf (z.B. Terrassen, Zäune). Diese sind daher nicht als CO₂-Senke wirksam und können somit nur als kurzlebige bauliche Nutzung eingestuft werden.
- Bei der Planung und Ausführung von Holzkonstruktionen ist oftmals eine gewisse Ignoranz gegenüber der besonderen Schutzbedürftigkeit von Holz und Nawaros als Baumaterialien festzustellen. Hier sind Defizite bei Ausbildung, der Anwendung von eingeübten Planungsroutinen und im konstruktionsbezogenen Denken festzustellen. Es besteht die Gefahr, dass die an sich hohe Akzeptanz des Bauens mit Holz und Nawaros dadurch Rückschläge erleiden kann.

Angesichts der langen Gebäude-Lebensdauern von im Mittel über 120 Jahren (vgl. Feist/Krick 2024) ist der Aspekt der Robustheit und Dauerhaftigkeit der Konstruktionen einer der wichtigsten Aspekte für die Materialeffizienz. Damit können unnötige Erneuerungen und Instandsetzungen und somit klimawirksame Emissionen vermieden werden. Darüber hinaus wird so erst die Voraussetzung für ein zirkuläres Bauen, speziell im Hinblick auf eine Wiederverwendung von Materialien und Bauteilen geschaffen.

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.

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.

Tabelle 10: Typische Nutzungsdauern von Holzkonstruktionen im Vergleich mit den Nutzungsdauern in Ökobilanzen. Quelle: (Vallentin 2024, S. 27).

Eine gute Zerlegbarkeit spielt auch bei den im Laufe des Lebenszyklus regelmäßig anstehenden Erneuerungszyklen eine wichtige Rolle. Das betrifft z.B. den zerstörungsfreien Fenstertausch, die Erneuerung des Fassadenbehangs und die Instandsetzung bzw. Nachrüstung der Elektrik im Zuge einer typischen Generalsanierung nach 50 - 60 Jahren.

Die Langlebigkeit der Konstruktionen im Sinne des Klimaschutzes kann ohnehin erst dann produktiv werden, wenn die Energieverluste durch die Bauteile bei der Raumbeheizung gegenüber dem heutigen Stand stark reduziert werden. Dies verweist wiederum auf das Zusammenspiel der Hauptstrategien Effizienz, Erneuerbare und CO₂-Senken: Diese Strategien sind immer gemeinsam zu entwickeln und sollten auf keinen Fall gegeneinander ausgespielt werden.

6 Positionspapier zur Klimabilanzierung von Gebäuden

1 Verursachergerecht bilanzieren

Es werden alle Energie- und Materialflüsse berücksichtigt, die durch das Gebäude verursacht werden, auch wenn dies ein sektorübergreifendes Bilanzieren erfordert. Beispielsweise sind alle Stromanwendungen im Gebäude einzubeziehen, auch wenn Stromemissionen im nationalen Energiesektor verbucht werden.

2 Bilanzgrenzen sachgerecht festlegen

Bilanzgrenzen sind prinzipiell frei wählbar, sofern sie sachgerecht und zur Quantifizierung des Klimaschutzes notwendig sind. Sie sind jedoch klar zu benennen und nachvollziehbar darzustellen. Andere Aspekte wie Konventionen, Normungen und gesetzliche Vorgaben sind hierfür nicht entscheidend.

3 Klimaziele gemäß dem aktuellen Stand der Klimaforschung festlegen

Die Klimaziele sind gemäß dem aktuellen Stand der Klimaforschung festzulegen. Die CO₂-Global-Budgets bilden nach derzeitigem Stand einen guten und relativ einfach interpretierbaren Maßstab für länder- und sektorenbezogene Klimaziele und damit auch für den Gebäudesektor.

4 Nutzungsdauern empirisch bestimmen

Die Nutzungsdauern von Gebäuden, Bauteilen und Technikkomponenten sollen empirisch und nicht gemäß anderen Kriterien (wie z.B. Abschreibungszeiträume, strategische oder interessensgeleitete Überlegungen) festgelegt werden.

5 Unterschied zwischen Betrachtungszeitraum und Lebenszyklusdauer beachten

Betrachtungszeitraum und Lebenszyklusdauer müssen nicht identisch sein. Allerdings sind dann für Komponenten, deren Lebensdauer über den Betrachtungszeitraum hinausragt, Restwerte zu berücksichtigen. Die Lebensdauer der Gebäude selbst sollte auf keinen Fall künstlich verkürzt werden, weil dann bestimmte Klimaschutzstrategien (z.B. CO₂-Senkenbildung, Einsatz besonders langlebiger Konstruktionen, zirkuläres Bauen) nicht einbezogen werden können.

6 Zeitabhängigkeiten abbilden

Bei den energie- und materialbedingten sowie den biogenen Emissionen ist deren Zeitabhängigkeit angemessen zu bilanzieren. Dies erfordert dynamische oder wenigstens halbstatische Methoden. Für anwendungsfreundliche Bilanzen sind auch Mittelwertbildungen über den Betrachtungszeitraum möglich. Diese sollten dann allerdings mit Hilfe von Szenarien oder einer dynamischen Bilanzierung ermittelt werden.

7 Richtungssicherheit als Kriterium

Angesichts der langen Zeiträume ist eine Klimaschutzbilanzierung von Gebäuden mit großen Unsicherheiten verbunden. Sie sollte jedoch wenigstens richtungssicher sein, d.h. nicht ziel-führende von guten Lösungen unterscheiden und dafür das Zusammenwirken der Hauptstra-tegien hinreichend genau abbilden können.

8 Methodenvergleiche als „Testmethode“

In der aktuellen Übergangsphase ist es wichtig, verschiedene Methoden hinsichtlich notwen-digen Datengrundlagen, Aufwand und Aussagekraft zu testen, um schließlich eine belastbare Methode für eine möglichst einfache und nachvollziehbare zeitabhängige Klimaschutzbilan-zierung zu finden. Die Rechenansätze, Annahmen und Randbedingungen sind offenzulegen und deren Konsequenzen auf die Bilanzergebnisse darzustellen.

9 Arbeitsprogramm

Um die Klimaschutzbilanzierung auf ein neues Niveau zu heben, ist ein einheitliches Arbeits-programm notwendig, das dann von verschiedenen Bilanzierungsteams nach unterschiedli-chen Methodenansätzen bearbeitet wird. Am Ende sollte ein Konsens stehen, wie künftige Klimaschutzbilanzierungen erfolgen können. Das Programm sollte folgende Aspekte umfas-sen:

- Begrenzte Auswahl von Materialien, mit denen verschiedene Bauweisen abgebildet werden können
- Begrenzte Auswahl von Versorgungssystemen
- Einheitliche Typengebäude für Neubau, Modernisierung sowie Abriss und Ersatzbau
- Berücksichtigung verschiedener End-of-Life-Prozesse (Wiederverwendung, Recyc-ling)

10 Anwenderfreundlich bilanzieren

Schließlich sind die komplexen wissenschaftlich basierten Bilanzmethoden so zu vereinfachen, dass sie für Planer und Bauschaffende transparent, gut anwendbar und einfach inter-pretierbar sind. Ein weiterer wichtiger Punkt ist auch, dass sie für nicht Fachkundige verständ-lich sind. Der Zeit- und Kostenaufwand sollte gegenüber dem heutigen Stand der statischen Ökobilanzen deutlich verringert werden.

Quellen

- (Archer et al. 2009) (Archer et al. 2019) Archer, David; u.a.: „Atmospheric Lifetime of Fossil Fuel Carbon Dioxide“; Internetveröffentlichung; URL: https://climate.models.uchicago.edu/geocarb/archer.2009.ann_rev_tail.pdf, aufgerufen am 24.05.2024.
- (BBSR 2020) BBSR (Hrgs.): Umweltfußabdruck von Gebäuden in Deutschland. Online-Publikation Nr. 17/2020, www.bbsr.bund.de
- (Cherubini et al. 2011) (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).
- (Cherubini et al. 2014) Cherubini, Francesco; u.a.: „Bioenergy and its actual Mitigation of Climate Change: Does Carbon Neutral means Climate Neutral?“ Internet-Veröffentlichung; URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=cedb99d848fd2be4fe8e34e4d7e8b2527937d6f9>, aufgerufen am 24.05.2024
- (Den Elzen et al. 2007) Den Elzen, Michel; u.a.: „The Tryptich approach revisited. A staged sectoral approach für climate mitigation.“ Internetveröffentlichung; ULR: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421507005289>, aufgerufen am 03.03.2024.
- (EIV 2025) Roßkopf-Nachbaur, Thomas; Ploss, Martin: „Ermittlung monatlicher Primärenergie- faktoren und CO₂eq-Konversionsfaktoren für den aktuellen österreichischen Verbraucherstrommix sowie Szenario für 2030“.
- (ENTSO-E 2025) Transparency Platform. ULR: <https://transparency.entsoe.eu/>, aufgerufen am 03.07.2025.
- (ETA-03/0050) Deutsches Institut für Bautechnik (Hrgs.): „Europäische Technische Bewertung ETA-03/0050 - Gipsfaserplatten für die Beplankung und Bekleidung von Bauteilen“, Stand: 14. Dezember 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) URL: <https://doi.org/10.3390/f13030365>; aufgerufen am 17.07.2023.
- (Feist/Krick 2024) Feist, Wolfgang; Krick, Benjamin: „Energie und CO₂ im Lebenszyklus: Ausgangspunkt“. In: Protokollband kostengünstige Passivhäuser Nr. 60, S. 1 -24.
- (Guest et al. 2012) Guest, Geoffrey, u. a.: Global Warming Potential of Carbon Dioxide Emissions from Biomass Stored in the Anthroposphere and used for Bioenergy at End of Life. Internetveröffentlichung unter DOI: 10.1111/j.1530-9290.2012.00507.x
- (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.
- (Kern 2016) Kern, Michaela: „Die Konsequenzen des Zwei-Grad-Ziels auf die energetischen Anforderungen an Wohngebäude“, Masterarbeit, TU München, 2016.
- (Meyer 2000) Meyer, Aubrey: „Contraction & Convergence: The Global Solution to Climate Change.“ Greenbooks for the Schumacher Society, Bristol, 2000.
- (Pittau et al. 2018) Pittau, Francesco u.a.: „Fast Growing Bio-Based Materials as an Opportunity for Storing Carbon in Exterior Walls“, Internetveröffentlichung unter DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.12.006
- (Pittau et al. 2022) Pittau, Francesco; Habert, Guillaume; Savi, Daniel; Klingler, Matthias: „Carbon storage project“, Hrsg.: Stadt Zürich, Amt für Hochbauten. Internetveröffentlichung; URL: <file:///C:/Users/VR/Downloads/2022-05-nb-Carbon-Storage-Project.pdf>, aufgerufen am 17.07.2023.
- (Vallentin 2022) Vallentin Rainer: „Ganz oder garnicht“, *DETAILgreen* 11.2022, S. 102 – 107.

- (Vallentin 2023) Vallentin, Rainer: „CO₂-Global-Budget für Gebäude-Aktualisierung der Klimaschutzstandards für den deutschen Wohnbau (Langfassung)“; Internetveröffentlichung unter www.vraie.de.
- (Vallentin 2024) Vallentin, Rainer: „Wie kann der Holzbau zum Klimaschutz beitragen?“; Internetveröffentlichung unter www.vraie.de.
- (Vallentin 2023) Vallentin, Rainer: „CO₂-Global-Budget für Gebäude-Aktualisierung der Klimaschutzstandards für den deutschen Wohnbau (Langfassung)“; Internetveröffentlichung unter www.vraie.de.
- (Schellnhuber 2022) Schellnhuber, Hans-Joachim: Bauhaus der Erde. Nachhaltige Holznutzung im Bausektor; In: Klaus Wiegand (Hrsg.): „Drei Grad mehr“, München, 2022, S. 169 - 208.
- (UBA 2018) Umweltbundesamt: „Kohlendioxid-Emissionen im Bedarfsfeld >Wohnen<“; Internetveröffentlichung; ULR: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/kohlendioxidemissionen-im-bedarfsfeld-wohnen>; aufgerufen am 07.05.2020.
- (UBA 2025) Umweltbundesamt:
- (WBGU 2009) Wissenschaftlicher Beirat Globale Umweltveränderungen (Hrsg.): „Der WBGU-Budgetansatz“; Internetveröffentlichung; ULR: <https://www.wbgu.de/de/publikationen/publikation/der-wbgu-budgetansatz>, aufgerufen am 03.03.2024.
- (Windesperger 2015) Windesperger, Andreas; Windesperger, Bernhard: „CO₂-Bilanzierung von Bauprodukten“; Internetveröffentlichung; St. Pölten, 2015; URL: https://nachhaltigwirtschaften.at/resources/hdz_pdf/zukunftssicheres_bauen_03_co2_bilanzierung.pdf, aufgerufen am 17.07.2023.

Abbildungen

- Abbildung 1: Analyse des Klimaschutz-Plus-Szenarios bezüglich der Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen. Zusätzlich sind strategisch bedeutsame Zeitpunkte hervorgehoben und die Herleitung der kumulierten Emissionen 2020-2070 als hellrot schraffierte Fläche dargestellt. Quelle: (Vallentin 2023, S. 21) 6
- Abbildung 2: Pro-Kopf-Treibhausgasemissionen der privaten Haushalte im Zeitraum 1990 - 2018. Zur besseren Einordnung sind eine Trendentwicklung bis 2050 und der Klimaschutz-Korridor sowie das Klimaschutz-Zielfeld mit dargestellt. Quellen: (UBA 2018), (Kern 2016) und (Vallentin 2023). 7
- Abbildung 3: Entwicklung der Pro-Kopf-CO₂-Äquivalent-Emissionen in Österreich 1990 – 2021. Zur besseren Einordnung sind die o.g. 4 Pfade A – D sowie der daraus gebildete Klimaschutz-Korridor (grau hinterlegter Bereich) und das Zielfeld (rotes Rechteck) eingetragen. Darüber hinaus sind eine Trendentwicklung und die Klimaschutzziele der österreichischen Bundesregierung eingetragen. 9
- Abbildung 4: Entwicklung der CO₂-eq-Faktoren der Strombereitstellung in Deutschland (Strommix) inklusive Berücksichtigung der Vorketten 1990 – 2024. Zusätzlich ist die künftige Entwicklung bis 2070 abgeschätzt. Der Pfad weg von der fossilen hin zur erneuerbaren Stromerzeugung findet hier innerhalb von acht Jahrzehnten statt. Quelle: (UBA 2025, S. 11 ff.) und eigene Berechnungen. 11
- Abbildung 5: Monatlicher Verlauf der CO₂-eq-Faktoren der Bruttostromerzeugung in der Tschechischen Republik, in Deutschland und in Österreich im Mittel der Jahre 2020 – 2024. Quellen und weitere Erläuterungen: (ENTSO-E 2025 und EIV 2025). Wichtiger Hinweis: In der Darstellung sind nur die Konversionsfaktoren der inländischen Stromerzeugung abgebildet. Importe spielen hier vorerst keine Rolle. Erst in der folgenden Abbildung 5 wird dies berücksichtigt (siehe unten). 12
- Abbildung 6: Monatlicher Verlauf der CO₂-eq-Faktoren des Verbraucherstrommixes in Österreich im Mittel der Jahre 2020 – 2024 (rot) und im Szenario für 2030. Quelle: (EIV 2025, S. 8) 12
- Abbildung 7: Entwicklung der CO₂-eq-Faktoren der Wärmebereitstellung in Deutschland inklusive Berücksichtigung der Vorketten 2020 – 2070 in Gramm CO₂-Äquivalente je kWh Endenergie. Als Beispiel für die Fernwärme wurde die Erdinger Fernwärmeversorgung herangezogen. 13

Abbildung 8: Versuchsweise Abschätzung der Dekarbonisierung der Materialbereitstellung im Zeitraum 2010 – 2100 über Dekarbonisierungsfaktoren, wobei der Wert von 1,0 für das Jahr 2010 festgelegt ist. Quelle: (Alig et al. 2020 und Vallentin 2024, S. 24)	14
Abbildung 9: Bestimmung des Speichersaldos für die Entnahme von Holz aus dem Wald. Quelle: (Fehrenbach et al. 2022).	19
Abbildung 10: Idealisierendes Schema der Entnahme von Biomasse und des Nachwuchsprozesses. A: CO ₂ -Gehalt der Biomasse zum Zeitpunkt der Ernte. B: Die gesamte Biomasse über dem Erdboden wurde geerntet und über einen energetischen Prozess freigesetzt. Gleichzeitig hat die Nachpflanzung stattgefunden. Damit beginnt der Prozess der Sequestrierung erneut. C: Am Ende der Rotationsperiode ist die gesamte Menge der zum Zeitpunkt B entnommenen Biomasse nachgewachsen und der zuvor entnommene Kohlenstoffpool wieder aufgebaut. Der Wachstumsprozess wird mathematisch über eine Gauss'sche Verteilung abgebildet. Quelle: (Cherubini et al. 2014).	19
Abbildung 11: Abbauraten in der Atmosphäre für drei Treibhausgase (Kohlendioxid – Stickstoffdioxid – Methan). Kohlendioxid wird auch in längeren Zeiträumen nicht vollständig abgebaut. Auch nach 1000 Jahren ist immer noch über 20 % in der Atmosphäre vorhanden. Quelle: (Cherubini et al. 2014, eigene Darstellung).	20
Abbildung 12: Dynamische Bilanzierung von Holz für verschiedene Speicherdauern S und Rotationsperioden R. In allen Fällen wird angenommen, dass nach der Nutzungszeit (= 60 Jahren) das Holz (R = 50 bzw. 100 Jahre) oder die landwirtschaftliche Biomasse (R = 1 Jahr) energetisch genutzt wird. Angabe der Werte in kg CO ₂ -Äquivalente je kg des im Produkt gebundenen CO ₂ . Quelle: (Pittau et al. 2022).	21
Abbildung 13: Dynamische Bilanzierung von Holz für verschiedene Speicherdauern S und Rotationsperioden R. In allen Fällen wird angenommen, dass nach der Nutzungszeit (= 60 Jahren) das Holz (R = 50 bzw. 100 Jahre) oder die landwirtschaftliche Biomasse (R = 1 Jahr) energetisch genutzt wird. Angabe der Werte in kg CO ₂ -Äquivalente je kg des im Produkt gebundenen CO ₂ . Quelle: (Guest et al. 2012, eigene Darstellung).	22
Abbildung 14: Schematischer Vergleich zwischen einer statischen Ökobilanz (mit: D = 1 = const.) und einer dynamischen Bilanzierung mit nahezu vollständiger Dekarbonisierung der Wirtschaft bis 2100 (D = 0). Den Ökobilanzen liegt somit ein „Szenario ohne Klimaschutz. Quelle: (Vallentin 2024), S. 39.	25

Tabellen

Tabelle 1: CO ₂ -Global-Budgets ab 2020 in Tonnen CO ₂ -Äquivalente pro Person und Jahr für verschiedene Klimaziele und Eintrittswahrscheinlichkeiten. Daraus lassen sich Pro-Kopf-Budgets für einzelne Staaten (beispielhaft dargestellt für Deutschland) sowie für die Bereiche Bauen und Wohnen ableiten. Quelle: (Vallentin 2022, S. 104)	4
Tabelle 2: CO ₂ -Global-Budgets ab 2020 für verschiedene Klimaschutzziele und Eintrittswahrscheinlichkeiten. Zuordnung der Pro-Kopf-CO ₂ -Budgets für Österreich durch Zuweisung des 0,00115%-Anteils an der Weltbevölkerung. Für die Wohnnutzung wird ein in etwa gleichbleibender Ansatz von einem Fünftel in Anspruch angesetzt (aktueller Wert AT: 17%). Quellen: (IPCC 2021, SfP S. 41) und eigene Berechnungen. Nähere Angaben finden sich in (Vallentin 2021).	8
Tabelle 3: Versuch einer Dynamisierung von Substitutionsfaktoren. Erläuterungen zu den Szenarien siehe Abbildung 7. Quelle (Vallentin 2024, S. 45)	15
Tabelle 4: Schematischer Methodenvergleich zur Bilanzierung biogener Emissionen im Hinblick auf Berücksichtigung der Emissionen durch die Holzentnahme aus dem Wald, die Ein- und Ausspeicherung von Kohlenstoff bei einer stofflichen Nutzung, der Rotationsperiode für Bäume bzw. Pflanzen, der Speicher- und Nutzungsdauer und der dynamischen Simulation der biogenen Emissionen. Quelle: (Vallentin 2024, S. 33 unter Heranziehung von (Windspurger 2015), (Hoxha et al. 2020) und (Pittau et al. 2022).	17

- Tabelle 5: Dynamische Bilanzierung von Holz für verschiedene Speicherdauern S und Rotationsperioden R. In allen Fällen wird angenommen, dass nach der Nutzungszeit die Biomasse energetisch genutzt wird. Angabe der Werte in kg CO₂-Äquivalente je kg des im Produkt gebundenen CO₂. Die Fälle bei denen sich ein Netto-Senkeneffekt (= Negativemission) ergibt sind zur besseren Übersicht gelb hinterlegt. Quelle: (Guest et al. 2012, eigene Darstellung). 23
- Tabelle 6: Zeitliche Entwicklung der CO_{2eq}-Konversionsfaktoren der Endenergiebereitstellung je Kilowattstunde Strom bzw. Wärme. Eigene Berechnung unter Heranziehung der Ergebnisse in (Vallentin 2023). 26
- Tabelle 7: Versuchsweise Abschätzung der Dekarbonisierung der Materialbereitstellung für zwei Entwicklungen (Referenz- und Klimaschutz-Plus-Szenario). Als belastbarer Stützpunkt für einen Klimaschutzpfad wird der Mittelwert einer schweizerischen Studie herangezogen, der eine Emissionsreduzierung von 65 % im Jahr 2050 gegenüber dem Stand 2020 für erreichbar einschätzt (vgl. Alig et al. 2020). 26
- Tabelle 8: Treibhausgasemissionen je kWh Nutzenergie für zwei Scheitholz- und eine Stroh-Pellet-Heizung unter Heranziehung von GWP(bio)-Index-Werten aus Abb. 12. Zum Vergleich sind die Werte für ein fossiles Referenzsystem und eine Wärmepumpe aufgeführt. Bei den Wärmepumpen werden zudem zwei Stromszenarien verglichen (Referenz versus Klimaschutz). Durch technologische Verbesserungen sinken die Emissionswerte im Zeitraum 2010 - 2050 ab, besonders stark bei den Wärmepumpen in einem Klimaschutzszenario, weil hier zunehmend erneuerbarer Strom bereitgestellt wird. Quelle: (Vallentin 2024), S.27. 27
- Tabelle 9: Treibhausgasemissionen je Kubikmeter Holzprodukt unter Heranziehung von GWP(bio)-Index-Werten aus Abb.12 und Tab. 2. Angabe der Werte für verschiedene Nutzungsdauern von 30, 60 und 90 Jahren. Am Ende der Nutzung erfolgt eine thermische Verwertung. Nur für die gelb hinterlegten Felder ergeben sich negative Emissionen und damit ein klimaentlastender Effekt. Quelle und weitere Erläuterungen siehe (Vallentin 2024), S. 29. 28
- Tabelle 10: Typische Nutzungsdauern von Holzkonstruktionen im Vergleich mit den Nutzungsdauern in Ökobilanzen. Quelle: (Vallentin 2024, S. 27). 30