

Sys.Wood: Ökologische Bewertung

Hintergrunddokumentation



Ökologische Bewertung - Hintergrunddokumentation

Autor:innen

Alireza Fadai, Alexander Gerger, Katharina Schachner, Fabian Ulrych, Marius Valente, Markus Wallner-Novak

Schlüsselwörter

Holzbau, Ökobilanzierung, Wiederverwendung, Vorfertigung, Zirkularität

Veröffentlichung

2026

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung	1
2 Einfluss der Vorfertigung auf die Ökobilanzierung.....	4
2.1 Ziele und Systemgrenzen.....	4
2.2 Erhebung der Sachbilanzen	4
2.2.1 Stoffbilanzen.....	5
2.2.2 Emissionen aus der Vorfertigung	6
2.3 Wirkungsabschätzung.....	6
2.4 Weiterführende Erkenntnisse aus der Ökobilanzierung	10
3 Bewertung der Zirkularität	11
4 Ökologische Bewertung wiederverwendeter Bauteiler	17
4.1 Ökologische Bewertung für einen Nutzungszyklus	17
4.1.1 Herangehensweise.....	17
4.1.2 Bilanzierung der Außenwände	17
4.1.3 Schlussfolgerungen für die Optimierung der Außenwände	18
4.1.4 Bilanzierung der Geschoßdecken	20
4.1.5 Bilanzierung der Nutzungsdauer (Modul B4 – Auswechseln / Wartung & Auswirkung auf LCA)	20
4.2 Ökologische Bewertung über mehrere Nutzungszyklen	24
4.2.1 Speicherwirkung Holz und Holzwerkstoffen	24
4.2.2 Herleitung der Berechnungsmethode	27
4.2.3 Abgrenzung zum Modul D	30
4.2.4 Materialströme der Nutzungszyklen	31
5 Literaturverzeichnis	33

1 Einführung

Die Bewertung der Umweltwirkungen von Neubauten durch Ökobilanzierungen gewinnt im Zuge nachhaltiger Entwicklung zunehmend an Bedeutung. Dabei ist es wichtig, sowohl den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks als auch dessen konstruktive Eigenschaften zu berücksichtigen. Die Systematik der Gebäudeökobilanz ist in Abbildung 1.1 nach EN 15978 [1] dargestellt. Sie gliedert den Lebenszyklus eines Bauwerks in die **Module**

- **A** (Herstellung und Errichtung),
- **B** (Nutzung),
- **C** (End-of-Life) sowie
- **D** (Potenziale außerhalb der Systemgrenze)

und bildet damit die methodische Grundlage für eine normkonforme Bewertung¹.

Während die Ökobilanzierung nach EN 15978 [1] quantitative Umweltwirkungen über definierte Lebenszyklusmodule abbildet, erfassen Leitfäden zur Kreislauffähigkeit konstruktive und organisatorische Eigenschaften, welche die Ausprägung einzelner Module – insbesondere B4 (Austausch), C (Rückbau und Entsorgung) sowie D (Wiederverwendungs- und Recyclingpotenziale) – maßgeblich beeinflussen.

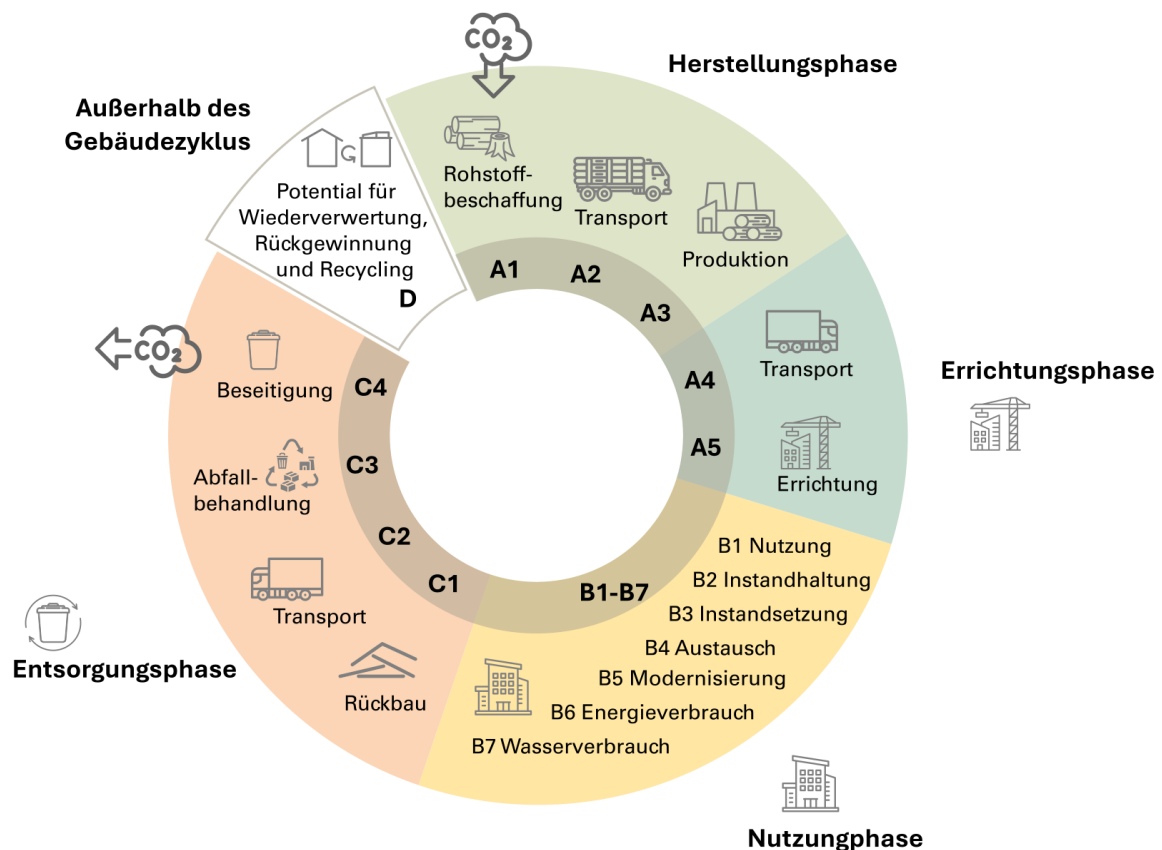


Abbildung 1.1 Systematik der Gebäudeökobilanz nach EN 15978 [1] mit Darstellung der Lebenszyklusmodule A–D

¹ Im Zuge der laufenden Revision der Norm wird eine Erweiterung der Modulstruktur diskutiert. Diese sieht ein zusätzliches Modul in der Nutzung B8 für zusätzliche Nutzungsaufwände vor. Außerdem eine Unterteilung des Modul D in D1 für Wiederverwendung und D2 für Energierückgewinnung. Ziel dieser Differenzierung ist eine präzisere Abbildung von Wiederverwendungsstrategien und Kreislaufpotenzialen. Die dargestellte Struktur ist bislang nicht normativ verbindlich.

Im Rahmen der Ökobilanzierung erfolgt zunächst die Wirkungsabschätzung, bei der die Sachbilanzwerte den jeweiligen Wirkungskategorien zugeordnet werden. Abbildung 1.2 stellt die methodische Verknüpfung zwischen Sachbilanz (Life Cycle Inventory, LCI) und Wirkungsabschätzung (Life Cycle Impact Assessment, LCIA) gemäß ÖNORM EN ISO 14040 [2] und 14044 [4] dar. In der Sachbilanz werden alle relevanten Input- und Outputflüsse eines Produkts oder Gebäudes – Rohstoff- und Energieverbräuche auf der Eingangsseite, Emissionen und Abfälle auf der Ausgangsseite – quantifiziert und auf eine gemeinsame Referenzeinheit (funktionelle Einheit) umgerechnet und zu einem Wirkungsindikator zusammengefasst. [5]. Diese Stoff- und Energieflüsse bilden die Ursachen potenzieller Umweltwirkungen.

Treibhausgase wie CO₂, CH₄ und N₂O werden beispielsweise der Kategorie Klimawandel zugewiesen, versauernd wirkende Emissionen wie SO_x und NH_x der Kategorie Versauerung. Einzelne Sachbilanzwerte können mehreren Kategorien zugeordnet sein – Stickoxide (NO_x) wirken etwa gleichzeitig versauernd, eutrophierend und auf das photochemische Ozonbildungspotenzial [5].

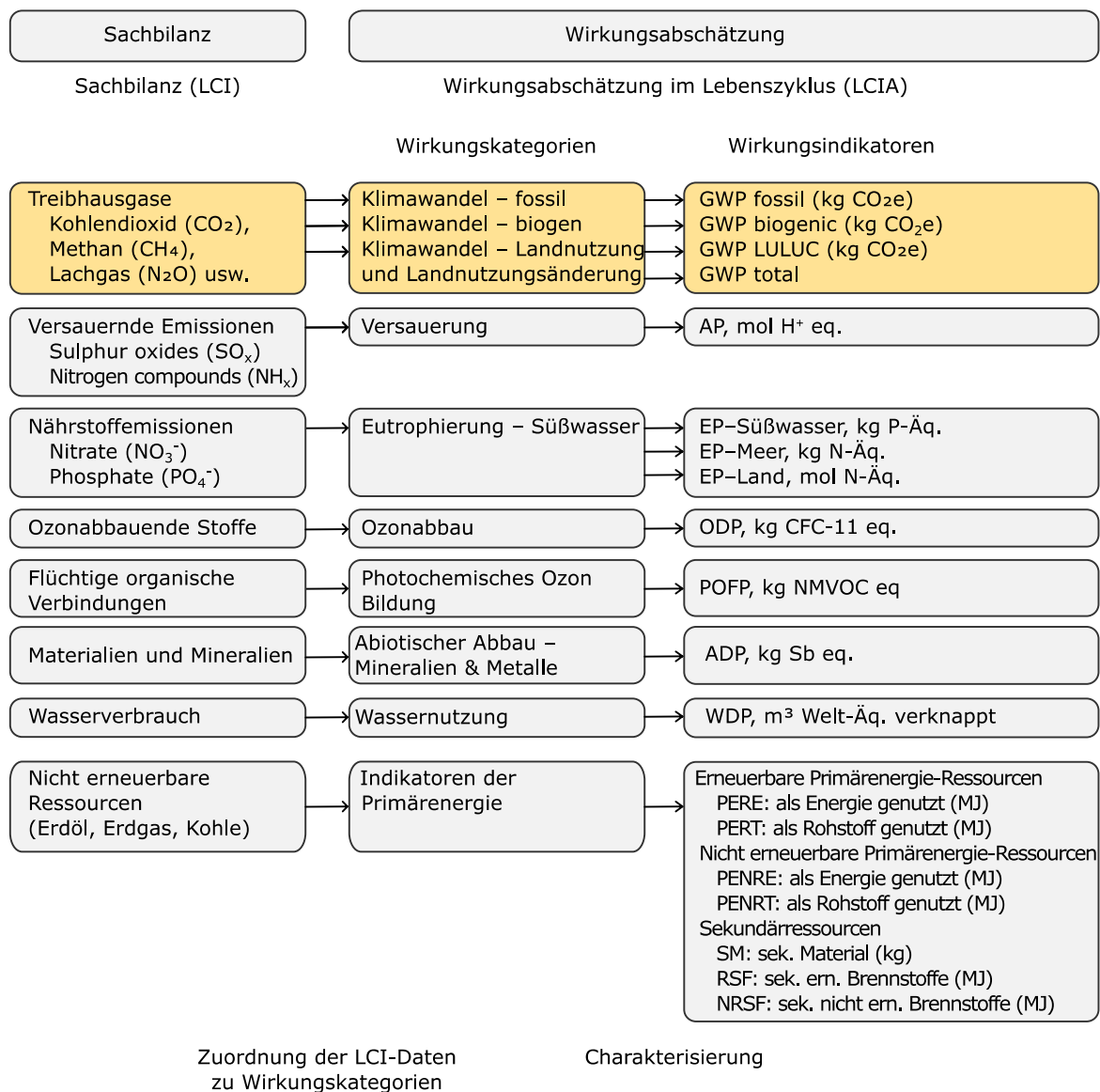


Abbildung 1.2 Übersicht über Sachbilanzen und Wirkungsabschätzungen [vgl. 5]

Die in Abbildung 1.2 dargestellten Indikatoren entsprechen den Vorgaben der ÖNORM EN 15804+A2 [7], die für Umweltproduktdeklarationen (EPD) seit Juli 2022 verbindlich gilt. Gegenüber der Vorgängerversion wurde die Klimawirkung in die Subindikatoren GWP-fossil, GWP-biogenic und GWP-LULUC (Land Use and Land Use

Change) aufgeteilt und zum GWP-total zusammengeführt. Die Eutrophierung wurde in Süßwasser-, Meer- und terrestrische Anteile gegliedert. Insgesamt umfasst der Pflichtumfang nach EN 15804+A2 dreizehn Umweltindikatoren, ergänzt um sechs optionale Indikatoren etwa zu Feinstaub und Humantoxizität.

Diese Indikatoren bilden die Grundlage für die Bewertung der ökologischen Auswirkungen von Gebäuden. Die ökologische Bewertung von Gebäuden kann dabei unterschiedliche Zielsetzungen verfolgen:

Lebenszyklusanalysen

Einerseits steht die quantitative Ermittlung von Umweltwirkungen im Vordergrund, wie sie im Rahmen normativer Lebenszyklusanalysen (Life cycle assessment LCA) erfolgt. Mit der Einführung der OIB-Richtlinie 7 sowie der Umsetzung der europäischen Gebäuderichtlinie [6] wird die Berechnung von Treibhausgasemissionen über den Lebenszyklus schrittweise zu einer verbindlichen Anforderung im Neubau. Künftig ist insbesondere die quantitative Ermittlung des Global Warming Potential (GWP) auf Grundlage der EN 15978 [1] vorgesehen, wobei zunächst die Herstellungsphase (Module A1–A3) im Fokus steht.

Im Rahmen dieser Bewertung ist zwischen fossilen Treibhausgasemissionen und biogenem Kohlenstoff zu unterscheiden. Während fossile Emissionen dauerhaft zur Erhöhung der atmosphärischen CO₂-Konzentration beitragen, wird biogener Kohlenstoff im nachwachsenden Rohstoff Holz während des Wachstums gebunden und über die Nutzungsdauer im Produkt gespeichert. Die bilanzielle Behandlung dieser biogenen Kohlenstoffspeicherung sowie deren allfällige Freisetzung am Lebensende erfolgt normiert nach EN 15804 [7] und ist für die Interpretation der Ergebnisse im Holzbau von zentraler Bedeutung.

Leitfäden zur Bewertung der Kreislauffähigkeit

Andererseits gewinnen qualitative und semiquantitative Bewertungsansätze an Bedeutung, welche konstruktive Eigenschaften im Hinblick auf Kreislauffähigkeit, Demontierbarkeit und Wiederverwendungspotenzial systematisch erfassen.

Im Projekt Sys.Wood werden beide Ebenen miteinander verknüpft. Während die Gebäudeökobilanz nach EN 15978 [1] eine normierte, wirkungsbezogene Bilanzierung über definierte Lebenszyklusmodule ermöglicht, adressieren ergänzende Leitfäden die konstruktive Ausgestaltung von Bauteilen und deren Einfluss auf Austauschzyklen (Modul B4), Rückbau (Modul C) sowie Potenziale außerhalb der Systemgrenze (Modul D).

Zudem liegt der Fokus auf dem GWP-total. Mit der OIB-Richtlinie 7 sowie der Umsetzung der überarbeiteten europäischen Gebäuderichtlinie wird die Berechnung von Treibhausgasemissionen über den Lebenszyklus schrittweise zu einer verbindlichen Anforderung im Neubau, wobei zunächst die Herstellungsphase (Module A1–A3) im Fokus steht. Die für die Untersuchung relevante Indikatorgruppe ist in Abbildung 1.2 (S. 2) entsprechend hervorgehoben.

2 Einfluss der Vorfertigung auf die Ökobilanzierung

Die Vorfertigung spielt im modernen Holzbau eine zentrale Rolle. Sie ermöglicht nicht nur eine effizientere und präzisere Bauweise, sondern hat auch Auswirkungen auf die ökologische Bilanz von Gebäuden. In diesem Kapitel wird untersucht, wie sich die Vorfertigung auf die Umwelt in der Herstellungsphase (A3) auswirkt – insbesondere im Hinblick auf die Ökobilanz von Holzbauerelementen. Die Ergebnisse basieren auf den Untersuchungen im Rahmen des Arbeitspakets und den erhobenen Daten dreier Partnerunternehmen.

2.1 Ziele und Systemgrenzen

Das Ziel dieser Ökobilanzierung ist, die Umweltauswirkungen von Holzbauteilen zu bewerten, die durch Vorfertigung hergestellt werden. Dabei liegt der Fokus auf Bauelementen aus Partnerunternehmen mit typischen Bauteilaufbauten. Um die Ökobilanz zu erstellen, wurden zwei zentrale Aspekte nach EN ISO 14040 [8] untersucht:

1. Sachbilanzen

a. Stoffbilanzen der Bauteile

Hier wurden die Bauteilaufbauten anhand von Plänen und Listen detailliert erfasst.

b. Produktionsaufwände in der Vorfertigung

Die Energieaufwendungen, die während der Herstellung in den Werkshallen entstehen, wurden dokumentiert.

2. Wirkungsabschätzung

Die Emissionen der Stoffbilanzen und der Produktionsaufwände durch die Vorfertigung wurden für die Globalen Treibhausgasemissionen (GWP-total) berechnet.

Durch die Vorfertigung verändern sich die Systemgrenzen im Vergleich zum klassischen Holz- und Massivbau. Aufgrund der Vorfertigung bzw. Errichtung im Werk findet vor Ort lediglich eine Errichtung durch Montage statt (A5). Die Emissionen, die bei einer vor Ort Errichtung entstehen (A5), werden aufgrund der Vorfertigung in die Herstellungsphase vorverschoben (A3). Abbildung 2.1 zeigt die Abweichung durch die Holzfertigbauweise sowie den Umfang der Datenerhebung im Forschungsprojekt für die Herstellungsphase. Für eine gesamtheitliche Betrachtung des Lebenszyklus wurden außerdem die Emissionen für die Entsorgung (C1-C4) berücksichtigt.

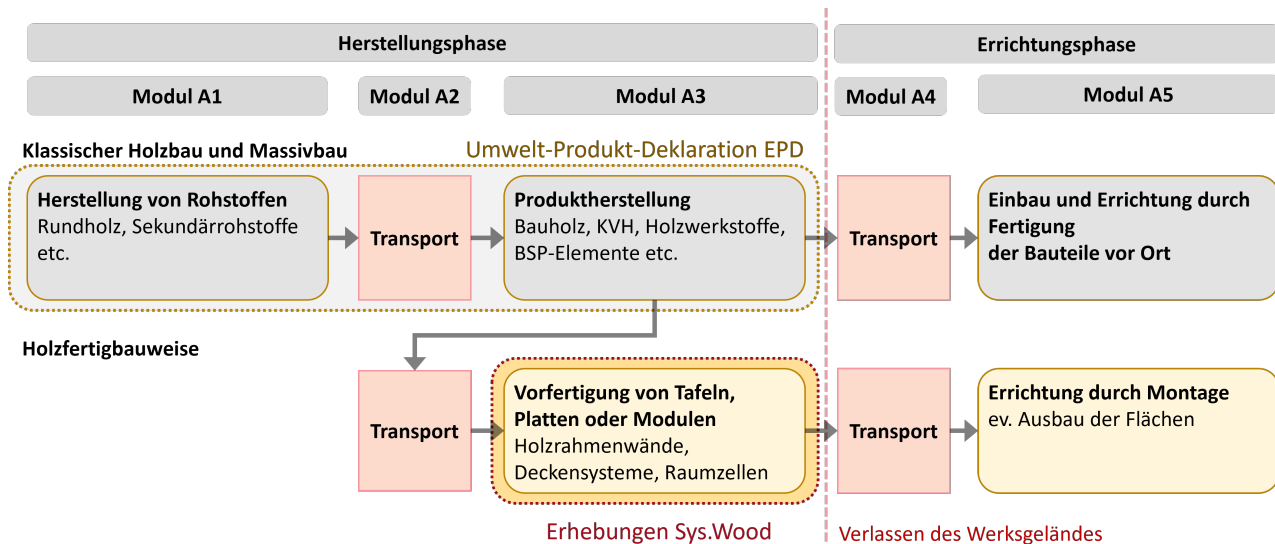


Abbildung 2.1 Zuordnung der Emissionen vom klassischen Holz- und Massivbau und der Holzfertigbauweise nach ÖNORM EN 15978 [9] und Systemgrenze der Datenerhebung der Unternehmenspartner [Abbildung nach 10]

2.2 Erhebung der Sachbilanzen

Im Rahmen des Projekts wurden die Produktionsschritte in der Vorfertigung detailliert aufgezeichnet und die zugehörigen Aufwände für die Ökobilanzierung untersucht. Dabei stützte man sich auf zwei wissenschaftliche Arbeiten [11, 12], die den Produktionsprozess in den Partnerunternehmen begleiteten.

Für die Untersuchung wurden sieben Bauelemente ausgewählt: Außen-, Innen- und Trennwände für Wohnbauten. Im Fokus stand die Vorfertigung von Holzrahmenelementen der drei Partnerunternehmen. Die Vertikalschnitte der Aufbauten in Abbildung 2.2 zeigen die unterschiedlichen Ausbaugrade der Außenwände in der Vorfertigung.

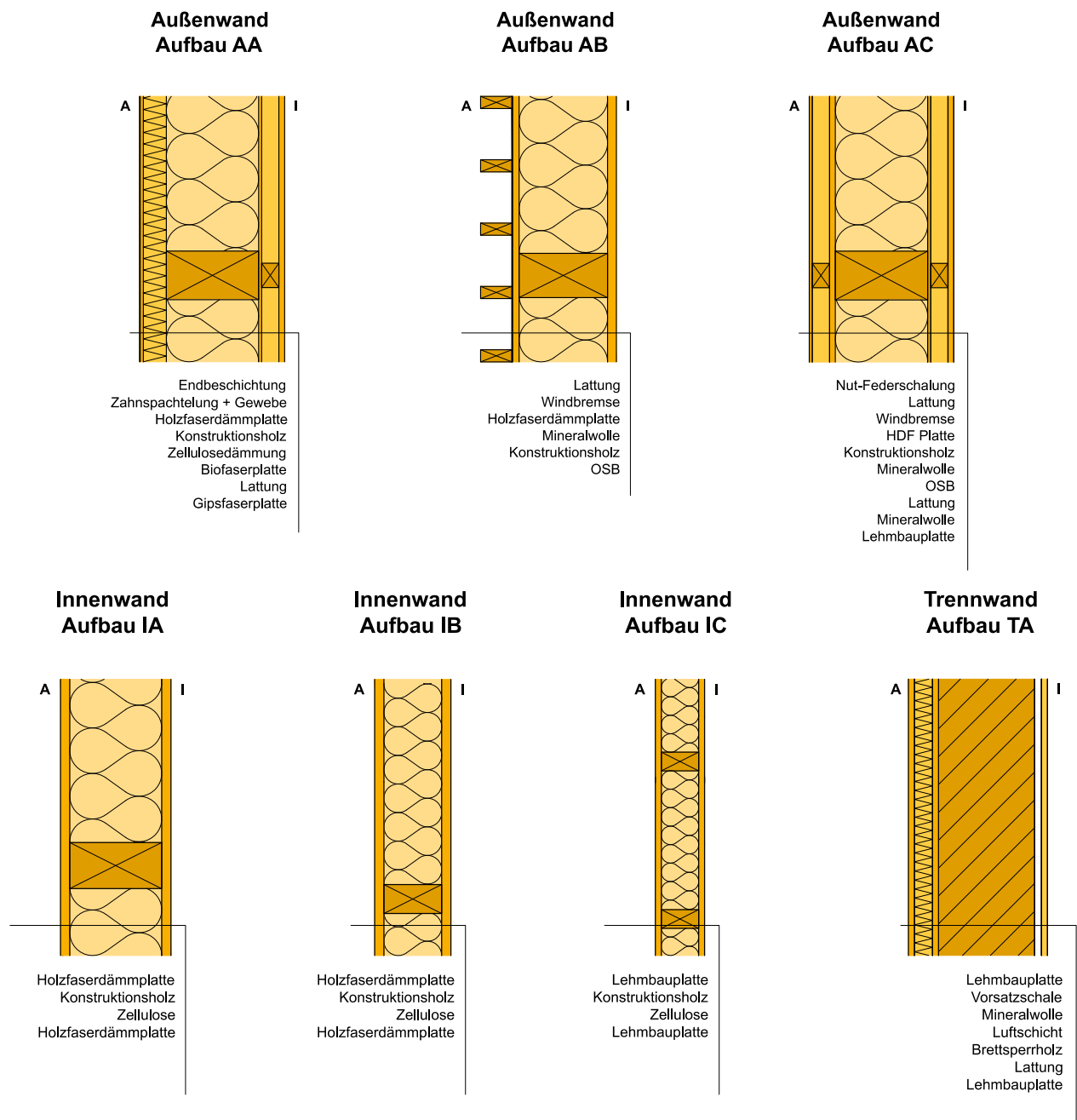


Abbildung 2.2 Untersuchte Bauelemente für Wohnbauten für die Ökobilanzierung

2.2.1 Stoffbilanzen

Die Stoffbilanz ist eine Erhebung aller Bauteilschichten. Dafür wurden die Materialien auf Grundlage von Plänen und Listen innerhalb der Systemgrenzen in Abbildung 2.3 detailliert erfasst. Für die anschließende Vergleichbarkeit der Ökobilanzierung der Wandaufbauten wird die funktionelle Einheit m^2 verwendet.

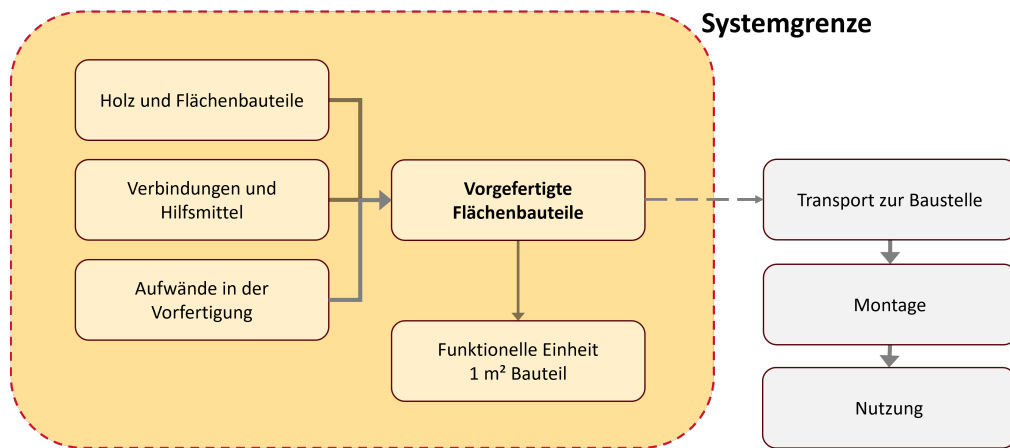


Abbildung 2.3 Systemgrenzen der Datenerhebung der Sachbilanzen in der Vorfertigung

2.2.2 Emissionen aus der Vorfertigung

Um die Emissionen, die durch die Vorfertigung von Holzbauteilen entstehen, präzise zu erfassen, wurden zwei Methoden angewendet:

- Zeitansatz für Einzelverbraucher in der Herstellung
- Überschlagsrechnung

Beim **Zeitansatz** wurden die einzelnen Schritte der Vorfertigung detailliert erhoben, um den Energieaufwand pro Bauelement zu berechnen. Die Methode ist sehr genau, aber auch aufwändig und Anschlussleistungen fehlen. Zudem verfügen die Firmen nicht immer über die Möglichkeit, die Aufwände für Heizen und Energieversorgung der Produktionsmittel im Detail zu erfassen, daher konnte diese Methode nicht bei allen Partnerunternehmen umgesetzt werden. Vergleiche mit dem Zeitansatz zeigten, dass die **Überschlagsrechnung** ausreichend genaue Ergebnisse liefert. Bei dieser Methode werden alle Energieaufwände eines Jahres auf die Jahresproduktionsmengen umgelegt. Daraus wird der durchschnittliche Aufwand für die Herstellung einer funktionellen Einheit ermittelt.

Dabei hat die eigene Energieversorgung einen Einfluss auf die Erfassung der Energieaufwände. Als Indikator wird nur der Betrag der zugekauften Energie für die weitere Wirkungsabschätzung angesetzt. Energie aus eigenen Versorgungssystemen wird für die weitere Wirkungsabschätzung nicht berücksichtigt.

2.3 Wirkungsabschätzung

Die Wirkungsabschätzung bildet den zentralen Schritt in der ökologischen Bewertung. Sie wurde für alle in Abbildung 2.2 (Seite 5) dargestellten Wandaufbauten durchgeführt. Aufbauend auf die erfassten Sachbilanzen erfolgt die Berechnung des Global Warming Potentials (GWP-total).

Dabei ist die ganzheitliche Betrachtung des Lebenszyklus (inkl. Entsorgungsphase) entscheidend, um Verzerrungen durch Teilergebnisse zu vermeiden. Um das GWP-total für die Herstellungsphase (A1-A3) und Entsorgungsphase (C1-C4) zu bestimmen, wurde auf etablierte Datenbanken und Datenblätter zurückgegriffen, um die Emissionen der jeweiligen Phase im Lebenszyklus zu berechnen.

Für die Wirkungsabschätzung wurden folgende Datenbanken und Datenblätter verwendet:

- Stoffbilanz:
 - Umweltproduktdeklarationen (EPDs)
 - ÖKOBAUDAT – Informationsportal Nachhaltiges Bauen [12]
 - Baubook [13]
- Emissionen aus der Vorfertigung:
 - österreichischen Energiemix [15]

Die Vorgangsweise der Wirkungsabschätzung wird am Wandaufbau AC detailliert in Abbildung 2.4 gezeigt. Dabei wird wie folgt vorgegangen:

1. Erhebung der Sachbilanzen

Die Sachbilanzen sind gemäß Kapitel 2.2 zu erfassen.

2. Umrechnung auf die bezogene Einheit

Für die Vergleichbarkeit beziehen sich die ermittelten Sachbilanzen auf die funktionelle Einheit.

3. GWP-total aus Datenbanken erfassen

Für jeden Baustoff und Energiebedarf wird das GWP-total aus Datenbanken und Datenblättern für die jeweilige Lebenszyklusphase entnommen.

4. Erstellung der Wirkungsabschätzung

Durch die Multiplikation der bezogenen Einheit mit dem GWP-total, lassen sich die Emissionen bestimmen, die in der Herstellungsphase (A1-A3) und der Entsorgungsphase (C1-C4) anfallen.

Außenwand - AC													
	Länge	53,7 m											
	Höhe	3,2 m											
	Gesamt m²	171,84 m²											
1		2			3						4		
											Herstellungsphase	Entsorgungsphase	
						A1-A3	C1	C2	C3	C4	A1-A3	C1-C4	
Baustoff	Dicke [m]	Fläche m²	Volumen m³	Bez. Einheit [m²/m²]	Deklarierte Einheit	GWP-total [kg CO2-Äqu.]	GWP-total [kg CO2-Äqu.]	GWP-total [kg CO2-Äqu.]	GWP-total [kg CO2-Äqu.]	GWP-total [kg CO2-Äqu.]	GWP - Total kg CO2-Äq./m²	GWP - Total kg CO2-Äq./m²	
Nut-Feder Schalung	0,024	171,84	4,12416	0,024	1 m³	-685	0,0000212	1,95	717	0	-16,44	17,25	
Fichte Lattung 30/50 e=0,625m	0,03	171,84	0,384	0,002	1 m³	-685	0,0000212	1,95	717	0	-1,53	1,61	
Windpapier sd<0,3	-	171,84		1,000	1 m²	5,08	0,02	0,01	5,03	0,00	5,08	5,06	
HDF Platte	0,015	171,84	2,5776	0,015	1 m³	-584	0	1,93	998	0	-8,76	15,00	
Konstruktionsholz 80/160 e=0,625m	0,16	171,84	2,15936	0,013	1 m³	-685	0,0000212	1,95	717	0	-8,61	9,03	
Mineralwolle Gefächdämmung	0,16	171,84	27,4944	0,160	1 m³	80,70	k.A.	0,127	k.A.	0,122	12,91	0,04	
OSB	0,015	171,84	2,5776	0,015	1 m³	-753	k.A.	k.A.	967	k.A.	-11,30	14,51	
Fichte Lattung 30/40 e=0,625	0,04	171,84	6,8736	0,040	1 m³	-685	0,0000212	1,95	717	0	-27,40	28,76	
Mineralwolle Installationsebene	0,04	171,84	6,8736	0,040	1 m³	80,7	k.A.	0,127	k.A.	0,122	3,23	0,01	
Lehmbauplatte	0,02	171,84	3,4368	1,000	1 m²	0,053	k.A.	0,039	0,044	k.A.	0,05	0,08	
Strombedarf am Werk				27,136	1 kWh	0,23	-	-	-	-	6,24	-	
Heizbedarf am Werk				9,200	1 kg	0,09	-	-	-	-	0,83	-	
											Σ	-45,69	91,35

Abbildung 2.4 Detailberechnung der Wirkungsabschätzung für 1m² Außenwand für den Wandaufbau AC

Die Ergebnisse aller Wandaufbauten sind in Abbildung 2.5 und Abbildung 2.6 zusammengefasst. Dabei werden die Emissionen aus der Vorfertigung durch Strom- und Heizbedarf separat angeführt. Für die Ergebnisdarstellung werden zunächst alle Gutschriften aus Holz und Holzwerkstoffen summiert. Davon abgezogen werden die Emissionen, die durch die Vorfertigung im Werk entstehen, sowie weitere Abzüge entstehen durch metallische Verbindungen (z. B. Schrauben, Vorsatzschalen) oder sonstige Produkte. Das abschließende Ergebnis ist das GWP-total nach der Herstellungsphase. Durch die weitere Berücksichtigung der Entsorgungsphase bleibt als Ergebnis das gesamte GWP-total am Ende des Lebenszyklus über.

Werden die Emissionen, die durch die Vorfertigung entstehen, in Abbildung 2.7, im Detail betrachtet, ist zu erkennen, dass sich die Emissionen zwischen den Partnerunternehmen unterscheiden. Dies ist vor allem auf die weitere Systemgrenze in Kapitel 2.2.2 rückzuführen, da nur die zugekaufte Energie für die Wirkungsabschätzung angesetzt wurde.

Insgesamt zeigen die Berechnungen der Gesamtbilanzierung der Wände eine gute Übereinstimmung mit vergleichbaren Untersuchungen von Achenbach [10]. Das Global Warming Potential (GWP-total) aus der Vorfertigung bewegt sich von 2 bis 7 kgCO₂-Äqu./m². Der Mittelwert für die drei untersuchten Betriebe ergibt 3,4 kgCO₂-Äqu./m². Die Erhebungen von Achenbach ergaben ein GWP für die Phase A3 von rund 9 kgCO₂-Äqu./m² für vergleichbare Wände in Tafelbauweise [9, S.62].

Bezieht man die Emissionen aus der Vorfertigung auf die Gesamtbilanz der untersuchten Rohbauteile, so erreichen diese etwa 2-3 %. Die relative Betrachtung ist nur eingeschränkt aussagekräftig, da die Gesamtbilanz als Bezugsgröße je nach Bauteilaufbau schwanken kann.

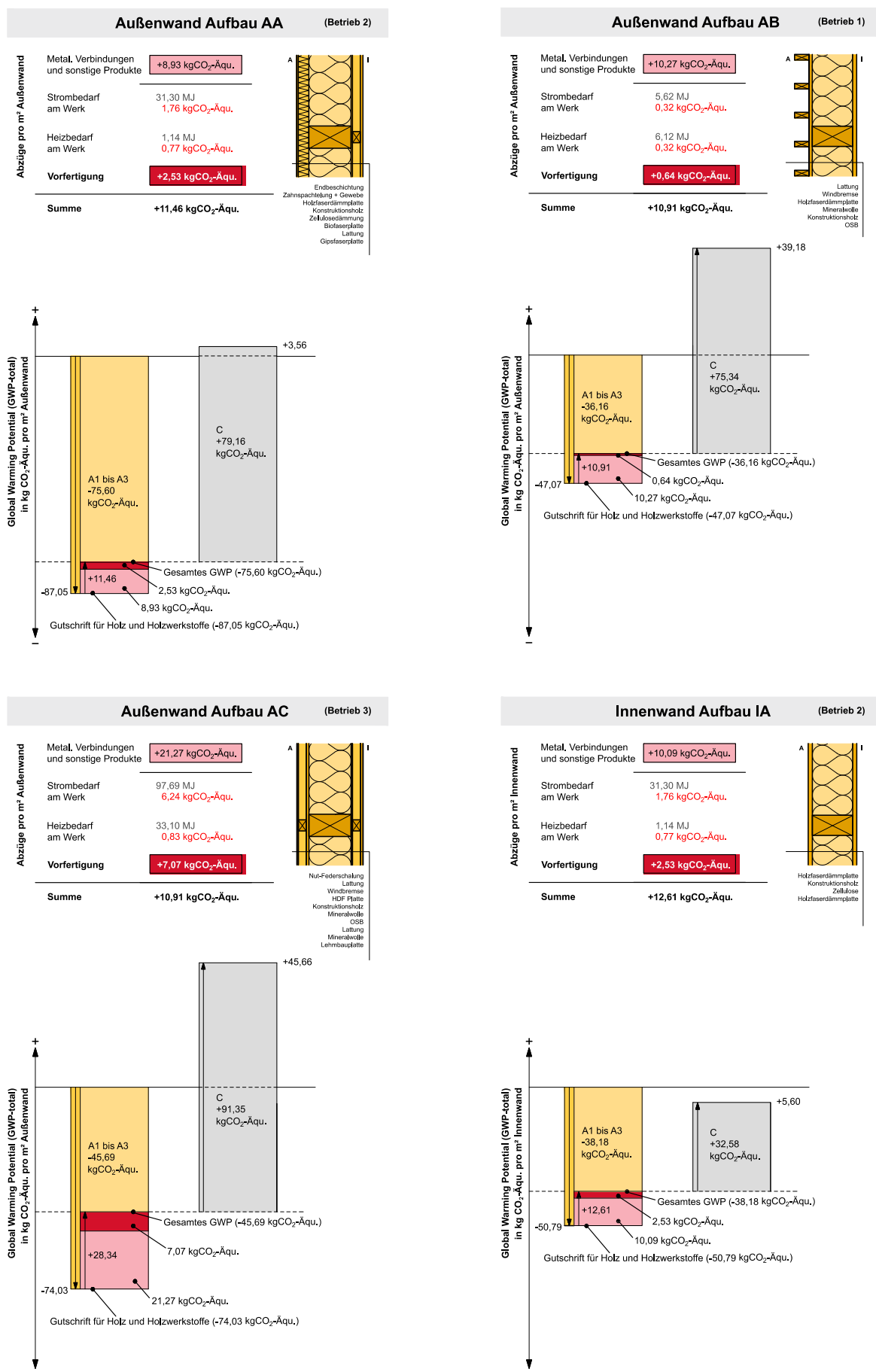


Abbildung 2.5 Ergebnisse der Wirkungsabschätzung für die Wandaufbauten AA, AB, AC und IA

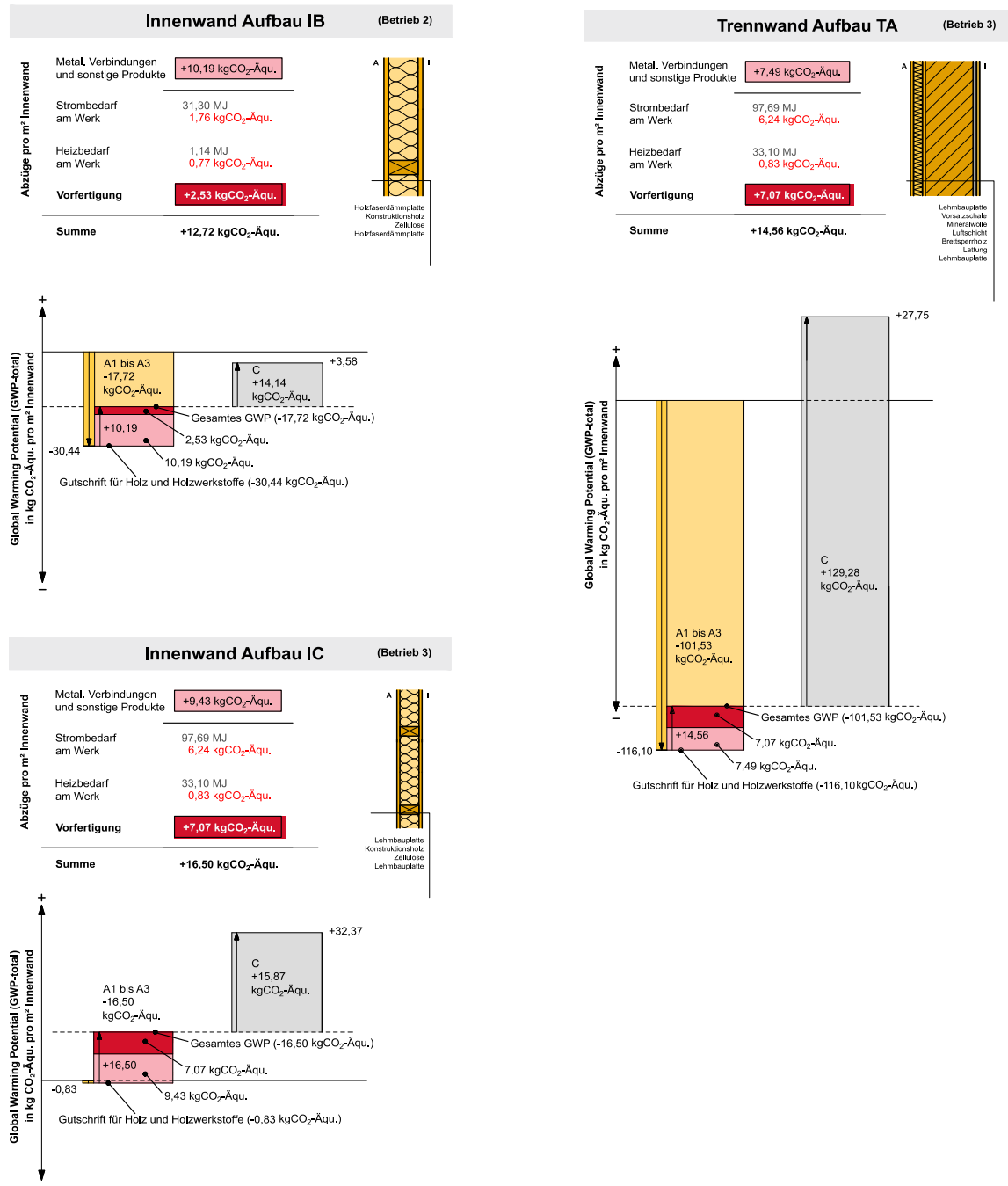


Abbildung 2.6 Ergebnisse der Wirkungsabschätzung für die Wandaufbauten IB, IC und TA

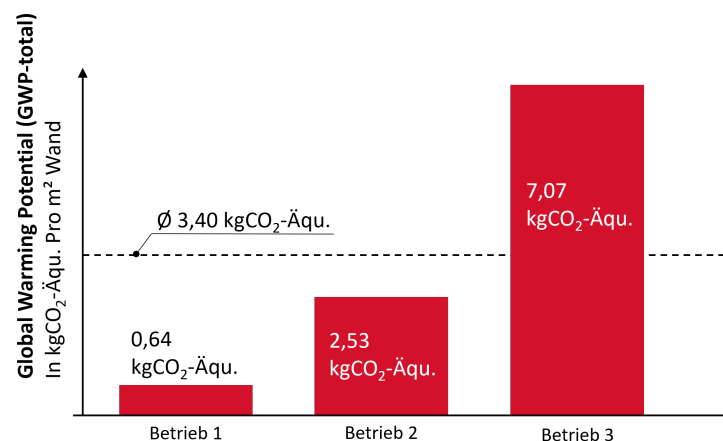


Abbildung 2.7 Ergebnis GWP-total Anteil der Vorfertigung sortiert nach Betrieben

2.4 Weiterführende Erkenntnisse aus der Ökobilanzierung

Die Treibhausgasemissionen durch die Vorfertigung im Holzbau sind gering und ihnen stehen Einsparungen durch die systemischen Vorteile der Vorfertigung gegenüber. Vergleichende Lebenszyklus-Analysen zeigen, dass die Vorfertigung gegenüber konventioneller Ortbauweise eine Reduktion der Treibhausgasemissionen in der Materialisierungsphase in der Größenordnung von rund 15 % ermöglichen kann [16].

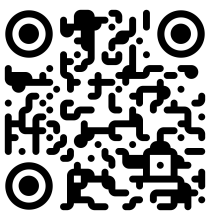
Die wesentlichen Vorteile der Vorfertigung lassen sich wie folgt zusammenfassen [vgl. 17]:

- Präzisere Materialplanung und reduzierte Materialverluste (Verweis zu Planungsmethoden für den Holzbau)
- Gleichbleibende Bauteilqualität durch kontrollierte Produktionsbedingungen, Verringerung von Ausführungsfehlern (Verweis zu Qualitätsmanagement im Holzbau)
- Bessere Voraussetzungen für Automatisierung und Digitalisierung
- Verbesserte Verarbeitung nachwachsender Rohstoffe in der Werkshalle
- Kürzere Bauzeiten durch schnelle Montage und frühzeitige Herstellung der Gebäudedichtigkeit
- Entlastung der Baustelle hinsichtlich Lärm-, Staub- und Maschinenemissionen
- Reduktion der Transportfahrten durch effiziente Werkslogistik
- Günstigere Voraussetzungen für Demontierbarkeit und Wiederverwendung

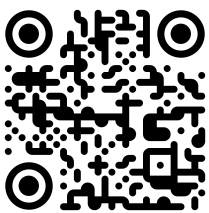
Der Trend zu höheren Vorfertigungsgraden zeichnet sich baustoffübergreifend ab. Im österreichischen Mehrfamilienhausneubau stieg der Anteil der Ortbetonbauweise mit teilweise Fertigbetonelementen zwischen 2022 und 2024 von 43 % auf 52 % der fertiggestellten Wohneinheiten. Die reine Ortbetonbauweise ging im selben Zeitraum von 6 % auf unter 1 %, die Ziegelbauweise von 40 % auf 34 % zurück [18, Abb. 27].

Diese parallele Entwicklung in Holz- und Betonbau zeigt, dass die Vorfertigung als baustoffübergreifender Hebel für Ressourceneffizienz, Prozessqualität und Bauproduktivität zu verstehen ist.

Weiterführende Information zu den anderen Arbeitspaketen:



Benjamin Kromoser, Marc Pantscharowitsch: Sys.Wood: Leitfaden
Planungsmethoden für den Holzbau. <https://doi.org/10.60588/06k6-0x54>



Nadine Ladstätter, Phillip Süss, Gottfried Mauerhofer: Sys.Wood: Leitfaden
Qualitätsmanagement im Holzbau. <https://doi.org/10.60588/tzwz-1455>

3 Bewertung der Zirkularität

Die ökologische Bewertung von Gebäuden mittels Life-Cycle Assessment (LCA) stellt ein wesentliches Instrument dar, um neben der sogenannten roten Energie – etwa erfasst durch einen Energieausweis – auch die graue Energie über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes zu berücksichtigen. Im Rahmen der „cradle-to-end-of-life“-Betrachtung umfasst die LCA-Bilanzierung die Phasen A bis C. Ergänzend ermöglicht das Modul D die Einbeziehung von Strategien der Kreislaufwirtschaft, beispielsweise Recycling oder Reuse, außerhalb der normativen Bilanzierungsgrenzen.

Eine fundierte Analyse der Kreislaufpotenziale setzt eine vertiefte Auseinandersetzung mit der Art der Fügung sowie mit den Möglichkeiten der Wieder- und Weiterverwendung einzelner Baustoffschichten voraus. Die Bewertung der Kreislauffähigkeit von Baukonstruktionen erfordert daher eine differenzierte Betrachtung auf unterschiedlichen Ebenen. Zur Veranschaulichung wird in Abbildung 3.1 exemplarisch eine Außenwand dargestellt. In der vorliegenden Arbeit werden dabei folgende Varianten unterschieden:

- Materialebene (M),
- Komponentenebene (K),
- Bauelementebene (BE),
- Bauteilebene (BT) und
- Gebäudeebene (G).

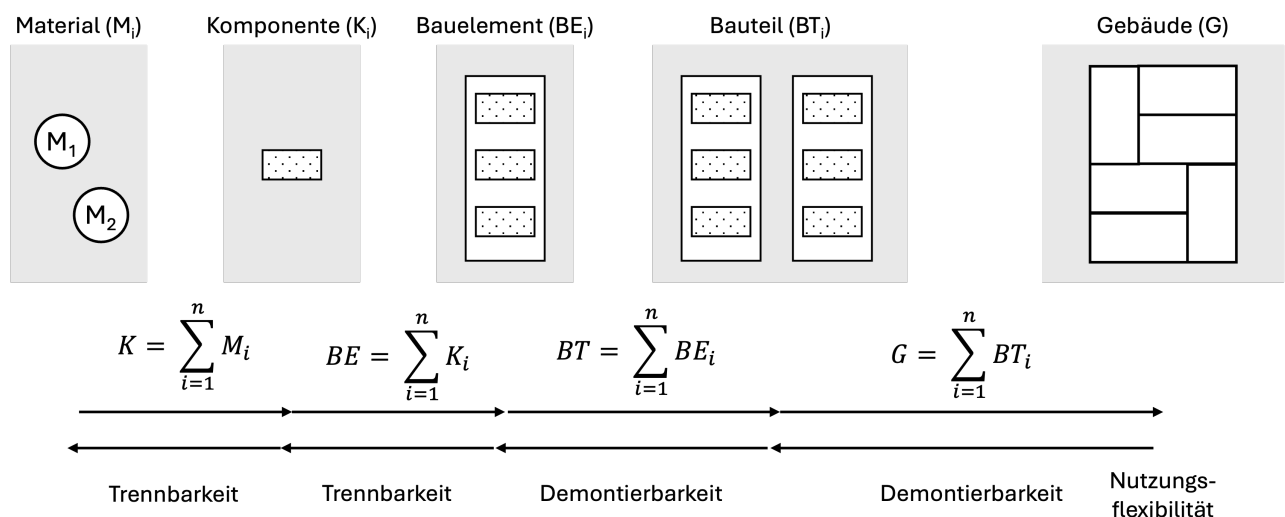


Abbildung 3.1 Darstellung der unterschiedlichen Betrachtungsebenen der Kreislauffähigkeit nach [19]

Jede Betrachtungsebene ist mit spezifischen Anforderungen hinsichtlich Trennbarkeit, Demontierbarkeit und Nutzungsflexibilität verbunden. Auf der Materialebene liegt der Schwerpunkt insbesondere auf der stofflichen Trennbarkeit, um eine sortenreine Rückgewinnung sowie eine hochwertige stoffliche Verwertung zu ermöglichen.

Auf der Ebene von Komponenten und Bauelementen spielt vor allem die Art der Verbindungstechnik eine zentrale Rolle, da diese den Schädigungsgrad beim Rückbau wesentlich beeinflusst. Die Bauteilebene fokussiert hingegen die Demontierbarkeit ganzer Konstruktionseinheiten. Auf Gebäudeebene stehen schließlich die strukturelle Anpassungsfähigkeit sowie die funktionale Flexibilität des Gebäudes im Vordergrund.

Über alle Ebenen hinweg lassen sich drei grundlegende Bewertungsdimensionen identifizieren:

- **Trennbarkeit** der eingesetzten Materialien und Schichten,
- **Demontierbarkeit** der Fügungen und Verbindungen,
- **Nutzungsflexibilität** im Sinne funktionaler Anpassbarkeit des Gebäudes.

Diese konstruktiven Eigenschaften beeinflussen unmittelbar die Lebenszyklusmodule der normativen Gebäudeökobilanz, insbesondere Modul B4 (Austausch), Modul C (Rückbau und Abfallbehandlung) sowie Modul D (Potenziale der Wiederverwendung und des Recyclings). Die Bewertung der Kreislauffähigkeit ergänzt die quantitative Lebenszyklusanalyse, indem sie jene Parameter systematisch erfasst, welche die Ausprägung dieser Module maßgeblich bestimmen. Für die Bilanzierung von Modul B4 sind neben der konstruktiven Ausführung der Fügungen insbesondere belastbare Annahmen zur Lebensdauer einzelner Materialien und Komponenten erforderlich. Die Bewertung der Potenziale in Modul D setzt darüber hinaus detaillierte Informationen zur Trennbarkeit der Baustoffe, zum Schädigungsgrad beim Rückbau sowie zu den Möglichkeiten der stofflichen oder funktionalen Weiterverwendung voraus. Da diese Parameter innerhalb der normativen Ökobilanz bislang nicht explizit geregelt sind, wurden in den vergangenen Jahren verschiedene Leitfäden zur Bewertung der Kreislauffähigkeit entwickelt. Diese unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Bewertungslogik, der jeweiligen Betrachtungsebene sowie ihrer Zielsetzung. Ziel des Projekts war es daher, die Vergleichbarkeit dieser Ansätze zu untersuchen. Dabei zeigte sich, dass die kombinierte Betrachtung der unterschiedlichen Leitfäden ein umfassenderes und ganzheitlicheres Bild ermöglicht.

Im ersten Schritt erfolgte eine Recherche potenzieller Bewertungsleitfäden sowie die Gegenüberstellung von drei ausgewählten Systemen: ZiFa 1.0 [20], der Katalog kreislauffähiger Holzbauteile [21] sowie der Leitfaden „Rückbauorientiertes Planen und Bauen im Holzbau“ [22]. Die ausgewählten Systeme richten sich an unterschiedliche Zielgruppen – beispielsweise Planung oder Handwerk – und behandeln verschiedene thematische Schwerpunkte. Diese reichen von der Demontierbarkeit unterschiedlicher Verbindungstypen über den durch die Demontage verursachten Schädigungsgrad einzelner Schichten bis hin zum Zirkularitätspotential durch Wiederverwendung oder Recycling.

Im Rückbaupotential wird die Trennbarkeit der einzelnen Bauteilschichten zueinander erfasst, während das Zirkularitätspotential sich der Wieder- und Weiterverwendung der Materialien befasst. Somit kann die Bauteilzerlegbarkeit im Sinne des sortenreinen Trennens einzelner Materialien und der Anteil an potentieller Sekundärbaustoffen quantifiziert werden, der in einen weiteren Nutzungszyklus übergeführt werden könnte.

Die Analyse legte Unterschiede (z. B. Umfang, Betrachtungsebene) sowie Gemeinsamkeiten der Systeme offen (siehe Abbildung 3.2). Hinter teils unterschiedlichen Begriffen ließen sich deckungsgleiche Inhalte identifizieren. So thematisieren Begriffe wie Rückbaupotenzial, Rückbaubarkeit und Demontierbarkeit in allen Leitfäden im Kern den Schädigungsgrad auf Bauteil- bzw. Komponentenebene. Die zur Bewertung erforderlichen Kriterien konnten eingegrenzt werden auf:

- Art der Fügung
- Grad der Schädigung
- Grad der Verunreinigung
- Anteil an Wieder-/ Weiterverwendung

Auf dieser Grundlage wurden im nächsten Schritt die jeweiligen Bewertungsskalen betrachtet. Diese reichen von dreistufigen (Farbcode) über vierstufige (Punktesystem) bis hin zu siebenstufigen (Arten) Skalen. Zur Vergleichbarkeit wurden die Skalen normiert und als Prozentwerte zwischen 0 % und 100 % interpretiert. Ein Problem bei dieser Vergleichbarkeit stellen die unterschiedlichen Bezugsgrößen dar. Einige Leitfäden legen eine Wichtung über die Masse zu Grunde (z.B. ZiFa) andere beziehen sich auf das Volumen (z.B. IBO/HFA).

		Kreislfgg. Holzbauteile Dolezal 		ZiFa 1.0 Kromoser 		LF Rückbau Koppelhuber 	
		Zirkularitäts- potenzial (Art) (1-7) ³	Rückbau- potenzial (1-4) (0-100 Pkt.)	Rückbaubarkeit (0-100%) ¹	Wiederver- wendbarkeit (Menge) (0-100%) ²	Demontier- barkeit (1-3)	Trennbarkeit (1-3)
Bauteile	Grad der Schädigung						
	Grad der Verunreinigung						
Komponente	Grad der Schädigung						
	Grad der Verunreinigung						
Material	End-of-Life-Kriterien						
	Anteil an Wiederverwendung						

Abbildung 3.2 Matrix der betrachteten Leitfäden zur Bewertung der Zirkularität [20, 21, 22]

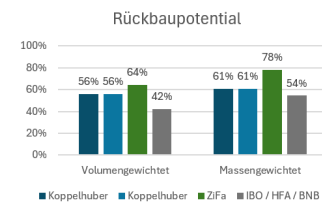
Im Zuge der Analyse wurden drei Außenwandaufbauten bewertet und vergleichend gegenübergestellt (siehe Abbildung 3.3, Abbildung 3.4 und Abbildung 3.5). Die Ergebnisse zeigen, dass eine ökologische Bauweise nicht rein über die materialinhärenten Eigenschaften, im Sinne des ökologischen Impakts definiert werden kann, sondern auch die Fügung der Elemente, für Wartung, Instandsetzung und den Rückbau eine große Rolle spielt. Über die Kombination von ökologischen Materialien und trennbaren Verbindungen, wird es möglich klimafreundliche Bauteile zu demontieren bzw. zu trennen und im Kreislauf zu führen. Dabei gilt es zu unterscheiden, ob ein Bauteil als Ganzes in einen weiteren Nutzungszyklus übergeführt werden soll (zerstörungsfreie Demontage vor Wiederverwendung) oder in seine einzelnen Bestandteile zerlegt wird (Trennung der einzelnen Bauteilschichten)

Je nach Szenario können den „Trennbarkeitsebenen“ unterschiedliche Prioritäten zugeordnet werden, wobei die Möglichkeit einer sortenreinen Trennung, für das End-of-Life-Szenario ungeachtet der Möglichkeit einer Wiederverwendung als Ganzes Bauteil, positiv zu beurteilen ist.

Für die Außenwand 1.3.a HM-HILU wurde sowohl der Standardaufbau (siehe Abbildung 3.4) als auch eine optimierte kreislauffähige Variante beurteilt (siehe Abbildung 3.5). Durch eine Optimierung der Verbindungsmittel auf Baustoffebene konnte eine wesentliche Steigerung im Rückbaupotential erzielt werden. Es werden aber auch Differenzen in der Auslegung der Leitfäden ersichtlich. So schwankt das Rückbaupotential der beiden Varianten nach dem ZiFa-Leitfaden wesentlich geringer als bei den anderen Leitfäden. Dies lässt sich unter anderem auf eine generalisierte Abstufung in der Beurteilungsmatrix der Trennbarkeit zurückführen. Der ZiFa-Leitfaden definiert dabei vier Abstufungen der Demontierbarkeit (vollständig rückbaubar, teilweise rückbaubar, zerstörend rückbaubar und nicht rückbaubar), während der Leitfaden „Rückbauorientiertes Planen und Bauen im Holzbau“ von KOPPELHUBER² und Partner knapp 60 unterschiedliche Baustofffügungen unterscheidet und hinsichtlich ihrer Demontierbarkeit und Trennbarkeit bewertet. Hierdurch kann auch eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse untereinander gewährleistet werden. Die Demontierbarkeit bezieht sich dabei auf die Intaktheit eines Baustoffes nach dem Rückbau, während die Trennbarkeit die Lösbarkeit der genutzten Verbindungsart bewertet. Die Demontierbarkeit ist in den nachstehenden Grafiken als dunkel Türkis gekennzeichnet, die Trennbarkeit als Hellblau. Die Einstufung der Trennbarkeit erfolgt im ZiFa-Leitfaden hingegen durch den Anwender selbst, wodurch dieser über ein gutes spezifisches Fachwissen verfügen muss,

um eine korrekte Einstufung der Konstruktion vornehmen zu können. Durch die subjektive Einstufung des Nutzers muss jedoch von einer gewissen Schwankungsbreite bei der Bewertung einer Konstruktion ausgegangen werden.

1.4.a HM-Putz - AUFBAU I>A inkl. Vorsatzschale				
	Komponente / Material	Verbindungstyp	Grad der Schädigung	Grad der Verunreinigung
M1	0,50 Gipsputz	verputzt	nicht rückbaubar	starke Verunreinigungen
M1	1,25 GKF-Platte, 1-fach	geschraubt, verputzt	zerstörend	starke Verunreinigungen
M2	2,00 UK (Schwingbügel-Profil bzw. freistehend)	geschraubt	teilweise zerstörend	ohne Verunreinigungen
M3	5,00 Installationsebene ausgedämmt MW	gesteckt / geklemmt	zerstörungsfrei	ohne Verunreinigungen
M4	5,00 Holzlattung IW	geschraubt	zerstörungsfrei	ohne Verunreinigungen
M5	10,00 Brettsperrholz	geschraubt	zerstörungsfrei	ohne Verunreinigungen
M11	18,00 Holzfaserdämmplatte	geklebt, vollflächig	nicht rückbaubar	mäßige Verunreinigungen
M12	1,50 Putzsystem inkl. Verklebung	verputzt	nicht rückbaubar	starke Verunreinigungen
	41,25 Gesamt Aufbau			



	Komponente / Material	Verbindungstyp	Aufbau IBO Datenbank	Anteil der Wiederverwendung
M1	0,50 Gipsputz	verputzt	Gipsspachtel auf Gipsbaust	nicht wiederverwendbar
M2	1,25 GKF-Platte, 1-fach	geschraubt, verputzt	GKF-Platte, 1-fach	<50% wiederverwendbar
M3	2,00 UK (Schwingbügel-Profil bzw. freistehend)	geschraubt	n.def.	>50% wiederverwendbar
M4	5,00 Installationsebene ausgedämmt MW	gesteckt / geklemmt	Steinwolle	100% wiederverwendbar
M5	5,00 Holzlattung IW	geschraubt	Schnittholz Fichte	>50% wiederverwendbar
M6	10,00 Brettsperrholz	geschraubt	BSP	100% wiederverwendbar
M7	18,00 Holzfaserdämmplatte	geklebt, vollflächig	Holzfaserdämmung flexibel	nicht wiederverwendbar
M8	1,50 Putzsystem inkl. Verklebung	verputzt	Silikatputz	nicht wiederverwendbar
	11,75 Gesamt Aufbau		0	

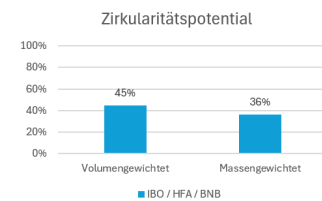
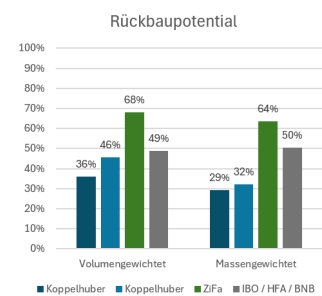


Abbildung 3.3 Bewertung des Aufbaus 1.4.a HM-Putz – Rückbaupotential und Zirkularitätspotential

1.3.a HM-HILU - AUFBAU I>A inkl. Vorsatzschale				
	Komponente / Material	Verbindungstyp	Grad der Schädigung	Grad der Verunreinigung
M1	0,50 Gipsputz	verputzt	nicht rückbaubar	mäßige Verunreinigungen
M1	1,25 GKF-Platte, 1-fach	geschraubt, verputzt	zerstörend	starke Verunreinigungen
M2	2,00 UK (Schwingbügel-Profil bzw. freistehend)	geschraubt	teilweise zerstörend	ohne Verunreinigungen
M3	5,00 Installationsebene ausgedämmt MW	gesteckt / geklemmt	zerstörungsfrei	ohne Verunreinigungen
M4	5,00 Holzlattung IW	geschraubt	zerstörungsfrei	ohne Verunreinigungen
M5	10,00 Brettsperrholz	geschraubt	zerstörungsfrei	ohne Verunreinigungen
M6	20,00 Zellulosefaserplatten	geklebt	zerstörend	ohne Verunreinigungen
M7	20,00 KVH	geschraubt, schräg	zerstörungsfrei	ohne Verunreinigungen
M8	1,50 Gipsfaserplatte	geklammert (GK)	zerstörend	ohne Verunreinigungen
M9	0,50 Fassadenbahn	geklammert + geklebt	nicht rückbaubar	mäßige Verunreinigungen
###	1,00 Hinterlüftungsebene/Konterlattung (z.B. Fichte)	geschraubt	zerstörungsfrei	mäßige Verunreinigungen
###	4,00 Traglattung (z.B. Fichte)	geschraubt	zerstörungsfrei	mäßige Verunreinigungen
###	1,90 Holzfassade, Außenwandverkleidung	genagelt	zerstörungsfrei	mäßige Verunreinigungen
	50,65 Gesamt Aufbau			



	Komponente / Material	Verbindungstyp	Aufbau IBO Datenbank	Anteil der Wiederverwendung
M1	0,50 Gipsputz	verputzt	Gipsspachtel auf Gipsbaust	nicht wiederverwendbar
M2	1,25 GKF-Platte, 1-fach	geschraubt, verputzt	GKF-Platte, 1-fach	<50% wiederverwendbar
M3	2,00 UK (Schwingbügel-Profil bzw. freistehend)	geschraubt	n.def.	>50% wiederverwendbar
M4	5,00 Installationsebene ausgedämmt MW	gesteckt / geklemmt	Steinwolle	100% wiederverwendbar
M5	5,00 Holzlattung IW	geschraubt	Schnittholz Fichte	>50% wiederverwendbar
M6	10,00 Brettsperrholz	geschraubt	BSP	100% wiederverwendbar
M7	20,00 Zellulosefaserplatten	geklebt	Holzfaserdämmung flexibel	nicht wiederverwendbar
M8	20,00 KVH	geschraubt, schräg	KVH	100% wiederverwendbar
M9	1,50 Gipsfaserplatte	geklammert (GK)	GKF-Platte, 1-fach	<50% wiederverwendbar
M10	0,50 Fassadenbahn	geklammert + geklebt	Windbremse	nicht wiederverwendbar
M11	1,00 Hinterlüftungsebene/Konterlattung (z.B. Fichte)	geschraubt	n.def.	<50% wiederverwendbar
M12	4,00 Traglattung (z.B. Fichte)	geschraubt	Schnittholz Fichte	<50% wiederverwendbar
M13	1,90 Holzfassade, Außenwandverkleidung	genagelt	Schnittholz Lärche	<50% wiederverwendbar
	54,75 Gesamt Aufbau		0	

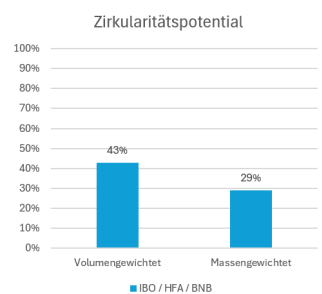
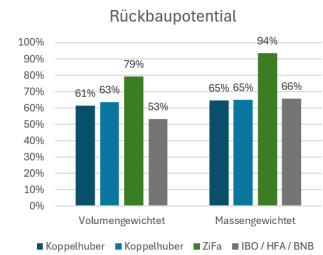


Abbildung 3.4 Bewertung des Aufbaus 1.3.a HM-HILU – Rückbaupotential und Zirkularitätspotential

1.3.a HM-HILÜ optimiert- AUFBAU I>A inkl. Vorsatzschale

Komponente / Material		Verbindungstyp	Grad der Schädigung	Grad der Verunreinigung
M1	0,50 Gipsputz	verputzt	nicht rückbaubar	mäßige Verunreinigungen
M2	1,25 GKF-Platte, 1-fach	geschraubt	teilweise zerstörend	starke Verunreinigungen
M3	10,00 Brettsperrholz	geschraubt	zerstörungsfrei	ohne Verunreinigungen
M4	1,50 OSB	geschraubt	zerstörungsfrei	ohne Verunreinigungen
M5	20,00 Mineralwolle	gesteckt / geklemmt	zerstörungsfrei	ohne Verunreinigungen
M6	20,00 KVH	geschraubt, schräg	zerstörungsfrei	ohne Verunreinigungen
M7	1,50 Gipsfaserplatte	geschraubt	zerstörend	ohne Verunreinigungen
M8	0,50 Fassadenbahn	geklammert + geklebt	nicht rückbaubar	mäßige Verunreinigungen
M9	1,00 Hinterlüftungsebene/Konterlattung (z.B. Fichte)	geschraubt	zerstörungsfrei	mäßige Verunreinigungen
M10	4,00 Traglattung (z.B. Fichte)	geschraubt	zerstörungsfrei	mäßige Verunreinigungen
M11	1,90 Holzfassade, Außenwandverkleidung	geschraubt	zerstörungsfrei	mäßige Verunreinigungen
42,15 Gesamt Aufbau				



Komponente / Material		Verbindungstyp	Aufbau IBO Datenbank	Anteil der Wiederverwendung
M1	0,50 Gipsputz	verputzt	Gipsspachtel auf Gipsbaust	nicht wiederverwendbar
M2	1,25 GKF-Platte, 1-fach	geschraubt	GKF-Platte, 1-fach	>50% wiederverwendbar
M3	10,00 Brettsperrholz	geschraubt	BSP	100% wiederverwendbar
M4	1,50 OSB	geschraubt	OSB-Platte	100% wiederverwendbar
M5	20,00 Mineralwolle	gesteckt / geklemmt	Steinwolle	100% wiederverwendbar
M6	20,00 KVH	geschraubt, schräg	KVH	100% wiederverwendbar
M7	1,50 Gipsfaserplatte	geschraubt	GKF-Platte, 1-fach	100% wiederverwendbar
M8	0,50 Fassadenbahn	geklammert + geklebt	Windbremse	nicht wiederverwendbar
M9	1,00 Hinterlüftungsebene/Konterlattung (z.B. Fichte)	geschraubt	n.def.	>50% wiederverwendbar
M10	4,00 Traglattung (z.B. Fichte)	geschraubt	Schnittholz Fichte	>50% wiederverwendbar
M11	1,90 Holzfassade, Außenwandverkleidung	geschraubt	Schnittholz Lärche	>50% wiederverwendbar
32,15 Gesamt Aufbau			0	

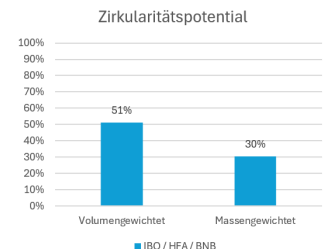


Abbildung 3.5 Bewertung des Aufbaus 1.3.a HM-HILÜ optimiert – Rückbaupotential und Zirkularitätspotential

Wie in **Abbildung 4.5** ersichtlich, wurde der Außenwandaufbau leicht adaptiert, um eine getrennte Wiederverwendung des Dämmpakets und der Tragkonstruktion zu ermöglichen. So könnte im Zuge eines Rückbaus das Brettsperrholz der Außenwand mit einem anderen Aufbau versehen werden, um auf abweichenden Anforderungen an einem anderen Bauplatz reagieren zu können. Das Dämmpaket mit Fassadenaufbau könnte beispielsweise im Zuge einer thermischen Bestandssanierung erneut eingebaut werden. Alternativ ist die Wiederverwendung als ganzes Bauteil dennoch gegeben. Dies führt zu einer größeren Mannigfaltigkeit an Wiederverwendungsszenarien für Bauteile am EoL eines Gebäudes und kann eine nachhaltige Steigerung der Sekundärbauteile und Materialien in der Baubranche fördern.

Desweiteren wurde ein besonderes Augenmerk auf die Rückbaubarkeit der einzelnen Bauteilschichten gelegt. Geklebte und geklammerte Verbindungen wurden durch einfach rückzubauenden Fügungen ersetzt. So wird beispielsweise der Dämmstoff geklemmt, anstatt geklebt. Die Schrauben der GKF-Platten können, über den im Abschnitt „Sanierungswellen“ beschriebenen Best-Practice-Ansatz, zugänglich gemacht werden und zerstörungsfrei rückgebaut werden, wodurch auch eine sortenreine Trennung der Materialien erfolgen kann.

Der IBO-Leitfaden weist neben der Trennbarkeit Bauteilschichten auch ein Zirkularitätspotential aus, welches darauf abzielt die Wiederverwendbarkeit bzw. Recycelbarkeit eines Baustoffs in Abhängigkeit von Verunreinigungen zu bestimmen. Die Einstufung des IBO basiert auf heute neuverbauten Baustoffen, wobei die spezifische Art der Fügung hier nur eine untergeordnete Rolle spielt, da der Hauptfokus in der erneuten stofflichen Verwertung der Bauprodukte liegt. Demensprechend fällt die Steigerung des Zirkularitätspotentials in der optimierten Variante geringer als im Rückbaupotential aus.

Der Wandaufbau mit Wärmedämmverbundsystem schneidet im Vergleich mit der Außenwandkonstruktion 1.3.a HM-HILÜ ähnlich in Bezug auf das Zirkularitätspotential ab, während das Rückbaupotential Volumengewichtet bei IBO und ZiFa für den hinterlüfteten Aufbau etwas höher ausfällt. Gegensätzlich dazu steht die Bewertung des Leitfadens von KOPPELHUBER² und Partner, bei dem die WDVS-Variante sowohl hinsichtlich ihrer Demontierbarkeit als auch Trennbarkeit besser abschneidet. Die spezifischen Tendenzen, widerspiegeln die jeweilige Schwerpunktsetzung der Leitfaden.

Die optimierte Variante zeigt dabei wie viel Potential, mittels einer einfachen Schicht und Verbindungsmitteloptimierung geschaffen werden kann. So konnte die Demontierbarkeit nach dem Leitfaden von KOPPELHUBER² und Partner fast verdoppelt werden und die Trennbarkeit um etwa 27% erhöht werden. Auch das Zirkularitätspotential konnte um ca. 16 % gesteigert werden.

Es hat sich gezeigt, dass eine direkte Gegenüberstellung der unterschiedlichen Leitfäden nicht zielführend ist, sondern vielmehr ein gemeinsames Lesen das gesamtheitlichste Bild zur Bewertung der Kreislauffähigkeit bietet. Folgende Leseart kann empfohlen werden:

- Der Leitfaden von Koppelhuber liefert die umfassendste Einschätzung zum konkreten Thema der Fügung. Eine genaue Auflistung der Verbindungsart inklusive einer 3-skaligen Bewertung liefert wichtige Informationen zur Trennbarkeit. Empirische Daten z.B. zur Lösbarkeit von Schrauben könnten weitere wichtige Informationen liefern.
- Der Leitfaden des IBO/HFA beschäftigt sich tiefgehend mit den Wiederverwendungs- bzw. Weiterverwertungspotenzialen auf Baustoffebene. Nach der Bestimmung der Fügung der Schichten kann mit Hilfe dieses Leitfadens der weitere Prozess bestimmt werden (Reuse, Closed-Loop-Recycling, thermische Verwertung, etc.). Die Daten liegen für einen definierten Bauteilkatalog vor - ein allgemeines System wäre wünschenswert.
- Der ZiFa hat den holistischsten Zugang und unterstützt bei der Beurteilung der einzelnen Kriterien zu einer Gesamtbewertung. Aufgrund des breiten Betrachtungsspektrums und der nutzerseitigen Einstufung der Trennbarkeit, ist mit einer Schwankungsbreite der Ergebnisse zu rechnen.

4 Ökologische Bewertung wiederverwendeter Bauteiler

Im Rahmen des Forschungsprojektes Sys.Wood wurden Inhalte aus verschiedenen Perspektiven analysiert. Ziel ist es ein möglichst holistisches Gesamtbild zu erhalten. Beispielsweise wurden die Leitdetails aus praktischer und technischer Sicht entwickelt. Anschließend wurden vier Außenwandaufbauten aus Sicht der ökologischen Bewertung näher untersucht. Dieser Abschnitt widmet sich der LCA-Bewertung (Life Cycle Assessment) dieser Aufbauten. Die durchgeführte Bewertung übersteigt dabei den üblichen Umfang und setzt sich insbesondere vertiefend mit dem Thema Kreislauffähigkeit auseinander. Der Fokus auf der Fügung wird auch in diesem Kapitel gesetzt und die Auswirkungen auf die LCA-Bilanzierung analysiert.

4.1 Ökologische Bewertung für einen Nutzungszyklus

Zunächst werden die ökologischen Aspekte der Sys.Wood-Aufbauten vertieft analysiert und anschließend systematisch mit funktional äquivalenten Stahlbetonbauteilen verglichen. Dabei werden sowohl Hebel zur Optimierung des ökologischen Impacts als auch Gestaltungsprinzipien zur Verbesserung der Demontier- und Trennbarkeit identifiziert und bewertet.

4.1.1 Herangehensweise

Die ökologische Bewertung der Sys.Wood-Bauteile, umfasst Beurteilung der Aufbauten mittels einer LCA. Kennwerte der Materialien wurden anhand von environmental product declarations (EPD) aus der online-Datenbank „ÖKOBAUDAT“ den jeweiligen Bauteilschichten zugeordnet [23]. Hierfür wurden vorrangig generische Datensätze verwendet. Nutzungsdauern wurden anhand der Kennwerte des BKI (Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern) bestimmt [24]. Die Auswertung erfolgt für GWP_{total} , GWP_{biogen} und GWP_{fossil} . Zur einfachen Veranschaulichung werden nachfolgende Ergebnisse der Module A1-A3, B4 und C3-C4 für $1m^2$ (funktionelle Einheit) des jeweiligen Bauteilaufbaus ausgewertet.

Für die Bilanzierung wurde ein Betrachtungszeitraum von 50 Jahren angesetzt. Bauteilschichten, die über eine geringere Nutzungsdauer verfügen, müssen in diesem Zeitraum ausgewechselt werden und sind im Modul B4 erfasst. Sollten mehrere Schichten untrennbar mit einer defekten Bauteilschicht verbunden sein oder für die Auswechslung der defekten Bauteilschicht zerstört werden müssen, werden diese ebenfalls im Modul B4 erfasst. Die Nutzungsdauer des Bauteils kann daher maßgeblich von der Beständigkeit und Zugänglichkeit des „schwächsten Glieds“ im Verbund beeinflusst werden.

Im Vordergrund der Analyse stand der Vergleich des ökologischen Impacts zwischen den Bauteilen selbst, weshalb von jedem Bauteil der GWP_{total} für $1m^2$ des Aufbaus ausgewertet und gegenübergestellt wurde. Da der Fokus auf den Bauteilen selbst und nicht auf der Betrachtung eines prototypischen Gebäudes lag, wurde von einer Betrachtung unterschiedlicher idealtypischen Gebäude in dieser Bewertung abgesehen.

Um berechnete Daten einordnen zu können, wurden äquivalente Bauteile (Tragfähigkeit, U-Wert) in Stahlbeton-Bauweise aus der Bauteildatenbank Baubook herangezogen [25]. Dabei ist zu beachten, dass LCA-Bilanzierungen für gesamte Gebäude durchgeführt werden. Damit fließen auch bauweisenspezifische Einflüsse wie etwa die Spannweiten oder Brandschutzanforderungen indirekt in die Bewertung ein. Im Rahmen des Forschungsprojektes erfolgt die Auswertung vereinfacht bauteilbezogen, weshalb diese Informationen nicht mitberücksichtigt wurden.

4.1.2 Bilanzierung der Außenwände

Beim Vergleich der Holzbauwände zu ihren U-Wert äquivalenten Stahlbetonbauteilen fällt auf, dass der kumulative Impact (Module A1-A3, B4, C3-C4) der Stahlbetonvarianten höher ausfällt als jener der Holzbauteile. Im Durchschnitt verfügen die Holzbauwände über ca. 65 % des GWP_{total} einer Stahlbetonaußenwand. Betrachtet man dies auf Ebene der einzelnen Module, lässt sich festhalten, dass in der Herstellungsphase (A1-A3) die Betonbauteile einen wesentlich höheren GWP_{total} als die Holzbauteile aufweisen. Auch wenn das im Holz gebundene CO_2 -Äquivalent im Modul C3 wieder frei wird, fällt der GWP_{total} der Holzbauteile in Summe geringer aus. Durch reine Betrachtung der Herstellungsphase (A1-A3) gehen Informationen über die Produktlebensdauer und Emissionen der Entsorgung verloren. Erst eine Betrachtung von Herstellung bis End-of-Life lässt seriöse Vergleiche zwischen organischen und mineralischen Bauweisen zu.

In die Bilanzierung der Holzbauwände wurden auch die Erkenntnisse aus der Erfassung der Umwelteinflüsse der Vorfertigung eingebunden. Die Anzahl und Art der Verbindungsmittel, wird dabei vom spezifischen Aufbau determiniert. Eine detaillierte Beschreibung der Erhebungen und Ergebnisse ist in Abschnitt 2 nachzulesen. Für die weiterführende Auswertung wurden Durchschnittswerte auf Basis der untersuchten Aufbauten ermittelt. Für die Vorfertigung wurden im Schnitt 2,53 kg CO₂-Äqv. und für die Verbindungsmittel 10,27 kg CO₂-Äqv. für jedes Holzbauwand berechnet, um eine Vergleichbarkeit mit dem Referenzaufbau in Stahlbetonbauweise gewährleisten zu können.

Im Zuge des Forschungsprojektes Sys.Wood wurden die Aufbauten seitens des Arbeitspakets „Resiliente Hochbaukonstruktionen im Holzbau“ mehrmals für den Detailkatalog überarbeitet. Hierbei wurde die Tragkonstruktion, Aufbau sowie die Schichtstärke adaptiert. Dies führte dazu, dass die Holzrahmenbauwände aufgrund stark abweichender U-Werte und unterschiedlicher Tragfähigkeit nicht mehr miteinander vergleichbar waren. Eine ökologische Gegenüberstellung der Holzbauteile zueinander ist durch die große Variabilität der Bauteilaufbauten und konstruktiver Eigenschaften daher nur sehr eingeschränkt möglich.

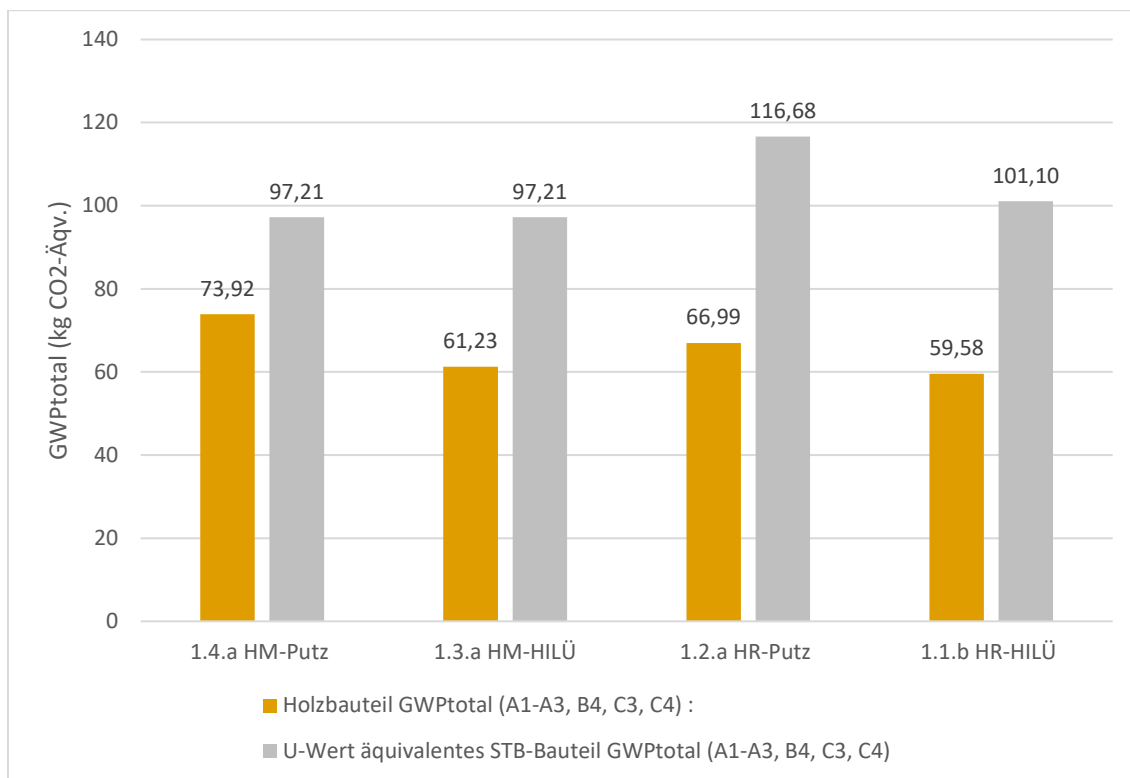
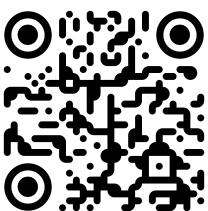


Abbildung 4.1 Gegenüberstellung des GWP_{total} für Außenwände in Holzbauweise und Stahlbetonbauweise



Ernst Alexander Dengg, Johannes Würzler: Sys.Wood: Leitfaden Resiliente Hochbaukonstruktionen im Holzbau. <https://doi.org/10.60588/mbeb-z771>

4.1.3 Schlussfolgerungen für die Optimierung der Außenwände

Nach einer Bilanzierung im ersten Schritt, ist die Optimierung Inhalt des zweiten Schrittes. Eine wesentliche Stellschraube für die ökologische Optimierung der Holzbauteile, stellen die Dämmebenen aus Mineralwolle dar. Bei der AW 1.1.b HM-HILÜ ist diese für etwa 25 % des Gesamtimpacts (A1-A3, B4, C3, C4) verantwortlich. Sie ist aufgrund ihrer anorganischen Materialeigenschaft jedoch dauerhafter als Holzfaser oder Zellulose, welche nach den Kennwerten des BKI, innerhalb eines Gebäudezyklus erneuert werden müssten. Dies betrifft beispielsweise die Zellulose-Einblasdämmung der AW 1.3.a HM-HILÜ. Ein Austausch dieser ist ohne das Entfernen von

vorgeschalteten Bauteilschichten jedoch nicht möglich, weshalb diese frühzeitig entfernt werden müssen. Da diese nicht zerstörungsfrei rückgebaut werden, können die ökologischen Vorteile der Zellulose Einblasdämmung nicht vollständig genutzt werden. Bei den STB-Referenzen (STB-20) stellen EPS mit ~40 % und der Stahlbeton ~48 % den größten Impact dar. Soweit man die Tragschicht nicht abändert, wäre hier eine Adaption des WDV-Systems durch den Austausch des EPS durch ein nachhaltiges Dämmmaterial am sinnvollsten. Da das WDV-System nach den Kennwerten des BKI über eine erwartete Nutzungsdauer von 37 Jahren verfügt, muss dieses innerhalb eines Nutzungszyklus erneuert werden und wird im Modul B4 erfasst.

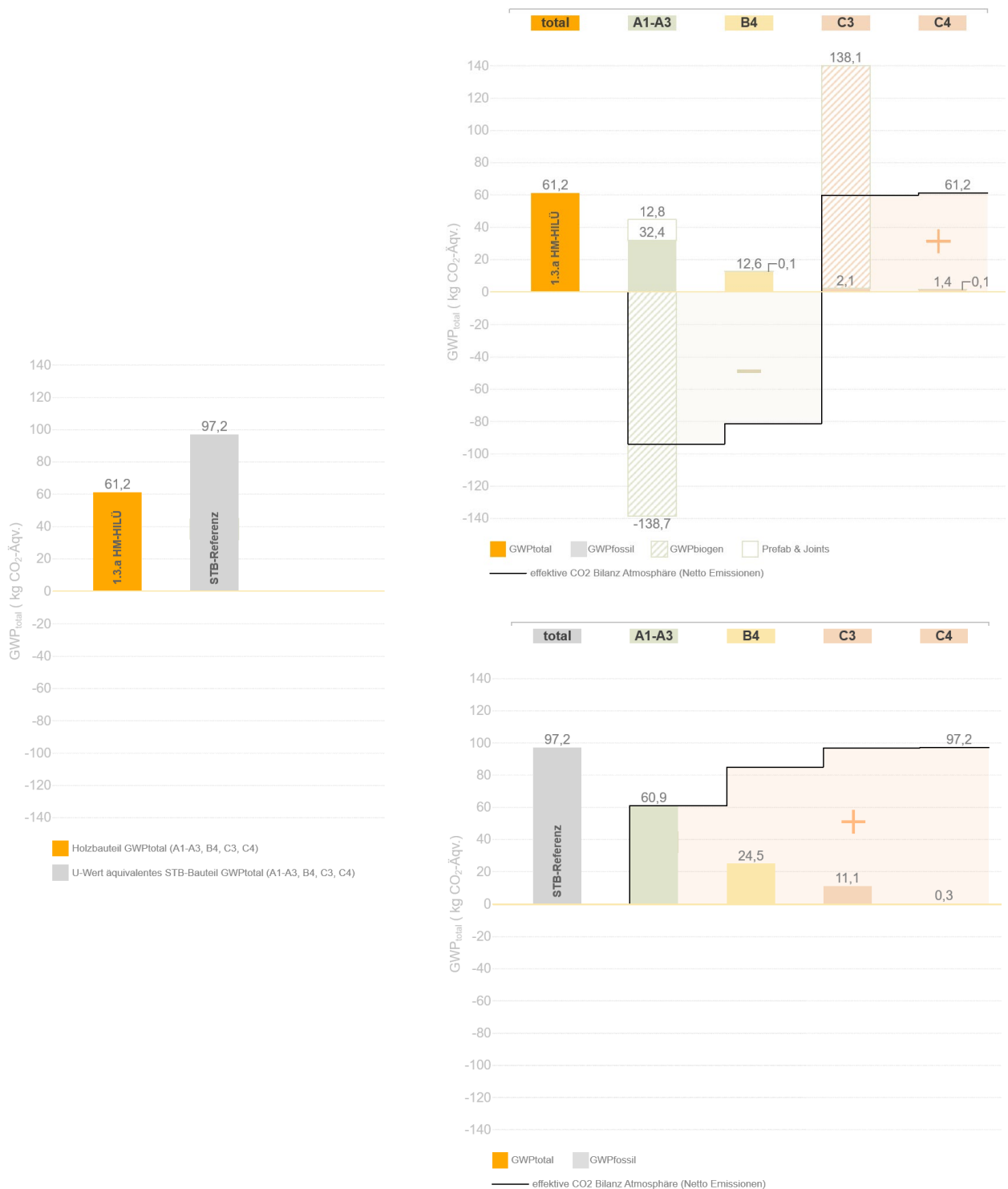


Abbildung 4.2 Gegenüberstellung des GWP_{total} für die Referenzwand 1.3.a HM-HILÜ in Holzbauweise und der äquivalenten Außenwand Stahlbetonbauweise (links), genauere Betrachtung des GWP_{fossil} und GWP_{biogen} über die einzelnen Phasen inkl. der effektiven CO₂-Bilanz über die Zeit (rechts)

4.1.4 Bilanzierung der Geschoßdecken

Für die ökologische Bewertung der Geschoßdecken aus dem Dokument „Sys.Wood: Bauteilaufbauten, Hintergrunddokumentation“ wurde ebenfalls eine LCA durchgeführt. Im Gegensatz zu den Analysen der Wände, wurde für die Geschoßdecken kein Vergleich zu äquivalenten STB-Varianten gezogen, da die Rahmenbedingungen der Anwendung (Spannweiten, Bauweise etc.) ohne Referenzgebäude zu breit streuen und damit nicht seriös vergleichbar sind.

Allgemein lässt sich festhalten, dass die Verwendung eines Zementestrichs im Fußbodenaufbau eine wesentliche ökologische Stellschraube darstellt. Prozentual gesehen stellt dieser bei den Brettsperrholzaufbauten für die Module (A1-A3, C3-C4) etwa 55% und für die Module (A1-A3, B4, C3-C4) 66% des GWP_{total} dar. Der hohe Anteil (mit etwa 68 kgCO₂-Äqv.) resultiert einerseits aus dem hohen Zementeinsatz und der erforderlichen Erneuerung innerhalb eines Nutzungszyklus. Ein direkter Austausch des Nassestrich durch einen Trockenestrich ist ohne eine weitere Adaption des Bauteilaufbaus kaum möglich, da die notwendigen Schalldämmwerte nicht mehr eingehalten werden würden. Eine zusätzliche abgehängte Decke würde materialspezifische Emissionen verursachen und müsste gegenüber den potenziellen Einsparungen abgewogen werden. Auch die Vereinbarkeit des höheren Bauteilaufbaus müsste im Anwendungsfall mit den Anforderungen geprüft werden.

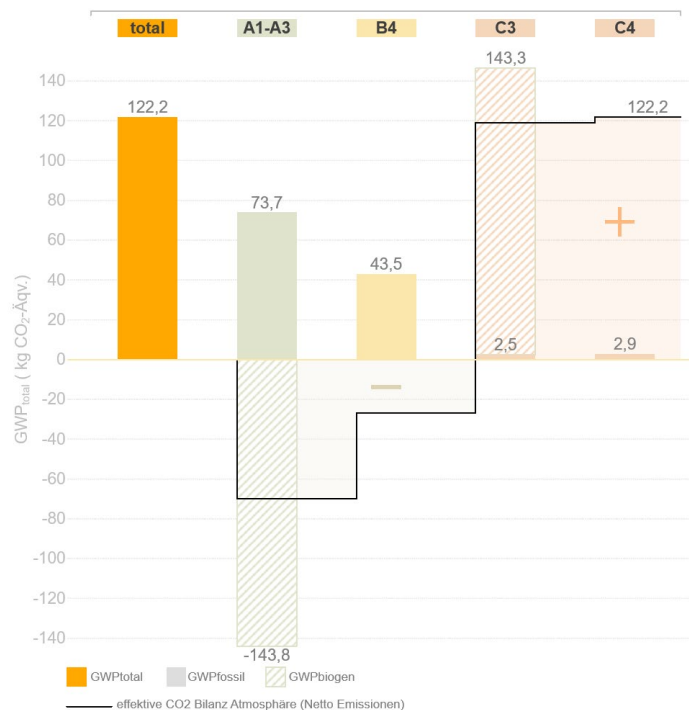


Abbildung 4.3 ökologische Bewertung der Geschossdecke beplankt

Vergleicht man die Geschoßdecken (RDUK auf Sicht und mit abgehängter Decke) miteinander ist ersichtlich, dass die Differenzen, aufgrund der starken konstruktiven Ähnlichkeiten, wesentlich geringer ausfallen als bei den Außenwänden. Die beplankte Variante hat einen um 6,5% höheren GWP_{total} als die RDUK auf Sicht. Dies entspricht einer Differenz von 7,4 kgCO₂-Äqv. pro m² und lässt sich fast ausschließlich auf die Emissionen der zusätzlichen angehängten Decke zurückführen.

4.1.5 Bilanzierung der Nutzungsdauer (Modul B4 – Auswechseln / Wartung & Auswirkung auf LCA)

Das Modul B4 weist Emissionen aus, die im Zuge der Auswechslung von Bauteilschichten innerhalb eines Nutzungszyklus entstehen. Sollte eine schadhafte, auszuwechselnde Bauteilschicht untrennbar mit anderen verbunden oder durch diese unzugänglich sein, müssen diese gegebenenfalls auch erneuert werden.

Als Betrachtungszeitraum der ökologischen Bewertung wurde ein Zeitrahmen von 50 Jahren angesetzt [6]. Alle Bauteilschichten, die über eine geringere Nutzungsdauer verfügen, müssen innerhalb des Nutzungszyklus erneuert werden, und sind im Modul B4 erfasst.

Die Berücksichtigung der unterschiedlichen Nutzungsdauern der Baustoffe in der Planung, kann die Wartbarkeit und Instandsetzung von Konstruktionen wesentlich beeinflussen. Ersichtlich wird dies am Beispiel des Dachaufbaus:

Das Gründachsystem verfügt über eine durchschnittliche Nutzungsdauer von 30 Jahren, die EPDM-Abdichtung über 31 Jahre, Dämmschicht aus EPS (38 Jahre) und die Dampfsperre über (47 Jahre). Sollte das Paket aus Abdichtung, Dämmung und Dampfsperre miteinander verklebt sein, erschwert dies nicht nur den sortenreinen Rückbau, sondern auch die Erneuerung einzelner Schichten innerhalb des Nutzungszyklus (Repair). Somit müsste trotz einem „Nutzungsdauerndelta“ von 16 Jahren der gesamte Aufbau auf einmal erneuert werden.

Desweiteren stellt die Holzfaserdämmplatte im Wärmedämmverbundsystem einen potenziellen Schwachpunkt dar. Während herkömmliche WDVS-Systeme (bestehend aus Anstrich, Standardputz und Polystyrolämmplatten) durchschnittlich über 40 Jahre bestehen, verfügt die Holzfaserdämmplatte im WDVS-System über eine Nutzungsdauer von nur 29 Jahren. Dies stellt eine Reduktion um knappe 38% dar. Hier lässt sich jedoch festhalten, dass selbst der Lebenszyklus von zwei WDVS-Systemen mit Holzfaserdämmplatten über einen geringeres GWP_{total} als die eines Lebenszyklus mit EPS verfügen. Für die Praxis wird sich hierbei die Frage stellen, wie ökonomische und ökologische Prioritäten gegeneinander abgewogen werden können.

„Sanierungswellen“

Aus den Nutzungsdauern der Bauteilschichten lassen sich durch ähnliche Nutzungsdauern „Pakete“ für einen Austausch / Sanierung definieren.

Der Aufbau einer hinterlüfteten Holzfassade, bestehend aus Schalung, Lattung und Fassadenbahn kommt dabei auf eine durchschnittlich zu erwartende Nutzungsdauer von 32 Jahren. Maßgebend ist hier die Schalung (32 Jahre) selbst, wobei eine zeitgleiche Erneuerung der Fassadenbahn (mit 33 Jahren Nutzungsdauer) naheliegend erscheint.

Für den Dachaufbau sind das Gründachsystem (30 Jahre) und die EPDM-Abdichtung (31 Jahre) ausschlaggebend. Die Dämmschicht aus EPS (38 Jahre) sowie die Dampfsperre (47 Jahre) würden über eine längere Nutzungsdauer verfügen, werden jedoch durch die nicht trennbaren geklebten Verbindungen (EPDM auf EPS) ebenfalls erneuert werden müssen.

Im Innenraum gibt es sowohl Verkleidungen von Wand und Decke als auch den Fußbodenaufbau, der nach und nach erneuert werden muss. Gipskartonverkleidungen an den Wänden haben eine zu erwartenden Nutzungsdauer von 42 Jahren und als abgehängte Decke von 44 Jahren. Diese können jedoch nach einem Best-Practice-Ansatz wiederverwendet werden. Dabei können zwei Ansätze unterschieden werden:

- **Ansatz A:** Die Verschraubungen der Gipskartonplatte werden mit einem Klebeband abgedeckt und danach mit Gipsputz verspachtelt. Das Klebeband wird unter die Sockelleiste geführt und ist beim Rückbau zugänglich. Durch das Abziehen des Klebestreifens werden die Schraubenköpfe offengelegt und ermöglichen einen zerstörungsfreien Rückbau.
- **Ansatz B:** Die Gipskartonplatten werden neben den Aluminiumprofilen abgeschnitten. Dadurch kann die Platte mit reduzierten Maßen nochmals eingesetzt werden.

Beim Fußbodenaufbau muss das Parkett mit 44 Jahren als erstes Bauteil erneuert werden. Der Zementestrich mit 53 Jahren sowie die Trittschalldämmung mit 48 verfügen über sehr ähnliche Nutzungsdauern. Generell lässt sich daher festhalten, dass eine allgemeine Sanierung des Innenausbaus nach etwa 40 bis 45 Jahren zu erwarten ist.

Tragende Schichten aus Holz wie die Außenwand (76 Jahre) und die Brettsper Holzdecke (78 Jahre) verfügen ebenfalls über eine sehr ähnliche Lebenserwartung und stellen damit die dritte Sanierungswelle dar. Da die angegebenen Werte dem Median darstellen, wird seitens des Forschungsprojekts davon ausgegangen, dass die Tragkonstruktion des Gebäudes, bei ausreichendem konstruktivem Holzschutz, einen vollständigen zweiten Nutzungszyklus durchlaufen könnte und damit eine effektive Nutzungsdauer von 100 Jahren aufweist. Die tragenden Schichten der STB-Referenzbauteile für Wände (100 Jahre) und für Decken (95 Jahre) verfügen über eine nochmals etwas höhere zu erwartende Nutzungsdauer als die Holzbauteile.

Zusammenfassend lassen sich die Bauteilauswechslungen für den Holzbau in 3. Sanierungswellen gliedern:

1. Sanierungswelle nach etwa 30/35 Jahren: äußere Fassade und Dachaufbau
2. Sanierungswelle nach etwa 40/45 Jahren: Innenausbau (Verkleidung und Fußbodenaufbau)
3. Sanierungswelle nach etwa 100 Jahren: Tragende Holzbauteile (Außenwände und Decken)

Tabelle 4.1: Bauteilspezifische Sanierungswellen anhand der Nutzungsdauer einzelner Bauteilschichten

Kategorie	Bauteil	durchschnittliche Nutzungsdauer je Bauteilschicht (nach BKI)	Auswechslung	Sanierungswelle
Außenwände				
1.3.a HM-HILÜ (03)	Hinterlüftete Fassade (HOLZ)			
	Schalung	32	27	1. Sanierungswelle (nach ~ 30 J.)
	Lattung	NA		
	Fassadenbahn	33		
	Gipsfaserplatte	situationsabhängig		Erneuerung notwendig durch Auswechslung Dämmschicht
	Zellulose	27		1. Sanierungswelle (nach ~ 30 J.)
	Tragende Schicht Holz (KVH + BSP)	76		3. Sanierungswelle (nach ~ 100 J.)
	Mineralwolle Innenausbau	Annahme Re-Use		
	Unterkonstruktion Holz	48	42*	2. Sanierungswelle (nach ~ 40/45 J.) ²
	Gipsplatte	42		
1.1.b HR-HILÜ (01)	Hinterlüftete Fassade (HOLZ)			
	Schalung	32	32	1. Sanierungswelle (nach ~ 30 J.)
	Lattung	NA		
	Fassadenbahn	33		
	Gipsfaserplatte	situationsabhängig	76	3. Sanierungswelle (nach ~ 100 J.)
	Mineralwolle	NA / Annahme Wiederverwendung		
	Tragende Schicht Holz (KVH)	76		
	OSB	NA / Teil Tragkonstruktionselement		
	Mineralwolle Innenausbau	Annahme Re-Use		
	Unterkonstruktion Metall	59	42*	2. Sanierungswelle (nach ~ 40/45 J.)*
	Gipsplatte	42		

² nach dem Best-Practice Ansatz wurden der Innenausbau im Modul B4 aufgrund des zerstörungsfreien Rückbaus nicht erfasst.

Fortsetzung Tabelle 4.2

1.4.a HM-Putz (04)	WDVS-Fassade (HOLZ)			
	Putzsystem inkl. Verklebung	37	29	1. Sanierungswelle (nach ~ 30J.)
	Holzfaserdämmplatte	29		
	Tragende Schicht Holz (BSP)	76	76	3. Sanierungswelle (nach ~ 100 J.)
	Mineralwolle Innenausbau	Annahme Re-Use		
	Unterkonstruktion Holz	48	42	2. Sanierungswelle (nach ~ 40/45 J.) ²
	Gipsplatte	42		

1.2.a HR-Putz (02)	WDVS-Fassade (HOLZ)			
	Putzsystem inkl. Verklebung	37	29	1. Sanierungswelle (nach ~ 100 J.)
	Holzfaserdämmplatte	29		
	OSB	NA / Teil Tragkonstruktionselement	76	
	Tragende Schicht Holzbauträger	76		3. Sanierungswelle (nach ~ 100 J.)
	Mineralwolle	Annahme Re-Use		
	OSB	NA / Teil Tragkonstruktionselement		
	Mineralwolle Innenausbau	Annahme Re-Use		
	Unterkonstruktion Holz	48	42	2. Sanierungswelle (nach ~ 40/45 J.) ²
	Gipsplatte	42		
	STB - Referenz			
	WDVS mit EPS	40	40	
	Tragende Schicht STB	100	100	
	Gipsspachtel	36	36	

Geschossdecken

2.2.a GD-MH	Geschossdecke			
	Parkett	44	44	2. Sanierungswelle (nach ~ 40/45 J.)
	Zementestrich	53		
	PE-Folie	NA		
	Trittschaldämmung	48		
	Trockenschüttung	NA / Annahme Wiederverwendung		
	Brettsperrholz	78	78	3. Sanierungswelle (nach ~ 100 J.)
	Mineralwolle Innen	NA / Annahme Wiederverwendung		
	Unterkon. Metall	63	44	2. Sanierungswelle (nach ~ 40/45 J.) ²
	Gipsplatte	44		

Fortsetzung Tabelle 4.3

Dach				
3.1.a FD-MH	Gründach			
	Gründachsystem	30	30	1. Sanierungswelle (nach ~ 30 J.)
	EPDM	31		
	EPS	38		
	Dampfsperre	47		
	Tragende Schicht BSP	78	78	3. Sanierungswelle (nach ~ 100 J.)
	Mineralwolle Innen	NA / Annahme Wiederverwendung		
	Unterkon. Metall	63	44	2. Sanierungswelle (nach ~ 40/45 J.)
	Gipsplatte	44		

4.2 Ökologische Bewertung über mehrere Nutzungszyklen

In der Regel werden ökologische Bewertungen von Gebäuden für einen Nutzungszeitraum von 50 Jahren erstellt. Bauteile, die wiederverwendet werden können, werden zwar in den separaten Bilanzen des neuen Gebäudes erfasst, stehen jedoch in keinem Bezug zum vorangegangenen Nutzungszyklus. Dieses Vorgehen ermöglicht zwar die Bewertung der Umweltwirkungen einzelner Phasen, eine ganzheitliche Betrachtung über mehrere Nutzungszyklen ist aufgrund potenzieller Doppelzählungen jedoch nicht ohne weiteres möglich. Der nachfolgende Abschnitt nähert sich einer systemgrenzenübergreifenden ökologischen Bewertung von Bauteilen an und soll die mit der Wiederverwendung verbundenen Vorteile und Belastungen veranschaulichen.

4.2.1 Speicherwirkung Holz und Holzwerkstoffen

Um die Speicherwirkung von Holz und Holzwerkstoffen zu illustrieren, wurden nachstehend ein Vergleich von 1m^3 Brettsperrholz und 1m^3 Stahlbeton C25/30 mit einem Bewährungsgrad von 1% erstellt. Wie die Phase A1-A3 zeigt, verfügt Holz über einen hohen Anteil an biogenem CO_2 , der im Bauteil gebunden ist ($\text{GWP}_{\text{biogen}}$). Die Herstellung von Holzwerkstoffen ist jedoch auch mit Aufwänden verbunden, die anhand des $\text{GWP}_{\text{fossil}}$ abgebildet werden.

Über ihre Nutzungsdauer fungieren Holzbauteile somit als temporärer CO_2 -Speicher und stellen damit eine CO_2 -Senke dar. Die Speicherwirkung, bzw. der positive Einfluss auf die Atmosphäre, hängt dabei maßgebend von der Nutzungsdauer des Bauteils ab. Durch eine Wiederverwendung in weiteren Nutzungszyklen, kann die Speicherwirkung des Holzbauteils erhalten bleiben und das erneute Freiwerden des CO_2 verhindert werden. Bei mineralischen Baustoffen wie Stahlbeton erfolgt der Großteil des Ausstoßes bereits bei der Materialherstellung (Phase A1-A3). Die Emissionen ($\text{GWP}_{\text{fossil}}$) der Entsorgungsphase fallen dabei wesentlich geringer aus als bei Holz.

Um die langfristige Speicherung von CO_2 zu gewährleisten, kann die Bauteilwiederverwendung eine wesentliche Stellschraube darstellen, da hierdurch die Nutzungsdauer eines Bauteils, unabhängig vom Gebäude, verlängert werden kann. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, Konstruktionen trennbar und zirkulär zu planen, um langfristig eine Reduktion der Emissionen durch reduzierte Bauteilherstellung und Entsorgung zu gewährleisten.



Abbildungung 4.4 Illustrative Darstellung der Speicherwirkung statt 50 Jahren über 150 Jahren
(entspricht 3 Nutzungszyklen je 50 Jahren)

Im Rahmen einer Sys.Wood-Masterarbeit wurde die Frage der Bilanzierung von Reuse-Bauteilen untersucht [26]. Die Datengrundlage für die Bauteilwiederverwendung liefert die Kombination aus Nutzungsdauer und deren Trennbarkeit. Ein Bauteil, welches nicht zerstörungsfrei rückgebaut werden kann, ist demnach entweder gar nicht oder nur durch zusätzliches Material und Energieaufwand wiederverwendbar. Bauteile, die über eine dementsprechend lange Nutzungsdauer verfügen und demontiert werden können, werden in einen angedachten zweiten Nutzungszyklus überführt und wiederverwendet. Der Umgang von Reuse-Szenarien in der LCA-Bilanzierung ist noch nicht normativ geregelt. Im Rahmen des Forschungsprojektes beschäftigt sich eine Diplomarbeit an der TU Wien mit einem möglichen Ansatz hierfür. Dabei werden zwei Ziele verfolgt:

- Es sollen keine fiktiven Annahmen über mögliche künftige Gutschriften (z. B. thermische Verwertung oder Reuse) bereits in der Planung berücksichtigt werden müssen
- Die Bilanzierung soll im Einklang mit den effektiven CO₂-Äqv.-Bilanzen in der Atmosphäre stehen

Die entwickelte Berechnungsmethode nimmt die, in der europäischen Normung als Standard geltende, Cut-off Methode als Ausgangspunkt. Lasten aus der Herstellungsphase werden vollständig dem ersten Nutzungszyklus zugeordnet. Am Ende jedes Nutzungszyklus wird normgemäß das Modul C angesetzt.

Sollte ein Bauteil einer Wiederverwendung zugeführt werden, so müssen die materialinhärenten Eigenschaften im neuen Nutzungszyklus einbezogen werden. Das im Holz gebundene CO₂-Äqv. wird damit auch in einem weiteren Nutzungszyklus berücksichtigt. Des Weiteren wurden Aufwände für Rückbau, Transport und Einbau berechnet. Für die Hintergrunddokumentation wurde die Bilanzierung des Transportweges (A4 und C2) auf 100km angepasst, um eine realitätsgetreuere Annahme der Transportwege zu gewährleisten. Um eine Aussage bezüglich der effektive CO₂-Äqv.-Ersparnis einer Wiederverwendung treffen zu können, ist es notwendig die ökologischen Einflüsse eines Bauteils bzw. eines Gebäudes über mehrere Zyklen zu betrachten. Einsparungen aus einer Verzögerung des End-of-Life-Szenarios oder der Herstellungsphase können so sichtbar gemacht werden.

Abbildungung 4.6 zeigt den Vergleich der LCA-Analyse der funktionellen Einheit eines Quadratmeter Wand basierend auf dem Aufbau AW 1.3.a HM-HILÜ: *Standard* und *optimiert*. Bei der Variante *optimiert* wurde der Aufbau so angepasst, dass Tragstruktur, Dämmebene und Innenverkleidung in den zweiten Nutzungszyklus übergeführt werden können, während die Außenverkleidung (Lattung, Hinterlüftung, Fassadenbahn) neu ausgeführt wird. In der Variante *Standard* wird für den Vergleich davon ausgegangen, dass das Bauteil vollständig abgerissen und für das zweite Bauwerk neu hergestellt wird. Aus der Gegenüberstellung wird sichtbar, dass sich mittels einer Wiederverwendung etwa 38 % des GWP_{total} über zwei Nutzungszyklen einsparen

lässt. Für die Innenverkleidung wird der bereits zuvor erläuterte Best-Practice-Ansatz angewendet, welcher einen weitgehend zerstörungsfreien Rückbau der Gipskartonplatten ermöglicht.

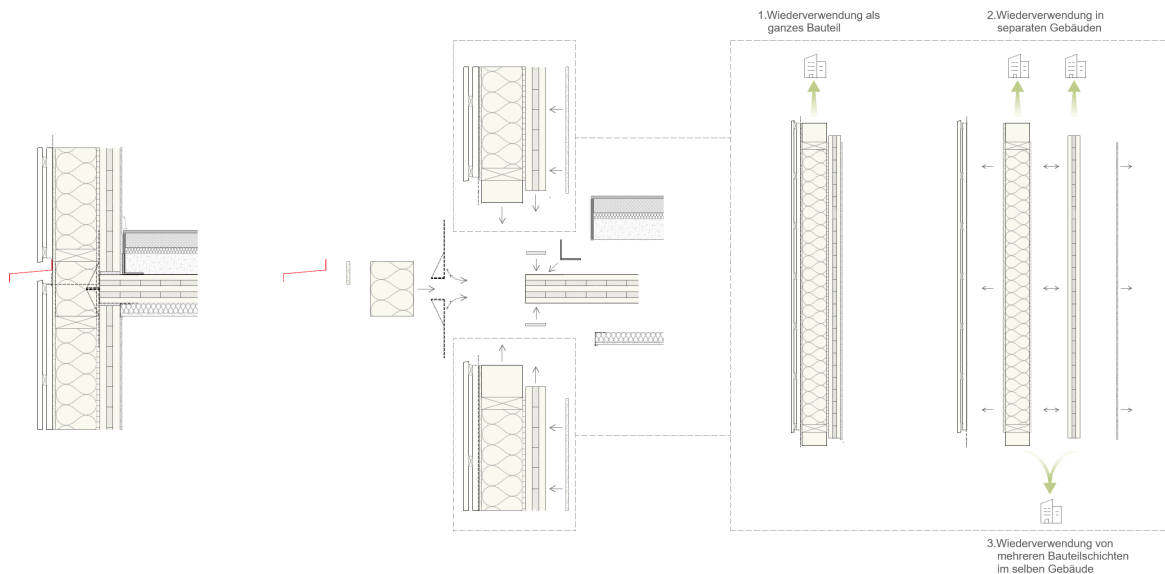
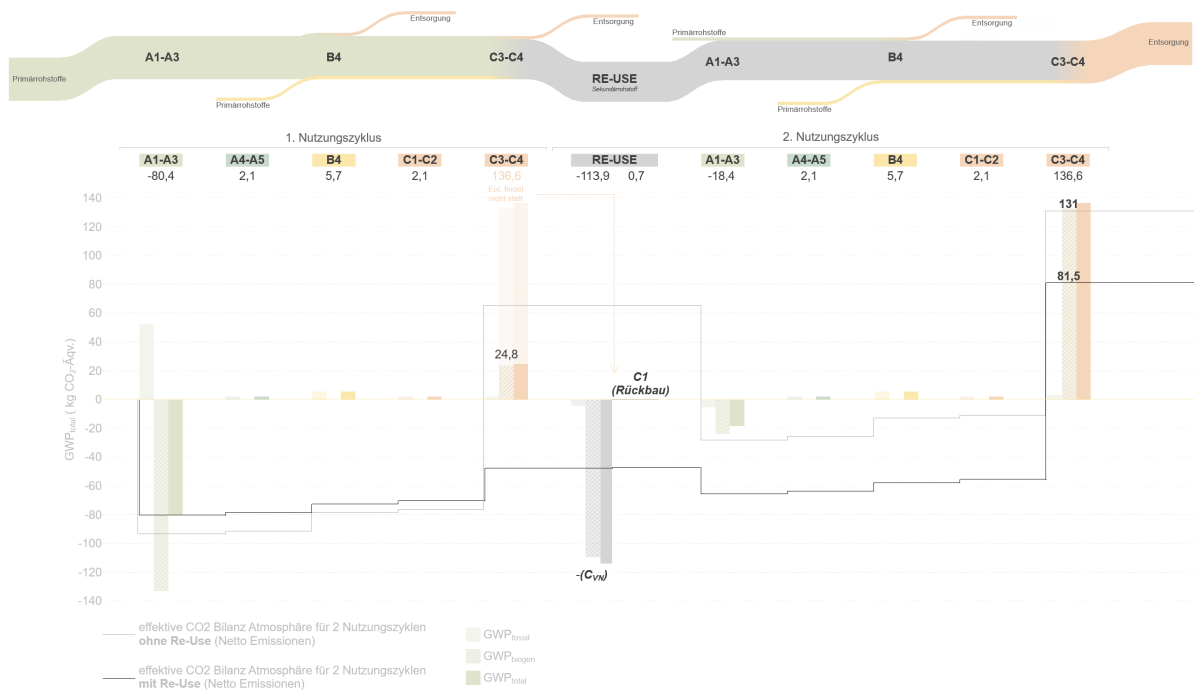


Abbildung 4.5 Konstruktion der optimierten Außenwand mit Wiederverwendungsoptionen

Der „Materialstrom“ oberhalb, zeigt die volumengewichtete Materialinputs und Outputs jedes Moduls. Darüber wird ersichtlich, dass der Austausch der Fassade einen sehr geringen Anteil des Bauteils darstellt und der Großteil in einen zweiten Zyklus übergeführt werden kann.

eine kompakte Erläuterung und Herleitung der Berechnungslogik ist nachstehend angeführt. Eine detaillierte Aufgliederung und Vergleiche zu anderen Methoden, wie der Cut-off Methode, ist in der Diplomarbeit zu finden.



4.2.2 Herleitung der Berechnungsmethode

Durch die normgemäße getrennte Betrachtung einzelner Nutzungszyklen wird biogen gebundenes CO₂ nach dem -1/+1-Ansatz am Ende eines Zyklus aus der Bilanz ausgebucht und im nächsten Zyklus erneut als CO₂-Senke angerechnet. Dieser Vorgang findet jedoch nur auf theoretischer Ebene statt, da der Kohlenstoffanteil in Realität im Bauteil gebunden bleibt. Damit wird der Spielraum ermöglicht die Bilanzierung auf die reale Anzahl der Wiederverwendung (oder eben nicht diese) abzustimmen.

Desweiteren werden Aufwände für eine thermische Verwertung bilanziert, die im Falle einer Wiederverwendung nicht eintreten. Um Doppelzählungen und ein realitätsgetreues Abbild der Emissionen über mehrere Zyklen zu schaffen, müssten diese daher rückgerechnet werden, um eine systemgrenzenübergreifende Bilanz erstellen zu können. Ziel der Berechnung ist es dabei jedem Modul die tatsächlich auftretenden Aufwände zuzuordnen.

Um eine Beschönigung des LCA-Ergebnisses zu verhindern, wird im rechnerischen Sinne, die normgemäße Berechnung des End-of-Life-Szenarios am Ende jedes Zyklus durchgeführt. Sollte die Bauteilentsorgung aufgrund einer Wiederverwendung nicht eintreten, kann dies durch ein Rückrechnen der Phase C des vorangegangenen Nutzungszyklus (CVN) in der Bilanz geltend gemacht werden. Hierdurch wird es ermöglicht eine Atmosphärenbilanz über mehrere Nutzungszyklen zu berechnen, ohne dabei die EoL-Berechnung zu spät anzusetzen. Die Bilanz wird dabei bei jedem weiteren Nutzungszyklus fortgeschrieben.

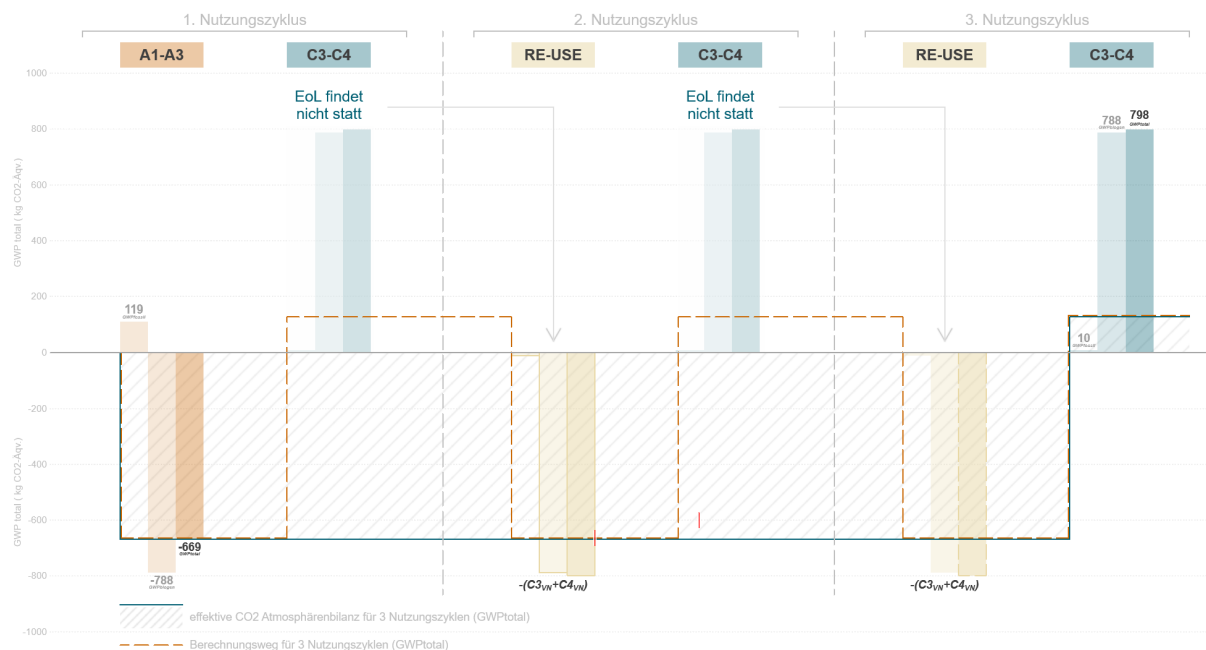


Abbildung 4.7 Herleitung der Berechnungslogik für die Atmosphärenbilanz über mehrere Nutzungszyklen

Mit der Wiederverwendung sind auch weitere Aufwände verbunden. Bauteile müssen rückgebaut, aufbereitet, transportiert und erneut eingebaut werden. Diese Vorgänge verursachen ihrerseits weitere Lasten, die berücksichtigt werden müssen. Sie fallen im Verhältnis zu den materialspezifischen Emissionen gering aus können aber im Fall von notwendigen Instandsetzungsarbeiten, wie beispielsweise das Erneuern des Brandschutzanstrich, mit spezifischen Aufwänden verbunden sein. Für die Berechnung der Aufwendungen des Reuse-Moduls ergibt sich daher folgende Berechnungsformel:

$$A_{Re-Use} = -(C3_{VN} + C4_{VN}) + A_{RE} [kgCO_2 - \ddot{A}qv.]$$

A_{Re-Use} ...Modul A eines wiederverwendeten Bauteils / Materials [$kgCO_2 - \ddot{A}qv.$]

$C3_{VN}$...Modul C3 des vorangegangenen Nutzungszyklus des Re-Use Bauteils / Material [$kgCO_2 - \ddot{A}qv.$]

$C4_{VN}$...Modul C4 des vorangegangenen Nutzungszyklus des Re-Use Bauteils / Material [$kgCO_2 - \ddot{A}qv.$]

A_{RE} ...Summe der Aufwendungen für die Wiederverwendung des Bauteils [$kgCO_2 - \ddot{A}qv.$]

$$A_{RE} = C1 + A_i + A4 + A5 [kgCO_2 - \ddot{A}qv.]$$

C1 ...Aufwendungen für den Rückbau $[kgCO_2 - \ddot{A}qv.]$

A_i ...Aufwendungen für die Instandsetzung des Bauteils $[kgCO_2 - \ddot{A}qv.]$

A4 ...Transport zur Baustelle des Wiedereinbaus $[kgCO_2 - \ddot{A}qv.]$

A5 ...Aufwendungen für den Einbau des wiederverwendeten Bauteils $[kgCO_2 - \ddot{A}qv.]$

Sollten im vorangegangenen Nutzungszyklus die Modul C1 und C2 bereits bilanziert worden sein, können diese ebenfalls rückgerechnet werden, da spezifische Aufwände für einen zerstörungsfreien Rückbau und Transport zum Ort der Wiederverwendung in A_{RE} erfasst sind.

$$A_{Re-Use} = - (C1_{VN} + C2_{VN} + C3_{VN} + C4_{VN}) + A_{RE} [kgCO_2 - \ddot{A}qv.]$$

Dies gewährleistet das korrekte Erfassen der Emissionen zum Zeitpunkt des Rückbaus. Die ursprünglich bilanzierte Rückbaumethode (z.B. Abriss anstatt Rückbau) kann von der tatsächlich angewendeten abweichen. Dies trifft auch für die Transportart und Strecke zum Ort der Wiederverwendung zu.

Der Rückbau (C1) bzw. der Einbau (A5) ist auf Basis der bauteilspezifischen Aufwendungen zu berechnen. Das Modul C1 ist ggf. für die Wiederverwendung neu zu bewerten, da Arbeitsschritte und Aufwände von einem Abriss und schonendem Rückbau variieren können.

Für die weitere Erläuterungen wird von einem vorgefertigten Außenwandelement in Tafelbauweise ausgegangen. Dieses wird mittels eines Turmdrehkran auf der Baustelle rückgebaut. Die berechneten Lasten für den Rückbau ergeben sich aus dem Stromverbrauch für das Verheben des Bauteils. Die Kranzeit für den Rückbau pro Element wurde mit 30 min angenommen. Diese werden dem Bauteil direkt zugeordnet. Lasten für den Aufbau des Krans, sowie dessen Transport zur Baustelle sind Teil der Baustelleneinrichtung und werden daher nicht anteilmäßig auf die Bauteile verrechnet. Sollte ein Bauteil demontiert und einer direkten Wiederverwendung (ohne Zwischenlagerung) zugeführt werden, so kann die gesamte Transportstrecke zum Ort der Wiederverwendung im Modul A4 erfasst werden.

Für das Modul C1 ergibt sich daher:

$$C1 = R_L \cdot V_G \cdot t \cdot 2,5 [kgCO_2 - \ddot{A}qv.] \text{ (pro Außenwandelement)}$$

R_L ...erforderliche Leistung für Rückbau in $[kW]$

V_G ...Spritverbrauch des Generators pro kW in $[l]$

t ...Zeitaufwand in $[h]$

2,5 ...Emissionsfaktor (direkt) für die Verbrennung von 1l Diesel $[kgCO_2 - \ddot{A}qv.]$

Für das Modul A5 ergibt sich äquivalent:

$$A5 = L_E \cdot V_G \cdot t \cdot 2,5 [kgCO_2 - \ddot{A}qv.] \text{ (pro Außenwandelement)}$$

L_E ...erforderliche Leistung für den Einbau in $[kW]$

V_G ...Spritverbrauch des Generators pro kW in $[l]$

t ...Zeitaufwand in $[h]$

2,5 ...Emissionsfaktor (direkt) für die Verbrennung von 1l Diesel in $[kgCO_2 - \ddot{A}qv.]$

Für die Transportwege (Modul C2 bzw. A4) ergeben sich:

$$C2 \text{ od. } A4 = S \cdot B \cdot T [kgCO_2 - \ddot{A}qv.] \text{ (pro Bauteil)}$$

S ...Transportstrecke in $[km]$

B ...Bauteilmasse in $[t]$

T ...GWP_{total} für 1km Transport einer Tonne in $[kgCO_2 - \ddot{A}qv.]$

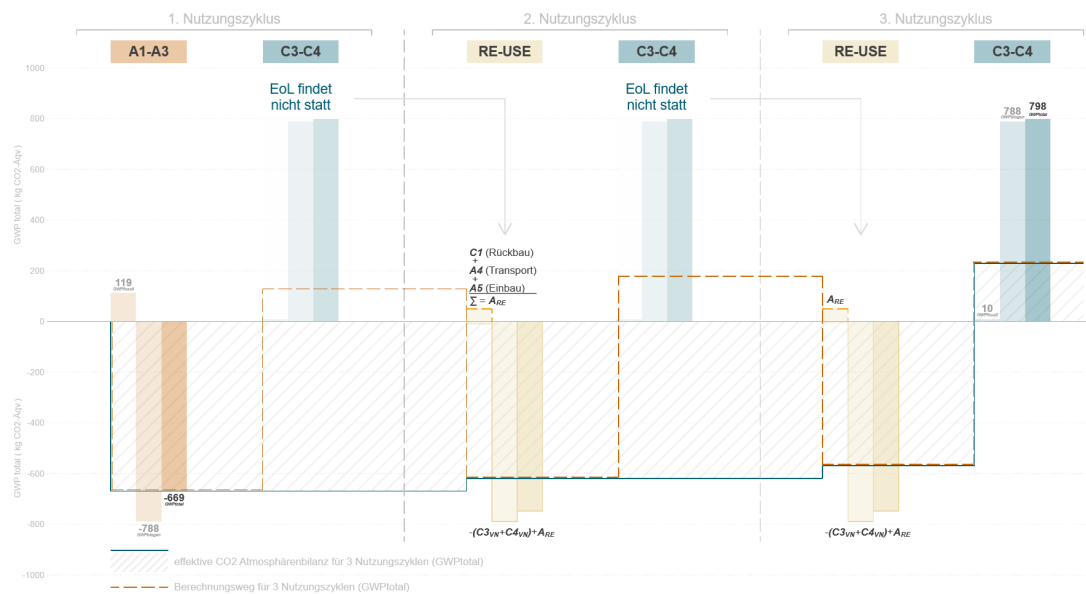


Abbildung 4.8 Herleitung der Berechnungslogik für die Atmosphärenbilanz über mehrere Nutzungszyklen inkl. A_{RE}

Bisher wurde nur schematisch die Wiederverwendung von 1m^3 Brettsperrholz berechnet. Es wurde angenommen, dass dieses vollständig wiederverwendet werden kann und ohne zusätzliche Auswechselungen (Modul B4) während eines Zyklus auskommt.

Eine Vielzahl an Bauteilen setzen sich jedoch aus mehreren Schichten zusammen, die über unterschiedliche Nutzungsdauern verfügen. Im Idealfall sind diese zerstörungsfrei trennbar, wodurch Teilbereiche eines Bauteils getauscht und nicht vollständig entsorgt werden müssen. Dieser Austausch wird im Modul B4 erfasst. Des Weiteren kann es erforderlich sein, dass am Ende eines Nutzungszyklus Bauteilschichten erneuert werden müssen, um eine Wiederverwendung zu ermöglichen.

Nachfolgend wurde eine illustrative Berechnung einer Außenwand in Holzrahmenbauweise durchgeführt, um diesen Prozess genauer zu veranschaulichen. Die Nutzungsdauer der einzelnen Bauteilschichten wurden anhand des BKI (Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern) ermittelt. Im Modul B4 wird die Schalung, Lattung, Konterlattung und die Fassadenbahn erfasst. Dies ist nach den Nutzungsdauern des BKI nach etwa 30 Jahren erforderlich. Bei einer angenommenen Nutzungszyklusdauer von 50 Jahren, könnten eben genannte Bauteilschichten am Ende des Zyklus nur noch etwa 10 Jahre genutzt werden, weshalb sie vor einer Wiederverwendung des Bauteiles erneuert werden. Die Lasten für die erneute Herstellung werden im Modul A1-A3 des nachfolgenden Nutzungszyklus erfasst. Die Entsorgung der alten Fassade wird dem Modul C des vorangegangenen Zyklus zugeordnet.

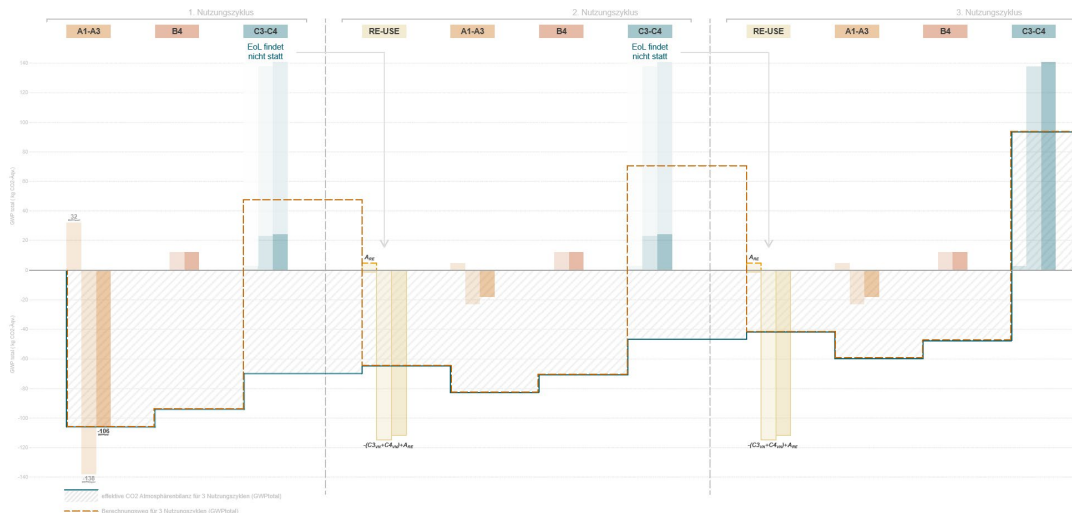


Abbildung 4.9 exemplarische Berechnung für 1m^2 Außenwand in Tafelbauweise inkl. Modul B4

Sollten die Module A4-A5 in der Berechnung separat ausgewiesen werden, so können die Aufwände für den erneuten Einbau von wiederverwendeter und neuer Substanz in diesem gesammelt ausgewiesen werden. Das Modul „Re-Use“ enthält dementsprechend folgende Module:

$$A_{Re-use} = -(C_{VN}) + A_{RE} [kgCO_2 - \ddot{A}qv.]$$

A_{Re-use} ...Modul A eines wiederverwendeten Bauteils/ Materials [$kgCO_2 - \ddot{A}qv.$]

C_{VN} ...Modul C des vorangegangenen Nutzungszyklus des Re-Use Bauteils/ Material:

$$C_{VN} = C1_{VN} + C2_{VN} + C3_{VN} + C4_{VN} [kgCO_2 - \ddot{A}qv.]$$

A_{RE} ...Summe der Aufwendungen für die Wiederverwendung des Bauteils:

$$A_{RE} = C1 + A_i [kgCO_2 - \ddot{A}qv.]$$

$C1$...Aufwendungen für den Rückbau [$kgCO_2 - \ddot{A}qv.$]

A_i ...Aufwendungen für die Instandsetzung des Bauteils [$kgCO_2 - \ddot{A}qv.$]

→ Aufwendungen für A4-A5 werden im dezidierten Modul ausgewiesen und daher nicht in A_{RE} erfasst.

Durch ein konsequentes Verfolgen der tatsächlich auftretenden Emissionen kann eine kumulierte Atmosphärenbilanz gezogen werden. Um ein „Greenwashing“ der Bilanzen zum Zeitpunkt der Berechnung zu verhindern, ist für die Berechnung der einzelnen Nutzungszyklen stets das „Worst-Case-Szenario“ der vollständigen Entsorgung anzusetzen. Dies ist in allen Abbildungen über den Berechnungsweg gekennzeichnet. Ein akkurates Beurteilen der effektiven CO_2 -Bilanz der Atmosphäre ist nur über kontinuierliches Fortschreiben der Bilanz möglich. So müssten zusätzlich getauschte Bauteilschichten, während des Betriebs (Modul B4) in der Bilanz nachgetragen werden.

4.2.3 Abgrenzung zum Modul D

Das Modul D bietet die Möglichkeit Lasten und Gutschriften für die Bereitstellung von Sekundärmaterial auszuweisen. Diese werden lt. der ÖNORM 15804 im $e_{moduleD1}$ erfasst und nachstehend genauer erörtert [7]. Andere Szenarien, wie beispielsweise die Verwendung als Sekundärbrennstoff, folgen einer eigenen Berechnungslogik. Die Summe aller (Teil-)Module ergeben das $e_{moduleD}$.

$$e_{moduleD} = e_{moduleD1} + e_{moduleD2} + e_{moduleD3} + e_{moduleD4}$$

Das Modul D1 berechnet sich wie folgt:

$$e_{moduleD1} = \sum_i (M_{MR\ out|i} - M_{MR\ in|i}) \cdot \left(E_{MR\ after\ EoW\ out|i} - E_{VMSub\ out|i} \cdot \frac{Q_{R\ out}}{Q_{Sub}} |i \right)$$

$M_{MR\ out|i}$...Sekundärmaterial – das in einem nachfolgenden System rückgewonnen wird

$M_{MR\ in|i}$...Sekundärmaterial – das bereits in einem vorangegangenen System rückgewonnen wurde

$E_{MR\ after\ EoW\ out|i}$...Emissionen & Ressourcenverbrauch je Einheit für Rückgewinnung, Recycling, Wiederverwendung des nachfolgenden Systems

$E_{VMSub\ out|i}$...Lasten für die Beschaffung und oder Vorbehandlung des substituierten Primärmaterials im Folgesystem

$Q_{R\ out} / Q_{Sub}$...Verhältnis des exportierten Sekundärmaterials zum substituierten Material (Primärmaterial) → Bei identischer Qualität = 1

Die Berechnung des Moduls D1 basiert auf der Annahme, dass ein Material die Systemgrenze als Sekundärrohstoff verlässt und in einem anderem Produktsystem (beispielsweise einem weiteren Nutzungszyklus) einen Primärrohstoff substituiert. Bemessungsgrundlage für die Berechnung ist dabei der Output-Fluss, welcher die Systemgrenze überschreitet. Die Variable $M_{MR\ out}$ definiert dabei den Material-Output, der in einem nachfolgenden System rückgewonnen wird (Sekundärmaterial, dass wiederverwendet wird), während $M_{MR\ in}$ den Input an Sekundärmaterial, dass aus einem vorangegangenen System rückgewonnen wurde erfasst (Material das im untersuchten Produktsystem schon als Sekundärrohstoff eingegangen ist). Die

Differenz ergibt den Materialanteil, für den Gutschriften im Modul D1 anfallen. Diese werden anhand der vermiedenen Lasten aus dem Herstellungsprozess des substituierten Primärmaterials ermittelt und mit den Aufwänden für eine Wiederverwendung (Reinigung, Instandsetzung etc.) gegengerechnet. Sollten die Aufwände für eine erneute Herstellung größer als die der Wiederaufbereitung ausfallen, kommt eine Gutschrift zustande. Die Höhe dieser wird dabei auch von der „Qualität“ des Sekundärmaterial definiert, die als Abminderungsbeiwert in die Gleichung eingeht. Sollte das Sekundärmaterial die gleiche Qualität wie ein äquivalentes Produkt aus Primärmaterial aufweisen, so ist der Faktor 1. In diesem Fall wird die Gutschrift nicht weiter abgemindert.

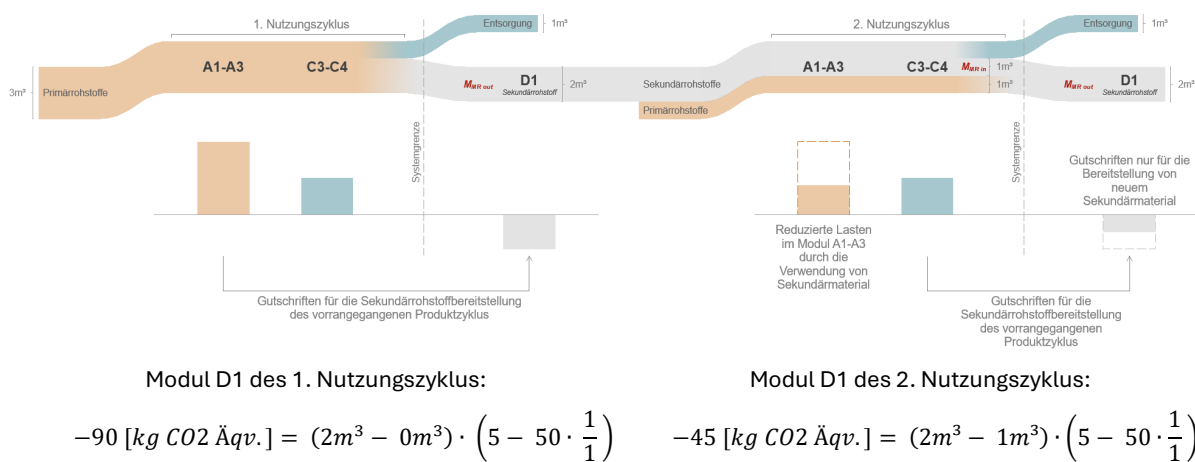


Abbildung 4.10 exemplarische Berechnung des Moduls D1

Das Modul D1 bezieht sich dabei immer auf den untersuchten Produktzyklus. Es weist nur Gutschriften für die Bereitstellung von neuem Sekundärmaterial aus und kann nicht mit anderen Modulen verrechnet werden. Modul D1 des ersten Nutzungszyklus bezieht sich auf den Material Output, den dieser für nachfolgende Systeme zur Verfügung stellt. Die Vorteile aus der Verwendung von Sekundärmaterial im zweiten Nutzungszyklus, äußern sich in geringeren Emissionswerten in der Phase A1-A3, da die Herstellungsemissionen für das substituierte äquivalente Primärmaterial entfallen. D1 des zweiten Nutzungszyklus weist wiederum Gutschriften für die Bereitstellung von neuem Sekundärmaterial des zweiten Nutzungszyklus aus. Für Sekundärmaterialien, die aus dem ersten Nutzungszyklus stammen werden keine erneuten Gutschriften ausgewiesen, da diese bereits Teil des Moduls D1 des ersten Nutzungszyklus waren.

4.2.4 Materialströme der Nutzungszyklen

Die Datengrundlage für die Materialströme liefert die Kombination aus Nutzungsdauer und deren Trennbarkeit. Sie bilden dabei den Input und Output von Materialien bzw. Bauteile über die Nutzungszyklen ab. Ein Bauteil, welches nicht zerstörungsfrei rückgebaut werden kann, kann demnach entweder gar nicht oder nur durch zusätzliches Material und Energieaufwand wiederverwendet werden. Bauteile, die über eine dementsprechend lange Nutzungsdauer verfügen und demontiert werden können, werden in einen angedachten zweiten Nutzungszyklus übergeführt und wiederverwendet.

Für die vorliegenden Bauteile bezieht sich dies primär auf die tragenden Schichten (Außenwand: vorgefertigte Rahmenbau- / Brettsperrholzelemente; Decken: Brettsperrholzdecken). Im nachfolgenden wurde die Außenwand 03 HM-HILÜ näher ausgearbeitet.

Ein Materialstrom einer Nutzungsphase wird dabei in Input- und Output-Ströme unterteilt. Der Inputstrom beinhaltet demnach alle notwendigen Materialien für die Nutzungsphase, während der Output alle Materialien, die das System verlassen zusammenfasst. Bauteile, die einer Wiederverwendung zugeführt werden, verlassen den Nutzungszyklus als Sekundärmaterialien und können als Input in einen weiteren Nutzungszyklus eingehen. Für die Herstellungsphase des ersten Nutzungszyklus wird davon ausgegangen das alle notwendigen Materialien als Primärrohstoffe in das System eingehen. Diese Annahme wurde anhand der derzeitigen Praxisdaten getroffen, lt. denen die Wiederverwendung unter einem Prozent liegt [27]. Der erste Nutzungszyklus

unterscheidet sich daher in den Input- und Output-Strömen von den restlichen Zyklen, welche eine Wiederverwendung von Bauteilen vorsehen.

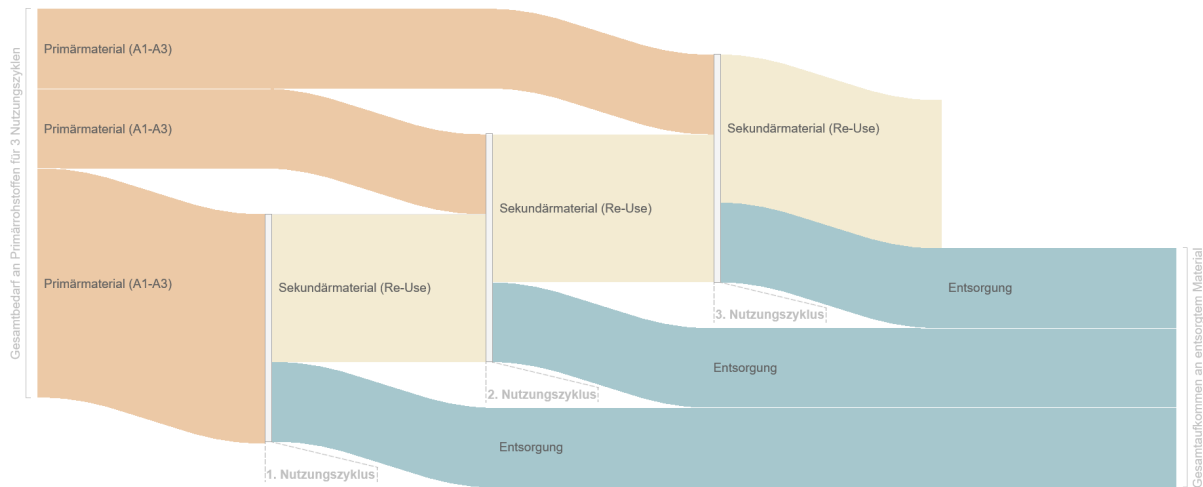


Abbildung 4.11 Materialstrom für drei Nutzungszyklen idealisierte Annahmen ohne Berücksichtigung des Moduls B4

Diese Materialströme stellen dabei ideale Annahmen dar. In Realität ist es unwahrscheinlich, dass zwei Nutzungszyklen identisch sind. Andere Wettereinflüsse, die Nutzung des Gebäudes, mögliche Schäden durch technische Gebrechen und viele weitere Faktoren können einen Einfluss auf die Nutzungsdauer eines Bauteiles haben. Es ist demnach davon auszugehen, dass die Phase B4 sich von einem zum anderen Gebäudezyklus leicht unterscheidet.

Diese Tatsache unterstreicht die Notwendigkeit einer erneuten Evaluierung der Ökobilanzierung, spätestens zum Zeitpunkt des Rückbaus, da situationsbedingt auch mehr oder weniger Bauteile für eine Wiederverwendung zur Verfügung stehen könnten als ursprünglich angenommen. Dies resultiert in einer variierenden Menge an Sekundärmaterial für die Herstellungsphase des darauffolgenden Nutzungszyklus, die mittels Primärrohstoffen oder Sekundärrohstoffen aus anderen Quellen substituiert werden müssten.

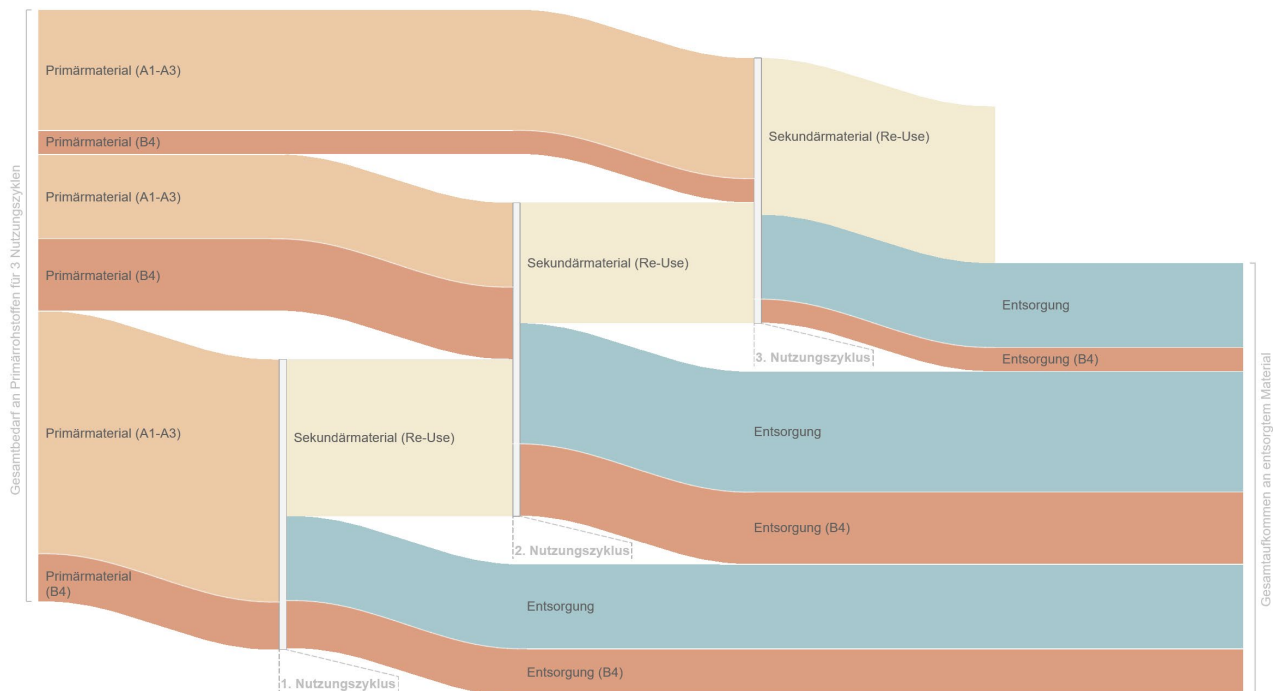


Abbildung 4.12 Materialstrom für drei Nutzungszyklen unter Berücksichtigung verschiedener Anteile des Moduls B4 und Sekundärmaterial

5 Literaturverzeichnis

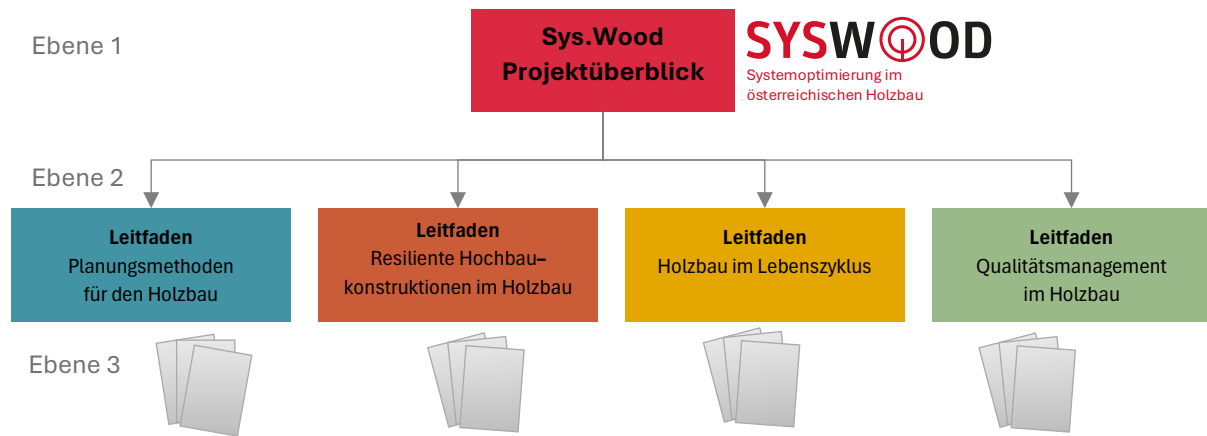
- [1] "Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der Umweltleistungen von Gebäuden – Anforderungen und Anleitungen," in *ÖNORM EN 15978:2024-05-15*, Austrian Standards International.
- [2] "Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen," in *ÖNORM EN ISO 14040:2021-03-01*, Austrian Standards International.
- [4] "Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen," in *ÖNORM EN ISO 14044:2021-03-01*, Austrian Standards International.
- [5] Pech, A., Aichholzer, M., Doubek, M., Höfferl, B. & Hollinsky, K. (2016). Holz im Hochbau: Theorie und Praxis. Baukonstruktionen: Sonderband. Birkhäuser.
- [6] Richtlinie (EU) 2024/1275 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 24. April 2024 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2024/1275/oj>
- [7] "Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte," in *ÖNORM EN 15804+A2:2022-02-15*, Austrian Standards International.
- [8] "Umweltmanagement-Ökobilanz-Grundsätze und Rahmenbedingungen," in *DIN EN ISO 14040:2021-02*, DIN Deutsches Institut für Normung.
- [9] "Nachhaltigkeit von Bauwerken-Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden-Berechnungsmethode," in *DIN EN 15978:2012-01*, DIN Deutsches Institut für Normung.
- [10] H. Achenbach and S. Rüter, "Ökobilanz-Daten für die Erstellung von Fertighäusern in Holzbauweise," in "Thünen Report 38," Braunschweig, 2016.
- [11] A. Lemmerer, "Ökologische Bewertung von Holzrahmenwänden und die Anteile der Vorfertigung im Vergleich," Bachelor, Institut für Architektur und Bauingenieurbau, FH JOANNEUM, Graz, 2023.
- [12] A. Herzog, "Prozessanalyse und ökologische Bewertung von Wandelementen im Holzbau," Bachelor, Institut für Architektur und Bauingenieurbau, FH JOANNEUM, Graz, 2023.
- [13] "ÖKOBAUDAT Informationsportal Nachhaltiges Bauen." Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. <https://www.oekobaudat.de/> (accessed 2023).
- [14] "Die baubook-Zentrale (Datenbank)." baubook GmbH. <https://www.baubook.at/zentrale/> (accessed 2023).
- [15] "Berechnung der Treibhausgas (TGH)-Emissionen verschiedener Energieträger." Umweltbundesamt. <https://secure.umweltbundesamt.at/co2mon/co2mon.html> (accessed 2024).
- [16] Hao, J. L., Cheng, B., Lu, W., Xu, J., Wang, J., Bu, W. & Guo, Z. (2020). Carbon emission reduction in prefabrication construction during materialization stage: A BIM-based life-cycle assessment approach. The Science of the total environment, 723, 137870. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137870>
- [17] Verband bayerischer Wohnungsunternehmen e.V. (Hrsg.). (2024). Informationsdienst Holz: Spezial. Planungshilfe mehrgeschossiger Wohnungsbau: Empfehlung für klimaverträgliches Bauen mit Holz.
- [18] Sibille, E., Simader, G., Dolna-Gruber, C., Bosak, A. & Treitler, L. (2025). Gebäudereport 2025.
- [19] Graf, J., Hao, B., Birk, S., Poteschkin, V., Shi, W., Klopfer, R., Jagsch, C. and Ciesla, E.-M. (2024), Legitimation der kreislaueffektiven Holzbauweise – Nachweis der Klimaschutzwirkung. Bautechnik, 101: 64-73. <https://doi.org/10.1002/bate.202300087>
- [20] Kromoser et al. (2023): Orientierungsleitfaden ZiFa 1.0. Universität für Bodenkultur Wien (BOKU) im Auftrag der Stadt Wien. Wien.
- [21] Dolezal et al. (2024): Katalog kreislauffähiger Holzbauteile. Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie (IBO) und Holzforschung Austria (HFA) im Auftrag des Fachverbands der Holzindustrie Österreichs. Wien
- [22] Koppelhuber et al. (2024): Leitfaden – Rückbauorientiertes Planen und Bauen im Holzbau. Koppelhuber2 und Partner im Auftrag der Holzindustrie Österreich.
- [23] Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen: ÖKOBAUDAT – Informationsportal Nachhaltiges Bauen, <https://www.oekobaudat.de> (letzter Zugriff: 19.02.2026)

[24] BKI – Konstruktionsaktas: Bauteile mit Ökobilanzen, CO₂-Äquivalenten und Baupreisen für die nachhaltige und wirtschaftliche Planung, Stuttgart: BKI, 2023.

[25] baubook GmbH, <https://www.baubook.at/zentrale/> (letzter Zugriff: 19.02.2026)

[26] F. Ulrych: „Ökologisch optimierte Planungsansätze für flexible Gebäudenutzungsstrategien und zerstörungsfreie Bauteilwiederverwendung“. Masterarbeit. TU Wien: In Bearbeitung.

[27] F. Dolezal: Vortrag: Modul Ressourceneffiziente Materialisierung. TU Wien. 2024.



Systemoptimierung im österreichischen Holzbau Sys.Wood Projektüberblick und Ergebnisse

Ernst Alexander Dengg, Alireza Fadaei, Alexander Gerger, Benjamin Kromoser, Nadine Ladstätter, Gottfried Mauerhofer, Marc Pantscharowitsch, Katharina Schachner, Phillip Süß, Marius Valente, Markus Wallner-Novak, Johannes Würzler (in alphabetischer Reihenfolge)

DOI: <https://doi.org/10.60588/2p3j-9655>

ISBN print: 978-3-903318-66-3

ISBN eBook: 978-3-903318-67-0

Sys.Wood: Planungsmethoden für den Holzbau, Leitfaden

Benjamin Kromoser, Marc Pantscharowitsch

DOI: <https://doi.org/10.60588/06k6-0x54>

Sys.Wood: BIM-Übergabe Mock-Ups, Hintergrunddokumentation

Benjamin Kromoser, Marc Pantscharowitsch

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_bim-mockups

Sys.Wood: Best Practice Beispiel Bauteilkatalog, Hintergrunddokumentation

Benjamin Kromoser, Marc Pantscharowitsch

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_bestpractice-bauteilkatalog

Sys.Wood: Allgemeines Prozesskettenmodell Holzbau

Nadine Ladstätter, Gottfried Mauerhofer, Phillip Süß, Benjamin Kromoser, Marc Pantscharowitsch

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_prozesskettenmodell

Sys.Wood: Resiliente Hochbaukonstruktionen im Holzbau, Leitfaden

Ernst Alexander Dengg, Johannes Würzler

DOI: <https://doi.org/10.60588/mbeb-z771>

Sys.Wood: FMEA-Bewertungen, Hintergrunddokumentation

Ernst Alexander Dengg, Johannes Würzler

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_ergebnisse_fmea-bewertungen

Sys.Wood: Bauteilaufbauten, Hintergrunddokumentation

Ernst Alexander Dengg, Johannes Würzler

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_bauteilaufbauten

Sys.Wood: Detailkatalog, Hintergrunddokumentation

Ernst Alexander Dengg, Johannes Würzler

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_detailkatalog

Sys.Wood: Checklisten, Hintergrunddokumentation

Ernst Alexander Dengg, Johannes Würzler

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_checklisten_anschlussdetails

Sys.Wood: Best-Practice-Beispiele, Hintergrunddokumentation

Ernst Alexander Dengg, Johannes Würzler

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_best-practice-beispiele

Sys.Wood: FMEA - Bewertungsmatrix, Hintergrunddokumentation

Ernst Alexander Dengg, Johannes Würzler

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_fmea_bewertungsmatrix

Sys.Wood: FMEA - Kriterienkataloge, Hintergrunddokumentation

Ernst Alexander Dengg, Johannes Würzler

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_fmea_kriterienkataloge

Sys.Wood: Dos & Don'ts, Hintergrunddokumentation

Ernst Alexander Dengg, Johannes Würzler

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_dos&donts_planung

Sys.Wood: Holzbau im Lebenszyklus, Leitfaden

Alireza Fadai, Alexander Gerger, Katharina Schachner, Marius Valente, Markus Wallner-Novak

DOI: <https://doi.org/10.60588/rw1-r893>

Sys.Wood: Wartungshandbuch Mieter, Hintergrunddokumentation

Katharina Schachner, Markus Wallner-Novak

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_wartung_mieter

Sys.Wood: Wartungshandbuch Verwalter, Hintergrunddokumentation

Katharina Schachner, Markus Wallner-Novak

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_wartung_verwalter

Sys.Wood: Wartungshandbuch Ausführende, Hintergrunddokumentation

Katharina Schachner, Markus Wallner-Novak

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_wartung_ausfuehrende

Sys.Wood: Best Practice Kreislaufwirtschaft, Hintergrunddokumentation

Alireza Fadai, Alexander Gerger, Fabian Ulrych, Marius Valente

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_bestpracticekreislauf

Sys.Wood: Ökologische Bewertung, Hintergrunddokumentation

Alireza Fadai, Alexander Gerger, Katharina Schachner, Fabian Ulrych, Marius Valente, Markus Wallner-Novak

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_lca

Sys.Wood: Zerlegbare Verbindungen im Holzbau, Hintergrunddokumentation

Alireza Fadai, Alexander Gerger, Jasmin Prünner, Marius Valente

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_zerlegbare_verbindungen

Sys.Wood: Vertikal Vorgespannte Wandelemente, Hintergrunddokumentation

Alireza Fadai, Alexander Gerger, Jasmin, Prünner, Markus Wallner-Novak

https://www.holzcluster-steiermark.at/download/syswood_vorspannung

Sys.Wood: Qualitätsmanagement im Holzbau, Leitfaden

Nadine Ladstätter, Phillip Süß, Gottfried Mauerhofer

DOI: <https://doi.org/10.60588/tzwz-1455>

ISBN eBook: 978-3-903318-71-7