

Diplomarbeit

Potentiale der *End-of-Life* Phase Bewertungsmethoden zur Unterstützung der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grads
Diplom-Ingenieur
eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen

Diploma Thesis

Potentials of end-of-life phase evaluation methods to strengthen the circular construction

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur
of the TU Wien, Faculty of Civil and Environmental Engineering

von

Sven Alvin Gilic

Matr.Nr.: 01604697

Betreuung: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Iva Kovacic**
Dipl.-Ing. **Stefan Schützenhofer**
Institut für Hoch- und Industriebau
Forschungsbereich Integrale Planung und Industriebau
Technische Universität Wien,
Karlsplatz 13/210-01, 1040 Wien, Österreich

Wien, im Mai 2023



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Danksagung

Ich möchte an dieser Stelle meiner Familie und insbesondere meiner Mutter meinen tiefsten Dank aussprechen, die mich während meines Studiums immer unterstützt haben und mir den Rücken gestärkt haben, wenn es mal schwierig wurde. Ich danke auch meiner Freundin Belinda, die immer an meiner Seite war und mir immer wieder Mut und Zuversicht gegeben hat.

Des Weiteren möchte ich mich bei meinen Betreuern bedanken, die mir über die gesamte Arbeit hinweg wertvollen Input gegeben haben. Darüber hinaus möchte ich mich bei meinen Studierenden bedanken, mit denen ich das Studium gemeinsam gemeistert habe. Ihre Unterstützung und Zusammenarbeit haben mir dabei geholfen, die Herausforderungen des Studiums zu meistern und erfolgreich abzuschließen.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Kurzfassung

In Anbetracht der wachsenden globalen Herausforderungen in den Bereichen Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung gewinnt auch die Baubranche zunehmend an Bedeutung. Die Bauindustrie ist für einen großen Teil der weltweiten Abfallerzeugung verantwortlich. Die Kreislaufwirtschaft kann hierzu einen wichtigen Beitrag leisten. Hierbei geht es darum, Rohstoffe und Materialien effizienter zu nutzen und Abfälle zu reduzieren, indem Produkte und Materialien am Ende ihres Lebenszyklus recycelt und wiederverwendet werden. Die Rückbau- und Verwertungsfähigkeit eines Materials in der *End-of-Life*-Phase kann durch die Verwendung von Bewertungsmethoden beurteilt werden und kann Optimierungen hinsichtlich der Recyclingfähigkeit ermöglichen. Jedoch ergeben sich Unterschiede in der Systematik und den verwendeten Indikatoren bei den entwickelten Bewertungsmethoden. Daher stellt sich die Frage, welche Indikatoren relevant und auch umsetzbar sind.

Zur Beantwortung der Fragestellung wurde als Methode eine umfangreiche Literaturrecherche und Experteninterviews gewählt. In der Literaturrecherche wurde nach Bewertungssystemen gesucht und die verwendeten Ansätze und Indikatoren analysiert. Indikatoren, welche relevante Faktoren berücksichtigen, wurden untersucht und mit Expert:innen diskutiert. Ziel der Experten:inneninterviews war es, die Relevanz der Indikatoren in der Praxis zu ermitteln. Abschließend wurden die vorgestellten Indikatoren in einem Fallbeispiel erprobt.

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass ökonomische Faktoren und die Ökobilanzberechnung die größten Potentiale zu den Erweiterungen der Kreislaufbewertung in der *End-of-Life*-Phase darstellen. Laut den durchgeführten Expert:inneninterviews ist die Implementierung dieser Faktoren sinnvoll und notwendig. Jedoch wurde betont, dass die Kreislaufwirtschaft noch nicht ausreichend in das Bewusstsein vorgedrungen ist und daher eine weitere Sensibilisierung zu diesem Thema notwendig ist.

Insgesamt zeigt die Studie, dass Verbesserungspotentiale in der Bewertungsmethodik der Recyclingfähigkeit von Gebäuden vorhanden sind. Diese Erkenntnisse liefern wichtige Impulse für zukünftiges Forschen und Handeln im Bereich der nachhaltigen Entwicklung und Schonung natürlicher Ressourcen im Bauwesen.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abstract

In regard to the growing global challenges in the areas of sustainability and resource conservation, the construction industry is also becoming increasingly important. The construction industry is responsible for a large proportion of global waste generation. The circular economy can make an important contribution to this. This involves using raw materials and materials more efficiently and reducing waste by recycling and reusing products and materials at the end of their life cycle. The degradability and recyclability of a material in the end-of-life phase can be assessed by using assessment methods and can enable optimizations with regard to recyclability. However, differences arise in the systematics and the indicators used in the assessment methods developed. Therefore, the question arises which indicators are relevant and also implementable.

To answer this question, a comprehensive literature research and expert interviews were chosen as methods. In the literature research, evaluation systems were searched for and the approaches and indicators used were analyzed. Indicators that take relevant factors into account were examined and discussed with experts. The aim of the expert interviews was to determine the relevance of the indicators in practice. Finally, the presented indicators were tested in a case study.

The results of this study show that economic factors and life cycle Assessment calculation represent the greatest potentials to the extensions of the cycle assessment in the end-of-life phase. According to the conducted interviews with experts, the implementation of these factors is reasonable and necessary. However, it was emphasized that the circular economy has not yet reached sufficiently into the consciousness and therefore a further sensitization to this topic is necessary.

Overall, the study shows that there is potential for improvement in the assessment of the recyclability of buildings. These findings provide important impulses for future research and action in the field of sustainable development and conservation of natural resources in the construction industry.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abkürzungsverzeichnis

AP	Acidification Potential
BNB	Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen
BREEAM	Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology
CLP	Closed-Loop-Potential
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
DNA	Disassembly Network Analysis
EoL	End of Life
EPD	European Product Declaration
GWP	Global Warming Potential
IBO	Österreichisches Institut für Baubiologie und - ökologie
LCA	Life Cycle Assessment
LP	Loop-Potential
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
ÖGNB	Österreichische Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
ÖGNI	Österreichische Gesellschaft für Nachhaltige Immobilienwirtschaft
PEI	Primär Energie Inhalt
PENRT	Primary Energy Non Renewable Total
TQB	Total Quality Building



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	15
1.1	Problemstellung.....	15
1.2	Motivation.....	17
1.3	Ziele und Forschungsfrage der Arbeit.....	18
2	Methodik.....	19
2.1	Expert:inneninterviews	20
3	Grundlagen.....	23
3.1	Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden.....	23
3.2	Politische Initiativen auf nationaler und internationaler Ebene	24
3.2.1	UN-Entwicklungsziele – Sustainable Development Goals (SDGs)	24
3.2.2	Aktionspläne zur Kreislaufwirtschaft der Europäischen Union.....	24
3.2.3	EU-Taxonomie-Verordnung	24
3.2.4	Österreichisches Regierungsprogramm 2020-2024.....	25
3.2.5	Abfallvermeidungsprogramm	26
3.3	Beseitigung und Verwertung von Abfällen in Österreich	27
3.4	Circular Economy	28
3.5	Zertifizierungen für die <i>End-of-Life</i> -Phase.....	31
3.5.1	Klima:aktiv.....	31
3.5.2	Total Quality Building (TQB).....	32
3.5.3	DGNB/ÖGNI.....	33
3.5.4	BNB	33
3.5.5	BREEAM.....	34
3.5.6	LEED	35
4	Literaturrecherche der Bewertungsmethoden für die <i>End-of-Life</i> -Phase.....	37
4.1	Entsorgungsindikator - EI10.....	38
4.2	Bewertungsmethode nach H. Figl et al	40
4.3	Bewertungsmethode nach A. Hafner et al.....	42
4.4	Bewertungsmethode nach F. Vogdt et al.....	46
4.5	BNB – Kriteriensteckbrief 4.1.4	47
4.6	DGNB – TEC 1.6.....	48
4.7	Building Information Modelling based Deconstructability Assessment Score (BIM-DAS) 49	
4.8	Urban Mining Index	51
4.9	Quantitative Ökobilanz in der EoL.....	53
4.9.1	Ökoindex 3	55
4.9.2	Life-Cycle-Gap-Analyse.....	55
4.10	Sanchez und Haas' Demontagesequenzmodell	57
4.11	Bewertungsmethode <i>Disassembly Network Analysis</i>	60
4.12	Zwischenfazit.....	65

5	Analyse der Bewertungsmethoden und Implementierungsvorschläge für die EI10-Methodik	67
5.1	Volumen-/ Massenbezogener Ansatz.....	67
5.1.1	Implementierungsvorschläge Volumen-/ Massenbezogener Ansatz.....	68
5.2	Indikatoren zur Beschreibung der Rückbau- und Trennbarkeit.....	68
5.2.1	Implementierungsvorschläge Indikatoren zur Rückbau- und Trennbarkeit.....	69
5.3	Indikatoren zur Beschreibung der Verwertungseinstufung.....	70
5.3.1	Implementierungsvorschläge Indikatoren zur Verwertungseinstufung.....	71
5.4	Indikatoren zur Ökobilanz.....	71
5.4.1	Implementierungsvorschläge Indikatoren zur Ökobilanz.....	72
5.5	Indikator zur potenziellen Verwertungseigenschaft in der Zukunft.....	73
5.5.1	Implementierungsvorschläge Indikatoren zur potenziellen Verwertungseigenschaft in der Zukunft.....	74
5.6	Implementierungsvorschlag für den EI10.....	74
5.7	Expert:inneninterviews.....	75
5.7.1	Zielgruppendefinition und Kontaktaufnahme.....	75
5.7.2	Leitfadenskonstruktion.....	76
5.7.3	Auswertungsmethode der Ergebnisse.....	76
5.7.4	Ergebnis der Expert:inneninterviews.....	77
5.7.5	Zusammenfassung und Diskussion.....	83
6	Fallbeispiel: Bewertung des Recyclingpotentials.....	89
6.1	Bewertungsobjekt.....	89
6.2	Bewertungskonzept.....	91
6.2.1	Berechnung des EI10.....	91
6.2.2	Bewertungskonzept Materialwert.....	92
6.2.3	Bewertungskonzept Rückbau-/ Trennungsaufwand.....	94
6.2.4	Bewertungskonzept Verwertungsanteil.....	94
6.2.5	Bewertungskonzept Ökobilanz.....	96
6.3	Bewertungsergebnisse.....	97
6.3.1	Bewertungsergebnisse EI10.....	97
6.3.2	Bewertungsergebnisse Materialrestwert.....	97
6.3.3	Bewertungsergebnisse Rückbau-/ und Trennungsaufwand.....	98
6.3.4	Bewertungsergebnisse Verwertungsanteil.....	99
6.3.5	Bewertungsergebnisse Ökobilanz.....	102
7	Diskussion und Ausblick.....	105
7.1	Diskussion der Forschungsergebnisse.....	105
7.2	Ausblick zum Bewertungssystem EI10.....	107
7.2.1	Beschreibung der neuen Bewertungsmethode.....	108
7.2.2	Gegenüberstellung.....	110
7.3	Zusammenfassung der Maßnahmen und Handlungsempfehlungen.....	112



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Die ökologische und gesundheitliche Bewertung von Gebäuden und die damit verbundene Auswahl von Baumaterialien werden immer wichtiger. Im Hinblick auf die Ressourcenschonung verfügt die Abfallvermeidung ein erhebliches Potential um die Umwelt- und Klimabelastung zu verringern. Ein Ziel der Kreislaufwirtschaft ist es, die natürlichen Ressourcen zu schonen, indem Baustoffe vermehrt wiederverwendet werden, statt diese zu deponieren. Betrachtet man die statistischen Auswertungen des österreichischen Bundes-Abfallwirtschaftsplans 2023, erkennt man welche großen Auswirkungen die Baubranche in der Entwicklung des Abfallaufkommens verursacht. Im Jahr 2020 lag das Gesamtabfallaufkommen in Österreich bei 69,81 Millionen Tonnen. Der Anteil an Primärabfällen ist von 2015 auf 2020 um 17% gestiegen, was vor allem auf die steigende Menge an Aushubmaterial und Abfällen aus dem Bauwesen zurückzuführen ist. Im Vergleich zum Vorjahr 2019 ist die Abfallmenge jedoch zurückgegangen, da die Bauarbeiten aufgrund der Auswirkungen der neuen Coronavirus-Infektion zurückgegangen sind. (Siehe Abbildung 1). (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2023)

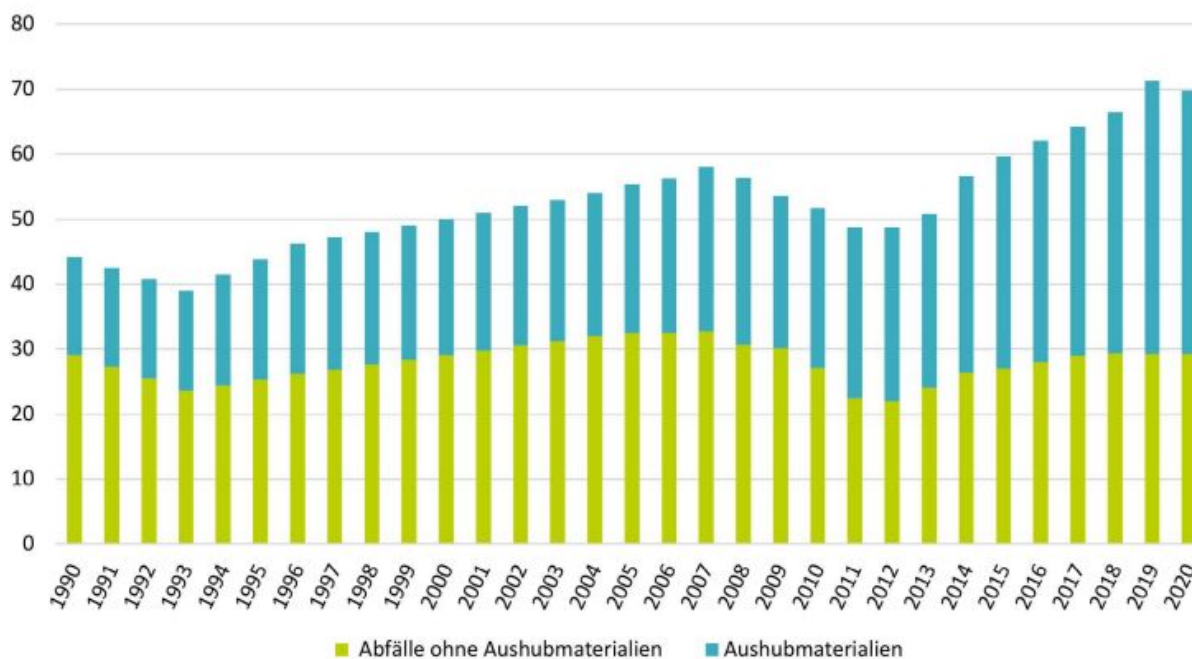


Abbildung 1: Österreichisches Gesamtabfallaufkommen in Tonnen von 1990 bis 2019
(Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2023)

Die Größte Fraktion des Abfallaufkommens, welche mehr als die Hälfte der Gesamtabfallmenge bildet, sind Aushubmaterialien (Siehe **Abbildung 2**). Im Vergleich zum Jahr 2015 sind diese um 24% gestiegen. Den größten Einfluss auf die Zunahme haben besonders große Bauvorhaben, wie

zum Beispiel dem Bau des Semmering- und Brenner-Basistunnel oder die Errichtung der Koralmbahn durch die ÖBB. Das Aufkommen der Abfälle aus Bau- und Abbruchabfällen, die nicht gefährliche mineralische Bau- und Abbruchabfälle umfasst, ist seit 2015 um 14% gestiegen und schließt auf eine vermehrte Bautätigkeit. Fasst man die Bau- und Abbruchabfälle und die Aushubmaterialien zusammen, verursacht die Baubranche somit fast dreiviertel des Gesamtabfallaufkommens in Österreich. Alle weiteren Abfallfraktionen wie die Siedlungsabfälle und Sekundärabfälle haben in den letzten Jahren ein geringeres Ausmaß gehabt (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2023).

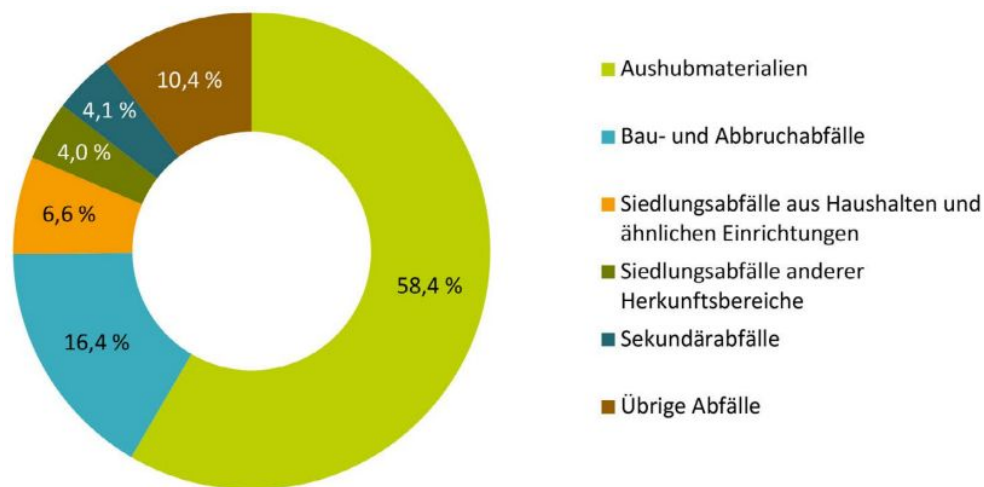


Abbildung 2: Österreichische Zusammensetzung der Gesamtabfallmenge des Jahres 2019 (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2023)

Berücksichtigt man den erwarteten Anstieg der Bevölkerung und die Zunahme des Bruttozialprodukts bis zum Jahr 2026, wird das erwartete Aufkommen an Abfällen bis zum Jahr 2026 auf rund 81 Millionen Tonnen steigen (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2023). Faktoren wie der Materialverbrauch sind hier ausschlaggebend. Das Beratungsunternehmen Ramboll hat in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung und EcoLogic Institut im Auftrag der Europäischen Umweltagentur berechnet, dass bis zu 60% der Treibhausgasemissionen, die durch den Materialeinsatz in der Bauindustrie entstehen, dank verschiedener Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen vermieden werden könnten (Den, et al., 2020).

Daher ist aus umwelttechnischer Sicht ein richtiger Umgang mit anfallenden Abfallströmen zwingend erforderlich. Um die Recyclingrate von Baustoffen zu erfassen, ist eine genaue Dokumentation der materiellen Zusammensetzung und deren Entsorgungs- und Verwertungseigenschaft erforderlich. Zu den unterschiedlichen Methoden und Verfahren für die Beurteilung der Entsorgung der Baustoffe zählen unter anderem der Entsorgungsindikator EI10.

Hierbei handelt es sich um einen vom österreichischen Institut für Baubiologie und -ökologie (IBO) entwickelten Indikator, welcher die Recyclingfähigkeit von Gebäuden und dessen Bauteile bewertet (IBO GmbH, 2020). In der Regel werden solche Evaluierungen in der Planungsphase, also vor der Errichtung des Gebäudes, erstellt und basieren daher auf Annahmen, Prognosen und Szenarien, insbesondere für die Zeit nach Inbetriebnahme des Gebäudes. Dabei werden Annahmen zur Nutzung, Nutzungsdauer, Instandsetzung sowie zu Ersatzinvestitionen, Rückbau und Entsorgung getroffen und sind eine Herausforderung für die Modell- und Datenbildung.

1.2 Motivation

Wie im vorherigen Kapitel gezeigt, ist die Baubranche gekennzeichnet durch einen hohen Material- und Energieeinsatz und verfügt über ein erhebliches Potential zur Verringerung der Umwelt- und Klimabelastung. Durch Sinnvolle Maßnahmen, wie zum Beispiel der Erhöhung der Wiederverwendung von Rohstoffen, kann der Verbrauch von Primärrohstoffen und Deponievolumen wesentlich vermindert werden. Die Abfallvermeidung steht dabei an oberster Stelle in der Abfallhierarchie (Abbildung 3). Daher steckt das größte Einsparungspotential bereits in der Planungsphase vor der Errichtung des Gebäudes. Ist eine Vermeidung von Abfallaufkommen nicht mehr möglich, sollte dieses zuerst zur Wiederverwendung vorbereitet werden, ansonsten recycelt oder wenn nicht anders möglich sonstig verwertet werden (thermische Verwertung). Die Beseitigung auf Deponien sollte, wenn möglich, vermieden werden.



Abbildung 3: Abfallvermeidung in der Abfallhierarchie gemäß EU-Abfallrahmenrichtlinie (eigene Darstellung nach (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2023))

Durch die Einführung eines geeigneten Bewertungssystems können Hersteller:innen, Planer:innen und Bauherre:innen in der Bauindustrie das Bewusstsein für die Notwendigkeit einer verbesserten Recyclingfähigkeit von Materialien schärfen. Bewertungs- und Zertifizierungssysteme können helfen, den Ressourcenverbrauch bei der Herstellung neuer Materialien zu reduzieren, indem sie die Verwendung von recycelbaren Materialien fördern. Darüber hinaus tragen Bewertungssysteme dazu bei, die Menge an Verbraucherabfällen zu reduzieren, indem sie die Trennbarkeit von Materialien für die Demontagephase bewertet. Indem eine einheitliche und transparente Methode zur Bewertung von Recyclingfähigkeit von Materialien und Konstruktionen geschaffen wird, kann die Qualität der Bewertungssysteme verbessert werden.

1.3 Ziele und Forschungsfrage der Arbeit

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, einen umfassenden Überblick über die bestehenden Bewertungsmethoden zu erstellen und diese hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit und Aussagekraft zu bewerten. Hierfür soll eine *Assessment*-Analyse der bereits bekannten Bewertungsverfahren für die *End-of-Life*-Phase (EoL-Phase) eines Gebäudes durchgeführt und hinsichtlich ihrer Einstufung zur Rückbaubarkeit und Entsorgung untersucht werden. Dabei stellt sich die Frage, welche Unterschiede sich zwischen der vom IBO entwickelten Bewertungsmethode und weiteren Bewertungssystemen ergeben und inwiefern diese Unterschiede relevant und auch umsetzbar sind. Die oben angeführte Fragestellung lässt sich in dieser Arbeit in drei Forschungsfragen zusammenfassen:

- 1) „Welche Indikatoren sind, in Österreich gängigen Bewertungsmethoden, inkludiert?“
- 2) „Welche Indikatoren sind für eine Bewertung in der *End-of-Life* Phase von Baumaterialien relevant?“
- 3) „Wie könnte eine Implementierung nicht inkludierter Indikatoren aussehen?“

2 Methodik

Als Basis zur Durchführung der empirischen Forschung wird der Forschungsstand und die Theorie kritisch betrachtet. Dabei wird nach Bewertungssystemen für die EoL-Phase gesucht und die verwendeten Ansätze und Indikatoren analysiert. Anschließend sollen die Indikatoren des Entsorgungsindikators EI10 mit denen der anderen Bewertungssystemen verglichen werden und eine mögliche Implementierung fehlender und relevanter Indikatoren im EI10 aufgezeigt werden. Die ausgewählten Indikatoren werden im empirischen Teil, im Rahmen von Expert:inneninterviews, vorgestellt und von den interviewten Personen bewertet. Das Ziel der empirischen Forschung ist es, die Relevanz der erweiterten Indikatoren für die Praxis festzustellen und die Möglichkeit zur Implementierung in den EI10 zu überprüfen. Mittels der qualitativen Inhaltsanalyse nach Mayring (Mayring, 2015) wird das Datenmaterial inhaltlich verdichtet, Zusammenhänge entwickelt und die Theorie untermauert. Abschließend werden die vorgestellten Indikatoren in einem Fallbeispiel erprobt, um eine Implementierung nicht inkludierter Indikatoren darzustellen. Die für die Auswertung notwendigen Formeln und Daten wurden in Excel eingetragen und berechnet. Die Ergebnisse der theoretischen und empirischen Forschung sollen die Forschungsfragen beantworten und darauf basierend Hypothesen für zukünftige Forschungsarbeiten ableiten.

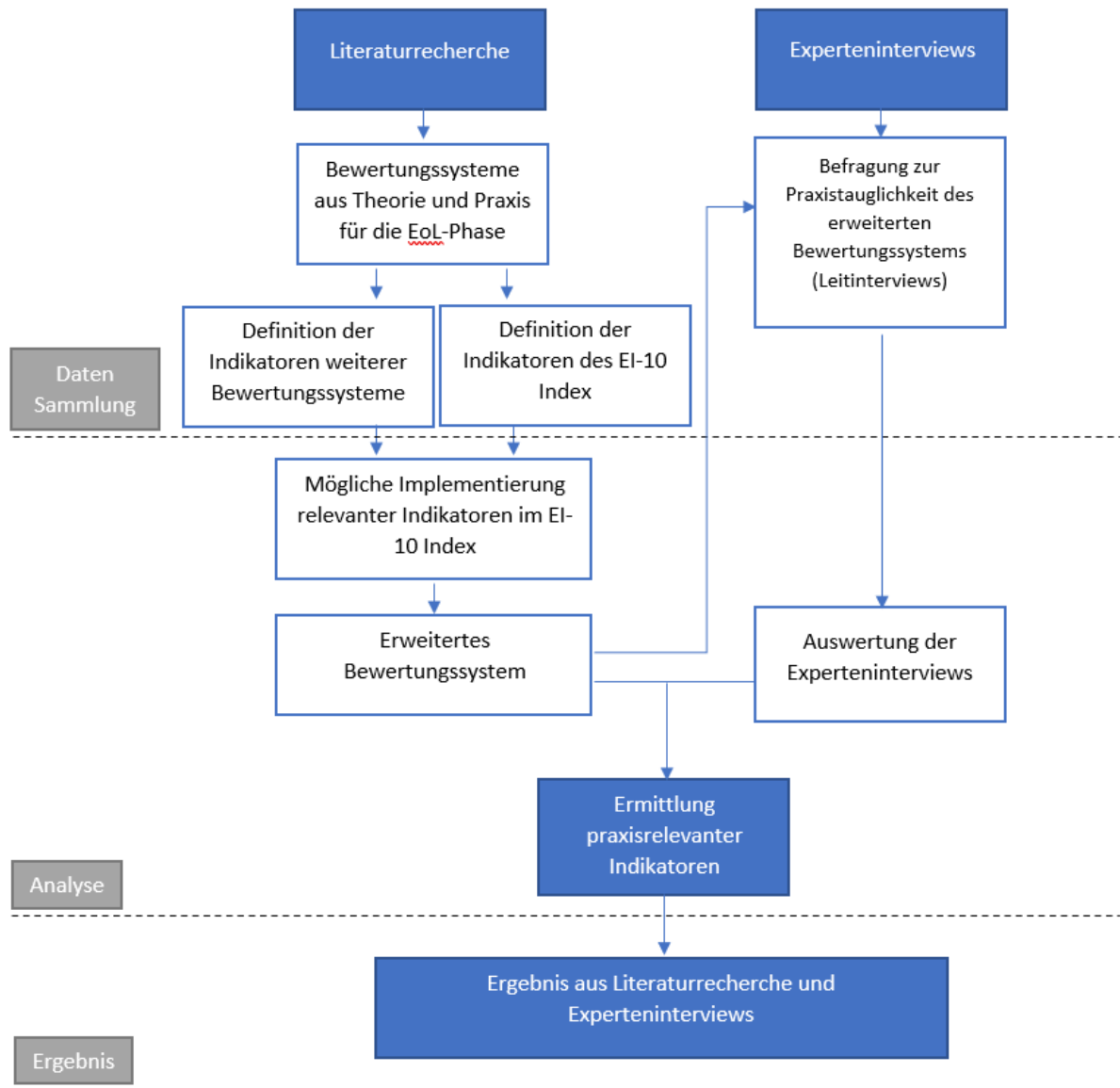


Abbildung 4: Diagramm des Forschungsablaufs - Forschungsdesign (eigene Darstellung)

2.1 Expert:inneninterviews

Für die empirische Untersuchung dieser Masterarbeit wurde ein qualitativer Ansatz in Form von qualitativen Expert:inneninterviews gewählt. Eine Übersicht der befragten Personen wird in Tabelle 9 angeführt.

Die Methodenwahl wurde gewählt, weil die Interviewmethode einen offenen und umfassenden Zugang zum Forschungsgebiet erlaubt und die individuellen Perspektiven der Befragten untersucht werden können. (Reinders, 2022)

Es wurden Personen, die Bewertungsmethoden und Zertifizierungssysteme nutzen, nach ihrer Einschätzung zur Sinnhaftigkeit und Umsetzbarkeit ausgewählter Indikatoren befragt. Die Expert:innen sollten über Erfahrung in der Bewertung und Zertifizierung von Gebäuden verfügen.

Für die Auswertung wird die qualitative Inhaltsanalyse nach Mayring angewendet. Diese Methode erlaubt eine strukturierte Auswertung und Interpretation umfangreicher Materialien

um bestimmte Aspekte der Kommunikation zu analysieren und Schlussfolgerungen daraus zu ziehen.

3 Grundlagen

3.1 Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden

Der Begriff der Nachhaltigkeit stammt ursprünglich aus der Forstwirtschaft und meinte eine Waldbewirtschaftung, die den Bestand erhält und somit eine dauerhafte wirtschaftliche Nutzung ermöglicht. (Görge & Wendt, 2015)

Erst später wurde dieser Begriff in die internationale Umwelt- und Entwicklungspolitik eingeführt. Das Drei-Säulen-Modell dient als Maßstab aus dem sich eine Leitlinie für nachhaltiges Handeln ableiten lassen. Das Modell beschreibt die drei Säulen der Ökologie, Soziales und Ökonomie und zielt darauf ab die Leistungsfähigkeit einer Gesellschaft sicherzustellen und zu verbessern. Dabei werden alle drei Säulen als gleichgewichtet und gleichrangig betrachtet. Jedoch wirft die Gleichstellung der drei Säulen die Frage auf, welche Bedeutung und Gewichtung den jeweiligen Säulen im Falle eines Zielkonfliktes zukommt. In der Praxis ist der Fokus auf der ökonomischen Säule meistens üblich. Für eine starke Nachhaltigkeit sollte das Ziel der ökologischen Nachhaltigkeit eine größere Gewichtung erhalten, da diese Voraussetzung für die Lebensbedingungen unserer Umwelt und somit auch Grundlage für den ökonomischen und sozialen Handlungsraum ist. In **Abbildung 5** wird das Modell als weiterentwickeltes Vorrangmodell vorgestellt. Das Vorrangmodell stellt diese Gewichtung her und positioniert die ökologische Nachhaltigkeit als Basis der anderen Säulen. Die Säule der sozialen Nachhaltigkeit wird an zweiter Stelle in der Gewichtung betrachtet. Erst wenn ökologische und soziale Nachhaltigkeit vorausgesetzt sind, können die Ziele der ökonomischen Nachhaltigkeit angestrebt werden. (Schanz, 2022)



Abbildung 5: Die drei Säulen der Nachhaltigkeit – Vorrangmodell (Müller, 2014)

Auch im Bauwesen hat das Thema Nachhaltigkeit seit längerem Einzug gehalten. Um Glaubwürdigkeit und Objektivität zu gewährleisten, basiert die Nachhaltigkeitsbewertung hauptsächlich auf quantitativen Basiskriterien, die in vier Kategorien eingeteilt werden:

ökologische Qualität, ökonomische Qualität, soziale und funktionale Qualität und technische Qualität. Die Nachhaltigkeit der untersuchten Objekte wird durch ein spezielles Zertifikat mit dem jeweiligen Label belegt. Die Bewertung einzelner Kriterien sollte, soweit möglich und sinnvoll, auf quantitativen Werten beruhen, um Willkür und Manipulation von Ergebnissen auszuschließen. (Grabner & Lützkendorf, 2008)

Auf das Thema der Gebäudezertifizierung in der *End-of-Life*-Phase wird im Kapitel 3.5 näher eingegangen.

3.2 Politische Initiativen auf nationaler und internationaler Ebene

3.2.1 UN-Entwicklungsziele – Sustainable Development Goals (SDGs)

Die Ziele für nachhaltige Entwicklung (englisch: Sustainable Development Goals) sind politische Zielsetzungen der Vereinten Nation (UN) um die nachhaltige Entwicklung auf ökologischer, sozialer und ökonomischer Ebene sicherzustellen. Konkret handelt es sich um 17 Hauptziele, welche durch weitere Unterziele erläutert werden. Bedenkt man, dass das Errichten von Gebäuden viele natürliche Ressourcen wie Fläche, Rohstoffe, Wasser und Energie verbraucht, ist es verständlich, warum der Bausektor besonders stark von den nachhaltigen Entwicklungszielen betroffen ist. Bestehende Gebäude sind heute zu einem Großteil für die CO₂ Emissionen verantwortlich und oftmals werden Gebäude am Ende ihrer Lebensdauer abgerissen, wodurch das anthropogene Lager immer weiterwächst. Bezogen auf die Nachhaltigkeitsziele können je nach Bauprojekt, bis zu 15 der 17 SDGs zutreffen. (DGNB GmbH, 2020)

3.2.2 Aktionspläne zur Kreislaufwirtschaft der Europäischen Union

Die Europäische Kommission hat im Dezember 2015 den Aktionsplan *Den Kreislauf schließen – Ein Aktionsplan der EU für die Kreislaufwirtschaft* (Europäische Kommission, 2015) verabschiedet. Dieser hat das Ziel, die Kreislaufwirtschaft und die globale Wettbewerbsfähigkeit der EU zu steigern sowie die Produktlebenszyklen durch ein verstärktes Recycling und Wiederverwenden zu schließen. Im März 2020 wurde ein weiterer Aktionsplan vorgelegt. Der Kreislaufwirtschafts-Aktionsplan *Für ein sauberes und wettbewerbsfähigeres Europa* (Europäische Kommission, 2020) dient als Fahrplan zur Erreichung der Klimaneutralitätsziele. Im Aktionsplan werden bestimmte Produktwertschöpfungsgruppen vorrangig behandelt, wobei die Gruppe *Bau- und Abbruchabfälle* eines davon darstellt. Diese Gruppen weisen einen großen Ressourcenverbrauch auf und haben daher ein hohes Kreislaufpotential.

3.2.3 EU-Taxonomie-Verordnung

Um die Klima- und Energieziele der EU zu erreichen, müssen Investitionen auf nachhaltige Projekte und Aktivitäten ausgerichtet werden. Daher ist es notwendig, den Begriff *nachhaltig* klar zu definieren. Zu diesem Zweck wurde die EU-Taxonomie-Verordnung geschaffen. Es ist ein

allgemeines Klassifizierungssystem für nachhaltiges Wirtschaften. Somit gilt eine Investition in Europa als nachhaltig, wenn sie eines der folgenden sechs Ziele erfüllt:

- Klimaschutz
- Klimawandelanpassung
- Nachhaltige Nutzung und Schutz von Wasser- und Meeresressourcen
- Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft
- Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung
- Schutz und Wiederherstellung der Biodiversität und der Ökosysteme
(Publications Office of the European Union, 2020)

Inwieweit Finanzprodukte der Taxonomie entsprechen, und den Anspruch erheben können, *ökologisch nachhaltig* zu sein, muss anhand eines Bewertungssystems überprüft werden. Beurteilt wird, ob das Finanzprodukt einen wesentlichen, positiven Beitrag zu mindestens einem der sechs Umweltziele leistet. Eines der Ziele ist die Wiederverwendbarkeit des Finanzprodukts. Bei Immobilien bedeutet das, dass die Abfallmenge, die im Bau- und Abbruchprozess anfällt, so weit wie möglich reduziert wird und mindestens 70 % der Abfälle aus dem Abbruch in den Kreislauf zurückgeführt werden muss. Außerdem dürfen Baustoffe und Bauteile keine Schadstoffe enthalten. Diese neuen Marktmechanismen werden zwangsläufig zur Entstehung oder Erweiterung bestehender Geschäftsmodelle für einzelne Bauprodukte oder ganzer Gebäude führen, die den Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft ermöglichen oder unterstützen. Schon jetzt ist absehbar, dass Immobilien, die nicht der EU-Taxonomie entsprechen, also nach dem Klassifizierungssystem nicht berechtigt sind, als *umweltverträglich* eingestuft zu werden, am Markt finanziell benachteiligt werden. Finanzmarktteilnehmer berichten von ungünstigen Kreditkonditionen für die Kreditfinanzierung bis hin zu einem Rückgang des Verkaufspreises von Immobilien, aufgrund geringerer Nachfrage nach nicht-nachhaltigen Immobilien. (IG Lebenszyklus Bau, 2021)

3.2.4 Österreichisches Regierungsprogramm 2020-2024

Das österreichische Regierungsprogramm widmet sich dem Schutz der Umwelt, der Bekämpfung der Klimakrise und der Stärkung der Nachhaltigkeit. Im Sinne der Abfallwirtschaft setzt es unter anderem Schwerpunkte im Bereich schadstoffarmer Materialkreisläufe, der Wiederverwendung und Reparatur von Produkten sowie dem nachhaltigen und energiesparenden Bauen. (Bundeskanzleramt Österreich, 2020)

3.2.5 Abfallvermeidungsprogramm

Das Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie veröffentlicht mindestens alle sechs Jahre einen Bundes-Abfallwirtschaftsplan (BAWP), der sich in drei Teile gliedert. Im dritten Teil wird das Abfallvermeidungsprogramm vorgestellt, um daraus konkrete Maßnahmen, Strategien und Programme abzuleiten. Hier wird die Notwendigkeit für die Entwicklung von Vermeidungsstrategien von Bau- und Abbruchabfällen vor allem durch die großen Umweltauswirkungen und Beeinträchtigung des Landschaftsbildes, des hohen Material- und Energieverbrauchs für die Herstellung von Baustoffen und des mangelnden Bewusstseins, dass bereits in der Planungsphase eines Gebäudes die Kreislaufschließung mitzudenken ist, gesehen. Das Abfallvermeidungsprogramm befasst sich mit den folgenden Problemen, die eine wachsende Herausforderung für Bau- und Abbruchabfälle darstellen:

- Die Lebensdauer von Gebäuden birgt ungenutzte Potentiale, weil eine mögliche Lebensverlängerung dazu führen kann, das Abfallaufkommen zu vermeiden. Beispielsweise kann man Gebäude umwidmen, um ihnen eine andere Funktion zu geben (z.B. Umbau einer Fabrikhalle zu Lofts).
- Im Bauwesen fallen nicht nur schwere Baustoffe an, sondern auch leichte, wie zum Beispiel Dämmstoffe, welche großvolumig sind. Wird ausschließlich die Masse berücksichtigt werden die Effekte von voluminösen Bauteilen unterschätzt - z.B. Deponievolumen.
- Baumaterialien enthalten oft Zusätze (z.B. Kunststofffasern in Estrich) oder auch gefährliche Stoffe. Die Kenntnis der genauen Zusammensetzung von Baumaterialien ist notwendig für die Wiederverwendung.
- Bauteile sind selten in reiner Form vorhanden. Jedoch sollte der Einsatz von schwer trennbaren Materialverbunden vermieden werden. Erreicht ein Bauteil sein Lebensende, muss die Auftrennung des Materialverbundes leicht möglich sein, weil nur reine Materialien wieder in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden können.

Eine Verringerung des Abfallaufkommens und eine Verbesserung der Qualität der Baurestmassen soll durch die Erhöhung der Materialeffizienz der Bauwerke und eine Verringerung des Materialeinsatzes erreicht werden. Folgende Indikatoren werden vom Abfallvermeidungsprogramm für die Evaluierung der Maßnahmen herangezogen:

- Gesamtabfallaufkommen im Bausektor im Verhältnis zur preisbereinigten Bruttowertschöpfung im Bausektor [kg/100€]
- Masse der wiederverwendeten Baumaterialien und Produkte [t/a]
- Recyclingrate der Bau- und Abbruchabfälle (exkl. Aushubmaterial) [%].

- (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2023)

3.3 Beseitigung und Verwertung von Abfällen in Österreich

Die **Abbildung 6** zeigt inwiefern das Gesamtabfallaufkommen in Österreich für das Jahr 2020 Verwertet bzw. Beseitigt wird (Basis 69,81 Millionen Tonnen). Der größte Anteil der Abfallströme wird immer noch deponiert, wobei sich der Großteil aus Aushubmaterial zusammensetzt (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2023)

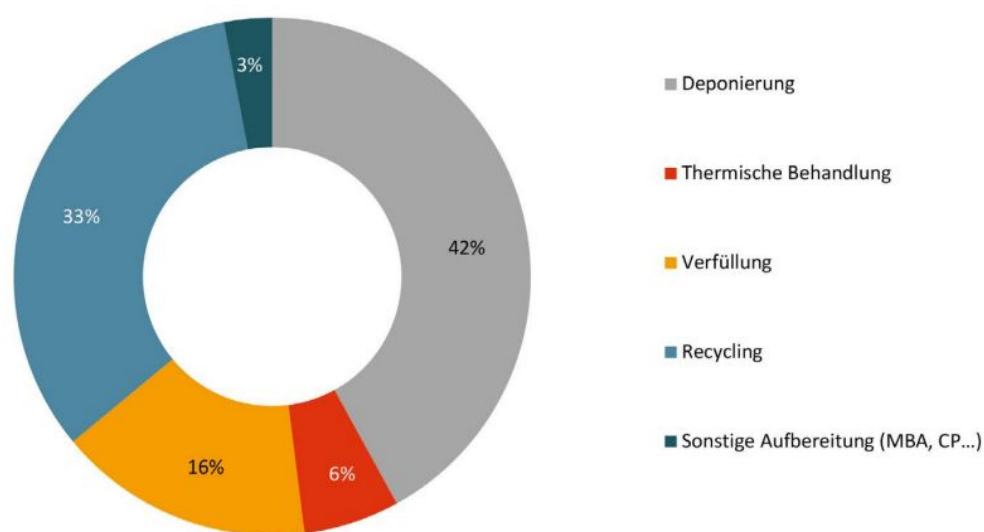


Abbildung 6: Verwertung und Beseitigung von Abfällen im Jahr 2019 in Österreich mit Aushubmaterial (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2023)

Berücksichtigt man die Abfallströme ohne Aushubmaterial so zeigt sich eine höhere Recyclingrate von 67%. (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2023)

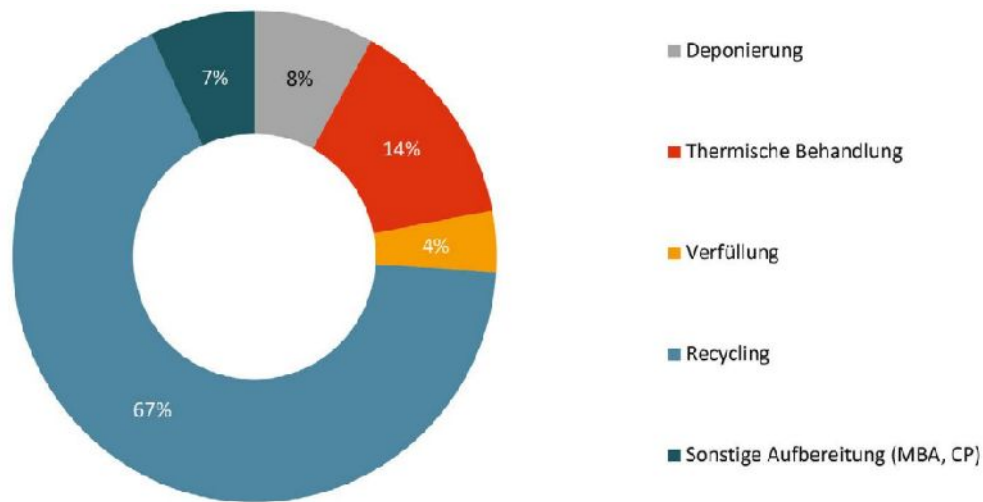


Abbildung 7: Verwertung und Beseitigung von Abfällen im Jahr 2019 in Österreich ohne Aushubmaterial (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2023)

Aus umweltpolitischer Sicht spielen Bau- und Abbruchabfälle aufgrund des großen Materialverbrauchs eine besonders große Rolle. Baurestmassen entstehen zu 90% beim Abbruch, Umbau oder der Sanierung von Bauwerken und zu 10% bei der Errichtung neuer Bauwerke. Obwohl die meisten (mineralischen) Bau- und Abbruchabfälle recycelbar sind, ist das Vertrauen in die Qualität der resultierenden recycelten Materialien gering. Auch die ökonomische Situation (z.B. der Preis von Rohstoffen) kann ein Hindernis für Recycling und Wiederverwendung darstellen. (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2023)

3.4 Circular Economy

Die **Abbildung 8** vergleicht die Entwicklung des Pro-Kopf Abfallaufkommens in Österreich (ohne Aushubmaterial) in kg/Einwohner mit dem Bruttoinlandsprodukt in €/Einwohner. Das BIP und das Abfallaufkommen zeigten aufgrund der Wirtschaftskrise im Jahr 2008 einen deutlichen Rückgang, welcher bis 2012 anhielt. Seit 2012 haben beide Indikatoren wieder zugenommen, jedoch zeigt sich im Vergleich zu den Vorjahren eine Entkoppelung des Abfallaufkommens (+5,3%) vom BIP (+12,3%), was auf die verstärkten Anstrengungen im Bereich der Abfall- und Kreislaufwirtschaft zurückzuführen ist. Aufgrund der Covid-19-Pandemie sind sowohl die Abfallmenge (-2%) als auch das Bruttoinlandsprodukt (-5%) im Jahr 2020 im Vergleich zum Vorjahr zurückgegangen. (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2023)

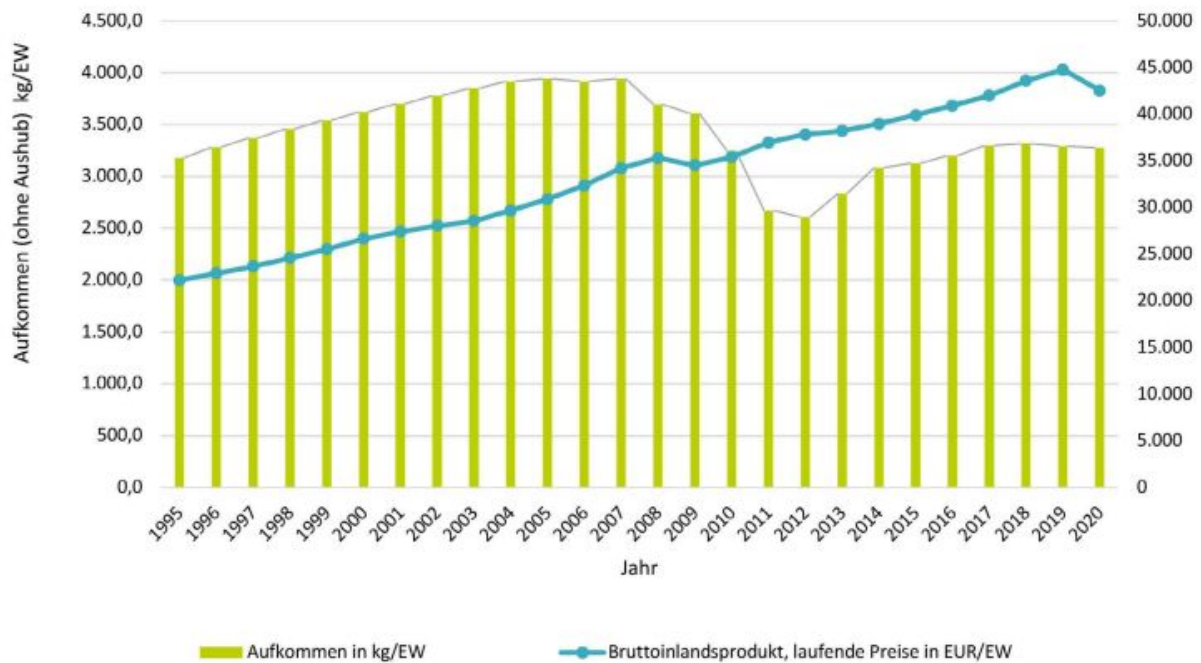


Abbildung 8: Pro-Kopf Abfallaufkommen in Österreich (Massen ohne Aushubmaterialien) im Vergleich mit Bruttoinlandsprodukt 1995-2020 (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2023)

Die Kreislaufwirtschaft (englisch: *circular economy*) beschreibt ein regeneratives System, wodurch der Ressourceneinsatz und die Abfallproduktion minimiert wird und dadurch Emissionen und Energieverbrauch verringert werden. Dahinter steckt das Kernprinzip des *Cradle-to-Cradle*, (dt.: von der Wiege zur Wiege). Das Konzept beschreibt den Ansatz, einen geschlossenen Kreislauf stattfinden zu lassen, wodurch Materialien immer weiterverwendet bzw. weiterverwertet werden und dadurch eine abfallfreie Wirtschaft ermöglicht wird. Im Gegenzug dazu steht die Linearwirtschaft, bei der die Materialien aus der Natur entnommen, zu Produkten verarbeitet, in den Gebäuden eingebaut und am Ende als Abfallprodukt entsorgt und auf Deponien gelagert oder verbrannt werden. Die Linearwirtschaft ist gekennzeichnet durch eine Umweltbelastung, Ressourcenerschöpfung, Verlust von Lebensraum und Energieverbrauch. Da natürliche Ressourcen nicht endlos zur Verfügung stehen, stößt dieses System zunehmend an seine Grenzen. (Durán, Lemaitre, & Braune, 2019)

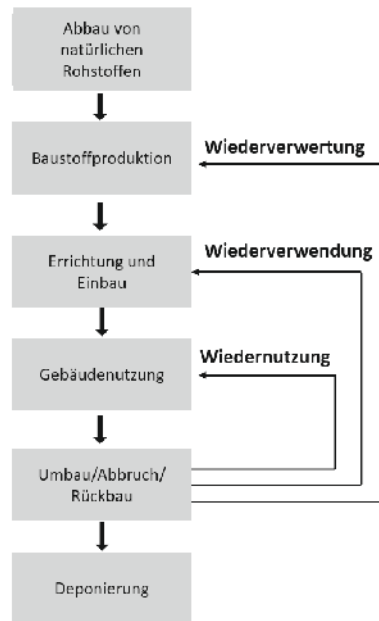


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Kreislaufwirtschaft in der Baubranche (eigene Abbildung nach (Crowther, 2005))

Befindet sich ein Gebäude am Ende seiner Lebensdauer, muss es nicht zwangsläufig abgebrochen und entsorgt werden, denn im Gebäude befinden sich viele Materialien, die dem Materialkreislauf zurückgeführt werden können. Ein besseres Szenario wäre es, das Gebäude selektiv Rückzubauen und dessen unbeschädigten Bauteile entweder als ganze Elemente in einem anderen Gebäude einzubauen, wie es bei Fertigteilelementen in Modulbauweise möglich wäre, oder das Bauteil zu zerlegen und dessen Stoffe für die Baustoffproduktion wiederzuverwenden. Beide Szenarien verringern den Verbrauch von Primärrohstoffen, jedoch wird beim Wiederverwenden von ganzen Bauteilen sogar jene Energie eingespart, die für die Zerlegung des ursprünglichen Elementes und Herstellung des neuen Elementes notwendig wäre (IG Lebenszyklus Bau, 2021). Ein Beispiel dafür ist, dass das Schmelzen alter Stahlprofile und die anschließende Herstellung neuer Stahlträger mehr Energie verbraucht als die direkte Wiederverwendung der alten Stahlelemente. Eine wichtige Voraussetzung für die Wiederverwendung von Bauteilen ist, dass sie sich einfach und zerstörungsfrei aus dem Gebäude herauslösen lassen. Im Sinne der ökologischen Nachhaltigkeit, ist das bestmögliche Szenario, ein Gebäude über seine geplante Lebens- oder Nutzungsdauer zu erhalten. Dadurch wird das Entstehen von Abfallprodukten vermieden und sollte immer die erste Wahl bei der Abfallvermeidungsstrategie sein (vgl. **Abbildung 3**). Eine kürzere Nutzungsdauer entsteht, wenn sich die Anforderungen in der Nutzung an ein Gebäude mit der Zeit ändert und unter anderem auch Leerstand zur Folge hat. Um den sich über die Zeit ändernden Anforderungen nachzukommen, sollten Neubauprojekte flexibel und nutzungsneutral geplant werden, sodass eine vielseitige Verwendung möglich ist. Was heute ein Büro ist, ist morgen ein Hotel und anschließend ein Wohngebäude. Grundlage hierfür sind ausreichende Raumhöhen, flexible

Grundrisse und geplante Anschlüsse. Die Nutzungsintensität kann durch unterschiedliche Einsatzmöglichkeiten gesteigert und die Lebensdauer durch hohe Reparaturfreundlichkeit maximiert werden. (Durán, Lemaitre, & Braune, 2019)

3.5 Zertifizierungen für die *End-of-Life-Phase*

Gebäudenachhaltigkeitszertifikate haben in den letzten Jahren eine zunehmende Marktposition eingenommen. Grundsätzlich hat die Zertifizierung eine qualitätssichernde Funktion und kann als ökologisches und ökonomisches Optimierungsinstrument dienen. Auf diese Weise ermöglichen sie allen am Recycling Beteiligten, bestimmte Eigenschaften als gegeben vorauszusetzen, ohne sie näher zu prüfen. Qualitätsstandards lassen sich problemlos zwischen den Beteiligten durch Bezugnahme auf Zertifikate vereinbaren. Investor:innen können zeitsparend Qualitäten bestellen, von privaten Bauherrenschaften bis hin zu Ausschreibungen der öffentlichen Hand. Planende erhalten bereits in der frühen Gebäudeplanung klare Anweisungen zu den notwendigen Schritten für eine optimierte Kreislaufwirtschaft. Herstellende profitieren von der Listung ihrer Produkte. Dem Facilitymanagement wird eine gute Basis für eine kontinuierliche, kreislaufoptimierte Gebäudeerhaltung zur Verfügung gestellt. Rückbauunternehmen können die Preise entsprechend anpassen. Der Gesetzgeber kann aktiv an den Lenkungsinstrumenten entsprechende Anpassungen vornehmen. (IG Lebenszyklus Bau, 2021)

Gebäudezertifizierungen enthalten einen Katalog zur Definition von Kriterien zur Qualitätsmessung. Dabei werden Zielwerte bestimmt, welche Mindestanforderungen beschreiben und auf einer Skala eingeordnet. Für jedes Kriterium ist ein Nachweis durch die Sammlung objektiver Informationen über das Gebäude zu erbringen. Nach abschließender Bewertung der Ergebnisse anhand vorhandener Wertvorstellungen wird eine Auszeichnung in verschiedenen Qualitätsstufen vergeben (z.B. Bronze, Silber Gold). In den nachfolgenden Kapiteln werden die wichtigsten deutschsprachigen sowie internationale Zertifizierungssysteme vorgestellt.

3.5.1 Klima:aktiv

Klima:aktiv ist eine Klimaschutzinitiative des österreichischen Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität und Technologie. Das entwickelte Bewertungsverfahren umfasst die Bewertungskategorien Standort (bis 150 Qualitätspunkte), Energie und Versorgung (bis 550 Qualitätspunkte), Baustoffe und Konstruktion (bis 150 Qualitätspunkte) sowie Komfort und Gesundheit (bis zu 150 Qualitätspunkte). Neben den frei wählbaren Kriterien gibt es auch Pflichtkriterien, die sogenannten *klima:aktiv Basiskriterien*, die in jedem Fall erfüllt werden müssen. Dazu gehören Primärenergiebedarf, CO₂-Emissionen, klimaschädliche Materialien und Lebenszykluskosten-Berechnungen. Die ökologischen Aspekte bezogen auf die Abfallwirtschaft werden in der Bewertungskategorie Baustoffe und Konstruktion beschrieben. Thematisiert wird die Ausschließung von klimaschädlichen Stoffen, die Vermeidung von Baustoffen, die in einer oder

mehreren Phasen ihres Lebenszyklus Schwächen aufweisen (z.B. PVC) und die Förderung der Verwendung von Baustoffen mit herausragenden ökologischen Eigenschaften über den gesamten Lebenszyklus (Baustoffe mit Umweltzeichen). Weiters wird das Vorhandensein einer Ökobilanzrechnung gefordert und stellt ein Pflichtkriterium dar. Für die Bilanzgrenze (BG) kann alternativ statt des gesamten Gebäudes (BG 3) auch die thermische Gebäudehülle inklusive Geschosdecken (BG1) gewählt werden. Dadurch werden Austauschzyklen jedoch nicht mehr berücksichtigt. Die Bewertung mittels Entsorgungsindikator EI10 wird ebenfalls belohnt, ist allerdings kein Pflichtkriterium. Einen positiven Einfluss auf die Bewertung hat die Durchführung eines Rückbau- und Verwertungskonzepts, welches die Abfallvermeidungsstrategie in der Abfallhierarchie aus Abbildung 3 verfolgt. Auch die Dokumentation mit BIM wirkt sich hierbei positiv auf die Bewertung aus. (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2020)

3.5.2 Total Quality Building (TQB)

Das *Total Quality Building* (TQB) ist ein österreichisches Gebäudelabel, welches von der ÖGNB (Österreichische Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen) entwickelt wurde. 2010 wurde TQB mit anderen auf dem österreichischen Markt eingeführten Gebäudebewertungssystemen harmonisiert (IBO Ökopass und klima:aktiv) und an internationale Trends angepasst. Die in einem Planungs- oder Errichtungszertifikat festgehaltenen Ergebnisse machen die Gebäudequalität sichtbar und vergleichbar und bieten Vermarktungs- und Sicherheitsvorteile in Bezug auf vereinbarte Qualitätsmerkmale. Die Kriterien werden 5 Kategorien mit jeweils 200 Bewertungspunkten und somit auf einem 1.000-Punkte-System zugeordnet. Anders als bei klimaaktiv, haben alle Kategorien die gleiche Gewichtung und es gibt keine verpflichtenden Kriterien, die für eine positive Bewertung erfüllt sein müssen. (Grim & Leutgöb, 2012)

Das Kriterium *Ressourceneffizienz* behandelt die ökologischen Aspekte von Gebäuden von der Produktion bis zur Entsorgung und bevorzugt die Vermeidung kritischer Materialien (HFKW, PVC, SVHC, VOC) sowie lokale und zertifizierte Bauprodukte. Für die Beurteilung der Verwendung von Recyclingmaterialien wird eine Staffelung eingeführt. Werden über 25% der Massenanteile als recycelte Materialien verwendet, wird die höchste Punktevergabe vergeben. Beim Verzicht von der Verwendung von recycelten Materialien werden keine Punkte vergeben. Weiters wird untersucht, wie viele umweltzertifizierte Produkte in mehr als 80% der verbauten Fläche sich befinden. Ein Nachweis der Ökobilanz des Gesamtgebäudes und des Entsorgungspotentials durch den Entsorgungsindikator EI10 wirkt sich positiv auf die Bewertung aus. Das TQB-Bewertungsverfahren bezieht sich auf die Bilanzgrenze BG3. Damit wird neben der Erstkonstruktion auch die Nutzungsdauer der einzelnen Schichten über die Gebäudelebensdauer und die damit verbundenen notwendigen Sanierungs- und Instandhaltungszyklen berücksichtigt.

Als normierter Betrachtungszeitraum werden gemäß EN15804 100 Jahre angenommen. (Österreichische Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen, 2018)

3.5.3 DGNB/ÖGNI

Seit Januar 2009 gibt es eine Auszeichnung für die Nachhaltigkeit von Bauwerken in Deutschland. Es ist ein gemeinsames Projekt des damaligen Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung und der 2007 gegründeten Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB). Die Entwicklung eines deutschen Zertifikats soll die Lücken im bestehenden System schließen und weitere Qualitätsstandards einführen, die auch deutsche Normen und Vorschriften berücksichtigen. In Österreich wird dieses Bewertungsverfahren von der Österreichischen Gesellschaft für nachhaltige Immobilienwirtschaft (ÖGNI) angeboten und vertrieben. (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e.V., 2023)

Das eigens Entwickelte Bewertungssystem gliedert sich in den Bewertungskategorien Ökologie, Ökonomie, soziale und funktionale Aspekte, Technik, Prozesse und Standortqualität. Die Kategorien enthalten verschieden Kriterien, deren Erfüllung zu einer Punktevergabe führt. Das DGNB-System gewichtet jedes der ersten vier Kriterien mit 22,5% in der Gesamtnote. Die restlichen 10 % entfallen auf die Prozessqualität. Die Standortqualität wird separat bewertet und fließt nicht in die Gesamtbewertung ein. Zur Bewertung jedes Kriteriums werden messbare Indikatoren ermittelt. Zielwerte für diese Indikatoren unterscheiden sich je nach Gebäudetyp und werden mit einem speziell entwickelten Berechnungstool über den Lebenszyklus des Gebäudes ermittelt. (Grim & Leutgöb, 2012)

In Bezug auf die Kreislauffähigkeit berücksichtigt das DGNB-System den erfolgreichen Einsatz von wiederverwendeten Bauteilen, den Erhalt von Baumaterialien sowie die voraussichtliche zukünftige Wiederverwendbarkeit. Die Rückbau- und Recyclingfreundlichkeit eines Gebäudes wird durch den Anteil von rückbau- bzw. recyclingfreundlichen Bauteilen, bezogen auf die jeweilige Bezugsgrößenanteile, definiert. Das Bewertungssystem TEC 1.6, welches die Recyclingfähigkeit von Bauteilen am Ende ihrer Nutzungsdauer über zwei Indikatoren beschreibt, wird im Kapitel 4.6 genauer vorgestellt. (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e.V., 2018)

3.5.4 BNB

Das Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) wurde vom deutschen Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit und dem Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) entwickelt. Während das DGNB primär eine privatwirtschaftliche Zertifizierung ist, wird das BNB als ein Bewertungssystem für den öffentlichen Bereich angesehen. Die Bewertungsgrundsätze und -methoden werden überwiegend für Gebäude in Deutschland auf Basis der aktuellen Regelwerke entwickelt. Für ausgewählte Gebäude werden Varianten des Bewertungssystem vorgehalten, die die gleichen Kriterien betrachten, jedoch auf den besonderen

Nutzungsbedingungen angepasst sind. Die Systemvarianten sind für Büro- und Verwaltungsgebäude, Unterrichtsgebäude, Laborgebäude und Außenanlagen vorgesehen. (Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, 2023)

Die Anforderungen an das Gebäude sind in sechs Hauptkriteriengruppen unterteilt, wobei die eigentliche Bewertung der Qualität des Gebäudes und des Prozesses auf der Ebene der Einzelkriterien in Steckbriefen beschrieben werden. Die Bewertungskriterien definieren für jeden Steckbrief einen Zielwert (bis zu 100 Punkte), einen Referenzwert (50 Punkte) und einen Grenzwert (10 Punkte), wobei die Einhaltung mindestens des Grenzwerts immer nachgewiesen werden sollte, um zur Zertifizierung zu gelangen. (Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, 2023)

Im Kriteriensteckbrief 4.1.4 (Rückbau, Trennung und Verwertung) wird der Beitrag zur Kreislaufführung von Baustoffen beurteilt und in Kapitel 4.5 näher erläutert.

3.5.5 BREEAM

BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) wurde 1990 in Großbritannien entwickelt und ist das älteste Zertifizierungssystem für nachhaltige Gebäude. BREEAM vergibt das Gütesiegel in sechs Abstufungen basierend auf einem einfachen Punktesystem in verschiedenen Bewertungskategorien. Dabei werden Auswirkungen auf globaler, regionaler, lokaler und innenräumlicher Ebene berücksichtigt. Das Zertifikat wird basierend auf der Anzahl der erreichten Punkte vergeben. (Grim & Leutgöb, 2012)

Die Bewertungskategorien *Materialien* und *Abfall* enthalten Kriterien, die sich auf die Bewertung in der EoL-Phase beziehen. Die erste Kategorie fördert Maßnahmen zur Verringerung der Auswirkungen von Baumaterialien durch Design, Konstruktion, Wartung und Reparatur. In diesem Abschnitt geht es hauptsächlich um die Beschaffung von Materialien, die verantwortungsbewusst bezogen werden und eine geringere Auswirkung auf die Umwelt haben, um ihre Lebensdauer zu erhöhen. Als Nachweis wird eine Ökobilanz, Angaben zu Umweltproduktdeklarationen nach EN15804, ISO14025 oder ISO21930 und Nachweise zu nachhaltigen Produkten in Bezug auf wiederverwendete Materialien (z.B. FSC) gefordert. Die Höhe der Punktevergabe für die Ökobilanz hängt von der Qualität der Berechnungsmethode, der Datengrundlage und den in der Beurteilung ausgewählten Umfang ab. (BRE Global, 2021)

In der Bewertungskategorie *Abfall* werden Kategorien zur Förderung der nachhaltigen Bewirtschaftung von Bau- und Betriebsabfällen und Abfällen durch zukünftige Instandhaltung und Reparaturen im Zusammenhang mit Gebäudestrukturen behandelt. Die Themen in diesem Abschnitt zielen darauf ab, die durch den Bau und Betrieb von Gebäuden erzeugten Abfälle zu reduzieren und die Abkehr von Deponien zu erleichtern, indem gute Planungs- und Baupraktiken gefördert werden. Als Indikatoren werden hier unter anderem Raten der nicht deponierten Abfälle und recycelten Abfälle hergenommen. (BRE Global, 2021)

3.5.6 LEED

Zur Klassifizierung nachhaltiger Gebäude wurde in Anlehnung an das britische Zertifizierungssystem BREEAM das US-amerikanische System LEED (= Leadership in Energy and Environmental Design) entwickelt. Im Bewertungssystemen werden Gebäude nach individuellen Kriterien mit Punkten bewertet und die in jeder Kategorie erzielten Punkte werden zur Gesamtpunktzahl addiert. Je höher die Gesamtpunktzahl, desto höher die Zertifizierungsstufe. (Grim & Leutgöb, 2012)

Für die Bewertung der EoL-Phase wird die Bewertungskategorie *Materials and Resources* herangenommen. Ähnlich wie bei BREEAM wird die Durchführung von Ökobilanzberechnungen und das Vorlegen von EPDs berücksichtigt und positiv bewertet. Werden bei Bestandsgebäuden möglichst viele Bauteile wiederverwendet, trägt das ebenfalls zu einer positiven Bewertung bei. (U.S. Green Building Council, 2022)

4 Literaturrecherche der Bewertungsmethoden für die *End-of-Life-Phase*

In diesem Kapitel werden verschiedene Bewertungsmethoden und Modelle vorgestellt, welche sich tiefer mit der *End-of-life Phase* (EoL) von Gebäuden auseinandersetzen. Dabei wird zunächst der Modellansatz beschrieben und die Methodik für die Beurteilung untersucht. Anschließend werden die Methoden miteinander verglichen und die verwendeten Indikatoren aufgezeigt. In der **Tabelle 1** werden die untersuchten Bewertungsmethoden in einer ersten Übersicht vorgestellt und die Methodik, input-Werte und output-Daten beschrieben.

	REFERENZ	METHODE	INPUT DATEN	OUTPUT DATEN
H. FIGL	(H. Figl et al., 2019)	semi-quantitativ	Klassenzuweisung auf Schichtebene	Gewichteter Indikator
A. HAFNER	(A. Hafner et al., 2020)	semi-quantitativ	Abfallströme in [kg/%-Anteil] und Fügemethode	Bewertete Stoffströme einzelner Baustoffe
F. U. VOGDT	(Frank U. Vogdt et al., 2019)	semi-quantitativ	Massen-, Volumenanteil bzw. Nutzen/Aufwand Parameter	Gewichteter Indikator
DNA	(Denis, Vandervaeren, & De Temmerman, 2018)	analytisch	Gebäudemodell, Bauteilverbindungen und Fügemethode	Trennbare Baustoffmenge, Rückbauzeit, Rückbausequenz,
DEMONTAGE-SEQUENZ-MODELL ÖKOBILANZ OI3	(Sanchez & Haas, 2018) (IBO GmbH, 2022)	analytisch quantitativ	Gebäudemodell, Bauteilverbindungen Drei Öko-Indikatoren (PEI, GWP, AP) pro Bauteil/Baustoff	Rückbausequenz und Simulation Gewichteter Indikator (OI3-Index)
ÖKOBILANZ LCGA	(Dieterle & Viere, 2019)	quantitativ	Öko-Indikatoren pro Bauteil/Baustoff	Life-Cycle-Gap
BNB-KRITERIEN-STECKBRIEF 4.1.4	(Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2015)	semi-quantitativ	Bewertungspunkte für Rückbau, Sortenreinheit und Verwertbarkeit	Gewichteter Indikator
ENTSORGUNGS-INDIKATOR - EI10	(IBO GmbH, 2020)	semi-quantitativ	Volumen, Einstufung in Entsorgungs- und Verwertungskategorien	Gewichteter Indikator
BIM-DAS	(Akinade, et al., 2015)	semi-quantitativ	Materialart, Art der Fügung, Anteil recyclingfähige, vorgefertigte und nachbehandelte Bauteile, Anteil toxischer Bauteile	Gewichteter Indikator
URBAN MINING INDEX	(Rosen, 2021)	semi-quantitativ	Empirische Inputdaten zu Materialwert, Rückbauaufwand, massenbezogene Verwertungseinstufung	Gewichteter Indikator
DGNB - TEC 1.6	(Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e.V., 2023)	qualitativ	Inputdaten für ein bewertendes Punktesystem	Gewichteter Indikator

Tabelle 1: Übersicht der Bewertungsmethoden für die EoL-Phase (eigene Darstellung)

4.1 Entsorgungsindikator - EI10

Das österreichische Institut für Bauen und Ökologie GmbH (IBO) hat ein semiquantitatives Bewertungsverfahren zur Beschreibung der Entsorgungseigenschaften entwickelt, das darin besteht, die Entsorgungseigenschaften von Baustoffen und daraus hergestellten Bauwerken zu klassifizieren. Die Methode wurde 2003 erstmals publiziert und kontinuierlich weiterentwickelt. 2018 wurde eine neue, erweiterte Version – der Entsorgungsindikator EI10 – vorgestellt. Die Bewertung untersucht die Entsorgungswege, gegliedert in Recycling, Verbrennung und Deponierung, und gliedert sie in fünf Qualitätsstufen (Abbildung 10), wobei die Qualitätsstufe 1 die beste Leistung darstellt. (IBO GmbH, 2020)

An dieser Stelle ist kritisch zu hinterfragen, wieso die Entsorgungswege Verbrennung und Deponierung eine positive Bewertung erhalten können, obwohl die Materialien dabei verloren gehen und somit nicht die Ziele im Sinne der Kreislaufwirtschaft erfüllt werden.

	1	2	3	4	5
Recycling	Wiederverwendung bzw. -verwertung zu technisch gleichwertigen Sekundärprodukt oder -rohstoff	Recyclingmaterial wird mit geringem Aufwand sortenrein gewonnen und kann hochwertig verwertet werden.	Recyclingmaterial ist verunreinigt, kann mit höherem Aufwand rückgebaut und nach Aufbereitung verwertet werden	Downcycling	Kein Recycling möglich
Verbrennung	Hoher Heizwert (> 2.000 MJ / m ³); natürliche Metall- und Halogengehalte im ppm-Bereich, sortenreines Material	Wie 1, jedoch nicht sortenrein Anteil an nicht-organischen Fremdstoffen beträgt > 3 Massen-%	Wie 1 oder 2, jedoch mittlerer Heizwert (500-2.000 MJ/m ³) oder geringfügige Metall- oder Halogengehalte (> 3 Masse-%)	Hoher Stickstoffgehalt, hoher Anteil mineralischer Bestandteile oder erhöhter Metall- oder Halogengehalt (3-10 Massen-%)	Hoher Metall- oder Halogengehalt
Deponierung	Zur Ablagerung auf Inertabfalldeponie geeignete Abfälle	Zur Ablagerung auf Baurestmassen geeignete Abfälle ohne Verunreinigungen	Materialien mit geringem Anteil nicht-mineralischer Bestandteile, z.B. mineralische Baurestmassen mit organischen Verunreinigungen durch Bitumen oder WDVS-Resten	Gipshaltige, faserförmige oder mineralisierte organische Materialien sowie Materialien mit erhöhtem Anteil nicht-mineralischer Verunreinigungen.	Organisch-mineralischer Verbund, Metalle als Verunreinigungen von Baurestmassen

Abbildung 10: Matrix der Entsorgungseinstufung für den EI10-Indikator (eigene Darstellung (IBO GmbH, 2020))

Das für jedes Bauteil anfallende Volumen wird mit der Entsorgungseinstufung des Materials multipliziert. Ein Baustoff der Entsorgungseinstufung drei wird dementsprechend das dreifache an fiktiven Abfallvolumen berechnet. Weiters wird das Bauteil mit dem Verwertungspotential (**Tabelle 2**) gewichtet, wodurch die zu beseitigende Abfallmenge reduziert bzw. erhöht wird. Bei einem Baustoff mit dem Verwertungspotential drei, fallen 75% als Abfall an, während 25% recycelt werden. Bei der Gewichtung mit dem Verwertungspotential 5 wird davon ausgegangen, dass für die Beseitigung, weiteres Material für die Aufbereitung benötigt wird. (IBO GmbH, 2020)

Verwertungspotential	Abfallreduktion oder -erhöhung
1	25%
2	50%
3	75%
4	100%
5	125%

Tabelle 2: Verwertungspotential für den EI10-Indikator (IBO GmbH, 2020)

Um die Trennbarkeit der Materialien einer Konstruktion zu berücksichtigen, wird im Berechnungsleitfaden des EI-10 ein Bauteilkatalog vorgestellt, welcher adaptierte Entsorgungseinstufungen und Verwertungspotentiale vorstellt. Beispielsweise verschlechtern sich die Entsorgungseigenschaften, wenn Beton in Kombination mit bituminöser Abdichtung vorliegt. (IBO GmbH, 2020)

Der Entsorgungsindikator eines Bauteils (EI KON) pro Quadratmeter setzt sich aus der Summe der gewichteten Volumina, welches am Ende des gesamten Lebenszyklus des Gebäudes zur Entsorgung geschaffen werden und der gewichteten Volumina, die sich aus den Austausch- bzw. Sanierungszyklen kumulieren zusammen. Die Berücksichtigung der Austausch- und Erneuerungszyklen findet in einem ausgewählten Gesamtbetrachtungszeitraum statt und beträgt beim Bewertungssystem IBO ÖKOPASS 100 Jahre. Die Berechnung basiert auf Volumen statt auf Masse. IBO argumentiert, dass die ökologischen Aufwendungen in vielen Teilbereichen der Entsorgung durch das anfallende Volumen maßgeblich beschrieben werden. Vogdt (Frank U. Vogdt et al, 2019) beschreibt die Notwendigkeit der Berücksichtigung des volumenbezogenen Ansatzes damit, dass Transportkosten von großvolumigen Bauteilen, im Vergleich zu reinen Tonnagebetrachtungen, entscheidend sein können, und das Deponieren von Leichtbaustoffen zu deutlich aufwendigeren Verdichtungsvorgängen, im Vergleich zu schweren Schüttungen, führen kann. Da im Bauwesen Produkte mit hoher Rohdichte, wie zum Beispiel Stahlbeton, aber auch mit geringer Rohdichte, wie zum Beispiel Dämmstoffe verwendet werden, würde ein rein massenbezogener Ansatz letztere bei der Bestimmung der Recyclingeffizienz unterschätzen. Daher sind Bewertungssysteme, die einen rein massenbezogenen Ansatz verfolgen, kritisch zu hinterfragen. (IBO GmbH, 2020)

$$EI\ KON = \sum_n^i V_i * 1 * Entsorg(IST)_i * Verwert(POT)_i$$

Formel 1: Berechnung des Entsorgungsindikators einer Konstruktion (IBO GmbH, 2020)

Der Entsorgungsindikator auf Gebäudeebene errechnet sich aus der flächengewichteten Mittelung von EIKON aller Konstruktionen, wobei eine Reduzierte Berücksichtigung von Innenbauteilen von 25% beim Flächenbezug einhergeht. Dadurch werden die

Entsorgungseigenschaften durch die Schichtdicken stärker gewichtet als die resultierenden Volumina. (IBO GmbH, 2020)

$$EI10 = \frac{\sum_i^n EIKon_i * A_i}{\sum_i^n ABt_i + 0,25 * \sum_i^n IBt_i} * 10$$

Formel 2: Berechnung des EI-10 auf Gebäudeebene (IBO GmbH, 2020)

Formel 2 beschreibt die endgültige Berechnung des Entsorgungsindikators auf Gebäudeebene.

Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> • Gebäude-/Bauteilübergreifender Vergleich möglich • Berücksichtigung der Trennbarkeit der Konstruktion • Volumenbezogener Ansatz 	<ul style="list-style-type: none"> • Annahmen über das zukünftige Verwertungspotential ist kritisch zu hinterfragen • Positive Beurteilung des Entsorgungswegs "Verbrennung" und "Deponierung" kritisch zu hinterfragen

Abbildung 11: Stärken/Schwächen des EI10-Index (eigene Darstellung)

4.2 Bewertungsmethode nach H. Figl et al

Ausgangspunkt der Methode waren drei vorangegangene Arbeiten: die vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) erarbeitete *Methodenskizze zur Weiterentwicklung des BNB-Kriteriums 4.1.4*, die Vorarbeiten der TU Berlin im Projekt *Urban Mining* und der Entsorgungsindikator EI10 des IBO. Die Bewertungsmethode erfasst die eingesetzten Bauteile, welche virtuell in kleinere, nicht mehr mit wirtschaftlichem Aufwand voneinander trennbare Fraktionen zerlegt werden und liefert als Ergebnis einen Index für die Wiederverwertbarkeit. Zuerst werden die Bauteile virtuell in die kleinstmögliche Einheit zerlegt. Die durch die Zerlegung entstandenen *minimalen Blöcke* werden anschließend bestimmten Kategorien zugewiesen. Je nachdem in welche Kategorie man zugewiesen wird, werden Noten vergeben. Die Skala reicht von 1 (beste Note) bis 6 (schlechteste Note), wobei die Noten 1 bis 4 einer Verwertung entsprechen (in unterschiedlichen Qualitätsstufen) und die Noten 5 bis 6 einer endgültigen Beseitigung. Eine übersichtliche Darstellung der Noten und Kategorien sind in **Abbildung 12** ersichtlich. Die Klassifizierung der *minimalen Blöcke* findet in zwei Schritten statt. Zuerst werden die *minimalen Blöcke* nach den aktuellen technischen Behandlungsstandards klassifiziert (reale Einstufung). Darauf folgend wird die Einstufung wiederholt, jedoch jetzt auf der Grundlage laufender Recyclinginitiativen und -entwicklungen (Potentialeinstufung). Anschließend werden beide Noten zu einer Gesamtnote für den Minimalblock zusammengeführt. Die Noten aller Minimalblöcke werden mit dem Volumen gewichtet, um eine Note für das Bauelement zu erhalten.

Abschließend werden die Bauteilnoten über das gesamte Gebäude (also alle Bauteile) aufsummiert und auf Basis der Bruttogeschossfläche normiert. (H. Figl et al; 2019)

1	2	3	4	5	6
Reuse	No preparation methods for reuse available				
Closed loop (CL)	Recycling			No recycling	
	Recycling RC+ or CL with efforts	Recycling RC- or RC+ with efforts	Other utilisation or RC- with efforts	No recycling procedure known or other utilisations with great efforts	
	Combustion				
	Derived	Energy recovers +	Energy recovers -	Thermal disposal +	Thermal disposal -
				Landfill	
			Landfill Class 0+I+II	Gypsum-Fibre-Organic	

Abbildung 12: Abstufungsschema (eigene Darstellung (H. Figl et al., 2019))

Grundlage für das in Abbildung 12 dargestellte Abstufungsschema sind heute gängige Technologien. Es kann jedoch Technologien geben, die ökologische Probleme besser lösen würden, die jedoch derzeit nicht vollständig entwickelt und/oder wirtschaftlich nicht mit gängigen Verfahren konkurrenzfähig sind. Daher wird die Einstufung bezüglich dieser Initiativen und Entwicklungen wiederholt (*Potentialeinstufung*). Zur Bewertung des Entwicklungsstandes wird ein Technologiefaktor eingeführt, wie in Abbildung 13 dargestellt. (H. Figl et al., 2019)

Technology description	Factor
A recycling technology is successfully practiced in other countries or regions or by a few companies in Germany; the introduction to whole Germany is foreseeable. <i>Example:</i> processing of plasterboards to raw material for new production of plaster boards	0,75
The respective technology is applied successfully in other countries and ready for the market but in Germany still uneconomic (e.g. expenses for the return are too high). <i>Examples:</i> Recycling of clean post-consumer mineral wool in mineral wool production.	0,5
The respective technology is in active development and tested on a small scale, or it is available for similar systems and has to be adapted to the actual case. <i>Examples:</i> reprocessing of contaminated mineral wool in mineral wool production.	0,25
The technology causes ecologic harm as carryover of pollutants <i>Examples:</i> PVC windows containing lead, EPS insulation containing HBCD.	0

Abbildung 13: Potentialeinstufung (H. Figl et al., 2019)

Der endgültige Index für die Recyclingfähigkeit für den jeweiligen Minimalblock wird durch die folgende Gleichung gebildet:

$$\text{Index Wiederverwertbarkeit} = \text{Realbewertung} - (\text{Realbewertung} - \text{Potenzialbewertung}) * \text{Technologiefaktor}$$

Formel 3: Endgültiger Index für die Wiederverwertbarkeit (H. Figl et al., 2019)

Die Klassifizierungen der einzelnen Schichten führt zu einer Klassifizierung des Bauteils und schließlich des Gebäudes. Figl (H. Figl et al., 2019) argumentiert, dass die Aggregation nach Volumen und nicht nach Masse erfolgt, weil das Volumen die maßgebliche Maßzahl für z.B. Deponievolumen oder Verbrennungsleistung ist und die teilweise problematischen Dämmstoffe bei der Masseangabe unterschätzt werden.

Stärken

- Gebäude-/Bauteilübergreifender Vergleich möglich
- Volumenbezogener Ansatz

Schwächen

- Annahmen über das zukünftige Verwertungspotential ist kritisch zu hinterfragen
- Trennbarkeit der Konstruktion wird nicht berücksichtigt

Abbildung 14: Stärken/Schwächen der Bewertungsmethode nach H. Figl (eigene Darstellung)

4.3 Bewertungsmethode nach A. Hafner et al

Der Ansatz von Hafner (A. Hafner et al, 2020) stützt sich auf ein Stoffstrommodell zur Ermittlung der Recyclingfähigkeit und der zu beseitigenden Baustoffe einer Konstruktion. Das Modell beschreibt die Recyclingfähigkeit auf Bauteilebene und berücksichtigt die materialspezifische Verwertbarkeit der Baustoffe als auch die Einschränkungen hinsichtlich der Lösbarkeit der Fügung. Laut Hafner (A. Hafner et al, 2020) kann eine alleinige Betrachtung auf Baustoffebene wesentliche Aspekte der Errichtung (Fügung), des Rückbaus (Lösbarkeit) und der Abfallbehandlung nicht abdecken. Deswegen wird das Modell auf Bauteilebene angewandt.

Zur Abbildung der Recyclingfähigkeit werden folgende Abfallströme definiert, die jedem Material in [kg/%-Anteil] zugewiesen wird:

- 1) MRU - Material zur Wiederverwertung (engl. Material for Re-Use)
- 2) MSM - Material zur gleichwertigen stofflichen Verwertung als Sekundärmaterial (engl. Material for Secondary Material Use)
- 3) MMR - Material zur minderwertigen stofflichen Verwertung (engl. Material for Material Recovery)
- 4) MMRf - Material zur endgültigen stofflichen Verwertung (engl. Material for final/one-time Energy Recovery)
- 5) MERf - Material zur endgültigen energetischen Verwertung (engl. Material for final/one-time Energy Recovery)

6) MWD - Material zur Deponierung (engl. Material for Waste and Disposal)
(A. Hafner et al, 2020)

In Abbildung 15 wird der Modellansatz nach Hafner (A. Hafner et al, 2020) grafisch dargestellt und zeigt den Stoffstrom von der Rohstoffbeschaffung bis zur Abfallbehandlung. Je nachdem wie ein Bauteil klassifiziert wird, hat das Auswirkungen auf den weiteren Stofftransport. Bauteile in der Kategorie *MWD* werden in Deponien endgültig gelagert. Eine wiederholte Verwertung im Sinne einer wiederholten Kreislaufführung ist damit ausgeschlossen. Bauteile in der Kategorie *MERf* und *MMRf* werden stofflich bzw. energetisch verwertet, können aber nicht in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden und schließen ebenfalls den Kreislauf endgültig ab. Erst ab der Kategorie *MMR* werden die einzelnen Bauteile dem Baustoffkreislauf zurückgeführt und vermindern effektiv den Rohstoffverbrauch und die Abfallentwicklung. Dabei wird unterschieden zwischen einem Produkt-Recycling (*MRU*), eine wiederholbare Kreislaufführung auf gleichwertigem Qualitätsniveau als Sekundärmaterial (*MSM*) oder einer Kreislaufführung auf minderwertigem Qualitätsniveau zum Downcycling (*MMR*). (A. Hafner et al, 2020)

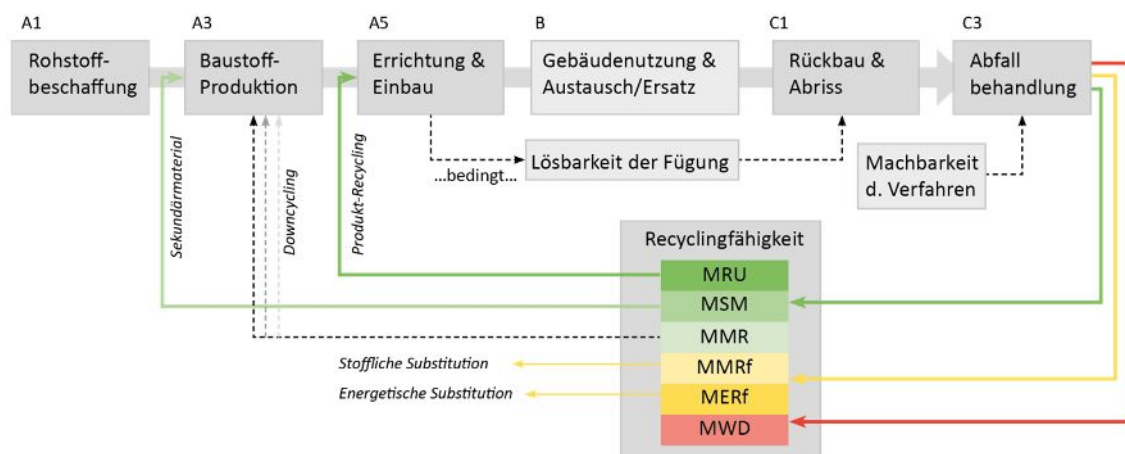


Abbildung 15: Modellansatz nach A. Hafner (eigene Darstellung nach (A. Hafner et al, 2020))

Mit dem Ziel möglichst wenig Rohstoffe zu verwenden, eine Beseitigung in Deponien zu vermeiden und die Rückführung in den Stoffkreislauf zu maximieren, liefert das Modell wesentliche Informationen, wie die Stoffströme durch die Wahl der Baustoffe beeinflusst werden. Die Zuordnung der Abfallströme je Baustoff basiert unter anderem auf Studien der Stoffstromorientierung (Steger, et al., 2018) und dem Monitoring-Bericht der Kreislaufwirtschaft Bau (Bundesverband Baustoffe–Steine und Erden e.V., 2018).

Wie schon eingangs erwähnt wird eine Betrachtung auf Bauteilebene vorgezogen, um die Einflüsse der Fügetechnik berücksichtigen zu können. Die Art der Fügung, also die Art wie einzelne Bauschichten miteinander verbunden werden, bestimmt, ob die Bauteilschicht mit oder ohne Schädigung getrennt werden kann. Eine Rückgewinnung einzelner Baustoffe in möglichst

reiner Form hat einen wesentlichen Einfluss auf die Recyclingfähigkeit. Die Fügetechnik wird über das Schema in Abbildung 16 bewertet. Dadurch lassen sich die Effekte zur Fügung und Lösbarkeit einer Konstruktion klassifizieren. (A. Hafner et al, 2020)

Symbol	Lösbarkeit
+	OHNE Schädigung lösbar
O	Mit ausreichend geringer Schädigung lösbar
-	MIT Schädigung lösbar

Abbildung 16: Klassifizierung der Lösbarkeit von Fügemethoden (eigene Darstellung nach (A. Hafner et al, 2020))

Die Abbildung 17, Abbildung 18 und Abbildung 19 zeigt ein Beispiel und die Ergebnisse einer Außenwand in Holzmassivbauweise und in Stahlbetonbau mit Wärmedämmverbundsystem (WDVS). Der Vergleich weist einen deutlichen Massenunterschied der beiden Außenwände, mit identischer Funktion auf.

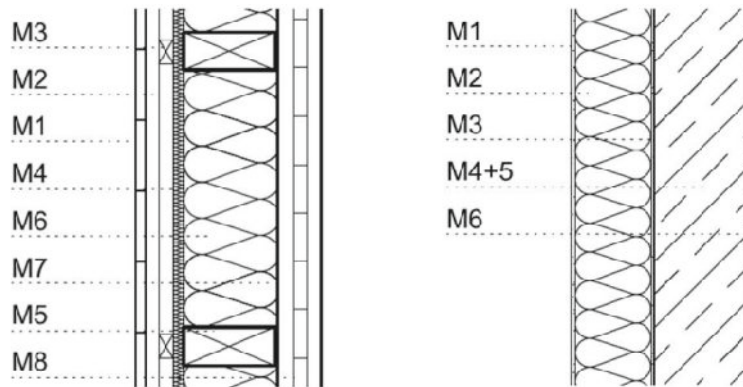


Abbildung 17: Schnitt Außenwand - links: Holzmassiv; rechts: Stb. Mit WDVS (A. Hafner et al, 2020)

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
M1		o	o					
M2	o		o					
M3	o	o		o				
M4			o		-	+		
M5				-		+		o
M6				+	+		+	+
M7						+		-
M8					o	+	-	

	M1	M2	M3	M4	M5	M6
M1		-				
M2	-		-			
M3		-		-		
M4			-		-	-
M5				-		
M6				-		

Abbildung 18: Fügematrix - links: Holzmassiv; rechts: Stb. Mit WDVS (A. Hafner et al, 2020)

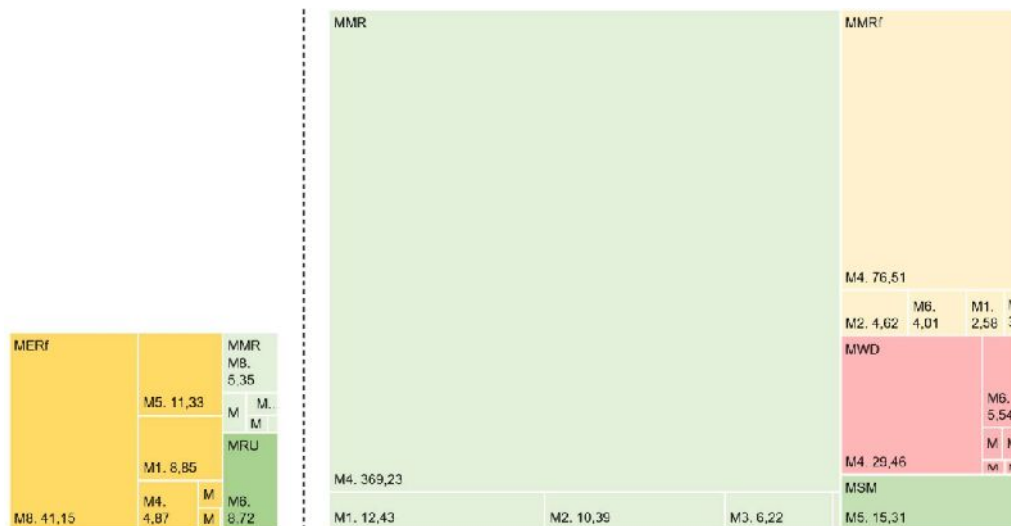


Abbildung 19: Massenverhältnis des Bauteils und der Baustoffe hinsichtlich der Recyclingfähigkeit - links: Holzmassiv; rechts: Stb. Mit WDVS (A. Hafner et al, 2020)

Da die Holzbauvariante (links) eine höhere schädigungsfreie Lösbarkeit aufweist (siehe Abbildung 18 links), kann das Wiederverwendungspotential Großteils gut genutzt werden. Aufgrund der Fügung der Holzfaserverplatte und der Dampfbremse ist nur in diesem Bereich eine Schädigung zu erwarten. Der Großteil wird als Baustellenabfall beseitigt und zu 80% energetisch verwertet. Die Fügematrix für die Außenwand in Stahlbeton (rechts) zeigt, dass beim Rückbau die Konstruktion fast vollständig beschädigt wird. Ein Großteil des mineralischen Bauschuttes wird als minderwertige stoffliche Verwertung wiederverwendet (Bundesverband Baustoffe–Steine und Erden e.V., 2018). Beim Abbruch wird der Bewehrungsstahl vom Beton separiert und kann fast vollständig einer gleichwertigen stofflichen Verwertung zugeführt werden.

Vergleicht man die Ergebnisse in Abbildung 19 sieht man den deutlichen Massenunterschied zwischen den beiden Konstruktionen. Durch die Berücksichtigung der Masse werden die Effekte von voluminösen Bauteilen unterschätzt - z.B. Deponievolumen. Das ist kritisch zu hinterfragen, weil die teilweise problematischen Dämmstoffe bei der Masseangabe unterschätzt werden (Frank U. Vogdt et al, 2019).

Weiters ist durch die komplexe Darstellung der Ergebnisse eine Aggregation auf Gebäudeebene und somit ein gebäudeübergreifender Vergleich nur schwer möglich.

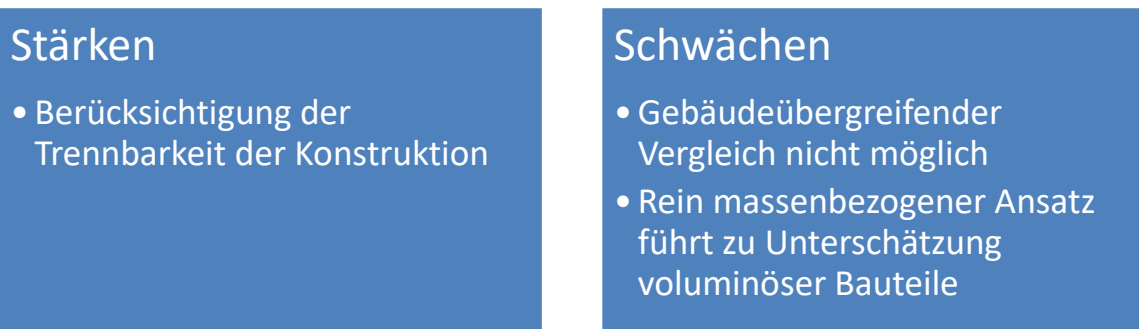


Abbildung 20: Stärken/Schwächen der Bewertungsmethode nach A. Hafner (eigene Darstellung)

4.4 Bewertungsmethode nach F. Vogdt et al

Das Ziel dieser Bewertungsmethode ist es einen Indikator zur quantitativen Bewertung der Recyclingeffizienz zu bestimmen, welcher die Zielsetzung nicht-recyclingfähige Baumaterialien zu vermeiden erfüllt und eine Variantenvergleich ermöglicht. Für die Ermittlung wird der klassische Effizienzansatz gewählt – also das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand. Das Modell verfolgt sowohl einen massenbezogenen (R_m) als auch einen volumenbezogenen (R_v) Ansatz. Beide werden separat ermittelt und die Recyclingeffizienz R ergibt sich aus dem Minimum der beiden Werte. (Frank U. Vogdt et al, 2019)

$$R = \min \{R_m | R_v\}$$

Formel 4: Recyclingeffizienz R (Frank U. Vogdt et al, 2019)

Für die Beurteilung der Recyclingeffizienz wird jedes Bauteil in seine n -Bauteilschichten bzw. Materialien zerlegt. Diese ergeben einen massenbezogenen Anteil $f_{m,i}$ bzw. ein volumenbezogenen Anteil $f_{v,i}$. (Frank U. Vogdt et al, 2019)

$$f_{m,i} = \frac{m_i}{\sum_{j=1}^n m_j}, f_{v,i} = \frac{V_i}{\sum_{j=1}^n V_j}$$

Formel 5: Massenbezogener Anteil $f_{m,i}$ und volumenbezogener Anteil $f_{v,i}$ (Frank U. Vogdt et al, 2019)

In weiterer Folge wird der Nutzen und der Aufwand für jedes Baumaterial ermittelt. Der Nutzen setzt sich zusammen aus der Qualitätsstufe des Recyclingproduktes (q_i), z.B. sortenreines Material, welcher mit einer bereits etablierten Technologie (s_i) gewonnen wird. Für beide Parameter sind Werte zwischen 0 und 10 zu vergeben, wobei 0 das schlechteste Ergebnis und 10 das beste Ergebnis darstellt. Der Aufwand ergibt sich aus dem Rückbau- (r_i), Transport- (t_i) und Aufbereitungsaufwand (a_i). Die Parameter für den Aufwand können Werte zwischen 1 und 10 annehmen, wobei 1 der geringste Aufwand und 10 der höchste Aufwand ist. Der Quotient, der sich aus dem Nutzen und Aufwänden ergibt, wird mit dem massen- bzw. volumenbezogenen Effizienzfaktor des Einzelmaterials bzw. der einzelnen Bauteilschicht multipliziert und ergeben

zum Schluss einen Index für die Recyclingeffizienz ($R_{m/v}$). Die Recyclingeffizienz ist besser, je größer das Ergebnis des Index für die Recyclingeffizienz ist.

(Frank U. Vogdt et al, 2019)

$$R_{m/v} = \sum_{i=1}^n f_{m/v,i} * \frac{q_i * s_i}{r_i * t_i * a_i}$$

Formel 6: massenbezogene bzw. volumenbezogene Recyclingeffizienz (Frank U. Vogdt et al, 2019)

Das Ergebnis liefert einen gewichteten Indikator als einzelne Zahl, welcher über ein komplexes System aus zu quantifizierenden Parametern entwickelt wird.

Stärken

- Massen- und volumenbezogener Ansatz
- Gebäude-/Bauteilübergreifender Vergleich möglich
- Berücksichtigung der Trennbarkeit der Konstruktion

Schwächen

- Keine relevanten Schwächen festgestellt

Abbildung 21: Stärken/Schwächen der Bewertungsmethode nach F. Vogdt (eigene Darstellung)

4.5 BNB – Kriteriensteckbrief 4.1.4

Um den Beitrag zur Kreislaufführung von Baustoffen zu beurteilen, werden anhand des BNB - Kriteriensteckbriefes 4.1.4 (Rückbau, Trennung und Verwertung) Anforderungen definiert. Ziel ist es, Deponieraum, Rohstoffe und Produktionsenergie einzusparen. Die Berechnung und Bewertung der ausgewählten Bauteile erfolgt in einem Excel-Tool, dem sogenannten Bauteilkatalog. Das Tool erfasst die Bauelemente und die dort enthaltenen Schichten und bewertet sie anhand von drei Indikatoren mit fünf verschiedenen Noten von *sehr ungünstig* bis *sehr günstig*. Diese Abstufungen sind jedoch nicht im Detail definiert. Bei der Auswertung können sich Nutzer der Methodik an der Struktur vorevaluierter Beispiele orientieren. Auf einer wissenschaftlichen Grundlage basiert diese Beurteilung allerdings nicht. Das Ergebnis liefert einen bauteilbezogenen Recyclingfaktor R zwischen 0 und 10 Punkten und wird aus den Bewertungspunkten für Rückbau, Sortenreinheit und Verwertbarkeit im Verhältnis 3:3:4 gebildet. (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2015)

$$R = 0,3 * P_{Rückbau} + 0,3 * P_{Sortenreinheit} + 0,4 * P_{Verwertung}$$

Formel 7: Recyclingfaktor R der BNB-Bewertungsmethode (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2015)

Die Bewertung für den Rückbau beschreibt den Aufwand, der für die Demontage oder Abbruch eines Bauteils aus dem Gebäudeverband nötig ist. Die Sortenreinheit beschreibt den Aufwand, der für die sortenreine Trennung mehrschichtiger oder inhomogener Bauteile anfällt. Die Verwertbarkeit der Baustofffraktionen wird durch die zur Zeit der Bewertung am Markt aktuell verfügbaren technischen Verfahren bewertet. Um eine hohe Aussagekraft erzielen zu können soll die Überprüfung mindestens 80% der Masse der baulichen Substanz berücksichtigen. Das Produkt aus R und dem massenbezogenen Anteil des Bauelements am gesamten Gebäude ergibt die Punktezahl für jedes Bauelement. (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2015)

Wie in Kapitel 4.1 beschrieben, führt die Aggregation über einen rein massenbezogenen Ansatz zu einer Unterschätzung von voluminösen Bauschichten und ist daher kritisch zu hinterfragen. Die Summe der Punktezahlen für alle Bauelemente ergibt schlussendlich die Bewertungspunkte für das Gesamtgebäude und stellt das Ergebnis des BNB-Kriteriums 4.1.4 dar.

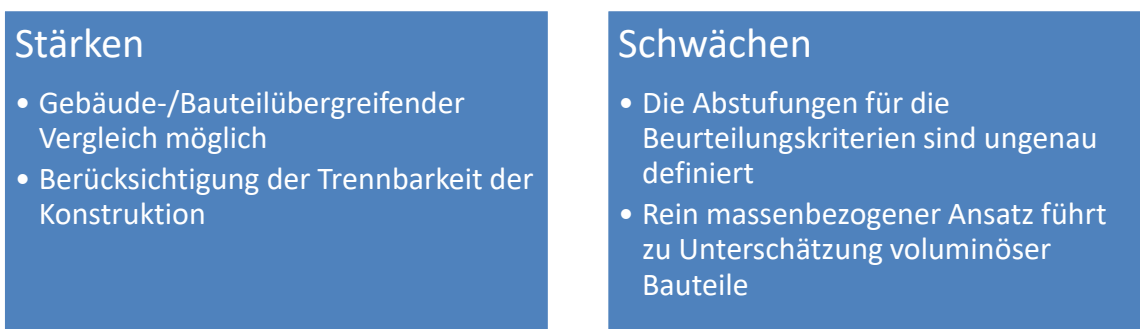


Abbildung 22: Stärken/Schwächen der BNB-Methode (eigene Darstellung)

4.6 DGNB – TEC 1.6

Mit einer Gewichtung von 3 bis 3,5 % der Gesamtbewertung (je nach Nutzungsart) berücksichtigt die DGNB die Recyclingfähigkeit von Bauteilen am Ende ihrer Nutzungsdauer. Mit den beiden Indikatoren *Recyclingfähige Baustoffauswahl* und *Rückbaufreundliche Baukonstruktion* werden die Standardbauteile von Gebäuden bis zur Kostengruppe 300 der 3. Ebene nach DIN 276 systematisch sowohl stofflich als auch konstruktiv getrennt berücksichtigt. Den verwendeten Baustoffen wird ein Recyclingverfahren zugeordnet, das einer Qualitätsstufe mit einer bestimmten Punktzahl entspricht. Eine Vermeidung (zum Beispiel durch den Verzicht auf Verkleidungen) oder die Wiederverwendung von Komponenten oder Materialien zu gleichwertigen Produkten wird mit einem *Circular-Economy-Bonus* belohnt. Zur Auswertung stellt die DGNB ein Excel-Tool mit einem bewerteten Bauteilkatalog zur Verfügung. Die relevanten Nachweise müssen jedoch nicht unbedingt den vollen Umfang der Struktur umfassen, sondern müssen einen vorgegebenen Mindestanteil am Gebäude erfassen - zum Beispiel definierbar über

Massenanteil oder Anteil Regelbauteile. Wird bei der Bewertung der Mindestanteile über die Masse argumentiert, so werden zum Beispiel voluminöse Bauteile mit einer geringeren Rohdichte unterschätzt. (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e.V., 2018)

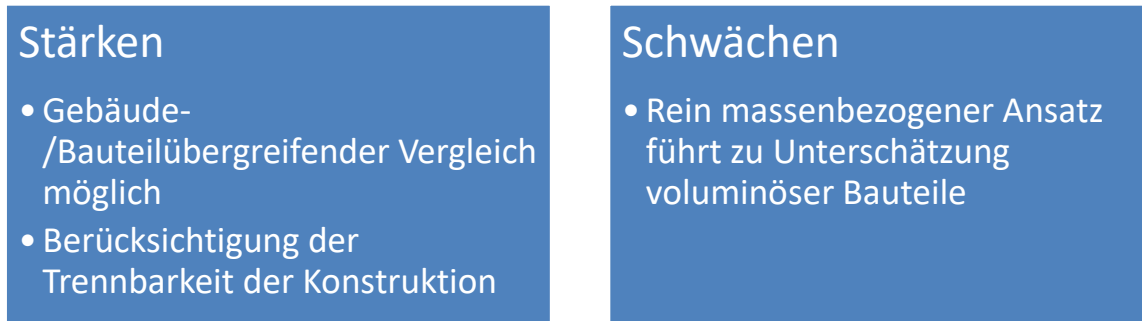


Abbildung 23: Stärken/Schwächen der DGNB – TEC 1.6 Methode (eigene Darstellung)

4.7 Building Information Modelling based Deconstructability Assessment Score (BIM-DAS)

Der BIM-DAS Score ist ein Bewertungsinstrument, das Planende bereits in der frühen Entwicklungsphase eines Gebäudes unterstützen soll, eine Beurteilung der Eignung von Bauwerken für den Rückbau und der Wiederverwendung zu geben. Das Bewertungssystem verwendet einen mathematischen Modellierungsansatz und wurde so konzipiert, dass die Berechnung unterstützend mit dem digitalen Modellierungsverfahren BIM durchgeführt werden kann, wodurch Designalternativen und Optimierungsvorschläge ausgearbeitet werden können. So können Informationen zu Gebäudeanforderungen, Planung, Entwurf, Konstruktion und Betrieb gesammelt und am Ende der Gebäudelebensdauer abgerufen werden. Für das Modell wird zunächst eine Gleichung aufgestellt, welches die Massenströme beim Abbruch bzw. Rückbau abbildet. Durch die Beurteilung über das Gewicht, werden massive Bauteile stärker gewichtet, was kritisch zu hinterfragen ist. Akinade (Akinade, et al., 2015) argumentiert die Wahl zum massenbezogenen Ansatz, dass die zugehörige graue Energie eines Elements direkt proportional zu seiner Masse ist. Daher kann die am Ende seiner Lebensdauer rückgewinnbare Energie als Produkt aus grauer Energie und Masse berechnet werden. (Akinade, et al., 2015)

Während des Abbruchprozesses wird die Gesamtmenge des entsorgten Abfalls (E_w), d.h. die Summe der nicht wiederverwendbaren Bauteilmasse (gemessen in Tonnen), wie folgt berechnet:

$$E_w = B_q - T_r + \varepsilon$$

Formel 8: Berechnung der nicht wiederverwendbaren Masse E_w (Akinade, et al., 2015)

B_q beschreibt die gesamte im Gebäude verbaute Masse, T_r ist die Menge der gesamten wiederverwendbaren Baustoffe und ε beschreibt Restabfälle aus Transport und sonstigem.

Nachdem B_q eine Konstante ist, kann eine Situation, wo kein Abfallvermögen ($E_w=0$) entsteht, nur dann erreicht werden, wenn der Wert von T_r maximiert wird. Dadurch kann die **Formel 8** vereinfacht werden und liefert folgendes Ergebnis:

$$\frac{T_r}{B_q} = 1.0 = DAS$$

Formel 9: Gleichung eines vollständig rückbaubaren und wiederverwendbaren Gebäudes (Akinade, et al., 2015)

Die Formel 9 zeigt, dass der Parameter *DAS* als Quotient zwischen der wiederverwendbaren Menge und der gesamten Menge aufgefasst werden kann. Die Eignung von Bauwerken zur Rückbaubarkeit und Wiederverwendung wird in weiterer Folge durch den *DAS* Wert ausgedrückt und berechnet sich anhand der gewichteten Summe des D_{Score} und R_{Score} . Der D_{Score} (*Deconstruction Score*) beschreibt den Aufwand für die Demontage eines Gebäudes. Dabei wird die Art und Anzahl der Elemente sowie die Fügetechnik (z.B. verschraubt, genagelt, ect.) im gesamten Gebäude berücksichtigt. Der R_{Score} (*Recovery Score*) beschreibt inwiefern die Bauteile in einem Gebäude wiederverwendet und recycelt werden können. Als Indikator wird der Anteil an vorgefertigten und wiederverwendbaren Elementen, sowie Elementen, ohne Nachbehandlung und toxischen Schadstoffen am Gesamtgebäude herangezogen. Allerdings ist anzumerken, dass durch die alleinige Berücksichtigung dieser vier Parameter, die Qualität des Recyclings nicht genauer beschrieben wird (thermische Verwertung, stoffliche Verwertung, ect.). (Akinade, et al., 2015)

$$DAS = \alpha * D_{Score} + \beta * R_{Score}$$

Formel 10: Formel für den *DAS*-Score (Akinade, et al., 2015)

Formel 10 erlaubt die getrennte Berücksichtigung der Rückbaubarkeit und Wiederverwendbarkeit einzelner Bauteile. Empfehlungen für die Gewichtungparameter α und β konnten im Zuge dieser Literaturrecherche nicht ermittelt werden. Akinade (Akinade, et al., 2015) hat in ersten Fallbeispielen die Gewichtung von D_{Score} und R_{Score} gleichgesetzt.

Stärken

- Gebäude-/Bauteilübergreifender Vergleich möglich
- Berücksichtigung der Trennbarkeit der Konstruktion

Schwächen

- Rein massenbezogener Ansatz führt zu Unterschätzung voluminöser Bauteile
- Qualität des Recyclings wird nicht beschrieben

Abbildung 24: Stärken/Schwächen der BIM-DAS Methode (eigene Darstellung)

4.8 Urban Mining Index

Der von der Bergischen Universität Wuppertal entwickelte Urban Mining Index (UMI) ist ein Bewertungstool für zirkuläres Bauen. Damit lässt sich das Potential zur Kreislauffähigkeit von Bauwerken quantitativ messen und die Qualität der stofflichen Verwertung sowie die Wirtschaftlichkeit des Abbruchaufwands und des selektiven Rückbaus in die Bewertung einbeziehen. Der UMI verwendet Eingangsdaten, welche auf deutschlandweite empirische Untersuchungen beruhen. Das Ergebnis beziffert den Anteil zirkulärer Baustoffe an der Gesamtmasse aller im Lebenszyklus eines Gebäudes eingesetzten Materialien. Zur Berechnung des UMI wird der Anteil sekundärer bzw. nachwachsender Rohstoffe und das Potenzial für zukünftiges Recycling bestimmt. Dabei werden sowohl Kriterien bei der Beschaffung der Materialien und somit vor der Nutzung (*Pre-Use*), als auch nach der Gebäudenutzung (*Post-Use*) definiert (**Abbildung 25**). Für die Bewertung werden die Materialien in verschiedenen Qualitätsstufen eingeordnet. Materialien, die in einem geschlossenen Kreislauf (wiederverwenden, recyceln) geführt werden können, werden zum *Closed-Loop-Potenzial* (CLP) gezählt. Materialien, die über einen offenen Kreislauf verarbeitet werden (z.B. Downcycling), sind im *Loop-Potenzial* (LP) enthalten. Das Rückbau- bzw. Trennungspotential wird über ökonomische Indikatoren bestimmt. Maßgebend für die Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus ist der materielle Restwert eines Materials. Der Restwert wird in monetären Einheiten (Euro) gemessen und durch den Parameter f_v ausgedrückt. Bei sehr hochwertigen Materialien, wie zum Beispiel Kupfer, ist das Recyclingpotential entsprechend höher, da die finanzielle Motivation höher ist das Material wiederzugewinnen. Ein weiterer relevanter Faktor zur Berücksichtigung des Rückbau- bzw. Trennungspotentials ist es, den tatsächlichen Rückbauaufwand zu bestimmen. Der Aufwand für den selektiven Rückbau wird über eine physikalische Größe, in der Einheit Megajoule, gemessen und wird in einem umfangreichen Bauteilkatalog für verschiedene Konstruktionen als Parameter f_w angegeben. (Rosen, 2021)

Weiters wird das *Material-Loop-Potential* (MLP) als Parameter eingeführt, welcher zeigt, wie groß der Recyclinganteil sein kann, wenn die Produktion hinsichtlich des Anteils an Sekundärrohstoffen so weit wie möglich optimiert wird (Hillebrandt, Riegler-Floors, Rosen, & Seggewies, 2018).

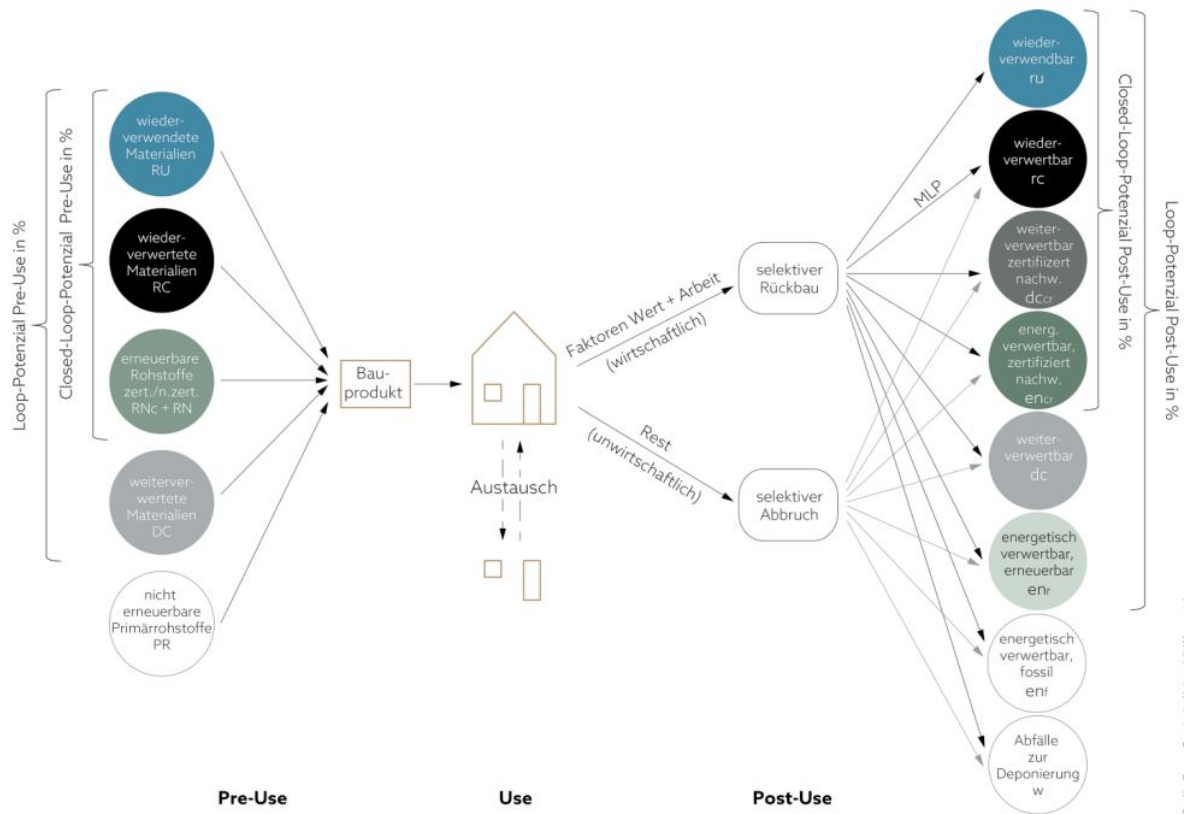


Abbildung 25: Systematik des Urban Mining Index (Rosen, 2021)

Bei der Berechnung werden die Variablen für den Aufwand (f_w) und den Restwert (f_v), der Wahrscheinlichkeit eines materialbezogenen MLP und der Masse der wiederverwertbaren Wertstoffe (M_{rc}) folgendermaßen in Verbindung gebracht:

$$rc_{sd} = \frac{M_{rc} * f_w * f_v * MLP}{M} * 100$$

Formel 11: rcsd wiederverwertbare Stoffe im EoL-Szenario selektiver Rückbau (Rosen, 2021)

Durch die Wahl eines rein massenbezogenen Ansatzes werden Bauprodukte mit geringer Rohdichte unterschätzt. Der Einfluss von voluminösen Baustoffen auf das Recyclingpotential wurde bereits in Kapitel 4.1 erläutert.

Die Darstellung der Ergebnisse auf Bauteilebene wird in zwei Diagrammen dargestellt (**Abbildung 26**), wobei das linke Diagramm den Materialeinsatz (*Pre-Use* Phase) und das rechte Diagramm den Materialverbleib (*Post-Use*-Phase) beschreibt. Die Tortendiagramme geben Auskunft über den Anteil an Materialien in einem geschlossenen bzw. offenen Kreislauf. (Rosen, 2021)

Phase	Qualitätsstufen/Variable	Formelzeichen	Kreislaufpotenzial	Loops
Pre-Use	■ wiederverwendete Materialien (Reuse)	RU	CLP	
	■ wiederverwertete Materialien (Recycling)	RC	CLP	
	■ erneuerbare Rohstoffe (Re-Newable)	RN	CLP	
	■ weiterverwertete Materialien (Downcycling)	DC	LP	
	□ (Primärrohstoffe, nicht erneuerbar (Primary Resources, not renewable))	(PR)	-	
Post-Use	■ wiederverwendbare Wertstoffe (reusables)	ru	CLP	
	■ wiederverwertbare Wertstoffe (recyclables)	rc	CLP	
	■ weiterverwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (downcyclables, certified renewable)	docr	CLP	
	■ energetisch verwertbare Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (energetically usables, certified renewable)	en _{cr}	CLP	
	■ weiterverwertbare Wertstoffe (downcyclables)	dc	LP	
	■ energetisch verwertbare Wertstoffe aus erneuerbaren Rohstoffen (energetically usables, renewable)	en _r	LP	
	□ energetisch verwertbare Abfälle aus fossilen Rohstoffen (fossil)	(en _f)	-	
	□ Abfälle zur Beseitigung/Deponierung (disposal)	(d)	-	

Abbildung 26: Schematische Darstellung der Ergebnisse auf Bauteilebene (Rosen, 2021)

Um den gewichteten Indikator UMI auf Gebäudeebene zu berechnen, werden die Ergebnisse der Phasen *Pre-Use* und *Post-Use* zu einer Gesamtbewertung gleichgewichtet zusammengefasst. Allerdings werden Materialien, die in einem offenen Kreislauf recycelt werden, nur zur Hälfte ihres Anteiles berücksichtigt, um den Qualitätsverlust abzubilden. Materialien, die in einem geschlossenen Kreislauf geführt werden, sind vollständig in die Bewertung einzubeziehen. Das Ergebnis liefert einen einzigen Indikator in einer 100%-Systematik, welcher einen gebäudeübergreifenden Vergleich ermöglicht. (Rosen, 2021)

<p>Stärken</p> <ul style="list-style-type: none"> •Gebäude-/Bauteilübergreifender Vergleich möglich •Berücksichtigung der Trennbarkeit der Konstruktion durch ökonomische Einflüsse •Bewertung des nachhaltigen Materialeinsatzes (Pre-Use) 	<p>Schwächen</p> <ul style="list-style-type: none"> •Rein massenbezogener Ansatz führt zu Unterschätzung voluminöser Bauteile
---	---

Abbildung 27: Stärken/Schwächen Urban Mining Index (eigene Darstellung)

4.9 Quantitative Ökobilanz in der EoL

Die Ökobilanz ist eine genormte Methode, um die potenziellen Umweltauswirkungen von Gebäuden über den gesamten Lebenszyklus quantitativ abschätzen zu können und basiert auf der DIN EN ISO 14040. Durch die Ökobilanz zum Zeitpunkt der EoL Phase soll primär die Umweltbelastung durch den Rückbau und die Materialverwertung ausgewiesen werden. Die eingesetzten Materialien und Energien umfassen die gesamte Vorkette, beginnend bei der Rohstoffgewinnung bis hin zur Abfallnachbehandlung und Recyclingfähigkeit. Am Ende der Lebensdauer wird sowohl die Entsorgung der Reststoffe aus dem Abriss des gesamten Gebäudes

als auch der Materialaustausch im Rahmen der Sanierung berücksichtigt. (Wittstock, Albrecht, Colodel, & Lindner, 2009)

Ein Produkt aus Lebenszyklusperspektive zu betrachten bedeutet, das Produkt über seine gesamten Lebensphasen zu verfolgen und entsprechend zu bewerten. Ein Gebäude wird gemäß EN 15804 durch die Lebensphasen Herstellungsphase (A), Nutzungsphase (B), Entsorgungsphase (C) und Vorteile und Lasten außerhalb der Systemgrenze (D), wie in **Abbildung 28** zu sehen, betrachtet. Modul D wird außerhalb der Systemgrenze des Gebäudes betrachtet. Es liefert zusätzliche Informationen, die sich aus der Wiederverwendung, dem Recycling und der Energierückgewinnung über die Systemgrenze hinweg ergeben. (IBO GmbH, 2022)

Die Überlegung hinter dem Ansatz Nettoeinflüsse zu berücksichtigen ist, dass Sekundärmaterialien, die als Input für die Produktionsstufe (Modul A) verwendet werden, nicht die Auswirkungen der Primärmaterialgewinnung/-herstellung tragen müssen. Da Vorteile bereits in der Produktionsstufe berücksichtigt werden, können sie folglich nicht erneut in Modul D berücksichtigt werden. Außerdem soll mit diesem Ansatz verhindert werden, dass Outputströme von Sekundärmaterialien als Ersatz für Primärmaterialien in einem nächsten Produktsystem angesehen werden, wenn das nächste Produktsystem bereits (teilweise) Sekundärmaterialien in der Realität nutzt. (Delem & Wastiels, 2019)

Je höher der Recyclinganteil eines Materials ist, desto weniger Belastungen aus der Primärmaterialherstellung sind in Modul A zu berücksichtigen. Es ist jedoch möglich, dass die Verwendung eines Sekundärmaterials zu einer höheren Umweltbelastung führt, als die Verwendung von Primärmaterialien. (Van Gulck, Wastiels, & Steeman, 2022)

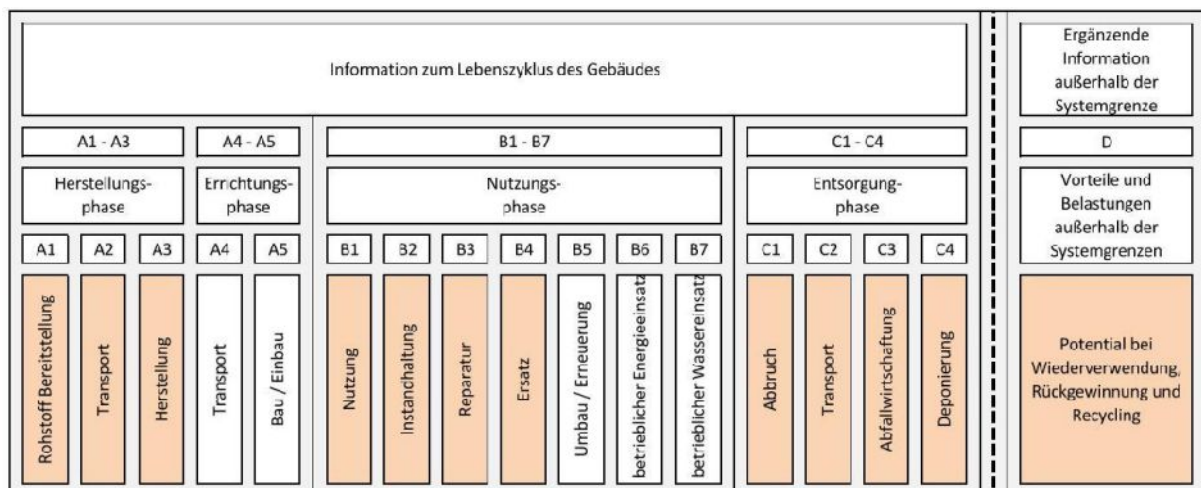


Abbildung 28: Information zum Lebenszyklus eines Gebäudes (IBO GmbH, 2022)

Die umweltbezogenen Informationen zu Baustoffprodukten werden in sogenannten Umweltproduktdeklarationen oder auch EPDs (Environmental Product Declarations) veröffentlicht. Sie enthalten grundlegende Informationen zum Ressourcenverbrauch und den Umweltkennzahlen. Die Produktdeklarationen werden durch die internationale Norm ISO14025

und EN15804 geregelt. Hersteller:innen beauftragen selbstständig und freiwillig EPDs und diese dienen hauptsächlich dem Informationsaustausch zwischen Anbieter:innen und Verbraucher:innen. (Wittstock, Albrecht, Colodel, & Lindner, 2009)

4.9.1 Ökoindex 3

Im Rahmen dieser Literaturrecherche wurde der Ökoindex 3 und die *Life-Cycle-Gap*-Analyse hinsichtlich ihrer Anwendung auf die Ökobilanzberechnung in der EoL-Phase untersucht. Der Ökoindex 3 (OI3-Index) wurde 2003 vom Österreichischen Institut für Bauen und Ökologie (IBO) als vereinfachtes quantitatives Bewertungsverfahren für Baustoffe, Bauwerke und Gebäude auf Basis einer Ökobilanz entwickelt. Dabei werden die drei Indikatoren

- Versauerungspotential (AP)
- Treibhausgaspotential (GWP) und
- Primärenergieinhalt aus nicht-erneuerbaren Quellen (PEI) betrachtet.

Die drei Indikatoren werden anschließend zu einem einzigen Indikator, dem OI3, zusammengefasst. Die Eingangswerte werden aus den baubook-Richtwerten bzw. geeigneten produktspezifischen Werten aus den Umweltproduktdeklarationen (EPDs) entnommen. Der OI3 ist der absolute Wert der Wirkungsindikatoren, ausgedrückt als Punktzahl. Je höher die Punktzahl, desto größer die Umweltauswirkung des Objekts. Die Berechnung wird über das Softwaretool Eco2Soft durchgeführt. Basis für die Datenbank von Eco2soft ist der baubook-Rechner von IBO. Dort kann das EoL Szenario jedes Bauproduktes ausgewählt werden. Die in der Gebäudesanierung anfallenden Instandhaltungszyklen (*ökologischer Rucksack*) können ebenfalls über das Softwaretool berechnet werden. Dabei sollte den jeweiligen Bauteilschichten eine Nutzungsdauer und Betrachtungszeitraum zugeordnet werden. Der Betrachtungszeitraum beträgt gemäß EN15804 typischerweise 100 Jahre, kann jedoch variieren. Die Lebensdauer der Komponenten wird von Eco2Soft vorgeschlagen, kann aber jederzeit geändert werden. (IBO GmbH, 2022)

4.9.2 Life-Cycle-Gap-Analyse

Das zweite untersuchte Bewertungssystem ist die *Life-Cycle-Gap*-Analyse (LCGA). Sie stellt einen erweiterten Interpretationsmechanismus in der Bewertung lebenszyklusorientierter Analysen dar, der den Beitrag von Neuentwicklungen und Innovationen hinsichtlich dem *Curricular-Economy*-Potential und der Umweltwirkung, entlang des gesamten Produktlebenszyklus, systematisch quantifiziert. In der LCGA ist die Ermittlung von Lebenszykluslücken im Vordergrund. Dies ist die ökologische Differenz zwischen der Werthaltigkeit der in der

Produktion eingesetzten Rohstoffe und Energien und der Werthaltigkeit der am Lebensende freiwerdenden Sekundärrohstoffe. Bei einem, aus kreislaufwirtschaftlicher Sicht, idealen System, sind diese ökologischen Systemverluste nahezu eliminiert. Das heißt, Sekundärrohstoffe ersetzen Primärrohstoffe und/ oder recycelte Komponenten zu einem Wert, der neu hergestellten Komponenten von Produkten und Kreisläufen entspricht. Ein Gesamtvorteil ergibt sich nur dann, wenn die ressourcenseitigen Umweltvorteile der Kreislaufführung die Aufwendungen für jeden Kreislaufschluss überwiegen. Die **Abbildung 29** stellt den Life Cycle Gap bezogen auf den GWP graphisch dar. Einerseits können Produktsystemverluste reduziert werden, indem die potenziellen Umweltauswirkungen während der Herstellungsphase reduziert werden - beispielsweise durch die Steigerung der Material- und Energieeffizienz in der Produktion. Andererseits besteht auch die Möglichkeit, die Umweltgutschriften am Lebensende des Produkts zu erhöhen, beispielsweise durch die Wiederverwendung einzelner Materialien. (Dieterle & Viere, 2019)

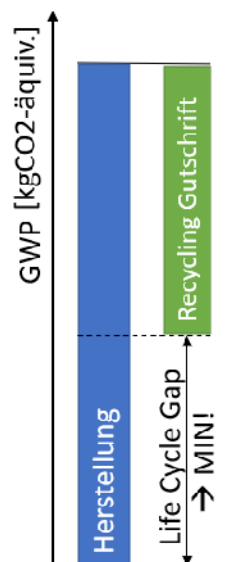


Abbildung 29: LCGA-Diagramm (eigene Darstellung nach (Dieterle & Viere, 2019))

Die spezifische Art und Weise, wie Ergebnisse innerhalb der LCGA präsentiert und interpretiert werden, erleichtert das Erkennen von Verbesserungspotenzialen und erhöht die Transparenz in Bezug auf eine geschlossene Kreislaufwirtschaft. Die Abwägungen, eine höhere Umweltbelastung zugunsten höherer Recyclingquoten in Kauf zu nehmen, können auf diese Weise transparent gemacht und eliminiert werden. (Dieterle & Viere, 2019)

Mötzl (Mötzl & Pladerer, 2010) sieht ein unzureichendes Vorliegen von Sachbilanzdaten für die Beschreibung von Entsorgungsprozessen, um Ökobilanzen mit ausreichender Genauigkeit zu berechnen. Ein weiterer Punkt ist, dass Ökobilanz-Indikatoren nicht empfindlich auf die Entsorgungsprozesse reagieren. Die Deponierung wird hauptsächlich durch die Abbruch- und

Transportprozesse beschrieben. Weiters ergibt sich die Problematik in der Harmonisierung. Die Methode ist zwar genormt, manche Bereiche müssen aber weiter harmonisiert werden (Annahmen von Nutzungsdauern (Nutzungsdauerthematik), Bezugsflächen, ect.). (Mötzl & Pladerer, 2010)

Mit Stand 2020 werden überwiegend die Module A1-A3 von den Herstellern deklariert. In Deutschland gilt seit 2020 eine überarbeitete DIN (EN15804:2020-03), welche das Angeben der Module A1-A3, C1-C4 und das Modul D verpflichtet. Um Datenlücken zu schließen, werden oftmals generische Datensätze als End-of-Life Szenario angegeben. Diese sind allgemeingültige Durchschnittswerte und stellen eine nicht produktspezifische Information dar. (A. Hafner et al, 2020)

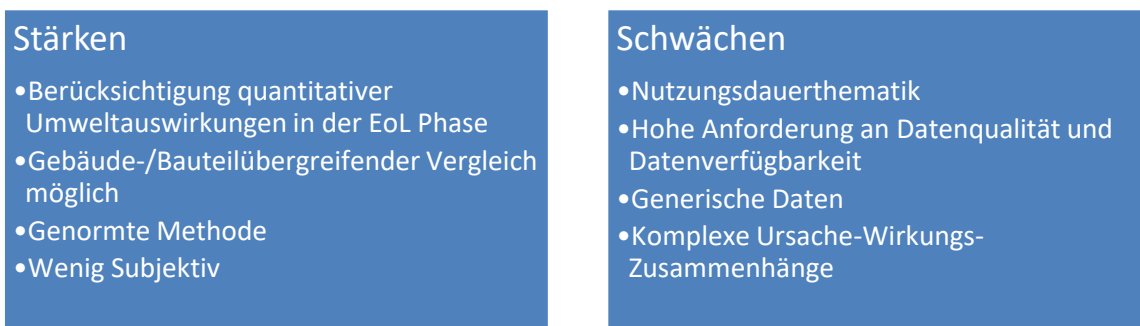


Abbildung 30: Stärken/Schwächen der quantitativen Ökobilanzmethode (eigene Darstellung)

4.10 Sanchez und Haas' Demontagesequenzmodell

Ein Rückbauprozess ist komplex und bedarf einer sorgfältigen Planung durch Expert:innen. Sanchez & Haas haben daher eine computergestützte Methode entwickelt, um die Wiederverwendung von Gebäudeteilen in der Demontageplanungsphase zu analysieren. Die Entwicklung eines solchen Verfahrens könnte ein besseres Verständnis der am Rückbauprozess beteiligten Parameter leisten, um den Nutzen und ihre Anwendung hin zu einer nachhaltigeren Entwicklung in der Bauindustrie zu ermöglichen. Bei der Methode wird ein geplantes Gebäude in ein Demontagemodell überführt, aus dem anschließend eine sogenannte Demontagesequenz generiert wird. Die Qualität und Komplexität des Demontagemodells beeinflusst die Lösungsqualität und die Suchzeit des Rechners. Ein Modell, welches viele Informationen enthält, verbessert die Lösungsqualität, verlängert jedoch die Suchzeit. Ein Gebäudekomplex besteht aus einer übermäßigen Anzahl an Elementen und Verbindungen. Als Vereinfachung können diese jeweils gruppiert werden, ohne die Allgemeingültigkeit zu verlieren. Das Modell muss ein geeignetes Niveau an Detail oder Granularität festlegen, um die Komplexität der Berechnung in einem vernünftigen Rahmen zu halten. (Sanchez & Haas, 2018)

Die Randbedingungen des Modells können in Form von Matrizen dargestellt werden. Die Spalten in der Matrix beschreiben jeweils eine Eigenschaft über ein Element. Die Reihen geben Auskunft, welches Element beschrieben wird. Eigenschaften können beispielsweise geometrische, physische, funktionale, ökologische oder ökonomische Informationen beinhalten. Die Matrix aus **Formel 12** beschreibt die geometrischen Randbedingungen für ein Rahmentragwerk (**Abbildung 31**). Jede Zelle beschreibt die Beziehung des betroffenen Elementes mit einem anderen Element in der vorgegebenen Richtung. Dabei ist C_i ein Element (englisch component) und f_i ein Verbindungselement (englisch fastener). Die geometrischen Randbedingungen in den Richtungen $+x$, $-x$, $+y$ und $-y$ des ersten Elementes werden somit in der Zelle CC_1 beschrieben (englisch contact constraint). (Sanchez & Haas, 2018)

$$CC = \begin{matrix} & +x & -x & +y & -y \\ \begin{matrix} CC_1 \\ CC_2 \\ CC_3 \\ CC_4 \\ CC_5 \\ CC_6 \\ CC_7 \\ CC_8 \\ CC_9 \\ CC_{10} \end{matrix} & = & \begin{bmatrix} f_1 & f_1 & f_1, c_4 & f_1, ground \\ f_4 & f_4 & f_4, c_5 & f_4, ground \\ f_7 & f_7 & f_7, c_6 & f_7, ground \\ f_1, f_2, c_7, c_{10} & f_1, f_2 & f_1, f_2 & f_1, f_2, c_1 \\ f_3, f_4, f_5, c_8 & f_3, f_4, f_5, c_{10} & f_4, f_5, f_3 & f_3, f_4, f_5, c_2 \\ f_6, f_7 & f_6, f_7, c_8 & f_6, f_7 & f_6, f_7, c_3 \\ f_2, f_3, f_9, f_{10}, c_5 & f_2, f_3, f_9, f_{10}, c_4 & f_2, f_3, f_9, f_{10} & f_2, f_3, f_9, f_{10}, c_9 \\ f_5, f_6 & f_5, f_6, c_5 & f_3, f_5, f_6 & f_5, f_6 \\ f_9 & f_9 & f_9, c_7 & f_9 \\ f_{10}, c_5 & f_{10}, c_4 & f_{10} & f_{10} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Formel 12: Geometrische Randbedingungen für das Gebäudemodell aus **Abbildung 31** in den Richtungen $+x$, $-x$, $+y$ und $-y$ (Sanchez & Haas, 2018)

Informationen können beliebig ergänzt und erweitert werden. In den Matrizen aus Formel 13 und Formel 14 werden beispielsweise weitere ökonomische und ökologische Eigenschaften von jedem Element beschrieben. (Sanchez & Haas, 2018)

$$EnvC = \begin{matrix} & GWP & PED \\ \begin{matrix} EnvC_1 \\ EnvC_2 \\ EnvC_3 \\ EnvC_4 \\ EnvC_5 \\ EnvC_6 \\ EnvC_7 \\ EnvC_8 \\ EnvC_9 \\ EnvC_{10} \end{matrix} & = & \begin{bmatrix} 805,43 & 6.416,06 \\ 805,43 & 6.416,06 \\ 805,43 & 6.416,06 \\ 228,94 & 3.124,31 \\ 202,74 & 1.568,91 \\ 202,74 & 1.568,91 \\ 174,34 & 2.516,24 \\ 485,25 & 3.733,11 \\ 12,47 & 185,29 \\ 21,93 & 301,00 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Formel 13: ökologische Eigenschaften (GWP, PED) eines jeden Elementes für das Gebäudemodell aus **Abbildung 31** (Sanchez & Haas, 2018)

$$EC = \begin{bmatrix} EC_1 \\ EC_2 \\ EC_3 \\ EC_4 \\ EC_5 \\ EC_6 \\ EC_7 \\ EC_8 \\ EC_9 \\ EC_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 438,25\$ \\ 438,25\$ \\ 438,25\$ \\ 86,75\$ \\ 71,61\$ \\ 71,61\$ \\ 86,75\$ \\ 174,73\$ \\ 67,29\$ \\ 40,12\$ \end{bmatrix} \begin{matrix} \textit{Demolition} \\ \textit{Demolition} \\ \textit{Demolition} \\ \textit{Disassembly} \\ \textit{Disassembly} \\ \textit{Disassembly} \\ \textit{Disassembly} \\ \textit{Demolition} \\ \textit{Disassembly} \\ \textit{Disassembly} \end{matrix}$$

Formel 14: ökonomische Eigenschaften (Kosten) eines jeden Elementes für das Gebäudemodell aus Abbildung 31 (Sanchez & Haas, 2018)

Um die computergestützte Erzeugung von Demontagesequenzen zu ermöglichen ist eine Einführung von Regeln und Algorithmen notwendig. Die Regeln sollen unrealistische Lösungswege ausschließen und dadurch den Rechenaufwand und die Rechenzeit vermindern. Anschließend wird über einen iterativen Algorithmus ein Demontageplan erstellt. Ein optimaler Rückbau kann beispielsweise dadurch erreicht werden, indem die ökologischen und/ oder die ökonomischen Einflüsse als Parameter definiert werden und anschließend in iterativen Schritten minimiert werden. (Sanchez & Haas, 2018)

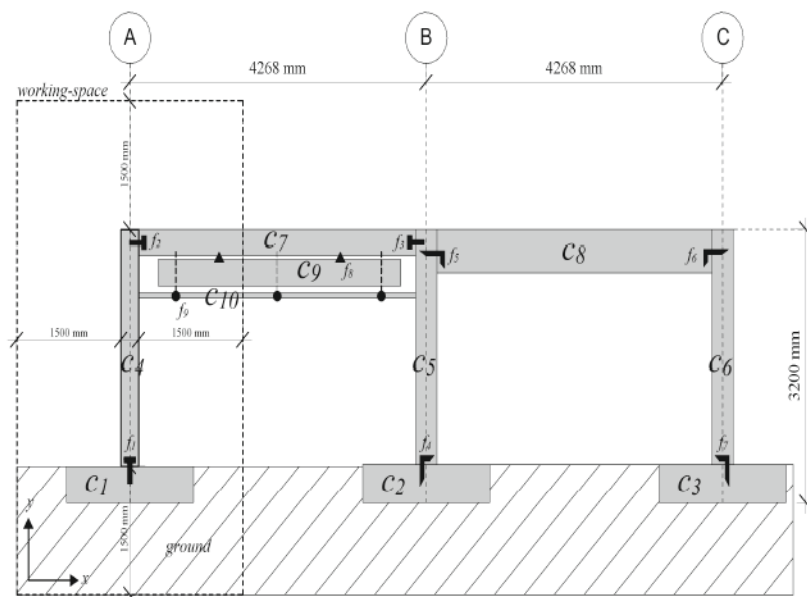


Abbildung 31: Modellbeispiel eines Rahmentragwerkes (Sanchez & Haas, 2018)

In Abbildung 32 wird der geplottete Demontagesequenzplan für den Rückbau von Element C7 dargestellt. Die Abbildung zeigt, welche Elemente bei der Demontage von Element C7 betroffen sind, in welcher Beziehung sie miteinander stehen und in welcher Reihenfolge die Demontage zu erfolgen hat. Um das Element C7 demontieren zu können, müssen vorher die Elemente, die in **Abbildung 32** dargestellt sind, abgetragen werden. Die Demontagereihenfolge ist in der Darstellung von oben nach unten zu lesen (zuerst f9, dann c10, usw.). (Sanchez & Haas, 2018)

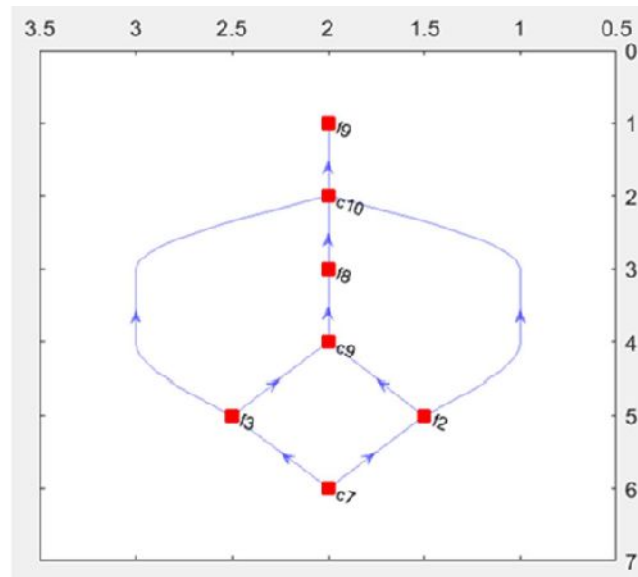


Abbildung 32: Demontagesequenzplan für das Element C7 (Sanchez & Haas, 2018)

Das vorgestellte Demontagesequenzmethode von Sanchez & Haas beschreibt eine computergestützte Simulation für eine Gebäudedemontage, welche hohe Anforderungen an das Gebäudemodell und die eingebetteten Informationen stellt. Durch Erweiterung von weiteren Inputdaten, die mit den Bauteilen zu verknüpfen sind, können zum Beispiel ökologische und ökonomische Outputdaten erzeugt werden. Da viele Parameter Einfluss auf das Modell haben, ist die Methode jedoch sehr komplex. Weiters ist zu hinterfragen, ob die erforderlichen Inputdaten einfach zu bestimmen sind und richtig modelliert werden können. Zu viele Lücken bei den Inputdaten würden unzureichende Ergebnisse liefern, wodurch die Methode nicht für die Praxis geeignet wäre.

Stärken

- Detaillierte Beschreibung des Rückbauprozess
- Beliebige Erweiterung der Inputdaten
- Alternative Vergleiche in der Demontage möglich

Schwächen

- Aufwendige & computergestützte Berechnung erforderlich
- Hohe Anforderung an das Modell und der Datenqualität und Datenverfügbarkeit

Abbildung 33: Stärken/Schwächen der Bewertungsmethode nach Sanchez und Haas (eigene Darstellung)

4.11 Bewertungsmethode *Disassembly Network Analysis*

Bei der Bewertungsmethode von Denis (Denis, Vandervaeren, & De Temmerman, 2018) handelt es sich um eine Weiterentwicklung des Demontagesequenzmodell von Sanchez und Haas (Sanchez & Haas, 2018) und ist ebenfalls eine computergestützte analytische Methode, welche die

Rückbaueigenschaften von Konstruktionen untersucht. Die Methode, auch *Disassembly-Network-Analysis* (DNA) genannt, untersucht die Beziehungen und Wechselwirkungen zwischen zwei Elementen, um den Materialfluss während des Rückbauprozesses zu bestimmen und gleichzeitig die erforderliche Rückbauzeit zu definieren. Anhand von drei Indikatoren wird das Ergebnis der DNA beschrieben:

- rückgewinnbare Elemente,
- verlorenen Elemente und
- Rückbauzeit.

Für die Ermittlung der ersten zwei Indikatoren wird die Masse des Elementes benötigt. Der Zeitaufwand pro Bauteil wird dem Modell hinzugefügt. Durch die Gegenüberstellung von Materialfluss und Zeitaufwand können Optimierungen in der Rückbauphase bestimmt werden. Wird ein Bauteil abgebrochen, wird angenommen, dass mehr Masse zu den verlorenen Elementen dazugezählt wird, jedoch eine Zeitersparnis möglich ist. Wird ein Bauteil selektiv Rückgebaut, bleiben mehr rückgewinnbare Elemente übrig. Allerdings wird angenommen, dass der selektive Rückbau zeitlich aufwendiger ist. Die wichtigsten Parameter, welche Einfluss auf die DNA-Methode haben, sind:

- Die Zugänglichkeit: Ein Element ist zugänglich, wenn ein/e Arbeiter:in das Element erreichen kann.
- Die Möglichkeit, das Element zu transportieren: Die Masse und das Volumen haben einen wesentlichen Einfluss auf die Transportkapazitäten.
- Widerstandsfaktor [0,1]: Dieser Wert definiert die Bruchstelle, wenn zwei Elemente mit einer irreversiblen Verbindung getrennt werden müssen.
- Gewicht: Repräsentiert die Masse des Elementes.
- Rückgängigkeit von Verbindungen: Dieser Parameter überprüft, ob eine Verbindung ohne Schädigung der Elemente aufgelöst werden kann.
- Rückbau- und Abbruchzeitaufwand: Die Zeit die benötigt wird, um eine reversible Verbindung aufzulösen.
- Sequenzielle Abhängigkeit: Dieser Parameter geht von der Annahme aus, dass die Elemente verschiedene Funktionen haben (Tragfunktion, Aussteifung, usw.). Die Beziehungen und Abhängigkeiten in dieser Hinsicht beeinflussen den Rückbauprozess.

Um ein Element e_0 aus einer Konstruktion herauszulösen, wird geprüft, ob das Element trennbar ist und transportiert werden kann. In weiterer Folge werden alle möglichen Demontagepfade ermittelt und aufgezählt, die für die Herauslösung des Elementes e_0 möglich

sind. Als Ergebnis wird für jeden möglichen Rückbaupfad eine Liste mit folgendem Output generiert:

- Liste der rückgewinnbaren und verlorenen Elemente
- Absolute Masse die als Abfall entsteht
- Erforderliche Rückbauzeit
- Rückbauabfolge

Der Output der DNA-Methode erlaubt verschiedene Rückbau Szenarien zu vergleichen, wodurch ein optimales Ergebnis herausgearbeitet werden kann. (Denis, Vandervaeren, & De Temmerman, 2018)

Um die Anwendung der DNA-Methode besser darzustellen, wird diese an einem Beispiel einer Außenfassade (Abbildung 34) illustrativ angewandt. Die Eingangswerte wurden für dieses Beispiel frei angenommen.

Der Aufbau der Außenfassade wird folgendermaßen von links nach rechts definiert:

- e1 Außenverkleidung
- e2 Dampfbremse
- e3 Wärmedämmung
- e4 Mauerwerk
- e5 Innenausbau

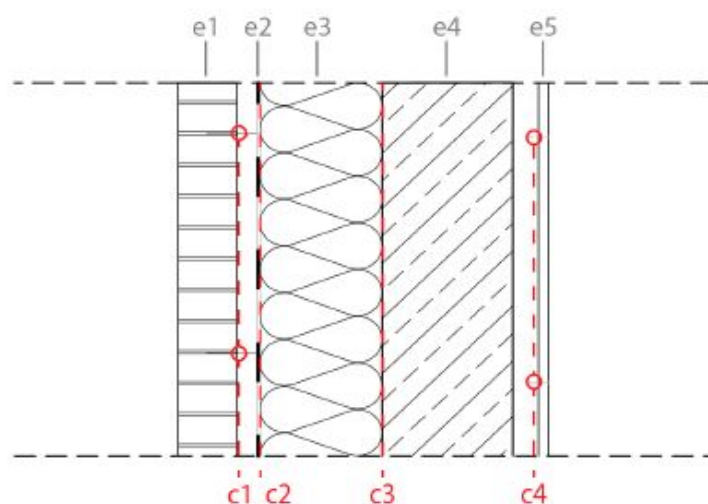


Abbildung 34: Beispiel Außenfassade (Denis, Vandervaeren, & De Temmerman, 2018)

In Abbildung 35 sind die Abhängigkeiten der einzelnen Elemente und Verbindungen der Außenfassade als Netzwerkvisualisierung dargestellt. Die als Kreise dargestellten Elemente

werden über Verbindungselemente verbunden. Blau hinterlegte Elemente stellen zugängliche Elemente dar und müssen für den Rückbau zuerst entnommen werden, um noch nicht zugängliche Elemente erreichen zu können. Eine durchgezogene Linie zwischen zwei Elementen bedeutet eine irreversible Verbindung, die mit einer Zerstörung einhergeht. Der zuvor erwähnte Widerstandsfaktor bestimmt in diesem Fall, welches Element, durch das Aufbrechen der Verbindung, rückgewonnen werden kann. Das Element mit einem niedrigeren Widerstandsfaktor geht dabei verloren. Strichlierte Linien zeigen eine reversible Verbindung und Pfeile zeigen die Verbindungsrichtung auf. In **Abbildung 35** weisen diese auf das Mauerwerk (e4), weil es, aus statischen Gründen, nicht vor den anderen Elementen aus dem Bauteil entfernt werden kann. (Denis, Vandervaeren, & De Temmerman, 2018)

Die Tabelle 3 und Tabelle 4 zeigen weitere Eingangswerte für die fiktive Außenwand. Die Ergebnisse sind in **Tabelle 5** dargestellt.

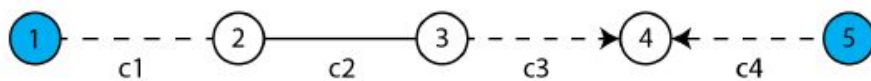


Abbildung 35: Netzwerkvisualisierung der Außenfassade (Denis, Vandervaeren, & De Temmerman, 2018)

Elemente	e1	e2	e3	e4	e5
Element Typ	Außenverkleidung	Dampfbremse	Wärmedämmung	Mauerwerk	Innenausbau
Transportierbar	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja
Widerstandsfaktor	0,7	0,2	0,4	1	0,7
Gewicht [kg]	10	2	5	150	5

Tabelle 3: Eingangswerte der Elemente für die Außenfassade (Denis, Vandervaeren, & De Temmerman, 2018)

Verbindungen	c1	c2	c3	c4
Reversibel	Ja	Nein	Ja	Ja
Zeit Rückbau [s]	60	/	60	180
Zeit Abbruch [s]	5	220	5	15

Tabelle 4: Eingangswerte der Verbindungen für die Außenfassade (Denis, Vandervaeren, & De Temmerman, 2018)

Rückgewinnbare Elemente	e1	e2	e3	e4	e5
1. Ist Element transportierbar	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja
2. Sind die Verbindungen reversibel?	Ja	Nein	Nein	/	Ja
3. Hat den größeren Widerstandsfaktor	/	Nein	Ja	/	/
Schlussfolgerung	Rückgewinnbar	Kann nicht rückgewonnen werden	Rückgewinnbar	Kann nicht rückgewonnen werden	Rückgewinnbar

Tabelle 5: Ermittlung der Rückgewinnbaren Elemente (Denis, Vandervaeren, & De Temmerman, 2018)

Wenn man beispielsweise das Element e3 aus der Konstruktion herauslösen will, werden die Punkte nach **Tabelle 5** folgendermaßen durchgespielt:

- 1) Ist e3 transportierbar? Diese Eigenschaft kann anhand der Masse oder Größe (Volumen) bestimmt werden, indem man z.B. für das Gewicht oder den Abmessungen eine obere Schranke setzt.

$$Weight_{element} < Weight_{limit} ; (x, y, z)_{element} < (l_{max}, L_{max}, H_{max})$$

Formel 15: Ermittlung der Transportierbarkeit von Elementen (Denis, Vandervaeren, & De Temmerman, 2018)

- 2) Sind die Verbindungen reversibel? Nein, die Verbindung c2 zwischen dem Element e2 und e3 lässt sich nicht zerstörungsfrei auflösen.
- 3) Da das Element e3 einen höheren Widerstandsfaktor hat, wird es erhalten bleiben. Das Element e2 kann nicht zerstörungsfrei aus der Verbindung entfernt werden und wird zu der Liste der verlorenen Elemente gezählt.

(Denis, Vandervaeren, & De Temmerman, 2018)

Wiederholt man den Prozess für jedes Element, erhält man eine Liste an rückgewinnbaren und verlorenen Elementen für das gesamte Bauteil. Die Masse der verlorenen Elemente kann als Referenz für die Abfallmenge herangezogen werden und als Richtwert für die Kreislauffähigkeit betrachtet werden. Wird die Rückbau- bzw. Abbruchzeit der einzelnen Elemente berücksichtigt und addiert, so wird es möglich, die theoretische Rückbau- bzw. Abbruchzeit des gesamten Bauteils zu erhalten. (Denis, Vandervaeren, & De Temmerman, 2018)

Folglich beschreibt die DNA-Methode nicht die Recyclingfähigkeit der Baustoffe, sondern fokussiert sich ausschließlich auf die Untersuchung der Rückbaueigenschaften einer Konstruktion auf Bauteil- und Gebäudeebene.

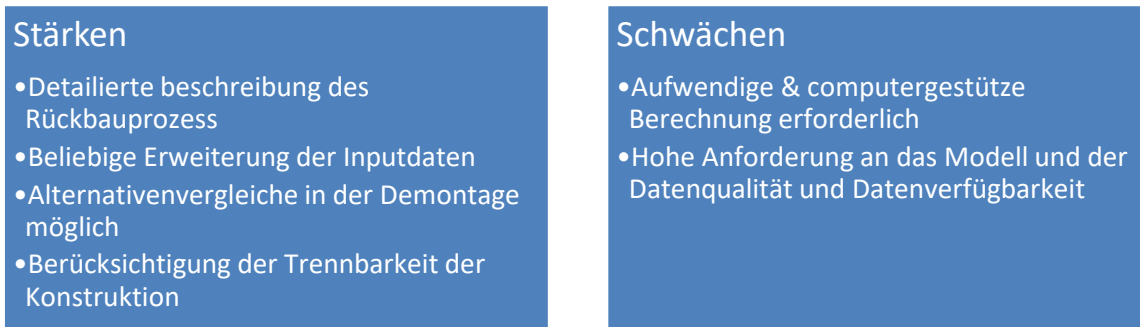


Abbildung 36: Stärken/Schwächen der DNA-Methode (eigene Darstellung)

4.12 Zwischenfazit

Die Literaturrecherche stellt mehrere Bewertungsmethoden zur Bewertung der Recyclingfähigkeit von Gebäuden vor (Überblick in **Tabelle 1**). Dabei werden unterschiedliche Methoden gezeigt, welche verschiedene Stärken und Schwächen aufweisen.

Die Ökobilanzmethode basiert auf einem rein quantitativen Ansatz. Ziel ist es, die Umwelteinflüsse, ausgedrückt über ökologische Indikatoren (zum Beispiel GWP), zu beschreiben. Dabei müssen Annahmen zu EoL-Szenarien geführt werden. Die Ergebnisse sollen tatsächliche ökologische Einflüsse wiedergeben, jedoch spiegeln sie die Recyclingaspekte nur teilweise wider (Rosen, 2021). Weiters entstehen hohe Anforderungen an die einhergehenden, produktspezifischen Daten, was durchaus problematisch für die Praxistauglichkeit ist. In Hinblick auf die zunehmende Dauer des Betrachtungszeitraums, weichen die Annahmen zu EoL-Prozessen immer weiter von realen Szenarien ab. Dies ergibt sich durch die fehlende technologische Entwicklung im Bereich der Entsorgung und Verwertung. Es lassen sich daher die quantitativen Umweltauswirkungen nicht zuverlässig vorhersagen (Kögler, 2014).

Das Demontagesequenzmodell stellt eine Methode zur Analyse von Rückbauprozessen vor und die DNA-Methode erweitert die Methode, indem sie die trennbaren und nicht trennbaren Mengen ermittelt. Die Methoden fokussieren sich dabei ausschließlich auf die Rückbau- und Trennungseigenschaften von Baukonstruktionen und liefern keine Ergebnisse für die Bewertung der Recyclingfähigkeit. Jedoch wurde gezeigt, dass man die Methoden mit einer Ökobilanzrechnung erweitern kann, wodurch die ökonomischen und ökologischen Effekte berücksichtigt werden könnten.

Anders verhält es sich bei den Methoden von Figl, Vogdt, BNB, DGNB, BIM-DAS und dem EI10, welche auf einen semi-quantitativen Ansatz basieren. Hierbei werden die Baustoffe in Gruppen bzw. Klassen zugewiesen und mittels einem gewichteten Formelapparat beurteilt. Das Ergebnis ist im Grunde ein gewichtetes Volumen bzw. Masse. Die Inputdaten erfordern zwar keine genaue numerische Berechnung, basieren allerdings auf Annahmen in der Klassenzuweisung, die zu einem gewissen Grad einer subjektiven Empfindung des gewichteten Modells unterliegen. Der

Output gibt keine direkte Auskunft über die tatsächlichen ökologischen Auswirkungen, sondern liefert einen *abstrakten* Vergleichsindikator. Der Vorteil dieses Indikators liegt in der vereinfachten Bewertung auf Bauteil und Gebäudeebene. Untersucht man allerdings dasselbe Gebäude oder denselben Bauteil mit verschiedenen Bewertungsmethoden, so können sich Unterschiede im Ergebnis zeigen. Das liegt meist an der gewählten Gewichtung der Beurteilung und in der unterschiedlichen Annahme für die Eingangsdaten. Die beschriebene Systematik wirft Fragen auf, wie Nutzer:innen die Ergebnisse in Beziehung setzen können, abgesehen von den bereits genannten Skalen der jeweiligen Bewertungssysteme. Insgesamt erscheinen die Ergebnisse wenig aussagekräftig zu sein, wenn es darum geht, die Kreislauffähigkeit von Gebäuden zu bewerten.

Die Methode von Hafner und der Urban Mining Index beschreiben die Recyclingfähigkeit quantitativ, indem die recycelten Massenanteile ermittelt werden, wodurch die Ergebnisse besser in Beziehung zur Kreislauffähigkeit gesetzt werden können.

5 Analyse der Bewertungsmethoden und Implementierungsvorschläge für die EI10-Methodik

Die **Tabelle 6** zeigt im Überblick, welche Indikatoren bei den unterschiedlichen Bewertungssystemen zur Anwendung kommen. Anhand der Untersuchung soll festgestellt werden, welche Aspekte in der EI10-Methodik ein Verbesserungspotential haben und wie eine mögliche Implementierung ausschauen könnte.

	H. FIGL	A. HAFNER	F. U. VOGDT	DNA	DEMONTAGESEQUENZMODELL	ÖKOBILANZMETHODE (OI3, LCGA)	BNB-KRITERIEN-STECK-BRIEF 4.1.4	DGNB - TEC 1.6	BIM-DAS	ENTSORGUNGSIKATOR - EI10	URBAN MINING INDEX
GEOMETRIE/ VOLUMEN	X		X					X		X	
MASSE		X	X	X	X	X	X	X	X		X
RÜCKBAU- UND TRENNBARKEIT (FÜGETECHNIK)		X	X	X		X	X	X	X	X	X
EMISSIONEN WIE GWP, PEI, AP, ECT.						X					
ENTSORGUNGS- & VERWERTUNGS- EINSTUFUNG	X	X	X			X	X	X		X	X
RECYCLINGRATE									X		
RECYCLING-POTENTIAL IN DER ZUKUNFT	X										
MATERIALRESTWERT IN DER EOL											X

Tabelle 6: Übersicht der Bewertungsmethoden und Indikatoren für die EoL-Phase (eigene Darstellung)

5.1 Volumen-/ Massenbezogener Ansatz

Das IBO Institut (IBO GmbH, 2020) legt die Hypothese zugrunde, dass je höher das anfallende Volumen ist, desto höher die ökologischen Aufwände der Entsorgung sind und somit das Volumen in vielen Teilbereichen der Entsorgung (Lagerung, Transport und Deponierung) entscheidend ist. Andererseits wird von Akinade (Akinade, et al., 2015) argumentiert, dass die zugehörige graue Energie eines Elements direkt proportional zu seiner Masse ist und daher ein massenbezogener Ansatz sinnvoll ist. In der **Tabelle 6** wird innerhalb der Zeilen *Geometrie/Volumen* und *Masse* beschrieben, ob ein Bewertungssystem Volumen oder Massen für die Beurteilung berücksichtigt.

Die Gewichtung bzw. Aggregation über einen rein massenbezogenen Ansatz, würde die Effekte von voluminösen Bauteilen unterschätzen.

5.1.1 Implementierungsvorschläge Volumen-/ Massenbezogener Ansatz

Da im Bauwesen Produkte mit hoher Rohdichte, wie zum Beispiel Stahlbeton, als auch mit geringer Rohdichte, wie zum Beispiel Dämmstoffe verwendet werden, wäre eine mögliche Implementierung, den Volumenbezogenen Ansatz, um einen massenbezogenen Ansatz zu erweitern. Die Bewertungsmethode von Vogdt berücksichtigt die Bewertung sowohl volumen- als auch massenbezogen, wobei der schlechtere Wert für die Gesamtbewertung maßgebend ist. Es muss jedoch sichergestellt werden, dass bei einem massenbezogenen Ansatz die Effekte voluminöser Bauteile nicht unterschätzt werden.

5.2 Indikatoren zur Beschreibung der Rückbau- und Trennbarkeit

Eine Rückgewinnung einzelner Baustoffe in möglichst reiner Form hat einen wesentlichen Einfluss auf die Recyclingqualität und kann durch die Einbeziehung der Rückbau- und Trennbarkeit von Materialien angeführt werden.

Die Methode nach Hafner berücksichtigt die Verbindung der Bauteile über eine einfache Bewertungsmatrix (**Abbildung 16**) und unterscheidet dabei zwischen Trennung mit und ohne Schädigung. Als Ergebnis erhält man eine qualitative Beschreibung der Trennbarkeit der Bauteilschichten in Matrixform, die in der Massenbilanz berücksichtigt wird.

Das System der DNA-Methode argumentiert ebenfalls die Lösbarkeit von zwei Bauteilschichten, indem bewertet wird, ob die Trennung zerstörungsfrei einhergeht oder nicht.

Die Bewertungsmethode von Vogdt, der BNB-Kriteriensteckbrief und der BIM-DAS beurteilen die Rückbau- und Trennungseigenschaften der Bauteile über Parameter, welche zuerst quantifiziert werden müssen und anschließend in einem gewichteten Formelapparat eingesetzt werden. Ähnlich funktioniert das Punktesystem des DGNB, welches einer Variable, dem Indikator für die Rückbaufreundlichkeit, einen quantitativen Wert zuweist und anschließend eine entsprechende Punkteanzahl vergibt.

Der Ansatz beim Urban Mining Index zur Beurteilung der Trennbarkeit einer Konstruktion, beruht auf dem Arbeitsaufwand, gemessen in Megajoule, der erforderlich ist, um eine sortenreine Trennung zu ermöglichen und den Restwert, den das herauszulösende Material in der EoL Phase hat. Auf diese Weise können der Aufwand und die Motivation zum Rückbau und zur Trennung abgebildet werden.

Beim EI10 wird das Potential für den Rückbau, die Trennung und Verwertung in einem einzelnen Kennwert zusammen angegeben. Dazu werden Bauschichten/ Baustoffe in Abhängigkeit ihrer Lage und Verbindung mit anderen Materialien in einem Bauteilkatalog angegeben und die adaptierten Werte für das Entsorgungs- und Verwertungspotential angeführt.

Der Vorteil liegt einerseits in der vereinfachten Bewertung, andererseits fehlt die Flexibilität, wenn Bauteile nicht in der Adaptierungstabelle vorhanden sind. Hierbei ist ebenfalls zu hinterfragen, auf welchen Erkenntnissen sich die Adaptierungstabellen in der Einordnung stützen und wie die Bewertung in Beziehung zu einem tatsächlichen Rückbauaufwand gesetzt werden kann.

Bei der Bewertungsmethode von Figl konnte nicht festgestellt werden, ob Rückbau- und Trennungseigenschaften überhaupt berücksichtigt werden.

In der Ökobilanz werden die quantitativen Umweltauswirkungen der Trennbarkeit in der Entsorgungsphase (Modul C1) abgebildet. Jedoch wird kritisch hinterfragt, ob solche Prozesse ausreichend quantitativ beschrieben werden können.

Nach Untersuchung der Indikatoren für den Rückbau und Trennbarkeit wurden diese in der **Tabelle 7** übersichtlich dargestellt und nach ihrer Systematik gruppiert.

Indikator Rückbau & Trennbarkeit	Bewertungsmethode
Variable mit zwei möglichen Werten: mit Schädigung trennbar und ohne Schädigung trennbar	Hafner, DNA
Variablen mit mehrstufiger Quantifizierung zur Beschreibung des Rückbau-/Trennungsaufwandes	Vogdt, BNB, BIM-DAS, DGNB
Indikator für Aufwand und Materialrestwert	UMI
In Verwertungseinstufung enthalten - Variablen mit mehrstufiger Quantifizierung zur Beschreibung des Rückbau-/Trennungsaufwandes	EI10
Umweltauswirkungen von Rückbau und Trennung abgebildet in EPDs (Modul C1)	Ökobilanz

Tabelle 7: Indikator Rückbau und Trennbarkeit (eigene Darstellung)

5.2.1 Implementierungsvorschläge Indikatoren zur Rückbau- und Trennbarkeit

Die Untersuchung des EI10 hat gezeigt, dass die Beschreibung des Rückbaus und der Trennungseigenschaft durch einen Bauteilkatalog nur unzureichend beschrieben werden.

Hafner zeigt eine einfache Systematik, um die Trennungseigenschaften einer Konstruktion zu beschreiben, welche im EI10 implementiert werden könnte. Zwischen je zwei Bauteilschichten wird eine Fügetechnik definiert, die eine qualitative Beschreibung der Trennungseigenschaft erlaubt. Beispielsweise hat man die Wahl zwischen einer Trennungseigenschaft *trennbar ohne Schädigung* und *trennbar mit Schädigung*. Trennungen mit Schädigung haben die Konsequenz, dass die Bewertung der Entorgungs- und Verwertungseinstufung verschlechtert werden. Trennungen ohne Schädigung haben keine negativen Auswirkungen auf die Recyclingeigenschaften.

Alternativ lässt sich die Systematik des Urban Mining Index implementieren, um Rückbau und Trennung in der Bewertung besser abzubilden. Die Rückbau- und Trennungseigenschaften werden durch einen Abminderungsfaktor berücksichtigt, welcher durch tatsächliche Aufwände,

gemessen in Megajoule, ermittelt wird. Die Beziehung zwischen Abminderungsfaktor und tatsächlichem Aufwand der Rückbauphase kann auf diese Weise transparent dargestellt werden.

Eine weitere Implementierung wäre die Berücksichtigung von ökonomischen Aspekten wie dem Materialrestwert. Laut Rosen (Rosen, 2021) erhöht ein hoher Materialrestwert die Motivation und somit auch die Wahrscheinlichkeit, dass ein Baustoff in reiner Form getrennt wird.

5.3 Indikatoren zur Beschreibung der Verwertungseinstufung

Der Indikator für die Entsorgungs- und Verwertungseinstufung beschreibt, ob EoL Szenarien, wie zum Beispiel Recycling, Verbrennung oder Deponie, zugewiesen und in der Bewertung berücksichtigt werden.

Die Bewertungssysteme EI10, Figl, BNB, DGNB und Vogdt beschreiben die Entsorgungseigenschaften über quantifizierte Parameter. Bei DGNB wird, wie bei dem Indikator für die Rückbaufreundlichkeit, die Variable in ein Punktesystem interpretiert. Im Sinne der Kreislaufwirtschaft sind wiederverwendbare Materialien positiver zu bewerten als Materialien, die deponiert werden. Daher ist es nicht nachvollziehbar, dass die Matrix des Entsorgungsindikators für die Ermittlung des EI10 (**Abbildung 10**) eine positive Beurteilung für die Deponierung von Materialien erlaubt. Angesichts dieser Systematik wird kritisch hinterfragt, was die angegebenen Zahlen bedeuten. Die Verwertungseigenschaft wird durch die Gewichtung von Volumen bzw. Massen angegeben, doch wie lässt sich dieses Ergebnis in Beziehung setzen?

Hafner und Urban Mining Index verwenden stattdessen eine empirische Wertetabelle, welche den jeweiligen Baustoffen ein Verwertungsszenario in % zuweist, wodurch ein praxisnaher Bezug der Verwertungswege gezeigt wird. Je höher der Anteil an recyceltem Material mit hochwertiger Verwertung, umso besser soll das Ergebnis sein. Anders als bei Hafner, werden im UMI die Stoffströme abschließend zu einem einzigen Indikator zusammen aggregiert, wodurch ein gebäudeübergreifender Vergleich ermöglicht wird.

Wird keine Einteilung in Entsorgungsszenarien angenommen, bezieht man sich stattdessen allgemein auf Recyclingraten. BIM-DAS berücksichtigt die Recyclingeigenschaften durch den massenbezogenen Anteil an wiederverwendbaren, vorgefertigten, sowie unbehandelten und nicht toxischen Bauteilen in Prozent und ermittelt damit den *recovery score*.

Die Ökobilanzierung berücksichtigt die Entsorgungseinstufung durch das gewählte Entsorgungsszenario des Baustoffes. Die Analyse und Implementierungsvorschläge für die Ökobilanz werden in Kapitel 5.4 beschrieben.

Nach Untersuchung der Indikatoren für die Verwertungseigenschaften wurden diese in der **Tabelle 8** übersichtlich dargestellt und nach ihrer Systematik gruppiert.

Indikator Verwertungseinstufung	Bewertungsmethode
Massenanteil der zugewiesenen EoL-Szenarien	Hafner, UMI
Variablen mit mehrstufiger Quantifizierung zur Beschreibung der Verwertungseinstufung	EI10, Figl, Vogdt, BNB, DGNB
Recyclingraten	BIM-DAS
Umweltauswirkungen der Verwertungswege, abgebildet in EPDs	Ökobilanz

Tabelle 8: Indikator Verwertungseinstufung (eigene Darstellung)

5.3.1 Implementierungsvorschläge Indikatoren zur Verwertungseinstufung

Die Bewertungsmatrix des EI10 wirft die Frage auf, weshalb die Entsorgungswege durch Deponierung und Verbrennung positiv bewertet werden, obwohl sie in der Abfallhierarchie (**Abbildung 3**) ganz unten stehen. Daher wird vorgeschlagen, eine Überarbeitung der EI10-Bewertungssystematik zu implementieren. Materialien mit einem erhöhten Potential zur Kreislaufschließung sind positiver zu bewerten als Materialien, die Deponiert werden. Das Abstufungsschema (**Abbildung 12**) in der Bewertungsmethode von Figl zeigt eine solche Implementierungsmöglichkeit. Die Verwertung wird in verschiedenen Qualitätsstufen *benotet* und bewertet Deponierung systematisch schlechter.

Eine alternative Implementierungsmöglichkeit wäre, das Recyclingpotential durch Massen- oder Volumenanteile der Verwertungswege darzustellen, anstatt die Verwertungseigenschaften durch gewichtete Volumen abzubilden. Das Bewertungssystem Urban Mining Index zeigt eine solche Systematik. Die Verwertung wird durch den *Material-Loop-Potential* (MLP) beschrieben und zeigt das Potential für den zukünftigen Anteil von Recyclingmaterialien in Produkten mit möglichst optimierter Herstellung hinsichtlich des Anteils an Sekundärrohstoffen. Als Datengrundlage können die empirischen Untersuchungen vom Atlas Recycling in Betracht zogen werden (Hillebrandt, Riegler-Floors, Rosen, & Seggewies, 2018).

Zum besseren Verständnis folgt ein Beispiel anhand eines Betonelementes: Der MLP eines Betonelements (C12/15 bis C50/60) zeigt, dass 40% des Materials auf gleichwertiger Qualitätsstufe recycelt wird und 60% in Deponien beseitigt wird (Hillebrandt & Seggewies, Recyclingpotenziale von Baustoffen, 2018). Um das Ergebnis auf Bauteilebene zu erhalten, müssen die Rückbau- und Trennungseigenschaften in Rechnung gestellt werden. Mögliche Implementierungen wurden in Kapitel 5.2 vorgezeigt. Um das Ergebnis auf Gebäudeebene zu aggregieren, werden jene Anteile, die eine Kreislaufführung erlauben, jeweils durch die Gesamtanteile dividiert und zusammengezählt. Auf diese Weise wird das Ergebnis auf eine 100%-Systematik überführt und beschreibt das Recyclingpotential in %.

5.4 Indikatoren zur Ökobilanz

Bei der Bewertung der Abfallentsorgung sind manche Szenarien nur schwer quantitativ zu erfassen, weshalb die Anwendung qualitativer oder semi-quantitativer Methoden vorteilhaft ist

(Mötzl & Fellner, 2011). Ein interessanter Aspekt ist die alleinige Bewertung der Recyclierbarkeit der Baustoffe. Es reicht nicht, hohe Recyclierbarkeit per se als umweltfreundlich zu titulieren. Einerseits reduziert der Gebrauch von recyceltem Material den Verbrauch von Primärrohstoffen und Deponievolumen. Andererseits ist es möglich, dass es weniger negative Umweltauswirkungen verursacht, einen Baustoff aus Primärrohstoffen zu produzieren, als mit Recyclingstoffen. Bei Letzterem könnte eine aufwendige Sammlung, Trennung und Aufbereitung des Baustoffs notwendig sein, die insgesamt mehr Energie verbraucht (Trusty & Horst, 2002). Diese Argumentationsweise verlangt nach weitergreifenden Kriterien, als nur die hohen Recyclinganteile linear proportional zu belohnen. Dabei müssen vor- bzw. nachgelagerte Prozesse und deren Umweltauswirkungen berücksichtigt werden. Deswegen ist es vorteilhaft, Recyclingprozesse über qualitative Indikatoren, wie es bei der EI10 Systematik der Fall ist, zu bewerten und diese beispielsweise mit quantitativen Umwelteinflüssen zu vergleichen. Dadurch werden Recyclingraten und die verursachten Emissionen durch das Recycling berücksichtigt und erlauben eine ganzheitliche Bewertung der ökologischen Umweltauswirkungen.

5.4.1 Implementierungsvorschläge Indikatoren zur Ökobilanz

In dieser Arbeit wurde der OI3 Indikator und die LCGA zur Auswertung von Ökobilanzindikatoren in der EoL Phase untersucht. Der OI3-Indikator fokussiert sich ausschließlich auf die Umweltauswirkungen die durch die drei Indikatoren Versauerungs-, Treibhausgaspotential und Primärenergieinhalt aus nicht-erneuerbaren Quellen gebildet werden. Die LCGA beschreibt die Lücke zwischen der Werthaltigkeit, der in der Produktion eingesetzten Rohstoffe und Energien und der Werthaltigkeit, der am Lebensende freiwerdenden Sekundärrohstoffe.

Erweitert man die Beurteilung des EI10 um eine auf die *Circular Economy* ausgerichtete Ökobilanzberechnung, können Umwelteinwirkungen über den gesamten Produktlebenszyklus analysiert und diese Effekte in der Beurteilung gegenübergestellt werden. Hierfür wird die *Life-Cycle-Gap-Analyse* (LCGA) herangezogen, deren Ansatz die Untersuchung von Ökobilanzergebnissen bezogen auf die *Circular Economy* erweitert.

Die **Abbildung 37** zeigt eine Matrix, welche die Indikatoren EI10 und LCGA gegenüberstellt und die fiktiven Bauteile A und B einordnet. Das Bauteil A zeigt ein Szenario, in welchem der EI10 besser bewertet wird als das Ergebnis der LCGA. Damit wird ausgedrückt, dass der Recyclinganteil zwar hoch ist, aber die Umwelteinwirkungen weiterhin negativ sind. Umgekehrt zeigt das Bauteil B ein Szenario, in welchem das LCGA-Ergebnis besser beurteilt wird als die EI10 Bewertung. Damit werden geringe, negative Umwelteinwirkungen, jedoch schlechtere Verwertungswege (z.b. Deponie), durch das Produkt ausgedrückt.

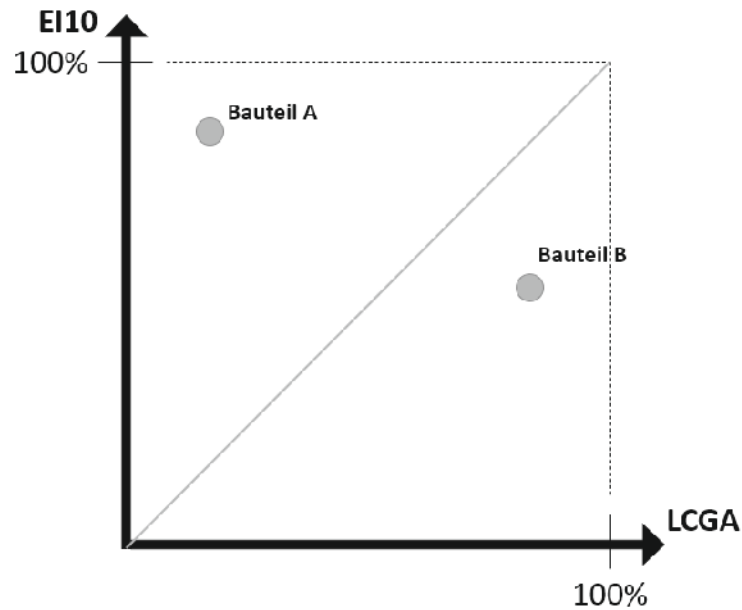


Abbildung 37: EI10-LCGA-Matrix (eigene Darstellung)

Um ein Gesamtergebnis R_{Gesamt} aus qualitativer und quantitativer Bewertung zu erhalten, werden die beiden Anteile mit einem Gewichtungsfaktor zusammengezählt. Wie die Gewichtung α und β zu wählen ist, muss in einer weiteren Untersuchung festgestellt werden. Für den aktuellen Forschungsstand wird sie jeweils mit 0,5 angenommen.

$$R_{\text{Gesamt}} = \alpha * R_{EI10} + \beta * R_{LCGA}$$

Formel 16: Aggregation von qualitativer und quantitativer Bewertung (eigene Darstellung)

Eine alternative Herangehensweise, um Umwelteinflüsse bei der Bewertung des EI10 einzubeziehen, besteht darin, einen Abminderungsfaktor zu verwenden, ähnlich wie bei der Bewertung des Aufwands für Rückbau und Trennung sowie des Materialrestwerts. Dabei sollten spezifische Grenzwerte für die Umwelteinflüsse festgelegt werden, die anschließend auf einer Skala abgebildet werden, um den Abminderungsfaktor zu bestimmen.

$$EI10_{LCA} = EI10 * f_{LCA}$$

Formel 17: Berechnung des EI10 unter Berücksichtigung eines Abminderungsfaktors für die Ökobilanz (eigene Darstellung)

5.5 Indikator zur potenziellen Verwertungseigenschaft in der Zukunft

Die Bewertungsmethode von Figl und der EI10 haben Ansätze vorgestellt, die Recyclingpotentiale in der Zukunft abschätzen. Die Bewertung der Entsorgungs- und Verwertungseinstufung eines Baustoffes wird zunächst für gängige Verfahren in der Gegenwart durchgeführt. Anschließend wird die Bewertung für Potentiale in der Zukunft wiederholt und in der Berechnung

zusammengeführt. Auf diese Weise wird versucht, Technologien zu berücksichtigen, die Recyclinghürden besser lösen, aber derzeit entweder unterentwickelt und/ oder mit gängigen Verfahren wirtschaftlich nicht konkurrenzfähig sind. Unsicherheiten entstehen in der Prognose über die Recyclingfähigkeit und Verwertbarkeit der Baustoffe in der Zukunft. Die Annahmen beziehen sich auf den heutigen Technologiestand und werden in die Zukunft abgeleitet.

5.5.1 Implementierungsvorschläge Indikatoren zur potenziellen Verwertungseigenschaft in der Zukunft

Aus Sicht des Autors, ist die Berücksichtigung von Zukunftspotentialen kritisch zu hinterfragen. Angesichts der langen Lebensdauer eines Gebäudes ist die Unsicherheit über mögliche vermeidbare Auswirkungen in der Zukunft sehr hoch. Ungenaue Annahmen sollen die Ergebnisse nicht beschönigen (*Greenwashing*), denn die Ergebnisse sollten sich auf die Reduzierung der aktuellen Emissionen konzentrieren (Van Gulck, Wastiels, & Steeman, 2022). Daher wird das Ausschließen der Bewertung zukünftiger Verwertungsszenarien vorgeschlagen.

5.6 Implementierungsvorschlag für den EI10

Nachfolgend wird eine mögliche Adaptierung des EI10 vorgestellt. Die Adaptierungen werden gemäß den im vorherigen Kapitel ausgearbeiteten Kategorien vorgenommen.

Als Methode zur Bewertung der Rückbau- und Trennbarkeit einer Konstruktion wird vorgeschlagen, die Abminderungsfaktoren für den Materialrestwert und den Rückbau- bzw. Trennungsaufwand zu verwenden. Beide Koeffizienten wurden in Kapitel 4.8 erläutert und ermöglichen eine quantifizierbare Größenbestimmung.

Es wird vorgeschlagen, die Methode der Verwertungsbewertung zu überarbeiten. Anstelle der qualitativen Bewertung von Volumen, welche sich durch den Faktor Entsorgungseinstufung und Verwertungspotential ergeben, werden die Materialstoffflüsse als Eingangswerte betrachtet und nach der Verwertungsqualität zugeordnet. Zur weiteren Bewertung dienen die prozentualen Verwertungswege als Bemessungsgröße. Die Einflüsse des Rückbau-/Trennungsaufwandes und des Materialrestwertes werden durch die zuvor erwähnten Abminderungsfaktoren berücksichtigt. Dies führt zu einem Gesamtergebnis für die Bewertung des Kreislaufpotentials.

Eine weitere Adaptierung ist die Bewertung des EI10 durch eine Ökobilanzbewertung zu erweitern. Kapitel 5.4 beschreibt qualitativ, wie eine solche Implementierung aussehen könnte.

Als Bemessungsgröße wird ein volumenbezogener Ansatz gewählt. In den Expert:inneninterviews soll jedoch kritisch hinterfragt und diskutiert werden, ob ein massenbezogener Ansatz als Bezugsgröße für die Bewertung sinnvoller ist.

Eine weitere Adaptierung wäre es, das Potenzial der zukünftigen Recyclingfähigkeit eines Materials, in Form eines Abminderungsfaktors, in die Bewertung einzubeziehen. Auch diese

Maßnahme soll im Rahmen der Expert:inneninterviews kritisch hinterfragt und diskutiert werden.







	Materialrestwert
	Rückbau-/ Trennungsaufwand in MJ
	Bewertung der Verwertungsanteile in %
	Berücksichtigung der Umwelteinflüsse durch eine Ökobilanz
	Bezugsgröße Masse und/oder Volumen
	Berücksichtigung von Zukunftspotentialen

Abbildung 38: Überblick der Implementierungsvorschläge für den EI10 (eigene Darstellung)

5.7 Expert:inneninterviews

Um die vorgeschlagenen Implementierungsmöglichkeiten im EI10 Bewertungssystem auf ihre mögliche Anwendung in der Praxis zu überprüfen werden diese bei Expert:inneninterviews vorgestellt und diskutiert. Dadurch soll das Verständnis aus der Praxis berücksichtigt werden und eine Einschätzung der vorgestellten Indikatoren erhoben werden. Die Ergebnisse werden abschließend untersucht und miteinander verglichen.

Es wurden theoriegenerierende Expert:inneninterviews geführt, dessen Erhebung auf *Deutungswissen* der Befragten abzielt. *Deutungswissen* beschreibt im engeren Sinne nicht nur *Fachwissen*, sondern all jenes Wissen, das für den professionellen Handlungsrahmen relevant ist. (Bogner, Littig, & Menz, 2014)

5.7.1 Zielgruppendefinition und Kontaktaufnahme

Die befragten Personen sind in der Regel Vertreter:innen einer bestimmten Gruppe, deren themenrelevante Informationen bzw. Deutungen erhoben werden soll. (Bogner, Littig, & Menz, 2014)

Es wurden Nutzer:innen von Bewertungsmethoden und Zertifizierungssystemen zur Implementierungsfähigkeit vorgenannter Indikatoren befragt. Die Expert:innen sollen Erfahrung in der Durchführung einer Bewertung und Zertifizierung eines Gebäudes haben.

Zuerst wurde in einer umfangreichen Onlinerecherche nach Beratungsunternehmen gesucht, welche einen Schwerpunkt in der Gebäudezertifizierung haben. Bei größeren Unternehmen wurde der Kontakt mit der Abteilungsleitung aufgenommen. Bei kleineren Beratungsunternehmen wurde oftmals die Geschäftsführung direkt kontaktiert. Insgesamt wurden elf Personen um ein Interview gebeten, von denen acht zugesagt haben.

Anonymisierte ID	Position	Datum
P1	Konsulent:in Gebäudezertifizierung	24.02.2023
P2	Geschäftsführer:in, Konsulent:in für Bauphysik und Bauökologie	27.02.2023
P3	Geschäftsführer:in, Konsulent für Bauökologie	02.03.2023
P4	Geschäftsführer:in, Konsulent Gebäudezertifizierung	03.03.2023
P5	Konsulent:in Gebäudezertifizierung	06.03.2023
P6	Konsulent:in Gebäudezertifizierung	13.03.2023
P7	Konsulent:in Bauökologie und Gebäudezertifizierung	17.03.2023
P8	Abteilungsleiter:in & Konsulent:in Bau-Nachhaltigkeit	20.03.2023

Tabelle 9: Übersicht der Interviewpartner:innen (eigene Darstellung)

5.7.2 Leitfadenkonstruktion

Die Expert:innen Interviews wurden in Form von Leitfadeninterviews durchgeführt. Der Leitfaden dient als Orientierung in denen die Themen gesammelt und geordnet sind, sowie bereits konkrete Frageformulierungen zu finden sind. (Bogner, Littig, & Menz, 2014)

Die Forschungsfragen und Hypothesen werden in mehreren Stufen systematisiert und reduziert, um die Interviewfragen einzugrenzen (Leitfragenkatalog siehe Anhang).

Der Leitfaden wird in folgende forschungsrelevanten Themenblöcke unterteilt:

- Rückbau und Trennung
- Verwertung
- Massen-/ Volumenbezogener Ansatz
- Ökobilanzierung
- Prognosen von Recyclingpotentialen

5.7.3 Auswertungsmethode der Ergebnisse

Die Auswertungsmethode der empirischen Forschung wird nach der qualitativen Inhaltsanalyse nach Mayring durchgeführt. Diese Methode ermöglicht die systematische Auswertung und Interpretation umfangreicher Materialien und das Ziehen von Rückschlüssen auf bestimmte Aspekte der Kommunikation. Die zusammenfassende Inhaltsanalyse wurde in dieser Arbeit gewählt, weil sie vorhandenes Material auf relevante Inhalte reduziert und gleichzeitig einen überschaubaren Korpus erstellt. (Mayring, 2015)

Für die Inhaltsanalyse wurden die Expert:inneninterviews transkribiert und anschließend paraphrasiert und kodiert. Inhaltlich übereinstimmende oder ähnliche Textpassagen wurden entsprechend kategorisiert. Diese Kategorien wurden induktiv gebildet. Inhalte ohne forschungsrelevante Bedeutung wurden ignoriert.

Im Folgenden werden die Ergebnisse näher erläutert und die wichtigsten Aussagen der Befragten gemäß obiger Beschreibung wiedergegeben.

5.7.4 Ergebnis der Expert:inneninterviews

In der vorliegenden Arbeit wurden insgesamt acht Expert:innen befragt. Die einzelnen Aussagen wurden in den nachfolgenden Tabellen zusammengefasst und paraphrasiert. In dieser Arbeit wurden die befragten Personen anonymisiert, so dass lediglich ihre Funktion im Unternehmen beschrieben werden. Den befragten Personen wurden anonymisierte ID's vergeben (z.B. P1). Zur besseren Übersicht werden die Ergebnisse der einzelnen Kategorien je Auswertungseinheit dargestellt. Die Gesamtergebnisse werden im nachfolgenden Kapitel zusammenfassend diskutiert.

P1 – Konsulent:in Gebäudezertifizierung	
Rückbau/Trennung	Am Anfang der Planung muss überlegt werden, wie Bauteile demontiert werden, ohne sie zu beschädigen und dadurch wiederverwendbar sind. Dabei muss die Verschmutzung (besonders bei Außenbauteilen) berücksichtigt werden. Das DGNB-System ist sehr streng in der Bewertung einer Konstruktion, weil die schlechteste Bauteilschicht, die Bewertung der Gesamtkonstruktion bestimmt. Dadurch wird ein größerer Anreiz geschaffen, die Planung zu verbessern. Die Implementierung von ökologischen Indikatoren für die Bewertung ist vorteilhaft, weil hochwertige Materialien langlebiger sind und daher das Prinzip der Kreislaufwirtschaft erfüllen. Allerdings ergibt sich die Problematik, dass hochwertige Materialien für Investor:innen teurer in der Anschaffung sind und in der Praxis daher nicht umgesetzt werden. Eine Implementierung wäre vielleicht machbar, jedoch muss überlegt werden, wie man das Bewusstsein der Kreislaufwirtschaft stärken kann.
Materialverwertung	Die Bewertungssystematik nach dem Schulnotensystem ist ein guter Ansatz, um die Wiederverwertbarkeit zu untersuchen. Der Ansatz, Anteile in den Verwertungswegen heranzuziehen, muss in genau definierten Qualitätsstufen der Verwertung gegliedert werden. Eine zu ungenaue Definition der Qualitätsstufen wäre in der Praxis nicht brauchbar und daher nicht umsetzbar. In jedem Fall wird eine Datenbank benötigt, wo die erforderlichen Informationen hinterlegt sind. Da Auditor:innen keine Chemiker:innen sind, werden diese Vorrecherchen gebraucht, um für die Planung eine Beratung schaffen zu können.
Volumen/massenbezogener Ansatz	P1 sieht, dass eine verringerte Berücksichtigung von voluminösen Bauteilen in der Beurteilung stattfindet. Allerdings besteht die Meinung, dass nicht der Blick auf die Auswertung relevant ist, sondern auf die Optimierung der Planung hinsichtlich der Umweltaspekte. Den Planern sollte gezeigt werden, wie sie besser, nachhaltiger und umweltfreundlicher planen und bauen können.
Ökobilanz	Derzeit ist es in der Ökobilanz nicht möglich auf zuverlässige und fehlerfreie Ergebnisse zu kommen. Vergleicht man die Bewertung mit unterschiedlichen Berechnungstools an einem Gebäude, kommt man meist auf unterschiedliche Ergebnisse.

	<p>Wichtig ist es, mit einem Berechnungstool Gebäudevarianten vergleichen zu können.</p> <p>In der Bewertung der Kreislaufwirtschaft sei das sehr ähnlich. In der Datenbank der Ökobaudat wird alles, was nicht in die Deponie landet, positiv bewertet. P1 hält diesen Ansatz für fragwürdig, weil bei der Verwertung <i>Recycling</i> sehr viel Energie verbraucht werden kann. Eine Implementierung wäre „vielleicht machbar“. Sinnvoll wäre es, eine Ökobilanz mit der Bewertung der Kreislauffähigkeit zu verbinden, um den ökologischen Fußabdruck der Wiederverwertung, Verbrennung, ect. zu beschreiben.</p>
Zukunftspotentiale	<p>Die Entwicklung der Forschung kann nicht vorhergesehen werden und deswegen wird mit aktuellen Daten gerechnet. Die DGNB bewertet daher auch nur die IST-Daten. Eine Möglichkeit wäre es einen Katalog zu schaffen, wo alle wichtigen Informationen zum Zeitpunkt der Planung oder Gebäudeausführung dokumentiert ist und beispielsweise nach 20 Jahren, aktualisiert werden kann. Deswegen sind materielle Gebäudepässe als Dokumentation sehr wichtig. Diese geben Aufschluss darüber, was in einem Gebäude steckt, und die Bewertung kann anhand der Forschungsentwicklung angepasst werden.</p>

Tabelle 10: Experteninterview P1 (eigene Darstellung)

P2 – Geschäftsführer:in, Konsulent:in für Bauphysik und Bauökologie	
Rückbau/Trennung	<p>P2 hält den EI10 für einen Anfang das Thema <i>End-of-Life</i> greifbar zu machen. Allerdings braucht es Ergänzungen vom energetischen Standpunkt. Das alleinige Potential des Recyclings reicht nicht aus.</p> <p>Bei der Implementierung eines Indikators, welcher den Trennungsaufwand in Megajoule bemisst, muss hinterfragt werden, wie sich die Menge in Megajoule berechnen lässt. Diese <i>Megajoule</i> hängen davon ab, wie die Konstruktion beschaffen ist und welcher energetische Aufwand zur Trennung betrieben werden muss. Also müssen die einzelnen Schichten und Elemente charakterisiert werden. Sind der Trennungsaufwand und der energetische Aufwand für den Rückbau bekannt, wäre das ein vorstellbarer Indikator.</p> <p>Die Entscheidung, ob ein Material recycelt wird, hängt, neben seinem Wert, auch von regulatorischen Systemen ab. Dort wo Wertvolle Ressourcen rauszuholen sind, passiert es sowieso schon.</p>
Materialverwertung	<p>Die Lebenszyklus-Phasen von Materialien haben unterschiedliche Auswirkungen auf die Umwelt. Die Deponierung von mineralischem Schutt wird besonders problematisch angesehen. P2 argumentiert, dass eine Entsorgung und Deponierung unter guten Bedingungen weniger Bewertungspunkte im Umweltindex erhalten als eine schlechte Wiederverwertbarkeit ohne Deponierung, da eine hierarchische Herangehensweise bereits angewendet wird.</p> <p>P2 sieht die Implementierung von Verwertungsanteilen in % als gleichwertig an, weil das indirekt in dem EI10 berücksichtigt wird.</p>

Volumen/massenbezogener Ansatz	Der EI10 hat die Bezugsgröße der Konstruktionsfläche. Damit gibt es für Gebäude, die sehr viel Konstruktionsflächen haben, bessere Kennzahlen als Gebäude, mit weniger Konstruktionsfläche oder mit einem geringeren Ausbau Standard. P2 ist der Auffassung, dass dadurch eine falsche Gewichtung entsteht. Der EI10 sollte sich auf ein Gebäudevolumen beziehen und nicht auf eine Konstruktionsoberfläche.
Ökobilanz	In der Thematik des Energieaufwandes ist der befragten Person kein Tool bekannt gewesen, dass belastbare Aussage trifft. P2 hält eine solche Berücksichtigung für sinnvoll und wichtig, jedoch wird die Umsetzung als schwierig eingeschätzt.
Zukunftspotentiale	Allgemein wurde angemerkt, dass Zukunftsszenarien schwer vorherzubestimmen sind. In Einzelfällen wären Prognosen abschätzbar. P2 argumentiert, dass der Trennungsaufwand bei Verbundbauteilen viel größer sein wird als bei anderen herkömmlichen Bauteilen, weil die Größe des Aufwands mit dem Grad der Verarbeitung und der Vermischung der Bauteile zusammenhängt. Deswegen sollte die Frage lauten: „Ist eine Konstruktion einfach und mit wenig Energieaufwand zu trennen?“ Dann hat es eine gute Chance im Kreislauf rückgebaut und getrennt zu werden. Je einfacher es geht, umso mehr wird die Rückführung in den Kreislauf passieren.

Tabelle 11: Experteninterview P2 (eigene Darstellung)

P3 - Geschäftsführer:in, Konsulent:in für Bauökologie	
Rückbau/Trennung	Eine quantitative Beschreibung der Recyclingfähigkeit wird nicht für sinnvoll gehalten, weil es abgelöst von der Funktion des Gebäudes geschieht. Wesentlich wichtiger und zentraler ist, dass die <i>Second Life, Third Life</i> ect. berücksichtigt wird, als auf die Trennbarkeit der Bauteile hinzuweisen. Das <i>End-of-Life</i> ist immer nur ein Szenario und das kann immer wieder hinausgezögert werden. Die Idee der Nachverdichtung muss viel zentraler werden. Die Frage sollte daher lauten: „Wie kann ein Gebäude auf das Verschieben der <i>End-of-Life</i> bewertet werden?“
Materialverwertung	Als geeignetste Verwertungsmethode wird das Recycling auf gleicher Qualitätsstufe angesehen. Das Beispiel aus dem Lehmbau, immer wieder Lehm aus dem Lehm zu machen, ist etwas, was für moderne Werkstoffe auch Wünschenswert ist. Von P3 wird kritisch hinterfragt, dass das Recycling von Beton permanent als Downcycling bezeichnet wird und als Zuschlag oder Füllmaterial in den Straßenbau gelangt.
Volumen/massenbezogener Ansatz	Laut P3 werden Entsorgungskosten in Tonnage berechnet. Jedoch wäre es viel wichtiger, Tonnenkilometer vorzuschreiben. Wenn ein Gebäude abgebrochen und das Material weggefahren wird, verändert sich der Tonnenkilometerabdruck des Gebäudes erheblich. Dadurch ist man verpflichtet, eigene Rezyklate zu verbauen und hat dadurch eine andere Bemessungsgrundlage.
Ökobilanz	In der Kreislaufwirtschaft geht es nicht um Stoffstromflüsse, sondern um CO2 neutrale Stoffstromschlüsse. Laut P3 sollte die übliche Variante, wie beispielsweise Holz in einer Ökobilanz berechnet wird, nicht zulässig sein. 50% der CO2 Bindung, welches im Wald abgeholzt wird, geht verloren. Daher wird von P3 hinterfragt, warum das als <i>Carbon Capturing</i> bezeichnet wird.

	P3 erwähnt eine Studie, in der gezeigt wird, dass 95% der Materialien von Altholz, die in die thermische Verwertung gehen, keine Grenzwerte erfüllen. Laut P3 sind die <i>End-of-Life</i> Szenarien mangelhaft gestaltet und werden derzeit durch die Ökobilanz unterstützt.
Zukunftspotentiale	Das Prinzip des Stoffflusses kann nicht darauf beruhen, dass die Entsorgungsthematik und die Probleme in die Zukunft weitergeben werden.

Tabelle 12: Experteninterview P3 (eigene Darstellung)

P4 – Geschäftsführer:in, Konsulent:in Gebäudezertifizierung	
Rückbau/Trennung	Laut P4 geht es nicht nur darum, ob die Baustoffe Recycling-, oder Rückbaufreundlich sind, sondern wie der Rückbau in der Planung berücksichtigt wird. Wenn die Rückbaufirma einen erschwerten Zutritt hat oder unter schlechte Gegebenheiten arbeiten muss, wird der Rückbau vermehrt willkürlich stattfinden. Das ist vor allem in Städten, wo dicht gebaut und daher wenig Platz vorhanden ist, ein großes Thema. Die Berücksichtigung des Rückbauaufwands als Indikator in der Bewertung wird als positiv und sinnvoll empfunden. Die Einschätzung, ob ökologische Indikatoren sinnvoll und implementierbar sind, war schwer festzustellen. Hierbei wurde besonders die Relevanz der herstellenden Industrie hervorgehoben.
Materialverwertung	P4 sieht die Anwendung von Prozentansätze in der Bewertung als einen besseren Ansatz. Es wäre vorstellbar, einen Ressourcenpass herzunehmen, welcher jedes Bauteil einmal dokumentiert und die Verwertungsqualität aus den Prozentanteilen der Massenauszüge Berücksichtigung. Grenzwerte werden durch den Gesetzgeber definiert. Desto höher der Prozentsatz von recyclebaren Wertstoffen ist, umso höher ist die Unterstützung des Gesetzgebers. Ein Gebäudepass bei einem Neubau, ist einfacher umzusetzen, weil es mit der Planung gemacht wird. Bei Bestandsgebäuden ist das schwieriger und kommt auf die Genauigkeit an. Ungenaue Ergebnisse haben keine Aussagekraft.
Volumen/massenbezogener Ansatz	Für P4 ist weder die Masse noch Volumen für die Kreislaufwirtschaft wichtiger. Viel wichtiger sind die Umweltauswirkungen und diese müssen runtergerechnet werden auf eine Einheit. P4 hält es für unvorteilhaft, wenn man nach Gewicht bewertet, da es Produkte gibt, welche wenig Gewicht haben und für die Umwelt erhebliche negative Auswirkungen haben.
Ökobilanz	Wenn etwas recyclingfreundlich ist, muss es nicht unbedingt einen guten Ökobilanznachweis geben. Eine Implementierung der Ökobilanz in der <i>End-of-Life</i> wäre machbar. Wenn es zum Schluss fiktive Annahmen sind, ist immer die Wertigkeit zu hinterfragen.
Zukunftspotentiale	P4 hält Prognosen für nicht gerechtfertigt, weil diese nicht auf wissenschaftliche Grundlagen aufbauen.

Tabelle 13: Experteninterview P4 (eigene Darstellung)

P5 - Konsulent:in Gebäudezertifizierung	
Rückbau/Trennung	<p>P5 hält das DGNB-System für sehr intransparent und verschachtelt aufgebaut.</p> <p>Der Ansatz, den Arbeitsaufwand in der Praxis zu berücksichtigen, wurde als ein sehr interessanter Ansatz empfunden und wäre eine bessere Methode als die der DGNB.</p> <p>Den Ansatz, den Materialrestwert und somit die ökonomische Seite in der Bewertung zu berücksichtigen wird als sehr sinnvoll erachtet. Eine Datengrundlage gibt es dafür noch nicht, aber der Ausbau wird momentan geschaffen.</p>
Materialverwertung	<p>P5 hält den Ansatz der DGNB für weitaus unzureichend.</p> <p>Der Ansatz, Verwertungsanteilen zu berücksichtigen, könnte durch die DGNB wieder in das Punktsystem übersetzt werden.</p> <p>Die Datengrundlage für eine solche Bewertung ist allerdings noch nicht ausreichend.</p>
Volumen/massenbezogener Ansatz	<p>Die Masse dient als Bezugsgröße und ist aber keine Bewertungsgröße. Oft wird behauptet, leichter bauen zu müssen, um die Bilanz zu verbessern. Wird die Menge an Konstruktion verringert, verringert sich der Ressourcenverbrauch. Allerdings hat das mit der Masse als Bezugsgröße wenig zu tun.</p>
Ökobilanz	<p>Die Ökobilanz berücksichtigt das <i>End-of-Life</i>, aber die Datenlage ist sehr dynamisch und ständig in Entwicklung. Im Gegensatz zu den Phasen A bis C, ist die Phase D nicht weiter differenziert. P5 ist der Meinung, dass diese Differenzierung und die entsprechende Datengrundlage fehlt. Somit wäre hier noch ein Forschungsbedarf.</p>
Zukunftspotentiale	<p>Interessant ist die Frage: „Wie entwickeln sich Tendenzen, Verfahren und Technologien in Zukunft, um Recycling machbar zu machen?“. Allerdings ist zu bezweifeln, ob solche Entwicklungen richtig vorhergesehen werden können. Daher ist es verständlich, dass sich Systeme wie die DGNB nur auf den Ist Stand fokussieren.</p> <p>Diese Betrachtungsweise ist momentan nicht fundiert quantifiziert worden und damit nicht plausibel.</p>

Tabelle 14: Experteninterview P5 (eigene Darstellung)

P6 - Konsulent:in Gebäudezertifizierung	
Rückbau/Trennung	<p>P6 verwendet als Bezugsgröße für die Beurteilung der Trennbarkeit die Masse. Dabei wird die Trennbarkeit qualitativ bewertet und auf einer Skala von 0% bis 100% aufgetragen, wobei 0% das schlechteste und 100% das beste Ergebnis darstellt.</p> <p>Die Trennbarkeit über den Ansatz des Arbeitsaufwandes zu bewerten, wurde positiv aufgenommen. Wieviel Zeit für den Rückbau notwendig ist, ist ein entscheidender Faktor. Wichtig ist es, dass die Bewertung auch für einen Laien durchgeführt werden kann.</p> <p>Der Ansatz, den Materialwert in die Bewertung aufzunehmen, wurde als sehr sinnvoll erachtet. Momentan funktioniert das nicht, weil Besitzer:innen ihre Immobilie auf null Abschreiben wollen und haben daher kein Interesse den Materialwert in ihrer Bilanz aufzunehmen. Es braucht vor allem ein Umdenken bei den Investor:innen.</p>

Materialverwertung	P6 verwendet prozentuelle Anteile, bezogen auf die Masse, für die Bewertung der Verwertungsqualität. Recycling ohne Verlust wird mit dem Faktor 1 angenommen. Beton wird oft als Schüttmaterial einem Downcycling zugefügt. Diesem Verwertungsszenario wird ein Faktor von 0,5 vergeben. Deponierung oder thermische Verwertung wird mit 0 bewertet. Eine Deponierung geht immer mit der schlechtesten Bewertung einher.
Volumen/massenbezogener Ansatz	P6 hält es für problematisch, dass Werte oft Gewichtsbezogen sind. Die Taxonomie Verordnung schreibt vor, dass 70% des Abbruches, nach der Masse bezogen, Recyclingfähig sein muss. Solange Beton wiederverwendet werden kann, erübrigt sich das Thema. Alle weiteren Materialien mit weniger Masse werden in der Bewertung geringer berücksichtigt.
Ökobilanz	P6 hatte wenig Erfahrung mit der Ökobilanz und konnte daher keine Aussagen machen.
Zukunftspotentiale	P6 hat kritisch hinterfragt, wer die Kompetenz hat einzuschätzen, ob sich eine Recyclingtechnologie am Markt etabliert. Daher wird die Berücksichtigung von Recyclingpotentialen in der Zukunft als problematisch angesehen.

Tabelle 15: Experteninterview P6 (eigene Darstellung)

P7 – Konsulent:in Bauökologie und Gebäudezertifizierung	
Rückbau/Trennung	P7 ist skeptisch bezüglich der Methoden des DGNB. Bei den Zertifizierungssystemen muss ein Rahmen geschaffen werden, sodass alle Projekte gleich berechnet werden und damit eine Vergleichbarkeit herrscht. Die Bewertungssysteme können nur in ihrem eigenen Bewertungsrahmen eine Vergleichbarkeit ermöglichen. Der Ansatz des Arbeitsaufwandes ist eine weitere Bewertungsmöglichkeit. Ob die eine oder die andere Methode besser ist, war für P7 schwer zu beurteilen. Den Ansatz, den Materialwert zu berücksichtigen, wird als sehr sinnvoll beurteilt, weil er einen ökonomischen Anreiz schafft. Für das Recycling werden entweder gesetzliche Vorgaben oder ökonomische Faktoren als Treiber angesehen.
Materialverwertung	Der Ansatz der EU-Taxonomie Verordnung, prozentuelle Anteile für die Verwertung vorzugeben, wird als sinnvoll angesehen, weil es eine konkrete Größe ist. Es wird konkret angezeigt, welcher Anteil recycelt wurde und muss nachgewiesen werden, welcher Verwertungsweg dem Material zugeordnet wird. Bei DGNB ist der Prozentanteil unerheblich. Dort geht es darum, inwieweit das Projekt besser oder schlechter abschneidet als ein definiertes Referenz Projekt. Die EU-Taxonomie Verordnung hat kein Referenz Gebäude, sondern zielt auf eine Offenlegung von Mindestanforderungen.
Volumen/massenbezogener Ansatz	Laut P7 ist für die Abfallwirtschaft das Volumen maßgebend. Der Ansatz, dass man Volumen und Masse getrennt betrachtet, wurde positiv bewertet. Beispielsweise könnte eine Bewertung mit Baustoffen hoher Dichte nach Masse und ab einer gewissen Dichte nach Volumen berechnet werden. Alternativ könnte die Definition Baustoffbezogen sein, wie zum Beispiel Dämmstoffe nach Volumen und mineralische Baustoffe nach Masse.

Ökobilanz	Die Berücksichtigung der Ökobilanz in der <i>End-of-Life</i> wird als sinnvoll angesehen, weil der Abbruch ein wesentlicher Punkt für das Ziel der Kreislaufwirtschaft ist. Es ist aufwendig solche Daten herzubekommen, weil jedes Produkt entsprechend dem EPD berechnet werden muss.
Zukunftspotentiale	P7 hält es für problematisch, dass die Bewertungssysteme die Weiterentwicklung der Recyclingtechnologie nicht berücksichtigt. Die Annahmen werden üblicherweise auf den aktuellen Stand des Wissens getroffen.

Tabelle 16: Experteninterview P7 (eigene Darstellung)

P8 – Abteilungsleiter:in & Konsulent:in Bau-Nachhaltigkeit	
Rückbau/Trennung	Beim DGBN-System wird die schlechteste Schicht einer Konstruktion für die Bewertung hergenommen. P8 hält eine differenzierte Betrachtung der einzelnen Bauteilschichten wünschenswert. Die Beschreibung der Trennbarkeit einer Konstruktion ist bei DGNB rein qualitativ und in Standard aufbauten enthalten. Die Betrachtung von ökonomischen Indikatoren wird als interessant angesehen. Allerdings wurde betont, dass es nicht ausreichende Daten hierfür gibt.
Materialverwertung	Die EU Taxonomie Verordnung schreibt vor, dass 70% eines Gebäudes, gemessen nach der Masse, Recyclingmaterial sein soll. Solange in Österreich die Versiegelung so schnell voranschreitet und so viele Straßen und Autobahnen noch errichtet werden, werden die 70% kein Problem sein.
Volumen/massenbezogener Ansatz	P8 hatte hauptsächlich mit massenbezogenen Ansätzen zu tun, weil die Dokumentation (Muldenscheine und Wiegescheine) üblicherweise nach der Masse bemessen wird. Eine differenzierte Betrachtung wird als interessanter Ansatz angesehen. Es ist immer eine Frage des Aufwands.
Ökobilanz	Die Datenbank der Ökobaudat hat zum Teil generische, zum Teil allgemeine oder ganz spezifische Produktdatensätze. Die Erläuterungen zu den Produktdatenblätter werden als plausibel empfunden.
Zukunftspotentiale	Grundsätzlich wird bei DGNB/ÖGNI abgefragt, inwiefern der Hersteller seines Produktes eine Rücknahmebestätigung oder eine Rücknahme Erklärung abgibt. Dies wirkt positiv auf die Bewertung. Eine Zertifizierung, nur zum Zwecke der Erlangung einer Plakette, sei nicht Zielführend. Die Zertifizierung ist ein Weg, ein Gebäude besser und wertvoller zu machen und da braucht es Dokumente, wie die Rücknahmeerklärung der Hersteller. Diese Dokumente haben einen wesentlich größeren Mehrwert als fiktiven Faktoren, welche die Recyclingpotentiale in der Zukunft berücksichtigen.

Tabelle 17: Experteninterview P8 (eigene Darstellung)

5.7.5 Zusammenfassung und Diskussion

Die Ergebnisse der empirischen Forschung werden in **Abbildung 39** übersichtlich dargestellt. Die Abbildung gibt einen anschaulichen Überblick über die Meinung und Einschätzung der Expert:innen und zeigt auf, welche Indikatoren als besonders sinnvoll und umsetzbar erachtet werden.

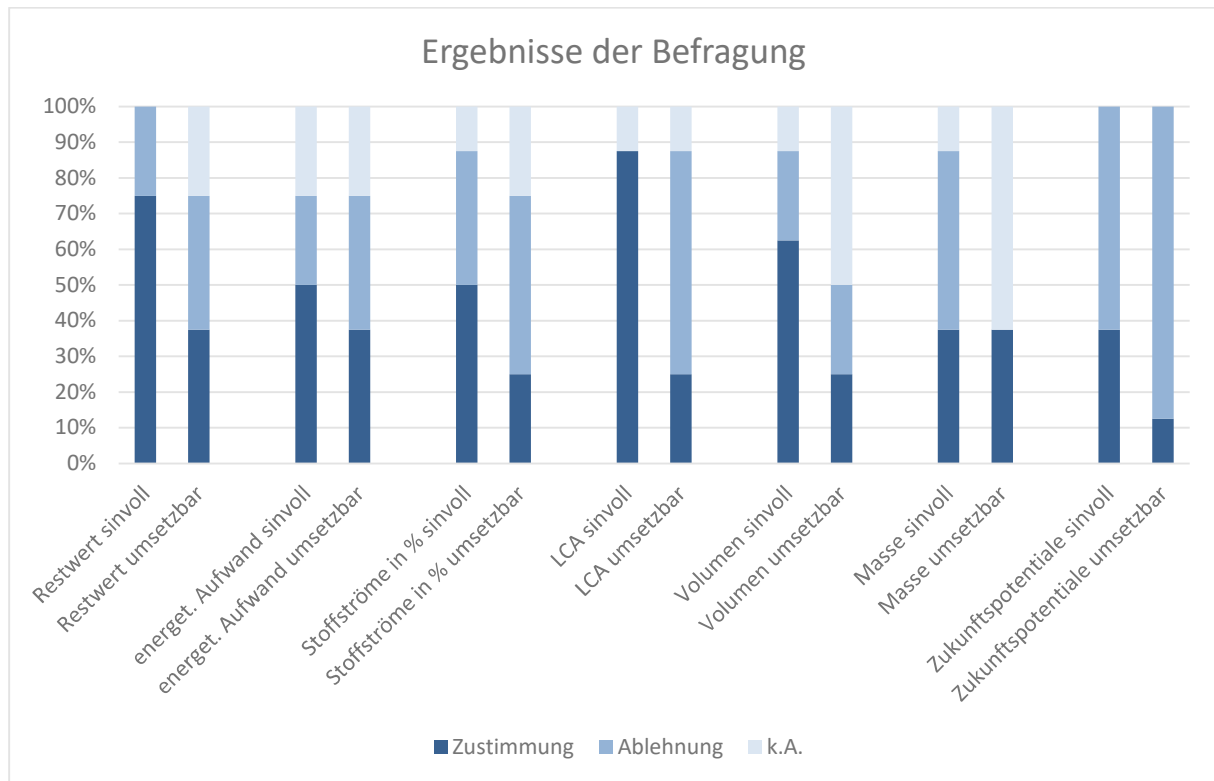


Abbildung 39: Ergebnisse der Befragung (eigene Darstellung)

Rückbau und Trennung:

Die Expert:inneninterviews zum Thema Rückbau und Trennung von Gebäuden haben verschiedene Meinungen und Ansätze hervorgebracht.

Bereits in der Planungsphase des Gebäudes sollte überlegt werden, wie Bauteile demontiert werden können, ohne beschädigt zu werden, um sie wiederverwendbar zu machen. Das DGNB-System wird als sehr streng angesehen, da die schlechteste Bauteilschicht die Bewertung der Gesamtkonstruktion bestimmt. (Interview P1, persönliche Kommunikation, 24.02.2023)

Ein:e Interviewexperte oder Interviewexpertin gab an, dass eine differenziertere Betrachtung der einzelnen Bauteilschichten wünschenswert wäre. (Interview P8, persönliche Kommunikation, 20.03.2023)

Die Implementierung von ökologischen Indikatoren für die Bewertung ist vorteilhaft, um hochwertige Materialien zu fördern und das Prinzip der Kreislaufwirtschaft zu erfüllen (Interview P1, persönliche Kommunikation, 24.02.2023). Insgesamt wurde der Ansatz, den Materialrestwert in die Bewertung einzubeziehen, sehr positiv aufgenommen. Die Umsetzung von Recycling- und Rückbau-freundlichen Baustoffen muss von Investor:innen und Baufirmen akzeptiert werden und die Kosten spielen letztendlich eine Rolle (Interview P4, persönliche Kommunikation, 03.03.2023). Der Recyclingprozess findet besonders bei wertvollen Materialien wie Kupfer und Metalle statt, da der Wert hoch genug ist (Interview P2, persönliche Kommunikation, 27.02.2023). Jedoch wurde darauf hingewiesen, dass es Schwierigkeiten in der Umsetzung geben könnte. Es

fehlt eine Datengrundlage für den Indikator Materialrestwert und diese muss erst geschaffen werden (Interview P5, persönliche Kommunikation, 06.03.2023).

Auch beim Bewertungssystem des DGNB wäre eine Betrachtung des Restwerts denkbar. Derzeit fehlen jedoch noch ausreichend Daten für eine solche wirtschaftliche Abschätzung. (Interview P8, persönliche Kommunikation, 20.03.2023)

Hochwertige Materialien sind für Investor:innen teurer in der Anschaffung und werden in der Praxis daher seltener umgesetzt. Hier muss überlegt werden, wie man Investoren für ganzheitliche Systeme sensibilisieren kann. (Interview P1, persönliche Kommunikation, 24.02.2023)

Bei der Berücksichtigung des Rückbauaufwandes als eine physikalische Größe, gab es bei den Expert:innen unterschiedliche Meinungen.

Einerseits wurde es als sinnvoll erachtet, da es ein entscheidender Faktor ist, die notwendige Rückbauzeit zu wissen. Auch wenn sich Materialien trennen lassen, ist es irrelevant, wenn der Aufwand zu hoch ist und sich nicht finanziell abbilden lässt. (Interview P6, persönliche Kommunikation, 13.03.2023)

Andererseits wurde darauf hingewiesen, dass es sehr schwierig ist, den energetischen Aufwand zu beschreiben. Hierfür müsste eine Möglichkeit der Messbarmachung entwickelt werden. (Interview P2, persönliche Kommunikation, 27.02.2023)

Es wurde auch diskutiert, ob eine quantitative Bewertung der Trennbarkeit der Bauteile sinnvoll ist oder ob es wichtiger ist, sich auf Second Life, Third Life usw. zu konzentrieren, um den Fokus auf das Verschieben des *End-of-Life*-Szenarios zu setzen (Interview P3, persönliche Kommunikation, 02.03.2023). Ein weiterer, wichtiger Punkt ist die Berücksichtigung eines Rückbaukonzeptes in der Planung, um einen willkürlichen Abbruch zu vermeiden (Interview P4, persönliche Kommunikation, 03.03.2023).

Insgesamt zeigt sich, dass der Rückbau von Gebäuden eine komplexe Angelegenheit ist, die viele Faktoren berücksichtigen muss. Eine ganzheitliche Betrachtung von Bauteilen und Gebäuden kann dazu beitragen, hochwertige Materialien zu fördern und das Prinzip der Kreislaufwirtschaft zu erfüllen. Die Implementierung ökologischer Indikatoren kann sinnvoll sein, sollte aber durch eine Sensibilisierung der Investor:innen für ganzheitliche Systeme unterstützt werden.

Materialverwertung:

Die Expert:inneninterviews zum Thema Materialverwertung von Gebäuden zeigen, dass es verschiedene Ansätze gibt, um die Verwertungsqualität von Baustoffen zu bewerten.

Der Ansatz der Bewertungssystematik nach dem Schulnotensystem wird von einem/ einer Interviewpartner:in als guter Ansatz betrachtet, um die Wiederverwertbarkeit von Materialien zu untersuchen. Dabei wurde erwähnt, dass eine gute Dokumentation der Qualitätsstufen erforderlich ist. Eine ungenaue Definition der Qualitätsstufen wäre in der Praxis nicht umsetzbar

und erfordert daher eine Datenbank mit erforderlichen Informationen, um eine Beratung für die Planung zu ermöglichen. (Interview P1, persönliche Kommunikation, 24.02.2023)

Das Recycling auf gleicher Qualitätsstufe wird als am besten geeignete Verwertungsmethode angesehen. Allerdings wurde von einem/ einer Interviewpartner:in negativ bewertet, dass das Recycling von Beton oft als Downcycling bezeichnet wird und als Zuschlag- oder Füllmaterial in den Straßenbau gelangt (Interview P3, persönliche Kommunikation, 02.03.2023).

Die Hälfte der Interviewpartner:innen sind sich einig, dass die prozentualen Anteile der Verwertung eine sinnvolle Methode zur Bewertung der Verwertungsqualität darstellen (Interview P4, persönliche Kommunikation, 03.03.2023. Interview P5, persönliche Kommunikation, 06.03.2023. Interview P6, persönliche Kommunikation, 13.03.2023. Interview P7 persönliche Kommunikation, 17.03.2023). Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass eine genaue Datengrundlage notwendig ist, um eine solche Bewertung durchführen zu können (Interview P5, persönliche Kommunikation, 06.03.2023). Der Ansatz der EU-Taxonomie-Verordnung, welcher auf dem denselben Ansatz basiert, wird als sinnvoll angesehen, da er einen konkreten Anteil vorgibt und es möglich ist, genau zu verfolgen, welchen Verwertungsweg das Material genommen hat (Interview P7, persönliche Kommunikation, 17.03.2023).

Die Expert:inneninterviews verdeutlichen, dass es notwendig ist, eine genaue Datengrundlage zu schaffen, um eine aussagekräftige Bewertung durchführen zu können. Die EU-Taxonomie-Verordnung wird als vielversprechender Ansatz angesehen, um die Verwertungsqualität von Baustoffen zu verbessern.

Volumen-/ massenbezogener Ansatz

Die Expert:inneninterviews haben gezeigt, dass es bei der Frage nach der geeigneten Bezugsgröße für die Bewertung von Gebäuden, im Hinblick auf ihre Umweltauswirkungen, unterschiedliche Meinungen gibt. Einige Interviewpartner:innen sind der Ansicht, dass das Volumen als Bezugsgröße sinnvoll ist. (Interview P1, persönliche Kommunikation, 24.02.2023. Interview P2, persönliche Kommunikation, 27.02.2023. Interview P6, persönliche Kommunikation, 13.03.2023. Interview P7 persönliche Kommunikation, 17.03.2023. Interview P8, persönliche Kommunikation, 20.03.2023). Andere argumentieren auch für die Berücksichtigung der Massen und sehen einen gemischten Ansatz, der sowohl das Volumen als auch die Massen berücksichtigt, als vorstellbar (Interview P7 persönliche Kommunikation, 17.03.2023. Interview P8, persönliche Kommunikation, 20.03.2023).

Darüber hinaus wurde in den Interviews der Vorschlag gemacht, einen Tonnenkilometer-Faktor bei der Entsorgung zu berücksichtigen. Dieser Faktor bezieht sich auf die Transportentfernung von abgebauten Materialien zur Entsorgungs- oder Recyclinganlage und spielt eine Rolle bei der Bewertung der Umweltauswirkungen. (Interview P3, persönliche Kommunikation, 02.03.2023)

Weiters angesprochen wurde, dass es bei der Diskussion um die geeignete Bezugsgröße nicht allein darum geht, die Kennzahlen zu optimieren, sondern vielmehr darum, die Planung hinsichtlich der Umweltaspekte zu optimieren. Es sollte den Planer:innen gezeigt werden, wie sie besser und nachhaltiger planen und bauen können. (Interview P1, persönliche Kommunikation, 24.02.2023)

Ein:e Interviewpartner:in hat die Bedeutung der Umweltauswirkungen von Bauprodukten und -materialien angesprochen. Dabei wird betont, dass die Umweltauswirkungen auf eine gemeinsame Einheit heruntergerechnet werden sollten, da es Produkte gibt, die wenig Gewicht haben, aber dennoch erhebliche negative Auswirkungen auf die Umwelt haben. (Interview P4, persönliche Kommunikation, 03.03.2023)

Insgesamt zeigt sich, dass es keine einheitliche Lösung für die Frage nach der geeigneten Bezugsgröße gibt. Vielmehr müssen verschiedene Faktoren berücksichtigt werden, um eine umfassende Bewertung der Umweltauswirkungen von Gebäuden zu ermöglichen.

Ökobilanz

Die Expert:inneninterviews zum Thema Ökobilanz von Gebäuden offenbaren verschiedene Herausforderungen und Forschungsbedarfe. Die Ökobilanz ist ein nützliches Instrument, um Gebäudevarianten zu vergleichen und Aussagen darüber zu treffen, was besser oder schlechter ist (Interview P1, persönliche Kommunikation, 24.02.2023). Allerdings ist es derzeit nicht möglich, auf perfekte und fehlerfreie Ergebnisse zu kommen, da unterschiedliche Berechnungstools zu unterschiedlichen Ergebnissen führen können (Interview P2, persönliche Kommunikation, 27.02.2023). Es wäre sinnvoll, die Ökobilanz mit der Bewertung der Kreislauffähigkeit zu verbinden, um den ökologischen Fußabdruck von Wiederverwertung, Verbrennung, usw. zu verstehen (Interview P1, persönliche Kommunikation, 24.02.2023).

Weiters wurde angemerkt, dass die Datenlage in der Ökobilanz sehr dynamisch und ständig in Entwicklung ist. Eine differenzierte Betrachtung der Phase D, so wie sie bei den anderen Phasen erfolgt, wäre zu empfehlen. (Interview P5, persönliche Kommunikation, 06.03.2023)

Ebenfalls wird kritisiert, dass die Ökobilanz in der Bewertung der Kreislaufwirtschaft nicht auf CO₂ neutrale Stoffstromschlüsse achtet. Es besteht Forschungsbedarf, um die *End-of-Life*-Szenarien zu verbessern und die Ökobilanz-Datenlage in der EoL-Phase zu differenzieren. (Interview P3, persönliche Kommunikation, 02.03.2023)

Insgesamt wird die Berücksichtigung der Ökobilanz in der EoL als sinnvoll erachtet, da der Abbruch ein wesentlicher Punkt für das Ziel der Kreislaufwirtschaft ist. Es ist jedoch aufwendig, solche Daten zu entwickeln, und es besteht ein Bedarf an einheitlichen und harmonisierten Produktdatensätzen. Daher wird die Umsetzung einer Berücksichtigung als schwierig eingeschätzt.

Zukunftspotentiale

Zum Thema Zukunftspotenziale von Gebäuderecycling wird angemerkt, dass es schwierig ist, die Entwicklung der Forschung und Technologie vorherzusagen und deshalb auf den aktuellen Stand des Wissens fokussiert werden sollte. Hier wird die Bedeutung von Gebäudepässen als Dokumentation hervorgehoben, um die Bewertung anzupassen und eine Rückführung in den Kreislauf zu ermöglichen. (Interview P1, persönliche Kommunikation, 24.02.2023)

Es wird kritisch hinterfragt, wer die Kompetenz hat, einzuschätzen, ob sich eine Recyclingtechnologie am Markt etablieren kann (Interview P6, persönliche Kommunikation, 13.03.2023). Es wird auch betont, dass eine Zertifizierung nur zum Zwecke der Erlangung einer Plakette nicht zielführend ist und dass es Dokumente wie Rücknahmeerklärungen der Hersteller braucht, um ein Gebäude besser und wertvoller zu machen. Diese Dokumente haben einen wesentlich größeren Mehrwert, als fiktive Abminderungsfaktoren, welche die Recyclingpotenziale in der Zukunft berücksichtigen. (Interview P8, persönliche Kommunikation, 20.03.2023)

Andererseits wird argumentiert, dass man in Einzelfällen Prognosen abschätzen kann und dass die Frage lauten sollte, ob eine Konstruktion einfach und mit wenig Energieaufwand zu trennen ist. (Interview P2, persönliche Kommunikation, 27.02.2023)

Insgesamt zeigt sich, dass es unterschiedliche Ansichten zum Thema Zukunftspotenziale von Gebäuderecycling gibt. Die Frage, ob und wie man zukünftige Entwicklungen und Technologien berücksichtigen soll, wird kritisch diskutiert. Während einige Expert:innen argumentieren, dass man auf den aktuellen Stand des Wissens fokussieren sollte, betonen andere die Bedeutung von Prognosen und einer einfachen Konstruktion für eine erfolgreiche Rückführung in den Kreislauf. Es scheint jedoch Konsens darüber zu herrschen, dass eine Dokumentation wie der Gebäudepass und Rücknahmeerklärungen der Hersteller einen wesentlich größeren Mehrwert haben, als fiktive Faktoren, die die Recyclingpotenziale in der Zukunft berücksichtigen.

6 Fallbeispiel: Bewertung des Recyclingpotentials

Im folgenden Kapitel wird eine Beispielrechnung mit dem EI10 und den entwickelten Implementierungsvorschlägen durchgeführt, wobei die Ergebnisse im Anschluss verglichen werden. Zunächst wird ein Bewertungsgegenstand definiert, für den der EI10 ermittelt wird. Darüber hinaus werden die Indikatoren für den Materialrestwert und den Aufwand für den Rückbau und die Trennung für jede einzelne Bauteilschicht ermittelt, um die angepassten Ergebnisse des EI10 gegenüberzustellen. In einem weiteren Schritt werden für jede Schicht *End-of-Life*-Szenarien definiert, und die Verwertungswege werden prozentual im Verhältnis zur Gesamtkonstruktion dargestellt und bewertet. Abschließend werden die Ergebnisse um eine Ökobilanzberechnung erweitert und diskutiert.

6.1 Bewertungsobjekt

Nachfolgend wird eine Außenwand in Holzbauweise als Bewertungsobjekt vorgestellt. In **Abbildung 40** und **Tabelle 18** werden die gewählten Aufbauten erläutert. Als Außenhülle wurde eine Holzschindelstruktur gewählt, die auf einer Lattung als Unterkonstruktion angebracht ist. Die Innenbekleidung besteht aus verputzten Gipskartonplatten. Als Wärmedämmung wurde eine Zellulosefaserdämmung gewählt, die in die Konstruktion eingeblasen wird. Diese wird zwischen einem Holzrahmen eingebaut und mit OSB-Platten verschlossen.

Für die Annahmen zur Lebensdauer werden die Empfehlungen des *Leitfaden zur Berechnung des Entsorgungsindikators EI Kon von Bauteilen und des Entsorgungsindikators EI10 auf Gebäudeebene* (IBO GmbH, 2020) eingehalten. Aufgrund der erhöhten Verschmutzung der Holzschindeln, wird für diese und die Unterkonstruktion eine angepasste Nutzungsdauer von 35 Jahren angenommen.

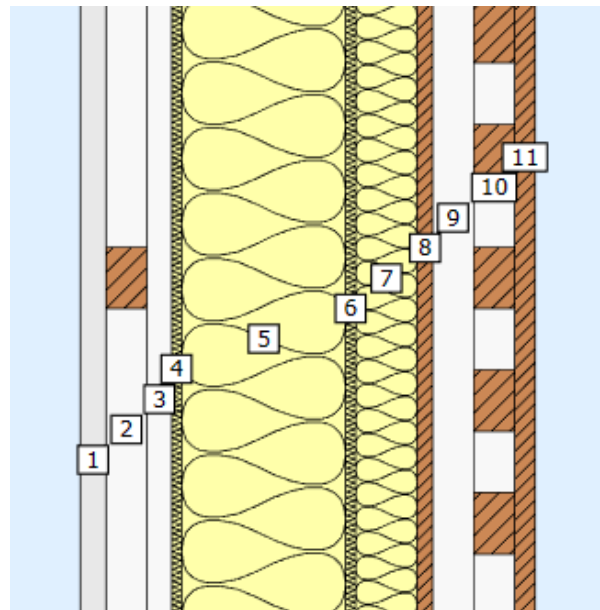


Abbildung 40: Schichtenaufbau der Außenwand in Holzbauweise (baubook GmbH, 2023)

Schicht	Material (von innen nach außen)	Schichtstärke	Nutzungsdauer [Jahre] (IBO GmbH, 2020)
1	Gipskartonplatte (700 kg/m^3) 12,5 mm, doppelt beplankt	2,5 cm	35
2	Lattung als Installationsebene 40/60 mm, Fichte, unbehandelt, verschraubt	4,0 cm	50
3	Konterlattung 24/60 mm, Fichte, unbehandelt, verschraubt	2,4 cm	50
4	Holzfaserverklebung 8 mm, sd: 1,48 m, luftdichte Verklebung der Stöße, verschraubt	0,8 cm	50
5	Holzrahmen KVH 80/160 mm, Fichte, unbehandelt; dazwischen Gefachdämmung 160 mm, Zellulosefasern aus Altpapier, $\lambda: 0,04 \text{ W/mK}$, eingeblasen	16,0 cm	100 50
6	Holzfaserverklebung 5 mm, 97% Holzanteil, sd: 0,06 m, verschraubt	0,5 cm	50
7	Konstruktionsholz 60/60 mm, Fichte, unbehandelt, verschraubt; dazwischen Dämmung 60 mm, Zellulosefasern aus Altpapier, $\lambda: 0,04 \text{ W/mK}$, eingeblasen	6,0 cm	50 50
8	MDF-Platte 15mm. Diffusionsoffen mit Nut und Feder, sd: 0,165m, verschraubt	1,5 cm	35*
9	Konterlattung 40/60 mm, Fichte, unbehandelt, verschraubt	4,0 cm	35*
10	Lattung 40/60 mm, Fichte, unbehandelt, verschraubt	4,0 cm	35*
11	Holzschindeln 20mm, zweilagig, Lärche gespalten, unbehandelt, vernagelt	2,0 cm	35*

Tabelle 18: Schichtenaufbau der Außenwand in Holzbauweise (eigene Darstellung)

*angepasste Nutzungsdauer

In **Abbildung 41** wird der Baustoffanteil der untersuchten Holzkonstruktion nach Volumen dargestellt, einschließlich der Austauschzyklen der Bauschichten. Die Abbildung zeigt, dass der größte Teil des Volumens von der Zellulosedämmung eingenommen wird. Da die Bewertung des EI10 auf dem Volumen basiert, ist zu erwarten, dass diese Baustofffraktion den größten Einfluss auf die Ergebnisse hat. Die Gipskartonplatte, Lärchenschindel und Unterkonstruktion der Außenfassade haben einen höheren Anteil, da sie aufgrund ihrer Nutzungsdauer von 35 Jahren häufiger ausgetauscht werden müssen. Das Holzständerwerk und die restlichen Kanthölzer machen nur einen sehr geringen Anteil der gesamten Konstruktion aus.

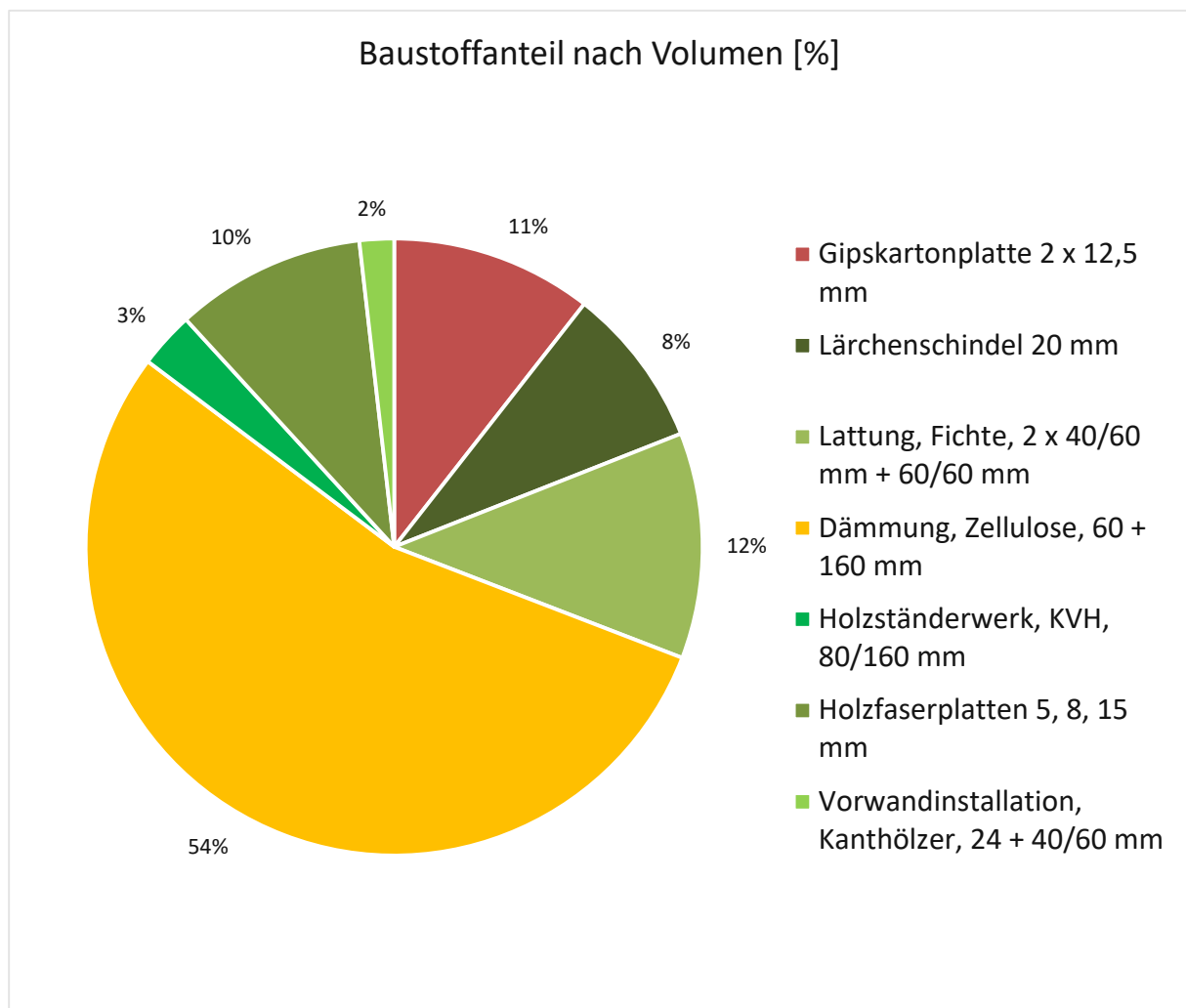


Abbildung 41: Außenwand in Holzbauweise – Anteil nach Volumen (eigene Darstellung)

6.2 Bewertungskonzept

6.2.1 Berechnung des EI10

Die für die Bewertung des EI10 erforderlichen Daten wurden von dem Online-Tool Baubook (baubook GmbH, 2023) bezogen. In **Tabelle 19** sind die notwendigen Werte für die

Nutzungsdauer, die Entsorgungseinstufung und das Verwertungspotential für jede Bauteilschicht aufgeführt.

Anhand dieser Daten erfolgt die Berechnung des EI10 für die Konstruktion. Anschließend werden die Ergebnisse präsentiert und der Einfluss der vorgeschlagenen Indikatoren beschrieben.

Schicht	Material (von innen nach außen)	Nutzungsdauer [Jahre] (IBO GmbH, 2020)	Entsorgungseinstufung (baubook GmbH, 2023)	Verwertungspotential (baubook GmbH, 2023)
1	Gipskartonplatte (700 kg/m ³) 12,5 mm, doppelt beplankt	35	4	3
2	Lattung als Installationsebene 40/60 mm, Fichte, unbehandelt, verschraubt	50	1	1
3	Konterlattung 24/60 mm, Fichte, unbehandelt, verschraubt	50	1	1
4	Holzfaserverplatte 8 mm, sd: 1,48 m, luftdichte Verklebung der Stöße, verschraubt	50	1	1
5	Holzrahmen KVH 80/160 mm, Fichte, unbehandelt; dazwischen Gefachdämmung 160 mm, Zellulosefasern aus Altpapier, λ : 0,04 W/mK, eingeblasen	100 50	1 3	1 3
6	Holzfaserverplatte 5 mm, 97% Holzanteil, sd: 0,06 m, verschraubt	50	1	1
7	Konstruktionsholz 60/60 mm, Fichte, unbehandelt, verschraubt; dazwischen Dämmung 60 mm, Zellulosefasern aus Altpapier, λ : 0,04 W/mK, eingeblasen	50 50	1 3	1 3
8	MDF-Platte 15mm. Diffusionsoffen mit Nut und Feder, sd: 0,165m, verschraubt	35*	3	3
9	Konterlattung 40/60 mm, Fichte, unbehandelt, verschraubt	35*	1	1
10	Lattung 40/60 mm, Fichte, unbehandelt, verschraubt	35*	1	1
11	Holzschindeln 20mm, zweilagig, Lärche gespalten, unbehandelt, vernagelt	35*	1	1

Tabelle 19: Nutzungsdauer, Entsorgungseinstufung und Verwertungspotential der Außenwand in Holzbauweise (eigene Darstellung)
*angepasste Nutzungsdauer

6.2.2 Bewertungskonzept Materialwert

Der Koeffizienten für den Materialwert wird verwendet, um die Wahrscheinlichkeit zu bestimmen, ob ein Wertstoff nach dem Rückbau ein hochwertiges EoL-Szenario erreicht. Dadurch

werden auch die Kosten und/oder Erlöse berücksichtigt, die mit dem Rückbau eines Baustoffs verbunden sind.

Materialien mit einem Wert von Null oder leicht positiv erhalten einen Koeffizienten von 1,0. Wenn ein Material einen besonders hohen Wert hat, steigt die Wahrscheinlichkeit einer Wiederverwendung ohne Qualitätsverlust entsprechend an. Daher kann ein Faktor von bis zu 1,3 erreicht werden, um gegebenenfalls einen erhöhten Rückbauaufwand auszugleichen. In der Praxis sind Abbruchunternehmen häufig bereit, einen höheren Rückbauaufwand für Wertstoffe in Kauf zu nehmen, die einen hohen Erlös erzielen können. Andererseits verringert sich der Koeffizient, je höher die Entsorgungskosten sind. Mit steigenden Kosten nimmt die Wahrscheinlichkeit eines hochwertigen Recyclings ab. In **Abbildung 42** wird das Zustandekommen des Koeffizienten für den Materialwert f_v dargestellt. Die baustoffspezifischen Daten zum Materialwert wurden aus der Dokumentation des Urban Mining Index entnommen und in der Berechnung verwendet. (Rosen, 2021)

Um den Koeffizienten für den Materialwert bei der Bewertung des erweiterten EI10 anzuwenden, muss der Faktor f_v in die Bewertungssystematik integriert werden. Wenn die Entsorgungskosten eines Materials hoch sind, sollte dies bei der Bewertung berücksichtigt werden, indem es das Ergebnis negativ beeinflusst. Beim EI10 wird das Ergebnis negativ beeinflusst, indem der Zahlenwert erhöht wird. Deshalb muss der Abminderungsfaktor f_v für die Bewertung beim EI10 umgekehrt werden.

	Preis	Bewertung	Faktor f_v	Faktor f_v (EI10)
	880 €/to.	äußerst positiv	1,3	0,7
	420 €/to.	sehr hoch positiv	1,2	0,8
	150 €/to.	hoch positiv	1,1	0,9
Erlöse	0 €/to.	leicht positiv	1,0	1,0
Kosten	-23 €/to.	leicht negativ	0,9	1,1
	-54 €/to.	hoch negativ	0,8	1,2
	-146 €/to.	Sehr hoch negativ	0,7	1,3
		äußerst negativ	0,6	1,4

Abbildung 42: Ermittlung des Faktors f_v für den Materialrestwert (eigene Darstellung nach (Rosen, 2021))

Das Ergebnis des erweiterten EI10 erhält man, indem der jeweilige bewertete Baustoff EI_{KON} mit dem Koeffizienten für den Materialwert multipliziert wird.

$$EI_{KON,Wert} = EI_{kon} * f_{v,EI10}$$

Formel 18: Berechnung des adaptierten EI_{KON} mittels Koeffizienten für den Materialrestwert (eigene Darstellung)

6.2.3 Bewertungskonzept Rückbau-/ Trennungsaufwand

Für den Koeffizienten des Rückbau-/ und Trennungsaufwand wurden in der Forschungsarbeit von Rosen (Rosen, 2021) mehrere Skalen basierend auf der Funktion der Bauteile festgelegt. Es wurde pro m^2 Bauteilfläche der Arbeitsaufwand bei der selektiven Demontage ermittelt und auf einer fünfstufigen Skala eingeordnet. Wenn der Aufwand für den Rückbau und die Trennung der Bauteilschichten sehr gering ist, erleichtert dies die sortenreine Sammlung der Materialien. Daher wird einem geringen Arbeitsaufwand ein Koeffizient von 1,0 zugewiesen. Mit zunehmendem Arbeitsaufwand sinkt die Wahrscheinlichkeit einer sortenreinen Trennung der Materialien, sodass der Koeffizient in Zehntelschritten bis auf 0,6 abnimmt. (Rosen, 2021)

In der **Abbildung 43** wird das Zustandekommen des Koeffizienten für den Materialwert f_w dargestellt. Wie beim Koeffizienten für den Materialwert muss der Faktor für den Arbeitsaufwand umgekehrt werden, um die Bewertung an die Systematik des EI_{10} anzupassen.

Arbeit	Bewertung Arbeitsaufwand	Faktor f_w	Faktor $f_w EI_{10}$
$\leq 7,1 \text{ MJ/m}^2$	sehr gering	1,0	1,0
$\leq 8,7 \text{ MJ/m}^2$	gering	0,9	1,1
$\leq 11,5 \text{ MJ/m}^2$	mittel	0,8	1,2
$\leq 12,6 \text{ MJ/m}^2$	hoch	0,7	1,3
$\geq 12,6 \text{ MJ/m}^2$	sehr hoch	0,6	1,4

Abbildung 43: Ermittlung des Faktors f_w für den Rückbau- / Trennungsaufwand (eigene Darstellung nach (Rosen, 2021))

Das Ergebnis des erweiterten EI_{10} erhält man, indem der jeweilige bewertete Baustoff EI_{KON} mit dem Koeffizienten für den Arbeitsaufwand multipliziert wird.

$$EI_{KON,Arbeit} = EI_{kon} * f_{w,EI10}$$

Formel 19: Berechnung des adaptierten EI_{KON} mittels Koeffizienten für den Arbeitsaufwand (eigene Darstellung)

6.2.4 Bewertungskonzept Verwertungsanteil

Für die Entsorgungsphase wird jedem Wertstoff ein hochwertiges (englisch: *selective dismantling* (sd)) und ein übliches (englisch: *usual demolition* (ud)) EoL-Szenario zugeordnet. Die Annahmen bezüglich der Szenarien basieren auf den Forschungsergebnissen von Rosen (Rosen, 2021), welche für die Berechnung des Urban Mining Index verwendet wurden. In **Tabelle 20** werden die

EoL-Szenarien übersichtlich dargestellt. Die Beurteilung, ob ein Material ein qualitativ hochwertiges EoL-Szenario erreicht, hängt vom Rückbauverfahren und der Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus ab. Daher werden die zuvor beschriebenen Koeffizienten für den Materialwert und den Rückbau-/ Trennungsaufwand in der Bewertung berücksichtigt. (Rosen, 2021)

Im Gegensatz zur Berechnung des Urban Mining Index, wird bei dem vorgeschlagenen Bewertungskonzept der Materialeinsatzes und des *Material-Loop-Potential* (MLP) nicht berücksichtigt. Aus Gründen der Vereinfachung wurden sie vernachlässigt.

Das Volumen, welches durch den selektiven Rückbau das jeweils hochwertige EoL-Szenario erreicht, wird mit dem Faktor Arbeit und Wert multipliziert. Das verbleibende Volumen wird dem jeweils üblichen EoL-Szenario zugeordnet. Das Ergebnis ist eine prozentuale Aufschlüsselung der Verwertungsszenarien für das gesamte Bauteil.

EoL-Szenario	Bezeichnung	Kreislaufpotential
ru	Wiederverwendbar	CLP
rc	Wiederverwertbar	CLP
dc _{cr}	Weiterverwertbar, zertifiziert nachhaltig nachwachsend	CLP
en _{cr}	Energetisch verwertbar, zertifiziert nachhaltig nachwachsend	CLP
dc	Weiterverwertbar	LP
en _r	Energetisch verwertbar nachwachsend	LP
en _f	Energetisch verwertbar, fossil	-
d	Entsorgung/Deponierung	-

Tabelle 20: Erläuterung der Verwertungswege (eigene Darstellung nach (Rosen, 2021))

Das Ziel besteht darin, das Kreislaufpotential eines Bauteils zu bewerten. Um Aussagen über die Kreislauffähigkeit der einzelnen Schichten zu treffen, werden die zuvor definierten EoL-Szenarien in folgende Kategorien unterteilt:

Closed-Loop-Potential (CLP)

Als *Closed-Loop-Potential* werden alle Anteile von Baustoffen bezeichnet, die nach dem Rückbau wiederverwertet oder wiederverwendet werden und damit auf dem ursprünglichen Niveau qualitativ nutzbar sind. (Rosen, 2021)

$$CLP = ru + rc + dc_{cr} + en_{cr}$$

Formel 20: Berechnung des *Closed-Loop-Potential* (Rosen, 2021)

Loop-Potential (LP)

Das *Loop-Potential* umfasst neben dem *Closed-Loop-Potential* auch alle Anteile an Materialien, die nach der Demontage stofflich wiederverwertet werden können und so den geschlossenen Produktionskreislauf verlassen, um in Produktionskreisläufen mit geringerer Qualität eingesetzt

zu werden. Darüber hinaus werden die Anteile an Baustoffen dazugezählt, die energetisch verwertet werden können und aus nachwachsenden Rohstoffen bestehen. (Rosen, 2021)

$$LP = CLP + dc + en_r$$

Formel 21: Berechnung des *Loop-Potentials* (Rosen, 2021)

Das Kreislaufpotential lässt sich mit folgender Formel berechnen:

$$\text{Kreislaufpotential [\%]} = CLP + 0,5 * (LP - CLP)$$

Formel 22: Berechnung des Kreislaufpotential (eigene Darstellung nach (Rosen, 2021))

Nicht erneuerbare Primärrohstoffe und Abfälle, die in Deponien beseitigt werden, sowie fossile Rohstoffabfälle, die nur energetisch genutzt werden können, fallen nicht in das Kreislaufpotential, da sie dem linearen Wirtschaftssystem zugeordnet sind. (Rosen, 2021)

6.2.5 Bewertungskonzept Ökobilanz

Bei der Ökobilanz erfolgt die Berechnung der drei Ökoindikatoren PENRT (englisch: *Primary Energy Non Renewable Total*), GWP (englisch: *Global Warming Potential*) und AP (englisch: *Acidification Potential*) für die Lebenszyklusphase A1-A3, C1, C3, C4 und D. Der Betrachtungszeitraum beträgt dabei 100 Jahre. In einem ersten Schritt werden den beschriebenen Aufbauten Kennwerte für diese Ökoindikatoren ermittelt. Für die Suche wird auf EPDs (European Product Declaration) der Produkthersteller zurückgegriffen. Hierfür wurde das *Onlinetool des Instituts für Bauen und Umwelt e.V* (Institut Bauen und Umwelt e.V., 2023) verwendet. Auf Daten der österreichischen Plattform Baubook (baubook GmbH, 2023) kann aufgrund fehlender Werte nicht zurückgegriffen werden.

Allgemein muss immer die Bezugseinheit (Fläche, Gewicht, Dichte, Volumen) der ermittelten Daten berücksichtigt werden. In der Berechnung ist deshalb die jeweilige Bezugseinheit als *Dichte* [kg/m³] oder *maßgebender Fluss* angeführt.

Für die Annahmen der Lebensdauer werden die Empfehlungen des *Leitfaden zur Berechnung des Ökoindex OI3 für Bauteile und Gebäude* (IBO GmbH, 2022) eingehalten. Da die Holzschindel einer verstärkten Verschmutzung ausgesetzt ist, wird für diese und die Unterkonstruktion eine angepasste Nutzungsdauer von 35 Jahren angenommen.

Mithilfe der zuvor ermittelten Datengrundlagen hinsichtlich PENRT, GWP und AP erfolgt die Berechnung der Gesamtbilanz der Konstruktion. Anschließend werden die Ergebnisse aus der Ökobilanz analysiert und der Einfluss auf den EI10 qualitativ beschrieben, da aufgrund fehlender Datengrundlage, quantitative Aussagen nicht möglich sind.

6.3 Bewertungsergebnisse

6.3.1 Bewertungsergebnisse EI10

Die Ermittlung des EI10 erfolgt nach dem *Leitfaden zur Berechnung des Entsorgungsindikators EI Kon von Bauteilen und des Entsorgungsindikators EI10 auf Gebäudeebene* (IBO GmbH, 2020). Unter Berücksichtigung der Faktoren Nutzungsdauer, Entsorgungseinstufung und Verwertungspotential, liefert der EI10 einen Wert von 12,30 als Ergebnis.

Bei der Berechnung fließt das Volumen der Bauteile ein, wodurch die Zellulosedämmung den größten Einfluss auf das Ergebnis hat. Obwohl die Gipskartonplatte ein geringes Volumen aufweist, hat sie ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf den EI10. Dies resultiert aus der hohen Wertzuordnung der Entsorgungseinstufung (4) und des Verwertungspotentials (3). Hingegen haben die überwiegend aus Holz bestehenden Produkte geringere Auswirkungen auf den EI10.

6.3.2 Bewertungsergebnisse Materialrestwert

Die Abbildung 44 zeigt den Wert der Entsorgungskosten in Euro pro m² Konstruktionsfläche für die untersuchte Außenwand. Da die Außenwand größtenteils aus natürlichen Materialien mit geringer Masse besteht, weisen diese im Allgemeinen geringe bis mittlere Entsorgungskosten bei sortenreiner Trennung auf. Besonders die Entsorgungskosten für die Materialfraktion Gips sind jedoch vergleichsweise hoch, was auf die hohe Dichte dieses Materials zurückzuführen ist.

Durch die Berücksichtigung des Koeffizienten des Materialwertes, wird das Ergebnis des EI10 um 30% erhöht (siehe **Abbildung 45**). Dieser Anstieg wird maßgeblich von der Gipskartonplatte, den Holzfaserplatten und der Zellulosedämmung beeinflusst. Diese Bauteile haben den größten Einfluss auf den Unterschied in den Ergebnissen des EI10, da sie in Bezug auf den Materialwert einen signifikanten Faktor darstellen.

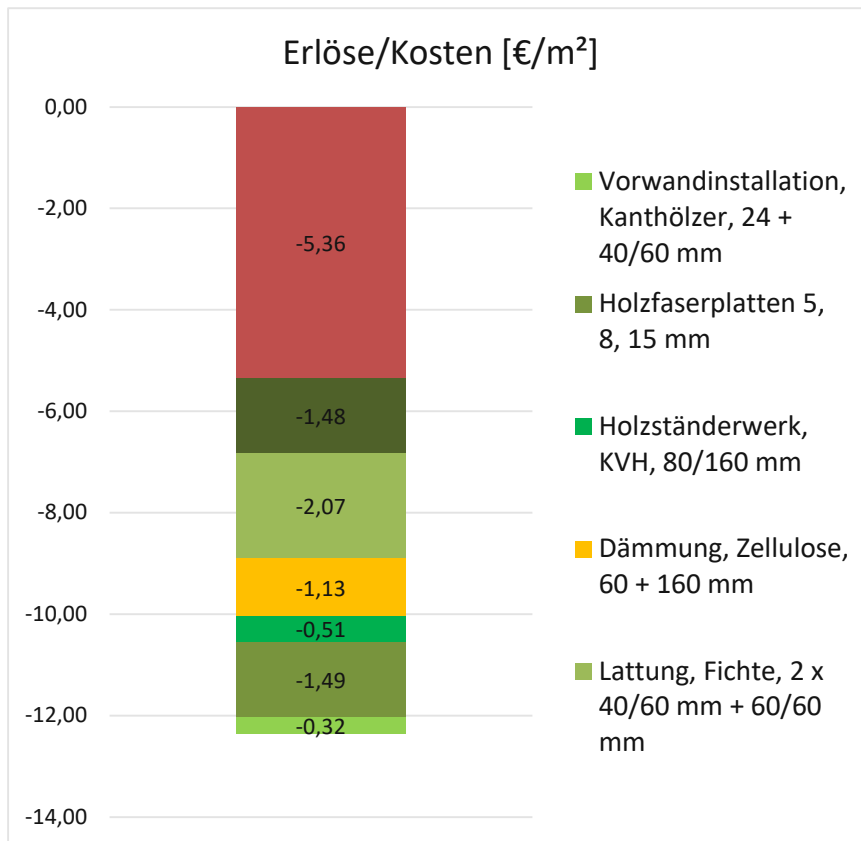


Abbildung 44: Erlös/Kosten Außenwand in Holzbauweise (eigene Darstellung)

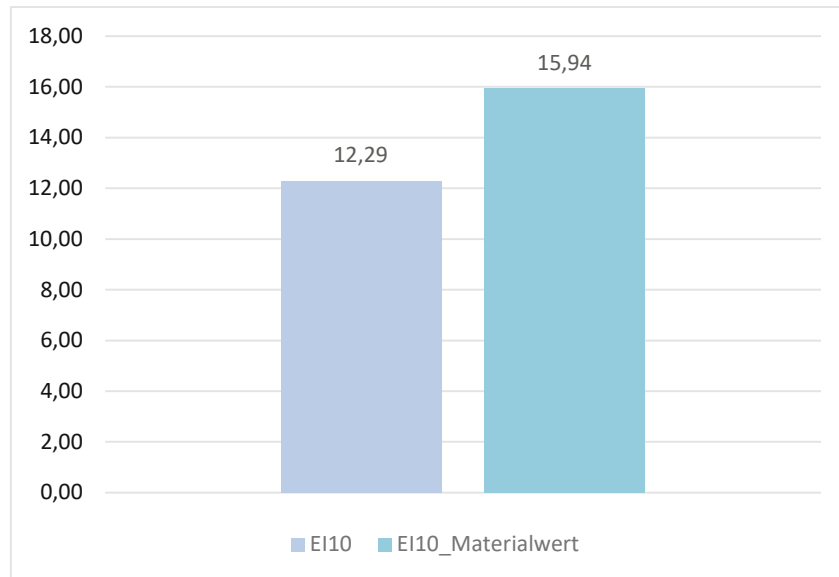


Abbildung 45: Bewertungsergebnisse Materialrestwert (eigene Darstellung)

6.3.3 Bewertungsergebnisse Rückbau-/ und Trennungsaufwand

Für jede Bauteilschicht wurden die Daten für den Arbeitsaufwand ermittelt, wobei der Bauteilkatalog des Urban Mining Index als Datengrundlage diente (Rosen, 2021). Bei der Außenwand wird der Rückbauaufwand als gering bis sehr gering eingestuft, da die Schichten hauptsächlich durch Schrauben miteinander verbunden sind. Allgemein ist der Trennungsaufwand höher, wenn Schichten verklebt oder verschweißt werden. Für die Zellulose-

Einblasdämmung wurde der Arbeitsaufwand auf 1,0 angenommen, da die Dämmung mit geringem Aufwand aus der Konstruktion entfernt werden kann.

Aufgrund des geringen Arbeitsaufwands hat die Berücksichtigung des Koeffizienten für den Rückbau- und Trennungsaufwand eine geringe Auswirkung auf das Ergebnis des EI10. Insgesamt wurde das Ergebnis um 3% erhöht (siehe **Abbildung 46**).

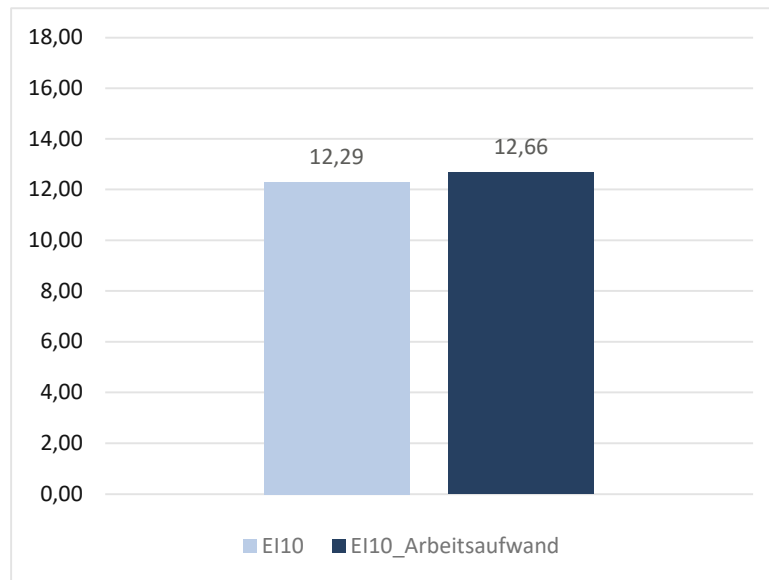


Abbildung 46: Bewertungsergebnisse Rückbau-/ Trennungsaufwand (eigene Darstellung)

6.3.4 Bewertungsergebnisse Verwertungsanteil

In der Berechnung des Kreislaufpotentials wurde jeder Bauteilschicht jeweils ein hochwertiges (sd) und ein übliches (ud) EoL-Szenario zugeordnet (siehe **Tabelle 21**). Die Annahmen zu den EoL-Szenarien basieren auf der Datengrundlage des Urban Mining Index (Rosen, 2021).

Schicht von innen nach außen	Hochwertiges EoL-Szenario (sd)	Übliches EoL-Szenario (ud)
Gipskartonplatte 12,5 mm, doppelt beplankt inkl. Putz	rc	d
Lattung als Installationsebene 40/60 mm, Fichte, unbehandelt, verschraubt	dc _{cr}	en _{cr}
Konterlattung 24/60 mm, Fichte, unbehandelt, verschraubt	dc _{cr}	en _{cr}
Holzfaserverplatte 8 mm, sd: 1,48 m, luftdichte Verklebung der Stöße, verschraubt	dc _{cr}	en _{cr}
Holzrahmen KVH 80/160 mm, Fichte, unbehandelt	dc _{cr}	en _{cr}
dazwischen Gefachdämmung 160 mm, Zellulosefasern aus Altpapier, λ : 0,04 W/mK, eingeblasen	rc	en _r
Holzfaserverplatte 5 mm, 97% Holzanteil, sd: 0,06 m, verschraubt	dc _{cr}	en _{cr}
Konstruktionsholz 60/60 mm, Fichte, unbehandelt, verschraubt	dc _{cr}	en _{cr}
dazwischen Dämmung 60 mm, Zellulosefasern aus Altpapier, λ : 0,04 W/mK, eingeblasen	rc	en _r
MDF-Platte 15mm. Diffusionsoffen mit Nut und Feder, sd: 0,165m, verschraubt	dc _{cr}	en _{cr}
Konterlattung 40/60 mm, Fichte, unbehandelt, verschraubt	dc _{cr}	en _{cr}
Lattung 40/60 mm, Fichte, unbehandelt, verschraubt	dc _{cr}	en _{cr}
Holzschindeln 20mm, zweilagig, Lärche gespalten, unbehandelt, vernagelt	en _{cr}	en _{cr}

Tabelle 21: EoL-Szenarien Außenwand in Holzbauweise (eigene Darstellung)

Das Ergebnis in **Abbildung 47** zeigt den Verwertungsanteil der Baustoffe gegliedert in den Kategorien *Closed-Loop-Potential* (blau), *Loop-Potential* (grün) und den restlichen Baustoffen, welche nicht zu einem Kreislaufpotential beitragen (rot). Da die Zellulosedämmung mehr als die Hälfte des eingebauten Volumens in der Konstruktion einnimmt, wirkt dessen Verwertungsweg am stärksten. Der Dämmstoff wird überwiegend stofflich wiederverwertet und zu einem geringen Anteil thermisch verbrannt und trägt damit maßgeblich zur Verwertung in geschlossenen Kreisläufen bei. Insgesamt wird 45% des Volumens stofflich wiederverwertet (rc). Für die Holzwerkstoffe wurde angenommen, dass dieser zu einem sehr hohen Anteil aus zertifiziert nachwachsenden Hölzern besteht. Unter Berücksichtigung des Faktors Aufwand und Wert, werden durchschnittlich zwei Drittel der entsorgten Holzwerkstoffe stofflich (dc_{cr}) und ein Drittel energetisch (en_{cr}) verwertet. Bezogen auf das Volumen der Außenwand werden somit 18% für die stoffliche Verwertung und 17% für die energetische Verwertung von zertifizierten Werkstoffen prognostiziert. Die Gipskartonplatte wird nach Berücksichtigung der Koeffizienten für Aufwand und Wert teilweise wiederverwertet, während das restliche Volumen auf Deponien gelagert wird. Der Gesamtanteil, welcher auf Deponien landet, wird auf 4% prognostiziert.

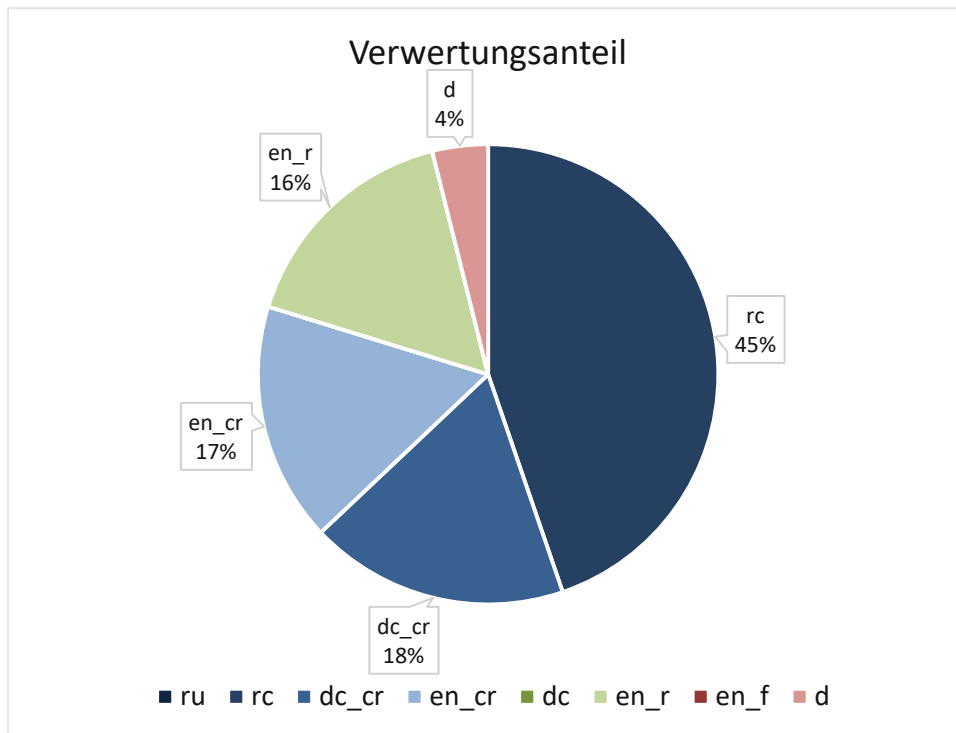


Abbildung 47: Bewertungsergebnisse Verwertungsanteil (eigene Darstellung)

Die Ergebnisse werden in der **Tabelle 22** übersichtlich aufgelistet. Die Verwertungsanteile, welche zum *Closed-Loop-Potential* gezählt werden, tragen vollwertig zum Kreislaufpotential bei. Verwertungsanteile im *Loop-Potential* wirken nur zur Hälfte zum Kreislaufpotential bei. Die restlichen Verwertungsanteile haben keinen Einfluss auf die Bewertung des Kreislaufpotentials. Für die vorliegende Außenwand in Holzbauweise wurde nach aufsummieren der einzelnen Ergebnisse ein Kreislaufpotential von 88% ermittelt.

Kreislaufpotential	EoL-Szenario	Bezeichnung	Verwertungsanteil
CLP	ru	Wiederverwendbar	0%
	rc	Wiederverwertbar	45%
	dc _{cr}	Weiterverwertbar, zertifiziert nachhaltig nachwachsend	18%
	en _{cr}	Energetisch verwertbar, zertifiziert nachhaltig nachwachsend	17%
LP	dc	Weiterverwertbar, nachwachsend	0%
	en _r	Energetisch verwertbar, nachwachsend	16%
	en _f	Energetisch verwertbar, fossil	0%
	d	Entsorgung/Deponierung	4%
Kreislaufpotential = CLP + 0,5 * LP =			88%

Tabelle 22: Bewertungsergebnisse Verwertungsanteil (eigene Darstellung)

6.3.5 Bewertungsergebnisse Ökobilanz

In Abbildung 48 wird der Totale nicht erneuerbare Primärenergiebedarf (PENRT) für den Lebenszyklus A-D dargestellt. Die Außenwand in Holzbauweise benötigt während der Herstellungsphase (A1-A3) einen Energiebedarf von ungefähr 400 MJ/m². In der Betriebsphase werden zusätzlich die Austauschzyklen (B4) der eingesetzten Bauteilschichten berücksichtigt. Die Auswirkungen des Energiebedarfes in der Entsorgungsphase (C) sind sehr gering. Da derzeit keine szenariobezogenen Ökobilanzdaten für die spätere Materialverwendung vorliegen, wird davon ausgegangen, dass alle organischen Materialien am Ende ihrer Nutzungsdauer energetisch verwertet werden (Rosen, 2021). Daher wird auch von den verwendeten EPDs das Szenario der thermischen Verwertung von organischen Materialien angenommen. Dies führt zu einer Gutschrift für den Energiebedarf in der Lebenszyklusphase D.

In **Abbildung 49** werden die Ergebnisse zum Treibhauspotential (GWP) abgebildet. Das verwendete Holz und die Biofasern binden während der Wachstumsphase Kohlenstoff und entfernen so klimaschädliches CO₂ aus der Atmosphäre. Daher weisen die Lebenszyklusphasen A und B eine Gutschrift auf. Bei der Verbrennung entsteht CO₂, welches im Modul C der Ökobilanz dargestellt wird. Die freigesetzte Energie kann jedoch die Verbrennung von fossilen Brennstoffen ersetzen, wodurch Gutschriften für vermiedenes CO₂ von fossilen Energieträgern in Modul D ausgewiesen werden.

Abbildung 50 zeigt die Auswirkungen auf das Versauerungspotential (AP). Die Ergebnisse zeigen, dass die Herstellungsphase (A) und Nutzungsphase (B) die größten Quellen für Emissionen mit einem potenziellen Beitrag zum Versauerungspotential aufweist.

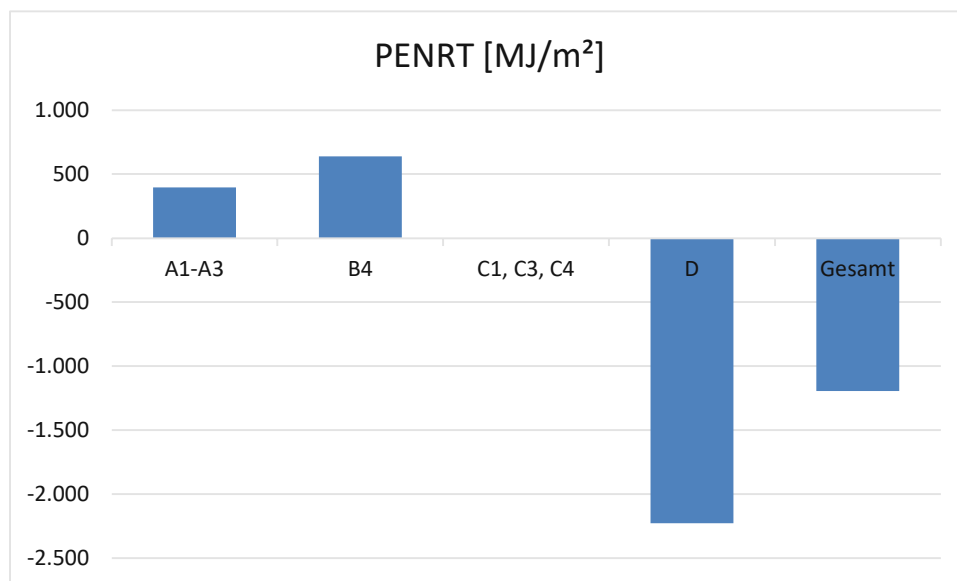


Abbildung 48: PENRT je m² Konstruktionsfläche (eigene Darstellung)

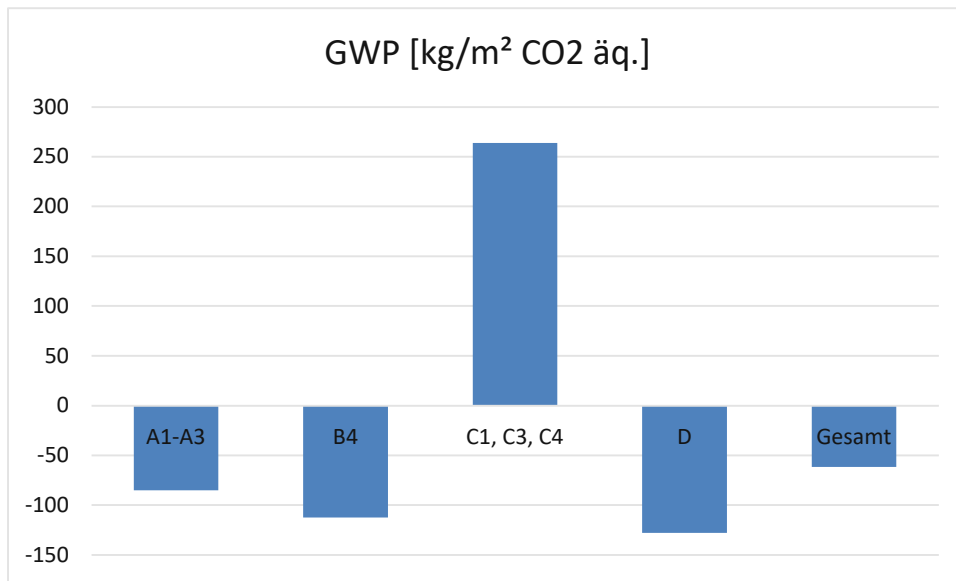


Abbildung 49: GWP je m² Konstruktionsfläche (eigene Darstellung)

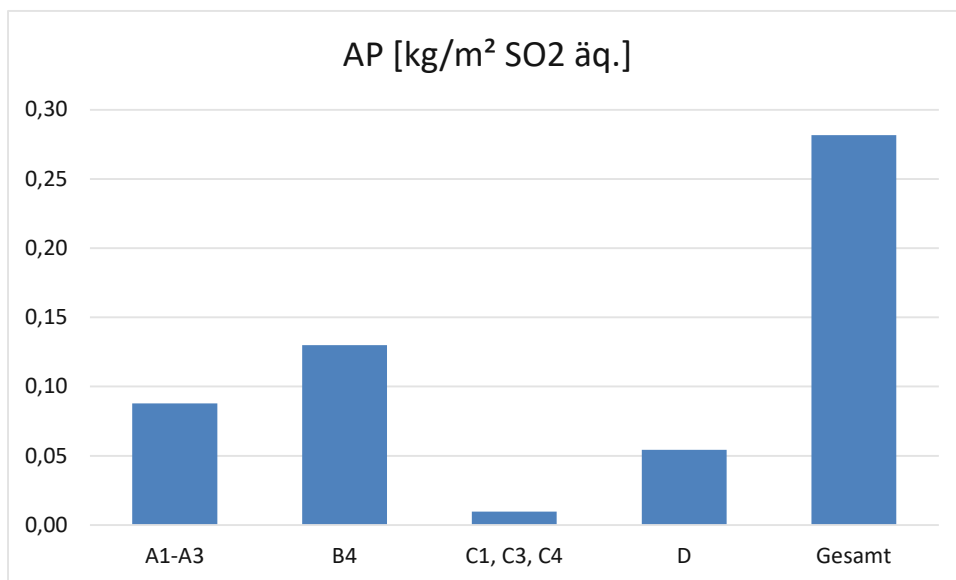


Abbildung 50: AP je m² Konstruktionsfläche (eigene Darstellung)

Zusammenfassend ergeben sich insgesamt geringe Umweltauswirkungen, wenn man die Umwelteinflüsse aller Lebenszyklusphasen summiert. Das Ergebnis des PENRT und des GWP führen zu Gutschriften für die Außenwand in Holzbauweise. Derzeit werden Umwelteinflüsse durch den EI10 nicht berücksichtigt. Die Berücksichtigung der Ökobilanzberechnung durch Abminderungsfaktoren, ähnlich wie bei den Koeffizienten für Aufwand und Wert, wäre möglich. Dabei führen negative Umwelteinflüsse zu Abminderungsfaktoren, welche das Ergebnis des EI10 verschlechtern. Da keine Datengrundlage für eine solche Bewertung vorliegt, wird hier eine Empfehlung für weiterführende Forschung gegeben.

7 Diskussion und Ausblick

7.1 Diskussion der Forschungsergebnisse

Zur besseren Übersicht werden im Folgenden die Forschungsfragen nochmals dargestellt:

- 1) „Welche Indikatoren sind, in Österreich gängigen Bewertungsmethoden, inkludiert?“
- 2) „Welche Indikatoren sind für eine Bewertung in der *End-of-Life* Phase von Baumaterialien relevant?“
- 3) „Wie könnte eine Implementierung nicht inkludierter Indikatoren aussehen?“

Die untersuchten Bewertungsmethoden in der *End-of-Life* Phase im Bauwesen lassen sich in verschiedene Kategorien einteilen. Zum einen gibt es Bewertungsmethoden, die sich mit der Wiederverwendung von Materialien und der Recyclingfähigkeit von Bauteilen beschäftigen, wie zum Beispiel der Urban Mining Index. Zum anderen gibt es spezifischere Methoden, wie die Demontagesequenzmodellierung, die sich auf die optimale Demontagereihenfolge von Bauteilen fokussiert. Die Ökobilanz ist eine allgemeine Methode, die die Umweltauswirkungen von Produkten über den gesamten Lebenszyklus bewertet. Sie kann auf Gebäude angewendet werden, um deren Nachhaltigkeit zu bewerten. Die Stärken und Schwächen dieser Bewertungsmethoden variieren je nach Kontext und Zielsetzung. Einige Methoden sind spezifischer und fokussieren auf bestimmte Aspekte, während andere allgemeiner sind und den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes bewerten. Die untersuchten Bewertungsmethoden werden in **Tabelle 6** übersichtlich dargestellt. In dieser Tabelle wird gezeigt, welche Indikatoren jeweils inkludiert sind.

Ziel der Beantwortung der zweiten Forschungsfrage war es, die Relevanz von Indikatoren für eine Bewertung der *End-of-Life* Phase zu ermitteln. Die im Zuge der Literaturrecherche ausgearbeiteten Indikatoren finden sich in **Abbildung 38**. Dazu wurden Interviews mit acht Expert:innen durchgeführt, welche unterschiedliche Einschätzungen und Betrachtungsweisen zu den jeweiligen Indikatoren ergeben haben. Generell wurde die Berücksichtigung von den vorgeschlagenen ökonomischen Indikatoren positiv aufgefasst. Wirtschaftliche Faktoren haben laut Aussagen der Expert:innen allgemein einen wesentlichen Einfluss auf die Bereitschaft ein Material zu recyceln. Eine Implementierung der ökonomischen Indikatoren wird als machbar eingeschätzt, jedoch wurde betont, dass ein Umdenken erforderlich ist und die Investor:innen in ganzheitlichen Systemen sensibilisiert werden müssen. Die Berücksichtigung des Rückbauaufwandes als physikalische Größe wurde Großteils kritisch diskutiert. Die Einschätzung der Expert:innen war, dass eine Implementierung nur schwierig machbar ist, da es keine ausreichende Datengrundlage dafür gibt.

Zum Thema *Bewertung der Materialverwertung* wurde der Ansatz prozentuelle Verwertungsanteile in die Bewertung aufzunehmen, von der Hälfte der Befragten als sinnvoll

erachtet. Für die Implementierung fehlt jedoch, laut Aussagen der Expert:innen, noch eine einheitliche Datengrundlage.

Keine einheitliche Antwort gab es auf die Frage, ob die Bezugsgröße in Volumen oder Masse sinnvoller ist. Ein größerer Anteil der Befragten war der Ansicht, dass die Berücksichtigung des Abfallvolumens für die Beurteilung relevant ist, da voluminöse Bauteile in der Entsorgung problematisch sein können und andernfalls unterschätzt werden könnten. Es wurde jedoch häufig angemerkt, dass in der Praxis für gewöhnlich Massen angeführt werden und dadurch diese als bestimmende Größe definiert wird. Eine differenzierte Betrachtung von Masse und Volumen wäre ein möglicher Ansatz. Allerdings wurde hervorgehoben, dass dies eine Frage des Aufwandes ist.

Die Berücksichtigung der Ökobilanz in der EoL wird als sinnvoll erachtet, da der Abbruch ein wesentlicher Punkt für das Ziel der Kreislaufwirtschaft ist. Es besteht ein Bedarf, die Ökobilanz mit der Bewertung der Kreislauffähigkeit zu verbinden, um den ökologischen Fußabdruck von Wiederverwertung, thermischer Verbrennung und Deponierung abzubilden. Die Umsetzung einer solchen Berücksichtigung wird von mehreren Expert:innen als schwierig eingeschätzt.

Zum Thema *Zukunftspotentiale von Gebäuderecycling* gab es unter den Interviewpartner:innen unterschiedliche Ansichten. Generell wird die Prognose von Entwicklungen und Technologien im Bereich des Recyclings als schwierig angesehen. Es wurde angesprochen, dass ein materieller Gebäudepass Vorteile für die Dokumentation der eingebauten Materialien bringt und für zukünftige (Neu-)Bewertungen besonders wichtig sein wird. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Bedeutung von Dokumentationen, wie Rücknahmeerklärungen der Hersteller, um die Zertifizierung von Gebäuden zu verbessern.

Zur Beantwortung der dritten Forschungsfrage wurde ein Fallbeispiel durchgeführt und dadurch eine mögliche Implementierung nicht inkludierter Indikatoren vorgezeigt. Das Fallbeispiel zeigt, wie eine Integrierung von unterschiedlichen Indikatoren beim EI10 aussehen könnte und wie diese das Ergebnis des EI10 beeinflussen.

Die Koeffizienten für den Arbeitsaufwand und den Materialwert beschreiben Faktoren, welche Einfluss auf die Rückbau- und Trennungseigenschaft eines Bauteils haben. Durch eine Multiplikation zwischen dem Ergebnis der Koeffizienten und dem EI10, konnte eine Implementierung vorgezeigt werden. Eine Datengrundlage wurde hierfür von Rosen (Rosen, 2021) erarbeitet, die derzeit jedoch nur den deutschen Markt abdeckt. Aus diesem Grund ist es notwendig, die Daten an den österreichischen Markt anzupassen, was weitere Forschung erfordert.

Die Bewertung der Verwertungsanteile, nach dem Beispiel des Urban Mining Index, bietet eine alternative Möglichkeit, die Verwertungswege einzelner Baustoffe transparent darzustellen und zu bewerten. Dabei werden EoL-Szenarien, die eine geschlossene Kreislaufführung ermöglichen, positiv bewertet. Alle anderen EoL-Szenarien tragen weniger oder gar nicht zum

Kreislaufpotential bei. Allgemein ergeben sich Unsicherheiten bei der Zuordnung von EoL-Szenarien. Diese kann im Einzelfall variieren und basiert auf marktübliche Verwertungsszenarien. In dieser Arbeit wurde die Annahmen zu den Szenarien auf Basis der Datengrundlage von Rosen (Rosen, 2021) getroffen. Im Gegensatz zum Urban Mining Index liegt der Fokus im vorliegenden Fallbeispiel auf den volumenbezogenen Verwertungsanteilen. Die Expert:inneninterviews ergaben, dass das Volumen eine relevante Größe darstellt. Eine alternative Möglichkeit wäre es, sowohl Volumen als auch Massen in die Bewertung einzubeziehen. Die kombinierte Betrachtung stellt einen interessanten Ansatz dar, der in zukünftigen Forschungsarbeiten näher untersucht werden könnte.

Die Ökobilanzberechnung hat die Umwelteinflüsse PENRT, GWP und AP des untersuchten Bewertungsobjektes ermittelt. Die für die Berechnung notwendigen Daten wurden aus EPDs der Produktherstellern entnommen. Eine interessante Erkenntnis ist, dass Unterschiede in den angenommenen EoL-Szenarien bestehen. Während EPDs beim Werkstoff Holz die thermische Verwertung wählen, wird bei der Bewertung der Verwertungswege, welche auf die Annahmen von Rosen (Rosen, 2021) basieren, die stoffliche Verwertung angenommen. Dies zeigt die Unsicherheiten, die bei der Zuordnung von EoL-Szenarien auftreten können. Eine umfassende Harmonisierung wäre daher erforderlich. Basierend auf den Ergebnissen der Ökobilanz, wurde ein Implementierungsvorschlag für die Berücksichtigung von Umwelteinflüssen in der EI10-Bewertung qualitativ beschrieben. Aufgrund fehlender Datengrundlage konnte jedoch keine Berechnung durchgeführt werden. Der Implementierungsvorschlag basiert auf derselben Bewertungssystematik, wie bei der Berücksichtigung der Koeffizienten für Arbeitsaufwand und Materialwert.

7.2 Ausblick zum Bewertungssystem EI10

Das österreichische Institut für Baubiologie und -ökologie (IBO) hat mit weiteren Projektpartner:innen für das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) den *Kriteriensteckbrief BNB 4.1.4 Rückbau, Trennung und Verwertung* methodisch und wissenschaftlich überarbeitet. Die dabei entwickelte neue Gebäudeevaluierungsmethode soll im Laufe des Jahres 2023 den Entsorgungsindikator 10 ablösen. Wenn im Folgenden das *neue* Bewertungssystem erwähnt wird, ist somit dieses neuentwickelte System vom IBO gemeint.

Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Forschungsarbeit wurde die neue Methode zur Beurteilung der Kreislauffähigkeit von Gebäuden noch nicht offiziell veröffentlicht. Trotzdem wurde beschlossen, das neue Bewertungssystem in dieser Arbeit zu diskutieren, um einen Einblick in die zukünftige Ausrichtung der Bewertung zu geben. Dieses System wird mit den aus dieser Forschungsarbeit entwickelten Vorschlägen für den Entsorgungsindikator verglichen und diskutiert. Die qualitative Beschreibung und Diskussion basiert auf vorläufigen Informationen,

bietet aber bereits einen wertvollen Einblick über mögliche Verbesserungen und zukünftige Entwicklungen der Bewertungssysteme für die Kreislauffähigkeit von Gebäuden.

7.2.1 Beschreibung der neuen Bewertungsmethode

Bei der vom IBO neu entwickelten Gebäudeevaluierungsmethodik erfolgt eine grundlegenden Neuausrichtung des Materialbewertungskonzepts. Im Gegensatz zum Entsorgungsindikator 10, basiert es auf dem Recyclingpotential von Materialien, die idealerweise sortenrein zurückgebaut werden können. Das Bewertungsschema besteht aus zehn Stufen von A+++ (ReUse-fähig) bis G (ungünstige Gefahrenstoffklasse). In der Klassifizierung der Materialien werden wirtschaftlich umsetzbare Aufbereitungstechniken und potenzielle Verwendungsmöglichkeiten als Sekundärrohstoff einbezogen. Das Punktesystem befindet sich zwischen +100 (A++) und -100 Punkten (F), wobei es Überpunktungen in positiver (A+++) und negativer (G) Richtung gibt. (Figl, Fellner, Nemeth, Schneider-Marin, & Klainsek, 2022)

Klassifizierung Verwertungseigenschaften von Baustoffen											
Klasse	A+++	A++	A+	A	B	C	D	E	F	G	
Kategorien	Produkt/ Element	RC-Material			Abfall			Gefährliche Abfälle			
	WW	Recycling			Verbrennung			Gefahrenstoffe			
	WW Wieder- verwendungs- fähige Bauprodukte / - elemente	CL (Closed Loop) Geschlossene Kreisläufe	RC+ Recycling mit geringem Aufbereitungs- aufwand	RC- Recycling mit Aufbereitungs- aufwand	EV+ Energetische Verwertung (potenziell RC- fähige Biomasse)	EV- Energetische Verwertung (Ersatz- brennstoff)	EB+ Energetische Beseitigung (Schadstoffgehalt begrenzt od. mittl. Energiedichte)	EB- Energetische Beseitigung (Schadstoffe oder niedrige Energiedichte)	Gef I (Gefahrstoff Kl. I)	Gef II (Gefahrstoff Kl. II)	Gef III (Gefahrstoff Kl. III)
					Sonstige Verwertung	Sonstige stoffl. Verwertung z.B. Verfüllungen	Deponierung	Dep- Deponier. ohne Aufbereitungs- aufwand	Dep- Deponierung mit Aufbereitungs- aufwand		
Punkte	140	100	80	60	20	-20	-60	-80	-100	-140	

Abbildung 51: End-of-Life Kategorien von Altbaustoffen und Gefahrenstoffen (Figl, Fellner, Nemeth, Schneider-Marin, & Klainsek, 2022)

Für die Kategorie A+++ (Wiederverwendung) wird ein rückbaufreundlicher Prozess, ohne oder mit minimaler Zerstörung der Materialien, vorausgesetzt. Gleichzeitig müssen die wiederverwendbaren Elemente (ReUse-Elemente) für den erneuten Einsatz geeignet sein, indem sie technische Anforderungen hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit erfüllen und eine spezifische Marknachfrage bedienen können. Niedrige Kosten für den Abbau, den Transport und die Lagerung erleichtern dabei die Wiederverwendung. (Figl, Fellner, Nemeth, Schneider-Marin, & Klainsek, 2022)

Die Kategorien A++, A+ und A repräsentieren Recyclingszenarien, die von Closed-Loop-Recycling bis hin zu Recycling mit erhöhtem Aufbereitungsaufwand reichen. In manchen Fällen handelt es sich um potenziell erneuerbare Biomasse, die derzeit überwiegend aus wirtschaftlichen Gründen vorwiegend thermisch verwertet wird. Die Verfügbarkeit von Technologien, ihre Marktreife und ihre Verbreitung bestimmen maßgeblich, ob und in welchem

Umfang Recyclingszenarien umgesetzt werden können. (Figl, Fellner, Nemeth, Schneider-Marin, & Klainsek, 2022)

Die Kategorien B bis D beschreiben konventionelle Verwertungs- oder Entsorgungswege, die im Wesentlichen ein geringes oder kein Kreislaufpotential aufweisen. In den Kategorien E bis G werden zusätzlich Materialien beschrieben, die mit gefährlichen Stoffen kontaminiert sind und daher eine besondere Behandlung erfordern. (Figl, Fellner, Nemeth, Schneider-Marin, & Klainsek, 2022)

Zunächst wird sortenreines Material klassifiziert, das jedoch aufgrund nicht oder nur schwer trennbarer Schichten im eingebauten Zustand erhebliche Beeinträchtigungen seiner Verwertungseigenschaften aufweisen kann. Es ist daher erforderlich, die Rückbaufähigkeit der Materialien, sowie ihre Anfälligkeit für störende Substanzen, im konkreten Materialverbund zu bewerten. Die Berücksichtigung der Rückbaufähigkeit erfolgt nach **Tabelle 23**. (Figl, Fellner, Nemeth, Schneider-Marin, & Klainsek, 2022)

Klasse	Beschreibung Rückbaufähigkeit (auf der Baustelle)	Bonuspunkte
A++	zerstörungsfrei rückbaubar	100
A+	weitgehend zerstörungsfrei rückbaubar	75
A	zerstörend, aber sortenrein rückbaubar	50
B-D	nicht sortenrein rückbaubar	0

Tabelle 23: Kategorien Rückbaufähigkeit (Figl, Fellner, Nemeth, Schneider-Marin, & Klainsek, 2022)

Materialien, die nicht sortenrein rückbaubar sind (Kategorie B-D im Rückbau), enthalten Verunreinigungen in Form von Stör- und Fremdstoffen, die weitere Aufbereitungsschritte für eine Verwertung erfordern. Die Auswirkungen dieser Stör- und Fremdstoffe auf den End-of-Life-Prozess des Hauptmaterials, können unterschiedlich schwerwiegend sein und werden in vier Störstoffkategorien klassifiziert (siehe **Tabelle 24**). Diese zusätzlichen Aufwände werden entsprechend der Punktabzüge der End-of-Life-Klassen in der gleichen Systematik berücksichtigt und spiegeln sich in der Bewertung des nicht sortenreinen Materials wider. (Figl, Fellner, Nemeth, Schneider-Marin, & Klainsek, 2022)

Störstoff-kategorie	Kurzbeschreibung Materialverträglichkeit	Punktabzüge
S1	Monomaterial kein Fremd-, Stör- oder Schadstoff	0 Punkte
S2	Fremdstoff, neutraler Störstoff od. unwesentl. Schadstoffgehalt in Aufbereitungsanlage abgetrennt oder gemeinsam mit Hauptstoff verwertet	0, - 5, -10 Punkte-Abzug abhängig vom EoL sortenreines Material
S3	Beeinträchtigender Stör- oder Schadstoff in Aufbereitungsanlage mit Zusatzaufwand abtrennbar, Beeinflussung der Verwertungsqualität bzw. der Entsorgungseigenschaften	-20 Punkte-Abzug
S4	Unverträglicher Störstoff kritischer Stör- oder Schadstoff, nicht (oder nicht unter wirtschaftlichen Bedingungen) abtrennbar in Aufbereitung, Verwertung nicht möglich oder nur unter sehr gravierenden Qualitätsverlusten. Neueinstufung erforderlich	Neueinstufung

Tabelle 24: Störstoffkategorien und Auswirkungen auf die End-of-Life-Bewertung (Figl, Fellner, Nemeth, Schneider-Marin, & Klainsek, 2022)

Abhängig von der Charakterisierung der Störstoffe, von keiner Beeinträchtigung bis hin zu unverträglichen Störstoffen, die eine wirtschaftliche Verwertung unmöglich machen, werden unterschiedliche Abzüge in der End-of-Life-Bewertung der Hauptstoffe vorgenommen. Eingebaute Verbundwerkstoffe, wie Kompositmaterialien, werden bereits im Voraus klassifiziert. Dieser Ansatz ermöglicht auch die Erfassung von Materialverlusten aufgrund von Stör- und Schadstoffen, die gemeinsam mit dem Hauptstoff verwertet werden. (Figl, Fellner, Nemeth, Schneider-Marin, & Klainsek, 2022)

In **Abbildung 52** wird das Ergebnis der Zuordnung in die einzelnen Kategorien eines Fallbeispiels auf Gebäudeebene dargestellt. Dabei werden die Ergebnisse volumen-/ und massenbezogen angeführt.

	End of Life Klassen													
	A+++	A++	A+	A+/A	A	A/B	B	B/C	C	C/D	D	E	F	G
Volumina in m ³	1,81	73,48	106,11	347,5	43,3	70,96	8,9	27,87	186,89	9,12	0	58,47	7,64	2,27
Volumina in %	0,2%	7,8%	11,2%	36,8%	4,6%	7,5%	0,9%	3,0%	19,8%	1,0%	0,0%	6,2%	0,8%	0,2%
Masse in kg	1.052	91.767	169.713	580.703	77.167	84.562	6.589	28.871	363.344	15.628	2.489	1.546	3.473	73
Masse in %	0,07%	6,43%	11,89%	40,69%	5,41%	5,93%	0,46%	2,02%	25,46%	1,10%	0,17%	0,11%	0,24%	0,01%

Abbildung 52: Indikator Kreislauffähigkeit auf Gebäudeebene nach Volumen und nach Masse (eigene Darstellung nach (Figl, Fellner, Nemeth, Schneider-Marin, & Klainsek, 2022))

7.2.2 Gegenüberstellung

Das neue Bewertungssystem (Figl, Fellner, Nemeth, Schneider-Marin, & Klainsek, 2022) soll im Vergleich zum vorgeschlagenem Bewertungssystem aus dieser Forschungsarbeit, das teilweise auf der Systematik des Urban Mining Index basiert (Rosen, 2021), gegenübergestellt werden. Das neue Bewertungssystem präsentiert ein adaptiertes Materialbewertungskonzept, welches die Anzahl der Verwertungskategorien auf zehn erweitert. Beide Bewertungsmethoden ermöglichen eine differenzierte Zuweisung der EoL-Szenarien und erlauben eine Bewertung in mehreren

Qualitätsstufen. Dennoch unterscheiden sich beide Systeme überwiegend in der Art der Zuweisung der Szenarien zu den jeweiligen Kategorien. Darüber hinaus stellt das neue System zusätzlich Kategorien für Gefahrenstoffe und Sub-Indikatoren für die Störstoffbeurteilung vor, welche im vorgeschlagenen System nicht vorhanden sind.

Während beim vorgeschlagenen System das Volumen in die Bewertung eingeht, betrachtet das neue System sowohl das anfallende Volumen als auch die Masse in getrennten Berechnungen. Wie die separat ermittelten Ergebnisse gewichtet und in einer Gesamtbewertung zusammengeführt werden sollen, ist zum jetzigen Zeitpunkt jedoch noch nicht ersichtlich. Da im Bauwesen Materialien mit hoher und niedriger Dichte vorhanden sind, hängt es vom Einzelfall ab, welche Betrachtungsweise maßgebend ist. Die Expert:inneninterviews haben gezeigt, dass die Bewertung des Volumens zwar wichtiger ist, jedoch die Berücksichtigung der Masse nicht ausgeschlossen werden kann. Eine gleichzeitige Berücksichtigung beider Bezugsgrößen, wie im neuen System angedacht, ist daher ein sinnvoller Ansatz.

Eine weitere Gemeinsamkeit beider Systeme besteht darin, dass der Arbeitsaufwand und ökonomische Faktoren in der Bewertung berücksichtigt werden. Während das vorgeschlagene Bewertungssystem diese durch separate Koeffizienten berücksichtigt, fließen diese im neuen System bereits in die Material-Klassifizierung ein.

Ein Unterschied zwischen den Systemen liegt in der Berücksichtigung von Zukunftspotentialen für die Recyclingfähigkeit. Das neue Bewertungssystem berücksichtigt Verwertungsverfahren, welche derzeit noch nicht flächendeckend angewendet werden, aber in Zukunft an Bedeutung gewinnen könnten. Die Berücksichtigung von Zukunftspotentialen wurde bei den Expert:inneninterviews kritisch diskutiert und daher im vorgeschlagenen System nicht aufgenommen.

Ein weiteres wichtiges Thema ist die Berücksichtigung der Ökobilanz in der EoL-Bewertung. Die Expert:inneninterviews ergaben, dass eine Berücksichtigung von Ökobilanzberechnung sinnvoll und wichtig für die Beurteilung der Kreislauffähigkeit von Materialien wäre. Im neuen System scheint die Ökobilanz in der EoL-Bewertung nicht berücksichtigt zu werden. Es könnte argumentiert werden, dass die Einstufung der Materialklassen die Umwelteinflüsse in die Bewertung einbezieht. Andererseits sollte jedoch berücksichtigt werden, dass hohe Recyclingraten nicht zwangsläufig mit niedrigen Umwelteinflüssen einhergehen müssen. Das vorgeschlagene Bewertungssystem beschreibt qualitativ einen Ansatz, wie eine solche Berücksichtigung mithilfe eines zusätzlichen Koeffizienten erfolgen könnte.

7.3 Zusammenfassung der Maßnahmen und Handlungsempfehlungen

Die Untersuchung hat verschiedene Indikatoren für die Implementierung der Bewertungsmethode EI10 hervorgebracht, die analysiert und diskutiert wurden. Die Expert:inneninterviews haben gezeigt, dass das größte Potentiale für Erweiterungen in der Implementierung von ökonomischen Größen, wie der Restwertbewertung und der Berücksichtigung einer Ökobilanz steckt. Jedoch gab es größere Zweifel bezüglich der Umsetzbarkeit, da eine ausreichende Datengrundlage bzw. Harmonisierung fehlt. Dies wurde auch im Fallbeispiel bestätigt, bei dem Unterschiede in den Annahmen zu den EoL-Szenarien aufgetreten sind. Es besteht daher ein Bedarf an weiterer Forschung, um eine harmonisierte Datengrundlage zu schaffen. Der Ausblick der neu entwickelten Bewertungsmethode des EI10 zeigt teilweise Überschneidungen mit den Ergebnissen dieser Forschungsarbeit. Unterschiede haben sich in der Berücksichtigung von Zukunftspotentialen und der Ökobilanzberechnung in der EoL-Phase ergeben, was als Grundlage für weitere Forschung dienen könnte.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Verbesserung der Recyclingfähigkeit im Bauwesen ein wichtiger Schritt zur Schonung von Ressourcen und damit zum Klimaschutz beiträgt. Durch *Design for Recycling*, Rückbaukonzepte, Bewertungssysteme, Forschung und Entwicklung, sowie Sensibilisierung, können wichtige Maßnahmen ergriffen werden, um die Recyclingfähigkeit von Bauwerken zu verbessern und eine nachhaltigere Bauweise zu fördern.

Die EU Taxonomie Verordnung zielt darauf ab, Investitionen in nachhaltige Technologien und Projekte zu fördern, um den Übergang zu einer kohlenstoffarmen und nachhaltigeren Wirtschaft zu unterstützen. Bewertungssysteme können hierbei helfen, indem sie eine strukturierte Methode zur Beurteilung von Nachhaltigkeitskriterien bieten und dazu beitragen, dass Investitionen nachhaltiger gestaltet werden. Durch die Einbeziehung von Bewertungssystemen in die Umsetzung der EU Taxonomie Verordnung, kann auch die Transparenz und Vergleichbarkeit von Projekten verbessert werden. Investor:innen können eine fundierte Entscheidung treffen und gezielt in Projekte investieren, die den Kriterien entsprechen und einen Beitrag zum Übergang zu einer kohlenstoffarmen und nachhaltigen Wirtschaft leisten.

Eine transparente Bewertung ermöglicht es Architekt:innen, Bauherr:innen und Nutzer:innen die Auswirkungen ihrer Entscheidungen auf die Umwelt besser zu verstehen und fundierte Entscheidungen zu treffen. Durch die Verwendung von Bewertungsmethoden können potenzielle Schwachstellen in der Planung identifiziert und optimiert werden, um die Nachhaltigkeit und die Recyclingfähigkeit des Gebäudes zu verbessern. Eine transparente Bewertung ist ein wichtiger Schritt in eine nachhaltigere Zukunft.

Literaturverzeichnis

- A. Hafner et al. (2020). Ressourcennutzung Gebäude: Entwicklung eines Nachweisverfahrens zur Bewertung der nachhaltigen Nutzung natürlicher Ressourcen in Bauwerken. Bochum: Ruhr-Universität Bochum.
- Akinade, O. O., Oyedele, L. O., Bilal, M., Ajayi, S. O., Owolabi, H. A., Alaka, H. A., & Bello, S. A. (2015). Waste minimisation through deconstruction: A BIM based Deconstructability Assessment Score (BIM-DAS). *Resources, Conservation and Recycling*(105), 167-176. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.10.018>
- baubook GmbH. (2023). Abgerufen am 11. 05 2023 von baubook - Reinschauen. Ökologisch bauen.: <https://www.baubook.info/>
- Bogner, A., Littig, B., & Menz, W. (2014). *Interviews mit Experten: eine praxisorientierte Einführung*. Wiesbaden: Springer Verlag. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-531-19416-5>
- BRE Global. (2021). *BREEAM International New Construction Version 6.0*. Watford: BRE Global.
- Bundeskanzleramt Österreich. (2020). *Aus Verantwortung für Österreich. Regierungsprogramm 2020–2024*. Wien: Bundeskanzleramt Österreich. Von Bundeskanzleramt: <https://www.bundeskanzleramt.gv.at/bundeskanzleramt/die-bundesregierung/regierungsdokumente.html> abgerufen
- Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. (2020). *klimaaktiv Kriterienkatalog für Wohnbauten Neubau und Sanierung 2020*. Wien: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie.
- Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. (2023). *Abfallvermeidungsprogramm 2023. Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2023 - Teil 3*. Wien: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie.
- Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. (2023). *Bundes-Abfallwirtschaftsplan 2023 - Teil 1*. Wien: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. (2015). *Steckbrief 4.1.4 Rückbau, Trennung und Verwertung*. Berlin: Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. Abgerufen am 05. 02 2023 von Bewertungskriterien für Bürogebäude: <https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/bewertungssystem/buerogebaeude/>
- Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. (2023). *Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen*. Abgerufen am 19. 04 2023 von Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen: <https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/bewertungssystem/>
- Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen. (2023). *BNB-Bewertungsmethodik*. Abgerufen am 19. 04 2023 von Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen: <https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/bewertungssystem/methodik-und-anwendung/>
- Bundesverband Baustoffe–Steine und Erden e.V. (Dezember 2018). Mineralische Bauabfälle Monitoring 2016 - Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2016. Berlin.
- Crowther, P. (2005). Design for disassembly - themes and principles. *Environment design guide*, 1-7.
- Delem, L., & Wastiels, L. (2019). The practical use of module D in a building case study: Assumptions, limitations and methodological issues. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing.
- Den, X., Porter, S., Collin, C., Hvid Horup Sorensen, L., Herbst, A., Rehfeldt, M., . . . Velten, E. (10. 06 2020). *The decarbonisation benefits of sectoral circular economy actions*. Ramboll. Abgerufen am 14. 12 2022 von <https://ramboll.com/media/environ/decarbonisation-benefits-of-sectoral-circular-economy-actions>

- Denis, F., Vandervaeren, C., & De Temmerman, N. (2018). Using Network Analysis and BIM to Quantify the Impact of Design for Disassembly. *Buildings*, 8(8), 113. doi:<https://doi.org/10.3390/buildings8080113>
- Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e.V. (2018). *TEC1.6 - Rückbau- und Recyclingfreundlichkeit*. Stuttgart: Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e.V.
- Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e.V. (2023). *Die Geschichte der DGNB – von 2007 bis heute*. Abgerufen am 19. 04 2023 von DGNB - Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen: <https://www.dgnb.de/de/>
- Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e.V. (2023). *Übersicht aller Kriterien für Gebäude Rückbau*. Abgerufen am 09. 01 2023 von DGNB - Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen: <https://www.dgnb-system.de/de/gebaeude/rueckbau/kriterien/>
- DGNB GmbH. (Dezember 2020). *Bauen für eine bessere Welt - Wie Gebäude einen Beitrag zu den globalen*. Stuttgart, Deutschland.
- Dieterle, M., & Viere, T. (2019). Die Integration von Fragestellungen der Circular Economy in die Ökobilanzierung. Anwendung der Life Cycle Gap Analyse mittels industriellem Fallbeispiel. In H. Biedermann, S. Vorbach, & W. Posch, *Industrial Life Cycle Management* (S. 99-110). Rainer Hampp Verlag. doi:<http://doi.org/10.978.395710/3451>
- Durán, C. R., Lemaitre, C., & Braune, A. (2019). *Circular Economy - Kreisläufe schließen, heißt zukunftsfähig sein*. Stuttgart: DGNB GmbH.
- Europäische Kommission. (2015). *Den Kreislauf schließen–Ein Aktionsplan der EU für die Kreislaufwirtschaft*. Brüssel: Europäische Kommission.
- Europäische Kommission. (2020). *Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft Für ein saubereres und wettbewerbsfähigeres Europa*. Brüssel: Europäische Kommission.
- Figl, H., Fellner, M., Nemeth, I., Schneider-Marin, P., & Klainsek, A. (2022). *Fortentwicklung und Evaluierung des BNB-Kriteriensteckbriefes 4.1.4 Rückbau, Trennung, Verwertung*. Deutschland: Forschungsprojekt im Rahmen von Zukunft Bau, im Auftrag des BBSR Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. Endbericht (unveröffentlicht, stand: 17.05.2023)
- Frank U. Vogdt et al. (2019). *Urban Mining - Leitfaden zur Vermeidung nicht recyclingfähiger Bauabfälle bei künftigen kommunalen Hochbauvorhaben*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Görgen, B., & Wendt, B. (2015). Nachhaltigkeit als Fortschritt denken: Grundrisse einer soziologisch fundierten Nachhaltigkeitsforschung. *Soziologie und Nachhaltigkeit*.
- Grabner, C.-A., & Lützkendorf, T. (2008). Bewertung und Zertifizierung der Nachhaltigkeit von Gebäuden. *Mauerwerk*, 12(2), 53-60. doi:10.1002/dama.200800364
- Grim, M., & Leutgöb, K. (2012). *Schritt für Schritt zum Nullenergiegebäude. Leitfaden energiebewusstes Bauen für Dienstleistungsgebäude in Wien*. Wien: Magistrat der Stadt Wien, MA 20.
- H. Figl et al.; (2019). A new Evaluation Method for the End-of-life Phase of Buildings. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*(225). doi:<https://doi.org/10.1088/1755-1315/225/1/012024>
- Hillebrandt, A., & Seggewies, J.-K. (2018). Recyclingpotenziale von Baustoffen. In A. Hillebrandt, P. Riegler-Floors, A. Rosen, & J.-K. Seggewies, *Atlas Recycling: Gebäude als Materialressource* (S. 58-101). München: Edition Detail.
- Hillebrandt, A., Riegler-Floors, P., Rosen, A., & Seggewies, J.-K. (2018). *Atlas Recycling: Gebäude als Materialressource*. München: Edition DETAIL.
- IBO GmbH. (11 2020). *Leitfaden zur Berechnung des Entsorgungsindikators EI Kon von Bauteilen und des Entsorgungsindikators EI10 auf Gebäudeebene*. Wien, Österreich.
- IBO GmbH. (2022). *Leitfaden zur Berechnung des Oekoindex OI3 für Bauteile und Gebäude*. Wien, Österreich.
- IG Lebenszyklus Bau. (10 2021). *Klimaneutralität und Kreislaufwirtschaft im Bauwesen*. Wien, Österreich.
- Institut Bauen und Umwelt e.V. (2023). *Veröffentlichte EPDs*. Abgerufen am 12. 05 2023 von Institut Bauen und Umwelt e.V.: <https://ibu-epd.com/veroeffentlichte-epds/>
- Kögler, L. (2014). Eine Analyse der Ökobilanzierung als Tool zur vergleichenden ökologischen Gebäudebewertung von Wohnhausanlagen im Neubau. Wien.

- Mayring, P. (2015). *Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken*. Beltz Verlag.
- Mötzl, H., & Fellner, M. (2011). Environmental and health related criteria for buildings. *Proceedings of the IBO Österreichisches Institut für Baubiologie und ökologie GmbH Austrian Institute for Healthy and Ecological Building, Final Report*(31).
- Mötzl, H., & Pladerer, C. (2010). *Assessment of Building and Construction - Disposal: Maßzahlen für die Entsorgungseigenschaften von Gebäuden und Konstruktionen für die Lebenszyklusbewertung*. Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie.
- Müller, F. (25. 10 2014). *Nachhaltigkeit - Drei-Säulen-Modell und Vorrangmodell*. (CC BY-SA 4.0) Abgerufen am 05. 02 2023 von Wikimedia Commons: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=36374337>
- Österreichische Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen. (2018). *TQB-Tool testen*. Abgerufen am 09. 01 2023 von ÖGNB - Österreichische Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen: https://www.oegnb.net/upload/file/%C3%96GNB_TQB_Wohngeb%C3%A4ude_Erkl%C3%A4rungen.pdf
- Publications Office of the European Union. (18. Juni 2020). *VERORDNUNG (EU) 2020/852 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 18. Juni 2020 über die Einrichtung eines Rahmens zur Erleichterung nachhaltiger Investitionen und zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/2088*. Brüssel: Publications Office of the European Union. Abgerufen am 10. 12 2022 von EUR-Lex: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2020/852/oj>
- Reinders, H. (2022). Methoden - Interview. In H. Reinders, D. Bergs-Winkels, A. Prochnow, I. Post, & I. Post (Hrsg.), *Empirische Bildungsforschung. Eine elementare Einführung* (S. 211-222). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-658-27277-7>
- Rosen, A. (2021). *Urban Mining Index. Entwicklung einer Systematik zur quantitativen Bewertung der Kreislaufkonsistenz von Baukonstruktionen in der Neubauplanung*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Sanchez, B., & Haas, C. (2018). A novel selective disassembly sequence planning method for adaptive reuse of buildings. *Journal of Cleaner Production*(183), 998-1010. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.201>
- Schanz, H. (03 2022). Alles richtig gemacht, nichts bewirkt-eine kurze Anleitung zum Nichtnachhaltigsein. *OrganisationsEntwicklung*, S. 31-37.
- Steger, S., Ritthoff, M., Bulach, W., Schüler, D., Kosińska, I., Degreif, S., . . . Oetjen-Dehne, R. (2018). *Stoffstromorientierte Ermittlung des Beitrags der Sekundärrohstoffwirtschaft zur Schonung von Primärrohstoffen und Steigerung der Ressourcenproduktivität*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- Trusty, W., & Horst, S. (2002). Integrating LCA Tools in Green Building Rating Systems. In *The Austin Papers: Best of the 2002 International Green Building Conference* (S. 53-57). Building Green, Inc. Abgerufen am 03. 10 2022 von <https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB2759.pdf>
- U.S. Green Building Council. (2022). *LEED v4.1 BUILDING DESIGN AND CONSTRUCTION*. Washington: U.S. Green Building Council.
- Van Gulck, L., Wastiels, L., & Steeman, M. (2022). How to evaluate circularity through an LCA study based on the standards EN 15804 and EN 15978. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1249-1266.
- Wittstock, B., Albrecht, S., Colodel, C., & Lindner, J. (2009). Gebäude aus Lebenszyklusperspektive – Ökobilanzen im Bauwesen. *Bauphysik*, 31(1), 9-17.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Österreichisches Gesamtabfallaufkommen in Tonnen von 1990 bis 2019 (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2023).....	15
Abbildung 2: Österreichische Zusammensetzung der Gesamtabfallmenge des Jahres 2019 (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2023).....	16
Abbildung 3: Abfallvermeidung in der Abfallhierarchie gemäß EU-Abfallrahmenrichtlinie (eigene Darstellung nach (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2023)).....	17
Abbildung 4: Diagramm des Forschungsablaufs - Forschungsdesign (eigene Darstellung).....	20
Abbildung 5: Die drei Säulen der Nachhaltigkeit – Vorrangmodell (Müller, 2014).....	23
Abbildung 6: Verwertung und Beseitigung von Abfällen im Jahr 2019 in Österreich mit Aushubmaterial (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2023).....	27
Abbildung 7: Verwertung und Beseitigung von Abfällen im Jahr 2019 in Österreich ohne Aushubmaterial (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2023).....	28
Abbildung 8: Pro-Kopf Abfallaufkommen in Österreich (Massen ohne Aushubmaterialien) im Vergleich mit Bruttoinlandsprodukt 1995-2020 (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2023).....	29
Abbildung 9: Schematische Darstellung der Kreislaufwirtschaft in der Baubranche (eigene Abbildung nach (Crowther, 2005)).....	30
Abbildung 10: Matrix der Entsorgungseinstufung für den EI10-Indikator (eigene Darstellung (IBO GmbH, 2020)).....	38
Abbildung 11: Stärken/Schwächen des EI10-Index (eigene Darstellung).....	40
Abbildung 12: Abstufungsschema (eigene Darstellung (H. Figl et al., 2019)).....	41
Abbildung 13: Potentialeinstufung (H. Figl et al., 2019).....	41
Abbildung 14: Stärken/Schwächen der Bewertungsmethode nach H. Figl (eigene Darstellung).....	42
Abbildung 15: Modellansatz nach A. Hafner (eigene Darstellung nach (A. Hafner et al, 2020)).	43
Abbildung 16: Klassifizierung der Lösbarkeit von Fügemethoden (eigene Darstellung nach (A. Hafner et al, 2020)).....	44
Abbildung 17: Schnitt Außenwand - links: Holzmassiv; rechts: Stb. Mit WDVS (A. Hafner et al, 2020).....	44
Abbildung 18: Fügematrix - links: Holzmassiv; rechts: Stb. Mit WDVS (A. Hafner et al, 2020) ..	44
Abbildung 19: Massenverhältnis des Bauteils und der Baustoffe hinsichtlich der Recyclingfähigkeit - links: Holzmassiv; rechts: Stb. Mit WDVS (A. Hafner et al, 2020).....	45
Abbildung 20: Stärken/Schwächen der Bewertungsmethode nach A. Hafner (eigene Darstellung).....	46
Abbildung 21: Stärken/Schwächen der Bewertungsmethode nach F. Vogdt (eigene Darstellung).....	47
Abbildung 22: Stärken/Schwächen der BNB-Methode (eigene Darstellung).....	48
Abbildung 23: Stärken/Schwächen der DGNB – TEC 1.6 Methode (eigene Darstellung).....	49
Abbildung 24: Stärken/Schwächen der BIM-DAS Methode (eigene Darstellung).....	50
Abbildung 25: Systematik des Urban Mining Index (Rosen, 2021).....	52
Abbildung 26: Schematische Darstellung der Ergebnisse auf Bauteilebene (Rosen, 2021).....	53
Abbildung 27: Stärken/Schwächen Urban Mining Index (eigene Darstellung).....	53
Abbildung 28: Information zum Lebenszyklus eines Gebäudes (IBO GmbH, 2022).....	54
Abbildung 29: LCGA-Diagramm (eigene Darstellung nach (Dieterle & Viere, 2019)).....	56
Abbildung 30: Stärken/Schwächen der quantitativen Ökobilanzmethode (eigene Darstellung).....	57
Abbildung 31: Modellbeispiel eines Rahmentragwerkes (Sanchez & Haas, 2018).....	59

Abbildung 32: Demontagesequenzplan für das Element C7 (Sanchez & Haas, 2018).....	60
Abbildung 33: Stärken/Schwächen der Bewertungsmethode nach Sanchez und Haas (eigene Darstellung).....	60
Abbildung 34: Beispiel Außenfassade (Denis, Vandervaeren, & De Temmerman, 2018).....	62
Abbildung 35: Netzwerkvisualisierung der Außenfassade (Denis, Vandervaeren, & De Temmerman, 2018).....	63
Abbildung 36: Stärken/Schwächen der DNA-Methode (eigene Darstellung).....	65
Abbildung 37: EI10-LCGA-Matrix (eigene Darstellung).....	73
Abbildung 38: Überblick der Implementierungsvorschläge für den EI10 (eigene Darstellung).75	
Abbildung 39: Ergebnisse der Befragung (eigene Darstellung).....	84
Abbildung 40: Schichtenaufbau der Außenwand in Holzbauweise (baubook GmbH, 2023).....	90
Abbildung 41: Außenwand in Holzbauweise – Anteil nach Volumen (eigene Darstellung).....	91
Abbildung 42: Ermittlung des Faktors f_v für den Materialrestwert (eigene Darstellung nach (Rosen, 2021)).....	93
Abbildung 43: Ermittlung des Faktors f_w für den Rückbau- / Trennungsaufwand (eigene Darstellung nach (Rosen, 2021)).....	94
Abbildung 44: Erlös/Kosten Außenwand in Holzbauweise (eigene Darstellung).....	98
Abbildung 45: Bewertungsergebnisse Materialrestwert (eigene Darstellung).....	98
Abbildung 46: Bewertungsergebnisse Rückbau-/ Trennungsaufwand (eigene Darstellung).....	99
Abbildung 47: Bewertungsergebnisse Verwertungsanteil (eigene Darstellung).....	101
Abbildung 48: PENRT je m^2 Konstruktionsfläche (eigene Darstellung).....	102
Abbildung 49: GWP je m^2 Konstruktionsfläche (eigene Darstellung).....	103
Abbildung 50: AP je m^2 Konstruktionsfläche (eigene Darstellung).....	103
Abbildung 51: End-of-Life Kategorien von Altbaustoffen und Gefahrenstoffen (Figl, Fellner, Nemeth, Schneider-Marin, & Klainsek, 2022).....	108
Abbildung 52: Indikator Kreislauffähigkeit auf Gebäudeebene nach Volumen und nach Masse (eigene Darstellung nach (Figl, Fellner, Nemeth, Schneider-Marin, & Klainsek, 2022)).....	110

Formelverzeichnis

Formel 1: Berechnung des Entsorgungsindikators einer Konstruktion (IBO GmbH, 2020).....	39
Formel 2: Berechnung des EI-10 auf Gebäudeebene (IBO GmbH, 2020).....	40
Formel 3: Endgültiger Index für die Wiederverwertbarkeit (H. Figl et al, 2019).....	42
Formel 4: Recyclingeffizienz R (Frank U. Vogdt et al, 2019).....	46
Formel 5: Massenbezogener Anteil $f_{m,i}$ und volumenbezogener Anteil $f_{v,i}$ (Frank U. Vogdt et al, 2019).....	46
Formel 6: massenbezogene bzw. volumenbezogene Recyclingeffizienz (Frank U. Vogdt et al, 2019).....	47
Formel 7: Recyclingfaktor R der BNB-Bewertungsmethode (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2015).....	47
Formel 8: Berechnung der nicht wiederverwendbaren Masse E_w (Akinade, et al, 2015).....	49
Formel 9: Gleichung eines vollständig rückbaubaren und wiederverwendbaren Gebäudes (Akinade, et al, 2015).....	50
Formel 10: Formel für den DAS-Score (Akinade, et al, 2015).....	50
Formel 11: rcsd wiederverwertbare Stoffe im EoL-Szenario selektiver Rückbau (Rosen, 2021).....	52
Formel 12: Geometrische Randbedingungen für das Gebäudemodell aus Abbildung 31 in den Richtungen +x, -x, +y und -y (Sanchez & Haas, 2018).....	58
Formel 13: ökologische Eigenschaften (GWP, PED) eines jeden Elementes für das Gebäudemodell aus Abbildung 31 (Sanchez & Haas, 2018).....	58
Formel 14: ökonomische Eigenschaften (Kosten) eines jeden Elementes für das Gebäudemodell aus Abbildung 31 (Sanchez & Haas, 2018).....	59
Formel 15: Ermittlung der Transportierbarkeit von Elementen (Denis, Vandervaeren, & De Temmerman, 2018).....	64
Formel 16: Aggregation von qualitativer und quantitativer Bewertung (eigene Darstellung)....	73
Formel 17: Berechnung des EI10 unter Berücksichtigung eines Abminderungsfaktors für die Ökobilanz (eigene Darstellung).....	73
Formel 18: Berechnung des adaptierten EI_{KON} mittels Koeffizienten für den Materialrestwert (eigene Darstellung).....	94
Formel 19: Berechnung des adaptierten EI_{KON} mittels Koeffizienten für den Arbeitsaufwand (eigene Darstellung).....	94
Formel 20: Berechnung des <i>Closed-Loop-Potential</i> (Rosen, 2021).....	95
Formel 21: Berechnung des <i>Loop-Potentials</i> (Rosen, 2021).....	96
Formel 22: Berechnung des Kreislaufpotential (eigene Darstellung nach (Rosen, 2021)).....	96

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der Bewertungsmethoden für die EoL-Phase (eigene Darstellung)	37
Tabelle 2: Verwertungspotential für den EI10-Indikator (IBO GmbH, 2020)	39
Tabelle 3: Eingangswerte der Elemente für die Außenfassade (Denis, Vandervaeren, & De Temmerman, 2018)	63
Tabelle 4: Eingangswerte der Verbindungen für die Außenfassade (Denis, Vandervaeren, & De Temmerman, 2018)	63
Tabelle 5: Ermittlung der Rückgewinnbaren Elemente (Denis, Vandervaeren, & De Temmerman, 2018)	64
Tabelle 6: Übersicht der Bewertungsmethoden und Indikatoren für die EoL-Phase (eigene Darstellung)	67
Tabelle 7: Indikator Rückbau und Trennbarkeit (eigene Darstellung)	69
Tabelle 8: Indikator Verwertungseinstufung (eigene Darstellung)	71
Tabelle 9: Übersicht der Interviewpartner:innen (eigene Darstellung)	76
Tabelle 10: Experteninterview P1 (eigene Darstellung)	78
Tabelle 11: Experteninterview P2 (eigene Darstellung)	79
Tabelle 12: Experteninterview P3 (eigene Darstellung)	80
Tabelle 13: Experteninterview P4 (eigene Darstellung)	80
Tabelle 14: Experteninterview P5 (eigene Darstellung)	81
Tabelle 15: Experteninterview P6 (eigene Darstellung)	82
Tabelle 16: Experteninterview P7 (eigene Darstellung)	83
Tabelle 17: Experteninterview P8 (eigene Darstellung)	83
Tabelle 18: Schichtenaufbau der Außenwand in Holzbauweise (eigene Darstellung) *angepasste Nutzungsdauer	90
Tabelle 19: Nutzungsdauer, Entsorgungseinstufung und Verwertungspotential der Außenwand in Holzbauweise (eigene Darstellung) *angepasste Nutzungsdauer	92
Tabelle 20: Erläuterung der Verwertungswege (eigene Darstellung nach (Rosen, 2021))	95
Tabelle 21: EoL-Szenarien Außenwand in Holzbauweise (eigene Darstellung)	100
Tabelle 22: Bewertungsergebnisse Verwertungsanteil (eigene Darstellung)	101
Tabelle 23: Kategorien Rückbaufähigkeit (Figl, Fellner, Nemeth, Schneider-Marín, & Klainsek, 2022)	109
Tabelle 24: Störstoffkategorien und Auswirkungen auf die End-of-Life-Bewertung (Figl, Fellner, Nemeth, Schneider-Marín, & Klainsek, 2022)	110

Anhang 1

Leitfadenkonstruktion

Einstiegsfragen:

- Werdegang und Tätigkeit im Unternehmen?
- Welche Erfahrung haben sie mit dem Einsatz von Zertifizierungssystemen (ÖGNB, DGNB, etc.)?
- Welche Gebäudelebensphasen (Errichtung, Nutzung, Rückbau) haben Sie mit der Zertifizierung untersucht und einer Bewertung unterzogen?
 - Inwieweit wurde die EoL Phase dabei berücksichtigt?

Rückbau und Trennung:

- Was hat Ihrer Meinung nach große Auswirkungen auf die Rückbau- bzw. Trennfähigkeit einer Konstruktion?
 - Welche messbaren Größen werden verwendet, um diese Fähigkeit zu quantifizieren?
- Hatten Sie Erfahrung mit der Bewertung der Rückbau und Trennungseigenschaft von Gebäuden (beispielsweise über den EI10?)?
- Es gibt Bewertungssysteme, welche den Rückbau-/Trennungsaufwand anhand einer Skala (von gut bis schlecht) bewerten. Kann eine solche Bewertung den Rückbauprozess ausreichend gut abbilden? (Eventuell Beispiele zeigen?) (WDVS schlecht, Schrauben gut)
- Es gibt Bewertungssysteme, welche verstärkt ökonomische Indikatoren für die Bestimmung der Rückbaufähigkeit verwenden. Sehen Sie die Implementierung von ökonomischen Indikatoren, wie zum Beispiel Aufwand oder Materialwert, für die Rückbau und Trennung als vorteilhaft?
- Sehen Sie die Implementierung von ökonomischen Indikatoren, wie Aufwand oder Materialwert, für die Rückbau und Trennung als machbar, vielleicht machbar oder nicht machbar?

Verwertung:

- Welche Bewertungssystematik haben Sie in vergangenen Projekten für die Beurteilung der Verwertungseigenschaft verwendet?

- Wie wird der Verwertungsweg eines Materials bestimmt?
- Welcher Indikator ist besonders relevant für die Beurteilung der Verwertungswege?
- Was hat die größte Auswirkung darauf, welche Verwertung auftritt?
- Ein Bewertungsansatz ist es, bestimmten Verwertungswegen eine *Note* zu vergeben und anschließend das anfallende Volumen (oder Masse) damit zu gewichten (z.B. EI10). Wie würden Sie diese Art der Bewertung einschätzen?
 - Welche Bedeutung würden Sie den Ergebnissen des EI10 in der Verwertungseinstufung geben? Der Verwertungsweg *Recycling* wird in der Regel positiv bewertet. Der Verwertungsweg *Deponieren* kann beim EI10 auch zu einer *guten* Beurteilung führen.
 - Wie stehen die Ergebnisse des EI10 bei der Beurteilung der Verwertungseigenschaft in Relation zur Praxis?
- Ein weiterer Beurteilungsansatz ist es, statt gewichtete Volumen sich auf Verwertungsanteile zu fokussieren. Sehen Sie die Implementierung von solch einem Ansatz als vorteilhaft? (%verwertet, %verbrannt, %Deponie)
- Sehen Sie die Implementierung von solch einem Ansatz, für die Bewertung der Verwertungswege, als machbar, vielleicht machbar oder nicht machbar?

Massen/Volumenbezogener Ansatz:

- Mit welchem Ansatz (Masse oder Volumen) haben Sie mehr Erfahrung in der Vergangenheit gehabt und warum?
- Welcher Ansatz ist für die Praxis relevanter?
 - Ist das Volumen oder die Masse ausschlaggebender?
- Sehen Sie eine gleichzeitige Berücksichtigung von beiden Ansätzen als vorteilhaft?
 - Wenn Ja, warum vorteilhaft?
 - Wenn Nein, warum nicht und welcher Ansatz wäre vorteilhafter (Masse oder Volumen)?
- Sehen Sie eine gleichzeitige Berücksichtigung von beiden Ansätzen als machbar, vielleicht machbar oder nicht machbar?

Ökobilanzierung:

- Haben Sie in früheren Projekten Erfahrungen zur Ökobilanzierung in der EoL Phase gemacht?
 - Inwiefern wurde die Rückbau-/Abbruchphase durch die Ökobilanzrechnung berücksichtigt?

- Wie schätzen Sie den Aufwand ein, eine Ökobilanzrechnung in der EoL durchzuführen?
- Welche Prozesse im Rückbau/Abbruch würden sich durch eine vermehrte Berücksichtigung von z.B. CO₂ Auswirkungen maßgeblich ändern?
- Sehen Sie die Implementierung von Ökobilanzindikatoren in der EoL als vorteilhaft?
- Sehen Sie die Implementierung von Ökobilanzindikatoren in der EoL als machbar, vielleicht machbar oder nicht machbar?

Prognosen von Recyclingpotentialen:

- Haben Sie ein Bewertungssystem verwendet, welches auf Prognosen zurückgreift?
- Wie schätzen Sie die Relevanz eines solchen Ansatzes ein?
- Ab wann können Rückbau- und Trennungsaufwände eines Gebäudes bestimmt werden? Ist eine Einschätzung bereits in der Vorerrichtungsphase möglich?
- Kann man schon vor der Errichtung eines Gebäudes genau abschätzen, welcher Verwertungsweg beim Rückbau stattfinden wird?
 - Von welchen Faktoren hängt das ab und kann man diese für die Zukunft abschätzen?

Anhang 2

Berechnungsblätter in Excel

Berechnung EI10 (eigene Darstellung)

Nr	Schicht (von innen nach außen)	Schichtbezeichnung lt Baubook	Dichte [kg/m ³]	d [cm]	Nutzungsdauer / Jahre	ΔOI3		Verwertungspotenzial [%]	EI10 Bewertung			
						[Pkt/m ²]	Entsorgungseinstufung		Verwertungspotenzial	EIKON (EoL)	EIKON (a)	EIKON
1	Gipskartonplatte 12,5 mm, doppelt beplankt inkl. Putz	Gipskartonplatte (700 kg/m ³)	700	2,5	35	8	4	3	75%	0,075	0,13928571	0,21428571
2	Lattung als Installationsebene 40/60 mm, Fichte, unbehandelt, verschraubt	<i>Inhomogen (Elemente horizontal)</i>		4								
		56,5 cm (90%) Luftschicht stehend, Wärmefluss nach oben 36 < d <= 40 mm		4		0	0	0				
3	Konterlattung 24/60 mm, Fichte, unbehandelt, verschraubt	<i>Inhomogen (Elemente vertikal)</i>		2,4								
		56,5 cm (90%) Luftschicht stehend, Wärmefluss nach oben 21 < d <= 25 mm		2,4		0	0	0				
4	Holzfaserplatte 8 mm, sd: 1,48 m, luftdichte Verklebung der Stöße, verschraubt	6 cm (10%) Nutzholz (475 kg/m ³ - zB Fichte/Tanne) - rauh, technisch getrocknet	475	4	50	0	1	1	25%	0,001	0,001	0,002
		Holzfasersplatte (250 kg/m ³)	250	0,8	50	8	1	1	25%	0,002	0,002	0,004
5	Holzrahmen KVH 80/160 mm, Fichte, unbehandelt; dazwischen Gefachdämmung 160 mm, Zellulosefasern aus Altpapier, λ: 0,04 W/mK, eingeblasen	<i>Inhomogen (Elemente vertikal)</i>		16								
		54,5 cm (87%) Zellulose-Einblasdämmung vertikal (54 kg/m ³)	54	16	50	10	3	3	75%	0,3132	0,3132	0,6264
6	Holzfaserplatte 5 mm, 97% Holzanteil, sd: 0,06 m, verschraubt	8 cm (13%) Nutzholz (475 kg/m ³ - zB Fichte/Tanne) - rauh, technisch getrocknet	475	16	100	0	1	1	25%	0,0052	0	0,0052
		Holzfasersplatte (250 kg/m ³)	250	0,5	50	5	1	1	25%	0,00125	0,00125	0,0025
7	Konstruktionsholz 60/60 mm, Fichte, unbehandelt, verschraubt; dazwischen Dämmung 60 mm, Zellulosefasern aus Altpapier, λ: 0,04 W/mK, eingeblasen	<i>Inhomogen (Elemente vertikal)</i>		6								
		56,5 cm (90%) Zellulose-Einblasdämmung vertikal (54 kg/m ³)	54	6	50	4	3	3	75%	0,1215	0,1215	0,243
7	Konstruktionsholz 60/60 mm, Fichte, unbehandelt, verschraubt; dazwischen Dämmung 60 mm, Zellulosefasern aus Altpapier, λ: 0,04 W/mK, eingeblasen	6 cm (10%) Nutzholz (475 kg/m ³ - zB Fichte/Tanne) - rauh, technisch getrocknet	475	6	50	0	1	1	25%	0,0015	0,0015	0,003

8	MDF-Platte 15mm. Diffusionsoffen mit Nut und Feder, sd: 0,165m, verschraubt	MDF-Platten mitteldichte Faserplatte (400 kg/m³)	400	1,5	35	7	3	3	75%	0,03375	0,06267857	0,09642857
9	Konterlattung 40/60 mm, Fichte, unbehandelt, verschraubt	<i>Inhomogen (Elemente vertikal)</i> 56,5 cm (90%) Luftschicht stehend, Wärmefluss nach oben 36 < d <= 40 mm 6 cm (10%) Nutzholz (475 kg/m³ - zB Fichte/Tanne) - rau, technisch getrocknet		4		0	0	0				
			475	4	35	0	1	1	25%	0,001	0,00185714	0,00285714
10	Lattung 40/60 mm, Fichte, unbehandelt, verschraubt	<i>Inhomogen (Elemente horizontal)</i> 56,5 cm (50%) Luftschicht stehend, Wärmefluss nach oben 36 < d <= 40 mm 6 cm (50%) Nutzholz (475 kg/m³ - zB Fichte/Tanne) - rau, technisch getrocknet		4		0	0	0				
			475	4	35	0	1	1	25%	0,005	0,00928571	0,01428571
11	Holzschindeln 20mm, zweilagig, Lärche gespalten, unbehandelt, vernagelt	Nutzholz (475 kg/m³ - zB Fichte/Tanne) - rau, technisch getrocknet	475	2	35	2	1	1	25%	0,005	0,00928571	0,01428571
Bauteil				43,7						0,566	0,66344286	1,2294429

BGF:	1
EI10	12,29

Berechnung Koeffizient Wert (eigene Darstellung)

Abfallschlüssel	[€/to brutto]	[€/m ²]	Parameter Wert		EIKON (alt)	EIKON (Wert)	Delta
			Faktor fv	Faktor fv EI10			
170802	-102	-5,355	0,7	1,3	0,21428571	0,27857143	30%
170201	-52	-0,1976	0,8	1,2	0,002	0,0024	20%
170201 A1	-52	-0,11856	0,8	1,2	0,0012	0,00144	20%
170201 A2	-61	-0,244	0,7	1,3	0,004	0,0052	30%
-	-54	-0,8118144	0,7	1,3	0,6264	0,81432	30%
170201 A1	-52	-0,51376	0,8	1,2	0,0052	0,00624	20%
170201 A2	-61	-0,1525	0,7	1,3	0,0025	0,00325	30%
-	-54	-0,314928	0,7	1,3	0,243	0,3159	30%
170201 A1	-52	-0,2964	0,8	1,2	0,003	0,0036	20%
170201 A2	-61	-1,098	0,7	1,3	0,09642857	0,12535714	30%
170201 A1	-52	-0,2964	0,8	1,2	0,00285714	0,00342857	20%
170201 A1	-52	-1,482	0,8	1,2	0,01428571	0,01714286	20%
170201 A1	-52	-1,482	0,8	1,2	0,01428571	0,01714286	20%

BGF:	1
EI10_Materialwert	15,94
Delta	30%

Berechnung Koeffizient Aufwand (eigene Darstellung)

Bauteilgruppe nach DIN 276	Bauteil-Nr.	Parameter Aufwand			EIKON (alt)	EIKON (Aufwand)	Delta
		Arbeit [MJ/m ²]	Faktor fw	Faktor fw EI10			
		Annahme ->	0,9	1,1	0,21428571	0,23571429	10%
C	335.01	0,025	0,9	1,1	0,002	0,0022	10%
C	335.01	0,025	0,9	1,1	0,0012	0,00132	10%
C	336.01	0,054	0,8	1,2	0,004	0,0048	20%
A	331.07	Annahme -> 0,15	1 1	1 1	0,6264 0,0052	0,6264 0,0052	0% 0%
C	336.01	0,054	0,8	1,2	0,0025	0,003	20%
C	335.01	Annahme -> 0,025	1 0,9	1 1,1	0,243 0,003	0,243 0,0033	0% 10%
C	336.02	0,023	0,9	1,1	0,09642857	0,10607143	10%
C	335.01	0,025	0,9	1,1	0,00285714	0,00314286	10%
C	335.01	0,025	0,9	1,1	0,01428571	0,01571429	10%
C	335.01	0,025	0,9	1,1	0,01428571	0,01571429	10%
BGF:		1					
EI10_Arbeitsaufwand		12,66					
Delta		3%					

Berechnung Verwertungsanteil (Blatt 1, eigene Darstellung)

Berechnung Verwertungsanteil					sd								ud								
Volumen [m³/m²]	Volumen (a) [m³/m²]	Volumen Gesamt [m³/m²]	EoL- Szenario selektiver Rückbau	EoL- Szenario selektiver Abbruch	ru [m³/m²]	rc [m³/m²]	dc_cr [m³/m²]	en_cr [m³/m²]	dc [m³/m²]	en_r [m³/m²]	en_f [m³/m²]	d [m³/m²]	ru [m³/m²]	rc [m³/m²]	dc_cr [m³/m²]	en_cr [m³/m²]	dc [m³/m²]	en_r [m³/m²]	en_f [m³/m²]	d [m³/m²]	
0,025	0,05	0,075	rc	d	0	0,04725	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,02775
0,004	0,004	0,008	dc_cr	en_cr	0	0	0,00576	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00224	0	0	0	0	0
0,0024	0,0024	0,0048	dc_cr	en_cr	0	0	0,00346	0	0	0	0	0	0	0	0	0,001344	0	0	0	0	0
0,008	0,008	0,016	dc_cr	en_cr	0	0	0,00896	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00704	0	0	0	0	0
0,1392	0,1392	0,2784	rc	en_r	0	0,19488	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,08352	0	0	0
0,0208	0	0,0208	dc_cr	en_cr	0	0	0,01664	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00416	0	0	0	0	0
0,005	0,005	0,01	dc_cr	en_cr	0	0	0,0056	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0044	0	0	0	0	0
0,054	0,054	0,108	rc	en_r	0	0,0756	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0324	0	0	0
0,006	0,006	0,012	dc_cr	en_cr	0	0	0,00864	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00336	0	0	0	0	0
0,015	0,03	0,045	dc_cr	en_cr	0	0	0,02835	0	0	0	0	0	0	0	0	0,01665	0	0	0	0	0
0,004	0,008	0,012	dc_cr	en_cr	0	0	0,00864	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00336	0	0	0	0	0
0,02	0,04	0,06	dc_cr	en_cr	0	0	0,0432	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0168	0	0	0	0	0
0,02	0,04	0,06	en_cr	en_cr	0	0	0	0,0432	0	0	0	0	0	0	0	0,0168	0	0	0	0	0

Berechnung Verwertungsanteil (Blatt 2, eigene Darstellung)

		Berechnung Verwertungsanteil													
Volumen [m³/m²]	Volumen (a) [m³/m²]	Volumen Gesamt [m³/m²]	EoL-Szenario selektiver Rückbau	EoL-Szenario selektiver Abbruch	Summe	ru %	rc %	dc_cr %	en_cr %	dc %	en_r %	en_f %	d %		
0,025	0,05	0,075	rc	d	0,075	0%	63%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	37%	100%
0,004	0,004	0,008	dc_cr	en_cr	0,008	0%	0%	72%	28%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
0,0024	0,0024	0,0048	dc_cr	en_cr	0,0048	0%	0%	72%	28%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
0,008	0,008	0,016	dc_cr	en_cr	0,016	0%	0%	56%	44%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
0,1392	0,1392	0,2784	rc	en_r	0,2784	0%	70%	0%	0%	0%	30%	0%	0%	0%	100%
0,0208	0	0,0208	dc_cr	en_cr	0,0208	0%	0%	80%	20%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
0,005	0,005	0,01	dc_cr	en_cr	0,01	0%	0%	56%	44%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
0,054	0,054	0,108	rc	en_r	0,108	0%	70%	0%	0%	0%	30%	0%	0%	0%	100%
0,006	0,006	0,012	dc_cr	en_cr	0,012	0%	0%	72%	28%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
0,015	0,03	0,045	dc_cr	en_cr	0,045	0%	0%	63%	37%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
0,004	0,008	0,012	dc_cr	en_cr	0,012	0%	0%	72%	28%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
0,02	0,04	0,06	dc_cr	en_cr	0,06	0%	0%	72%	28%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
0,02	0,04	0,06	en_cr	en_cr	0,06	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
CLP		ru			0%										
		rc			45%										
		dc_cr			18%										
		en_cr			17%										
LP		dc			0%										
		en_r			16%										
		en_f			0%										
		d			4%										
		CLP + 0,5* LP =													
		Kreislaufpotential			88%										

Öko-Materialdaten (Quelle: EPDs, eigene Darstellung)

Material	Dichte [kg/m ³] oder maßgebender Fluss	Indikator	Herstellung A1-A3	Abbruch C1	Abfallbehandlung C3	Beseitigung C4	Recyclingpotential D	Summe Gesamt	Summe A1-A3	Summe C1-C4	Summe D
Zellulosedämmung	45	PEI [MJ/m ³]	3,72	0,0498	0,401	MND	-7,92	-3,7492	3,72	0,4508	-7,92
		GWP[kg CO ₂ /m ³]	-1,23	0,000562	1,45	MND	-0,447	-0,226438	-1,23	1,450562	-0,447
		AP [kg SO ₂ /m ³]	0,00108	0,0000030	8	MND	-0,00076	0,00063608	0,00108	0,00031608	-0,00076
KVH	Volumen	PEI [MJ/m ³]	1179,5	MND	54,3	MND	-6150	-4916,2	1179,5	54,3	-6150
		GWP[kg CO ₂ /m ³]	-681,22	MND	770	MND	-425	-336,22	-681,22	770	-425
		AP [kg SO ₂ /m ³]	0,4595	MND	0,0069	MND	-0,421	0,0454	0,4595	0,0069	-0,421
MDF	Volumen	PEI [MJ/m ³]	10600	MND	-881	MND	-13700	-3981	10600	-881	-13700
		GWP[kg CO ₂ /m ³]	-710	MND	1340	MND	-740	-110	-710	1340	-740
		AP [kg SO ₂ /m ³]	1,96	MND	0	MND	0,787	2,747	1,96	0	0,787
Schnittholz	Volumen	PEI [MJ/m ³]	1290	0	69,4	0	-6950	-5590,6	1290	69,4	-6950
		GWP[kg CO ₂ /m ³]	-696	0	806	0	-405	-295	-696	806	-405
		AP [kg SO ₂ /m ³]	0,433	0	0,00871	0	0,271	0,71271	0,433	0,00871	0,271
OSB	Volumen	PEI [MJ/m ³]	4400	MND	97,6	MND	-9710	-5212,4	4400	97,6	-9710
		GWP[kg CO ₂ /m ³]	-753	MND	967	MND	-549	-335	-753	967	-549
		AP [kg SO ₂ /m ³]	0,919	MND	0,0139	MND	-0,0386	0,8943	0,919	0,0139	-0,0386
Gipsfaserplatten	Fläche	PEI [MJ/m ³]	50,7	0	4,07	0,81	-1,15	54,43	50,7	4,88	-1,15
		GWP[kg CO ₂ /m ³]	-0,458	0	0,196	3,44	-0,0857	3,0923	-0,458	3,636	-0,0857
		AP [kg SO ₂ /m ³]	0,00312	0	0,000317	0,000434	-0,000194	0,003677	0,00312	0,000751	0,000194

Ökobilanzierung (Blatt 1, eigene Darstellung)

A1-A3		
PEI[MJ/EH]	CO2 [kg/EH]	So2 [kg/EH]
50,7	-0,458	0,00312
1290	-696	0,433
1290	-696	0,433
4400	-753	0,919
1179,5	-681,22	0,4595
3,72	-1,23	0,00108
4400	-753	0,919
1290	-696	0,433
3,72	-1,23	0,00108
10600	-710	1,96
1290	-696	0,433
1290	-696	0,433
1290	-696	0,433

C1, C3, C4		
PEI[MJ/EH]	CO2 [kg/EH]	So2 [kg/EH]
4,88	3,636	0,000751
69,4	806	0,00871
69,4	806	0,00871
97,6	967	0,0139
54,3	770	0,0069
0,4508	1,450562	0,00031608
97,6	967	0,0139
69,4	806	0,00871
0,4508	1,450562	0,00031608
-881	1340	0
69,4	806	0,00871
69,4	806	0,00871
69,4	806	0,00871

D		
PEI[MJ/EH]	CO2 [kg/EH]	So2 [kg/EH]
-1,15	-0,0857	-0,000194
-6950	-405	0,271
-6950	-405	0,271
-9710	-549	-0,0386
-6150	-425	-0,421
-7,92	-0,447	-0,00076
-9710	-549	-0,0386
-6950	-405	0,271
-7,92	-0,447	-0,00076
-13700	-740	0,787
-6950	-405	0,271
-6950	-405	0,271
-6950	-405	0,271

Gesamt		
PEI[MJ/EH]	CO2 [kg/EH]	So2 [kg/EH]
54,43	3,0923	0,003677
-5590,6	-295	0,71271
-5590,6	-295	0,71271
-5212,4	-335	0,8943
-4916,2	-336,22	0,0454
-3,7492	-0,226438	0,00063608
-5212,4	-335	0,8943
-5590,6	-295	0,71271
-3,7492	-0,226438	0,00063608
-3981	-110	2,747
-5590,6	-295	0,71271
-5590,6	-295	0,71271
-5590,6	-295	0,71271

Ökobilanzierung (Blatt 2, eigene Darstellung)

Außenwand Holz
 im²

 A_kon= 1,00 m²

	d[mm]	Prozent- anteil	Dichte [kg/m ³] oder maßgebender Fluss	A [m ²]	ND-LD [a]	A1-A3			B4			C1, C3, C4			D			Gesamt			Produkt
						PEL_A [MJ]	CO2_A [kg]	Su2_A [kg]	PEL_A [MJ]	CO2_A [kg]	Su2_A [kg]	PEL_C [MJ]	CO2_C [kg]	Su2_C [kg]	PEL_D [MJ]	CO2_D [kg]	Su2_D [kg]	PEL_100 [MJ]	CO2_100 [kg]	Su2_100 [kg]	
Lehmbeuplatte	0,025	100,00%	Fläche	1	35	50,70	-0,46	0,0031	101,40	-0,92	0,01	14,64	10,91	0,00	-3,45	-0,26	0,00	163,29	9,28	0,0110	Gipsfaserplatten
Lattung als Installationsebene 40/60	0,04	10,00%	Volumen	1	50	5,16	-2,78	0,0017	5,16	-2,78	0,0017	0,56	6,45	0,0001	-55,60	-1,24	0,0022	-44,72	-2,36	0,0057	Schnittholz
Konterlattung 24/50 mm	0,024	10,00%	Volumen	1	50	3,10	-1,67	0,0010	3,10	-1,67	0,0010	0,33	3,67	0,0000	-33,15	-1,24	0,0013	-26,81	-1,42	0,0034	Schnittholz
Holzfasierplatte (250 kg/m ³)	0,008	100,00%	Volumen	1	50	35,20	5,02	0,0074	35,20	6,02	0,0074	1,56	15,47	0,0002	155,35	8,78	0,0006	83,40	5,36	0,0143	OSB
Holzrahmen KVH 80/160 mm	0,16	13,00%	Volumen	1	100	24,53	14,17	0,0056	0,00	0,00	0,0000	1,13	16,02	0,0001	127,92	8,84	0,0058	102,26	6,59	0,0005	KVH
dazwischen Zellulose-Einblasdämm	0,16	87,00%	45	1	50	23,80	-7,70	0,0058	23,80	-7,70	0,0058	5,65	18,17	0,0040	-99,22	-3,60	-0,0055	-16,97	-2,94	0,0080	ZelluloseDämmung
Holzfasierplatte (250 kg/m ³)	0,005	100,00%	Volumen	1	50	22,00	-3,77	0,0046	22,00	-3,77	0,0046	0,98	9,67	0,0001	-97,10	-3,49	-0,0004	-52,12	-3,35	0,0085	OSB
Konstruktionsholz 60/60 mm	0,06	10,00%	Volumen	1	50	7,74	-4,18	0,0020	7,74	-4,18	0,0020	0,83	9,67	0,0002	-83,40	-4,86	0,0033	-67,09	-3,34	0,0080	Schnittholz
dazwischen Zellulose-Einblasdämm	0,16	90,00%	45	1	50	9,04	-2,29	0,0026	9,04	-2,29	0,0026	2,19	7,05	0,0015	-38,41	-2,17	-0,0017	-18,22	-1,10	0,0031	ZelluloseDämmung
Mittl-Platte	0,015	100,00%	Volumen	1	35	159,00	-10,65	0,0274	110,00	-21,30	0,0385	-39,65	60,30	0,0000	-516,50	-11,30	0,0154	-179,15	-4,75	0,1236	Mittl
Konterlattung 40/60 mm	0,04	10,00%	Volumen	1	35	5,16	2,78	0,0017	10,32	5,57	0,0035	0,83	9,67	0,0001	83,40	4,86	0,0033	67,09	3,54	0,0086	Schnittholz
Lattung 40/60 mm	0,04	50,00%	Volumen	1	35	25,80	-13,92	0,0037	51,60	-27,84	0,0173	1,16	18,35	0,0005	-117,00	-21,30	0,0153	-335,41	-17,70	0,0428	Schnittholz
Holzschindeln 20 mm	0,02	100,00%	Volumen	1	35	25,80	-13,92	0,0037	51,60	-27,84	0,0173	1,16	18,35	0,0005	-117,00	-21,30	0,0153	-335,41	-17,70	0,0428	Schnittholz
	0,657				Summe Gesamt	396,53	-85,01	0,0878	638,1577	-112,5770	0,1298	-2,62	263,97	0,0096	-2.227,80	-127,95	0,0544	-1.195,43	-61,57	0,2817	
					Summe /m ²	396,53	-85,01	0,0878	638,1577	-112,5770	0,1298	-2,62	263,97	0,0096	-2.227,80	-127,95	0,0544	-1.195,43	-61,57	0,2817	
					Summe /m ² BGF	396,53	-85,01	0,0878	638,1577	-112,5770	0,1298	-2,62	263,97	0,0096	-2.227,80	-127,95	0,0544	-1.195,43	-61,57	0,2817	