

Bewertung der Kreislauffähigkeit von Gebäuden am Beispiel des Forschungsprojekts “Building.Lab“

Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades

Master of Science

an der TUM School of Engineering and Design der Technischen Universität
München.

Betreut von Iryna Takser M.Sc.

Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen

Eingereicht von Janja Kaufmann

Volkartsraße 19

80634 München

Eingereicht am München, den 27.12.2022

Vereinbarung

zwischen

der Technischen Universität München, vertreten durch ihren Präsidenten,
Arcisstraße 21, 80290 München

hier handelnd der Lehrstuhl für Energieeffizientes und Nachhaltiges Planen und Bauen
(Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Lang), Arcisstr. 21, 80333 München

– nachfolgend TUM –

und

Frau Janja Kaufmann
Volkartstr.19
80634 München

– nachfolgend Autorin/Autor –

Die Autorin / der Autor wünscht, dass die von ihr/ihm an der TUM erstellte Masterarbeit
mit dem Titel:

Bewertung der Kreislauffähigkeit von Gebäuden am Beispiel des Forschungsprojekts
Building.Lab

auf mediaTUM und der Webseite des Lehrstuhls für Energieeffizientes und Nachhaltiges Planen und Bauen mit dem Namen der Verfasserin / des Verfassers, dem Titel der Arbeit, den Betreuer:innen und dem Erscheinungsjahr genannt werden darf.

in Bibliotheken der TUM, einschließlich mediaTUM und die Präsenzbibliothek des Lehrstuhls für Energieeffizientes und Nachhaltiges Planen und Bauen, Studierenden und Besucher:innen zugänglich gemacht und veröffentlicht werden darf. Dies schließt auch Inhalte von Abschlusspräsentationen ein.

mit einem Sperrvermerk versehen und nicht an Dritte weitergegeben wird.

(Zutreffendes bitte ankreuzen)

Zu diesem Zweck überträgt die Autorin / der Autor der TUM zeitlich und örtlich unbefristet das nichtausschließliche Nutzungs- und Veröffentlichungsrecht an der Masterarbeit.

Die Autorin / der Autor versichert, dass sie/er alleinige(r) Inhaber(in) aller Rechte an der Masterarbeit ist und der weltweiten Veröffentlichung keine Rechte Dritter entgegenstehen, bspw. an Abbildungen, beschränkende Absprachen mit Verlagen, Arbeitgebern oder Unterstützern der Masterarbeit. Die Autorin / der Autor stellt die TUM und deren Beschäftigte insofern von Ansprüchen und Forderungen Dritter sowie den damit verbundenen Kosten frei.

Eine elektronische Fassung der Masterarbeit als pdf-Datei hat die Autorin / der Autor dieser Vereinbarung beigelegt. Die TUM ist berechtigt, ggf. notwendig werdende Konvertierungen der Datei in andere Formate vorzunehmen.

Vergütungen werden nicht gewährt.

Eine Verpflichtung der TUM zur Veröffentlichung für eine bestimmte Dauer besteht nicht.

Die Autorin / der Autor hat jederzeit das Recht, die mit dieser Vereinbarung eingeräumten Rechte schriftlich zu widerrufen. Die TUM wird die Veröffentlichung nach dem Widerruf in einer angemessenen Frist und auf etwaige Kosten der Autorin / des Autors rückgängig machen, soweit rechtlich und tatsächlich möglich und zumutbar.

Die TUM haftet nur für vorsätzlich oder grob fahrlässig verursachte Schäden. Im Falle grober Fahrlässigkeit ist die Haftung auf den vorhersehbaren Schaden begrenzt; für mittelbare Schäden, Folgeschäden sowie unbefugte nachträgliche Veränderungen der veröffentlichten Masterarbeit ist die Haftung bei grober Fahrlässigkeit ausgeschlossen.

Die vorstehenden Haftungsbeschränkungen gelten nicht für Verletzungen des Lebens, des Körpers oder der Gesundheit.

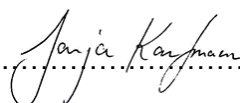
Meinungsverschiedenheiten im Zusammenhang mit dieser Vereinbarung bemühen sich die TUM und die Autorin / der Autor einvernehmlich zu klären. Auf diese Vereinbarung findet deutsches Recht unter Ausschluss kollisionsrechtlicher Regelungen Anwendung. Ausschließlicher Gerichtsstand ist München.

München, den

, den 27.12.2022

.....

(TUM)

.....


(Autor:in)

Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die von mir eingereichte Abschlussarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

München den 27.12.2022

Janja Kayman

Ort, Datum, Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

Vereinbarung	I
Erklärung	III
Inhaltsverzeichnis	1
Kurzfassung.....	4
Abstract	5
Abkürzungsverzeichnis	6
Glossar	9
1. Einleitung	11
1.1. Hintergrund und Themenfeld	11
1.2. Problemstellung.....	12
1.3. Zielsetzung und Vorgehen.....	13
1.4. Forschungsfrage und Hypothese.....	14
2. Stand der Forschung und der Technik.....	15
2.1. Begriffe.....	15
2.1.1. Circular Economy	15
2.1.2. Verwertungs- und Entsorgungswege.....	17
2.2. Grundlagen.....	21
2.2.1. Entwurfsphase	22
2.2.2. Abriss- und Rückbauphase	25
2.2.3. Recyclingpotenzial von Baustoffen.....	28
2.2.4. Rückbaubare und recyclingfähige Baukonstruktionen	33
2.2.5. Verwertung in der Praxis	34
2.3. Gesetzliche Rahmenbedingungen	38
2.3.1. Bauproduktverordnung.....	39
2.3.2. Abfallrecht	39
2.3.3. Rückbaurecht.....	44
2.4. Fazit und Einflussparameter	45
3. Bewertungsmethoden	48
3.1. Ökobilanzierung.....	49
3.1.1. Bilanzierung von Recyclingpotenzial	49
3.1.2. Indikatoren zur Beurteilung des Ressourcenverbrauchs.....	50
3.1.3. Fazit	52
3.2. Material Circularity Indicator	52
3.2.1. Systematik	52

3.3.	Building Circularity Indicator.....	54
3.3.1.	Systematik.....	54
3.3.2.	Material Circularity Indicator	55
3.3.3.	Product Circularity Indicator.....	58
3.3.4.	System Circularity Indicator	61
3.3.5.	Building Circularity Indicator	61
3.3.6.	Fazit	62
3.4.	Circularity Indicator	63
3.4.1.	Systematik.....	64
3.4.2.	CI Bauphase.....	64
3.4.3.	CI Nutzungsphase	64
3.4.4.	CI End-of-Life Phase	65
3.4.5.	CI Gebäudebewertung.....	65
3.4.6.	Abbildung der Rückbaubarkeit.....	68
3.4.7.	Daten zur Berechnung des CI.....	68
3.4.8.	Fazit	70
3.5.	Building Circularity Index.....	71
3.5.1.	Systematik.....	72
3.5.2.	Material Circularity Index	72
3.5.3.	Product Circularity Index.....	73
3.5.4.	Element Circularity Index.....	74
3.5.5.	Building Circularity Index	75
3.5.6.	Umweltkostenindikator.....	76
3.5.7.	Fazit	76
3.6.	Urban Mining Index.....	77
3.6.1.	Systematik.....	77
3.6.2.	Kreislaufpotenzial im Urban Mining Index.....	79
3.6.3.	Kreislaufpotenzial Pre-Use-Phase	80
3.6.4.	Kreislaufpotenzial Post-Use-Phase.....	81
3.6.5.	Use-Phase.....	89
3.6.6.	Schadstofffreiheit.....	89
3.6.7.	Urban Mining Indicator.....	89
3.6.8.	Fazit	90
3.7.	Vergleich der Methoden.....	91
3.7.1.	Abbildung der Entwurfsphase.....	92
3.7.2.	Abbildung der Nutzphase	92
3.7.3.	Abbildung der Rückbauphase.....	93
3.8.	Ergebnis und Auswahl der Methode	93

4.	Bewertung des Building.Labs	95
4.1.	Das Building.Lab	95
4.1.1.	Entstehung und Nutzungskonzept.....	95
4.1.2.	Baukonstruktion und Materialität	96
4.2.	Methodik.....	98
4.2.1.	Bewertungstool	98
4.2.2.	Untersuchungsrahmen	98
4.2.3.	Systemgrenzen und Abschneiderregeln im Urban Mining Index.....	100
4.2.4.	Daten und Annahmen für die Bewertung.....	101
4.3.	Bewertung Bauteile	103
4.3.1.	Bodenplatte	103
4.3.2.	Außenwände	104
4.3.3.	Innenwand	108
4.3.4.	Decke.....	110
4.3.5.	Flachdach	112
4.3.6.	Schadstofffreiheit	115
4.4.	Bewertung des Gebäudes	115
5.	Zusammenfassung und Interpretation	117
5.1.	Untersuchung der Aussagekraft der Methoden.....	117
5.2.	Bewertung des Building.Labs	118
5.3.	Herausforderungen bei der Bewertung	120
6.	Fazit und Ausblick	123
7.	Literaturverzeichnis	127
	Abbildungsverzeichnis	135
	Tabellenverzeichnis	137
	Anhang 1	139
	Anhang 2	140
	Anhang 3	141

Kurzfassung

Im Hinblick auf den enormen Ressourcenverbrauch und das Abfallaufkommen des Bau-sektors, ist ein Umdenken vom linearen Wirtschaftsmodell hin zu einer geschlossenen Kreislaufwirtschaft erforderlich. Das bedeutet, dass Baustoffe nach ihrer Nutzung hochwertig recycelt oder wiederverwendet werden, anstatt als Abfall auf der Deponie zu landen. Zur Förderung der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen werden Methoden benötigt, um die Rückführbarkeit der Materialien in den Stoffkreislauf zu bewerten und zu optimieren. In den letzten Jahren sind neue Methoden entstanden, die eine quantitative Bewertung von Kreislauffähigkeit ermöglichen: sogenannte Zirkularitätsindikatoren. Darunter der Building Circularity Indicator von Verberne, der Circularity Indicator der Plattform Madaster, der Building Circularity Index des Unternehmens Alba Concept und der Urban Mining Index aus der Dissertation von Rosen. Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung der Anwendbarkeit dieser Methoden. Dabei wurden sowohl deren Aussagekraft als auch Herausforderungen bei der Anwendung untersucht. Mittels der Identifikation wesentlicher Parameter, die die Kreislauffähigkeit von Gebäuden beeinflussen, wurde eine Basis für den Vergleich der Aussagekraft der Methoden geschaffen. Der Vergleich ergab, dass der Urban Mining Index die meisten der wesentlichen Parameter in die Bewertung einbezieht und daher derzeit die aussagekräftigste Methode zur quantitativen Bewertung darstellt. Eine Kerncharakteristik der Methode ist die Prognose der Wahrscheinlichkeit, mit der ein Material ein hochwertiges oder nachrangiges EOL-Szenario erreichen wird, mittels der Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus. Diese wird am Restwert der Materialien und dem Arbeitsaufwand für Maschinen und Personal gemessen. Durch die Anwendung der Methode am Beispiel des Forschungsgebäudes Building.Lab konnten drei wesentliche Herausforderungen bei der Anwendung der Methode ermittelt werden: die Unsicherheiten bei der Prognose der Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus, fehlende Daten für die Ermittlung des Rückbauaufwands sowie die Bewertung der Kreislaufpotenziale nach Massenanteilen. Weiterhin ergaben sich zwei nachgeordnete Herausforderungen: die Komplexität in der Interpretation der Methode und der Aufwand für die Beschaffung notwendiger Daten für die Bewertung.

Abstract

In terms of the enormous consumption of resources and the amount of waste generated by the construction sector, a rethinking from the linear economic model towards a circular economy is required. To achieve this goal construction materials will need to be recycled with high quality or reused after their lifecycle ends instead of ending up as waste in landfills. To promote a circular economy in the construction sector, methods are needed to evaluate and optimize the recyclability of materials into closed loop cycles. In recent years, new methods have emerged that allow a quantitative assessment of circularity, so-called Circularity Indicators. These include the Building Circularity Indicator by Verberne, the Circularity Indicator of the Madaster platform, the Building Circularity Index of the Alba Concept company, and the Urban Mining Index by Rosen. The aim of this thesis is to investigate the applicability of these methods. Thereby, their validity as well as challenges in their application are investigated. By identifying key parameters that influence the circularity of buildings, a basis for comparing the validity of the methods is developed. The comparison revealed that the Urban Mining Index includes most of the essential parameters in the assessment and is therefore currently the most valid method for quantitative evaluation. A core characteristic of the method is the prediction of the probability that a material will reach a high-grade or lower-grade end-of-life scenario using the cost-effectiveness of selective dismantling. This is measured by the residual value of the materials and the work effort required for machines and persons. By applying the method to the example of the Building.Lab research project, three main challenges were identified: the uncertainties in predicting the cost-effectiveness of selective dismantling, the lack of data for determining the deconstruction effort, and the assessment of the circular potentials by mass fraction. Furthermore, two minor challenges were identified: the complexity in interpreting the method and the effort required to obtain necessary data for the evaluation.

Abkürzungsverzeichnis

AbfRR	Abfallrahmenrichtlinie
AC	Alba Concept
ADPE	Abiotische Ressourcenabbaupotenzial für Elemente
AltholzV	Altholzverordnung
AVV	Abfallverzeichnis-Verordnung
AW	Außenwand
BAMB	Buildings as Material Banks
BBSR	Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung
BBVI	Bayerischen Bauindustrieverband e.V
BCI	Building Circularity Indicator Verberne
BCI _{AC}	Building Circularity Index Alba Concept
BIM	Building Information Modelling
Bio-AbfV	Bioabfallverordnung
BNB	Bewertungssystem für Nachhaltiges Bauen
CBA	Circular Building Assessment Model
CE	Circular Economy
CI	Circularity Indicator
CLP	Close-Loop-Potenzial
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DA	Deutscher Abbruchverband
Dfd	Design for Disassembly
DGAW	Deutsche Gesellschaft für Abfallwirtschaft
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
DHU	Deutsche Umwelthilfe
DIN	Deutsches Institut für Normung
ECI	Element Circularity Index
EMF	Ellen MacArthur Foundation
EN	Europäische Norm
EoL	End of Life
EPD	Umwelt Produktdeklaration
EPS	Polystyrol Dämmung

EU	Europäische Union
EUBauPVO	Europäische Bauproduktverordnung
FPO	flexiblen Polyolefin Kunststoff
FSC	Forest Stewardship Council
GewAbfV	Gewerbeabfallverordnung
IREBS	International Real Estate Business School
ISO	International Organization for Standardization
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
LCA	Life Cycle Assessment
LFI	Linear Flow Index
LP	Loop-Potenzial
MCI	Material Circularity Indicator
MEB	Mineralische Ersatzbaustoffe
MFR	Stoffe für das Recycling
MKI	Umweltfolgekostenindikator
MLP	Material-Loop-Potenzial
MRC	Material Recycling Content
NABU	Naturschutzbund Deutschland
NaWaRo	Nachwachsende Rohstoffe
NL	Niederlande
OSB	Oriented Strand Board
OTH	Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg
PCI	Product Circularity Indicator/Index
PE	Polyethylen
PEFC	Programme for the Endorsement of Forest Certification Schemes
PENRM	nicht erneuerbare Primärenergie - als Rohstoff
PERM	erneuerbare Primärenergie - als Rohstoff
PSS	Produkt-Service-Systeme
PUR	Polyurethan-Hartschaum
PVC	Polyvinylchlorid
RC-Beton	Recyclingbeton
SCI	System Circularity Indicator
ToV	Trennbarkeitsfaktors Zugänglichkeit zu Montagepunkten
UBA	Umwelt Bundesamt

UMI	Urban Mining Index
UNEP	United Nations Environment Programm
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WDVS	Wärmedämmverbundsystem
ZDB	Zentralverbands Deutsches Baugewerbe

Glossar

Benchmark:

Maßstab für den Vergleich von Leistungen.[1]

Closed-Loop-Potential:

Definiert den Anteil der Materialien oder Konstruktionen der eine gleichwertige (Recycling oder Wiederverwendung) möglich macht. [2, S. 217]

CO₂-Footprint:

Beitrag eines Produkts oder Gebäudes zur Erderwärmung über einen bestimmten Zeitraum (nach DIN EN ISO 14044 100 Jahre) durch anthropogene Treibhausgase; berechnet mithilfe einer Ökobilanz.

Circular Economy CE:

CE (dt. Kreislaufwirtschaft) beschreibt im Gegensatz zur linearen Wirtschaft (Abbauen – Produzieren – Entsorgen) einen Ansatz Produkte nach Ihrer Nutzung vollständig wieder in den Produktionsprozess zurückzuführen. [2, S. 217]

Downcycling:

Aufbereitung von gebrauchten Produkten oder Abfällen der mit einem Qualitätsverlust gegenüber dem Ausgangsprodukt verbunden ist. [2, S. 216]

End-of-Life-Szenario:

Beschreibt die Möglichkeiten der Nutzung von Produkten oder Materialien ihrem Nutzungsphase. Darin enthalten Szenarien von Verwertung bis Deponierung. [2, S. 216]

Environmental Product Declarations (EPD):

EPDs (dt. Umwelt-Produktdeklartionen) sind Grundlage zur Bewertung von Nachhaltigkeit und enthalten Informationen zu Umweltwirkungen von Bauprodukten, die auf Basis von Ökobilanzen ermittelt wurden. [2, S. 216]

Kaskadennutzung:

Die aufeinanderfolgende Nutzung von Rohstoffen mit ggf. anschließender energetischer Verwertung (Bsp. Bauholz – Spanplatte – energetische Verwertung). [2, S. 217]

Loop-Potenzial (LP):

Definiert den Anteil der Materialien oder Konstruktionen der eine gleichwertige (Recycling oder Wiederverwendung) oder qualitätsvolle Verwertung (Downcycling oder Weiterverwendung) möglich macht. [2, S. 217]

Material-Loop-Potenzial (MLP):

Der mögliche zukünftige Recyclinganteil in Produkten unter der Annahme maximaler Optimierung der Produktion hinsichtlich ihres Sekundärrohstoffanteils. [2, S. 217]

Material Recycling Content (MRC):

Der aktuelle Anteil an Sekundärmaterial in Produkten. [2, S. 217]

Nachwachsende Rohstoffe (NaWaRos):

„Organische Rohstoffe aus land- und forstwirtschaftlicher Produktion, die nicht als Nahrungs- oder Futtermittel Verwendung finden, sondern stofflich oder zur Erzeugung von Wärme, Strom, Bau- oder Kraftstoffen genutzt werden“ [2, S. 218]

Post-Use:

Engl. für nach Gebrauch oder nach der Nutzung. [3, S. 329]

Pre-Use:

Engl. für vor Gebrauch oder vor der Nutzung. [3, S. 329]

Recycling:

Verwertung von Abfällen, die nach einem Lebenszyklus entstehen zu Sekundärrohstoffen. Die dabei jedoch weitgehend das gleiche Qualitätsstufe des Ausgangsprodukts aufweisen (Wiederverwertung). [2, S. 218]

Sekundärrohstoff, -material, -baustoff:

Rohstoffe die aus der Verwertung von Abfall stammen. Sie grenzen sich ab von Primärrohstoffen die aus natürlichen Quellen stammen. [2, S. 217]

1. Einleitung

1.1. Hintergrund und Themenfeld

Der Bausektor ist national und international der Sektor mit dem höchsten Ressourcenverbrauch und dem größten Abfallaufkommen [3, S. 8]. Derzeit übersteigt die Nutzung der natürlichen Ressourcen deren Regenerationsfähigkeit deutlich (Earth Overshoot Day 2022: 28. Juli) [4].

Ebenso stellt der Abbau fossiler Ressourcen wie Kohle, Öl und Gas ein Problem dar. Die über Millionen Jahre entstandenen Vorkommen werden in vergleichsweise kurzer Zeit abgebaut. Aus diesem intensiven Ressourcenverbrauch entstehen gravierende Belastungen für die Umwelt. Folgen davon sind unter anderem der vorherrschende Klimawandel sowie das fortschreitende Artensterben. Auch der Verbrauch abiotischer Ressourcen, wie Mineralien und Metallen – die nicht im natürlichen Kreislauf erneuerbar sind – stellt auf Grund deren Knappheit ein akutes Problem dar.[5]

Die drei Strategien zur Schonung dieser Ressourcen sind Suffizienz, Effizienz und Konsistenz. Die Suffizienz zielt auf die Schonung von Ressourcen durch den Verzicht auf deren Einsatz ab. Gebäude oder Bauteile sollen demnach grundsätzlich auf deren Notwendigkeit hin überprüft werden. Effizienz hingegen hat das Ziel des minimalen Materialeinsatzes unter der Einhaltung notwendiger Funktionen. So kann beispielsweise ein Tragwerk auf seinen Materialeinsatz hin optimiert werden, ohne dabei die Statik zu gefährden. Die aktuell viel besprochene Strategie der Konsistenz, auch bekannt als Kreislaufwirtschaft oder Circular Economy, setzt auf geschlossene oder konsistente Kreisläufe. Rohstoffe sollen demnach, nach ihrer Nutzung, wieder zurück in natürliche und technische Kreisläufe geführt werden. Auf den Gebrauch fossiler, also nur langsam regenerativer Ressourcen, soll möglichst verzichtet werden. Das Themenfeld dieser Arbeit ist die Reduzierung des Ressourcenverbrauchs des Bausektors durch die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft.

Im Gebäudebestand lagern laut dem deutschen Umweltbundesamt rund 50 Mrd. Tonnen mineralischer Rohstoffe wie Kalk, Gipsstein, Kies, Sand oder Ton [6]. Zwar wird bereits heute ein Großteil der anfallenden Bau- und Abrissabfälle in Deutschland verwertet (80%), doch geschieht das fast ausschließlich als sogenanntes *Downcycling*.

Mineralisches Abbruchmaterial kann beispielsweise aufgrund seiner minderen Qualität nur zu 21% als hochwertige Gesteinskörnung im Straßenbau eingesetzt werden, 73% hingegen werden als minderwertiges Material zur Verfüllung im Straßen- und Erdbau verwertet. Der Rest wird auf Deponien gelagert. [7]

Downcycling ist zum einen der chemischen Beschaffenheit der Baumaterialien an sich (z.B. Beton), zum anderen der nur bedingt möglichen Trennbarkeit der Bauteilschichten (z.B. Wärmedämmverbundsysteme) geschuldet [2, S. 13]. Die Bauwirtschaft steht also vor der Herausforderung die eingesetzten Rohstoffe wieder sortenrein in Stoffkreisläufe zu bringen, um somit die Zugabe von neuen Primärrohstoffen zu verringern.

1.2. Problemstellung

Ein wichtiges Instrument zur Verfolgung der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen ist die Bewertung des Kreislaufpotenzials mittels geeigneter Bewertungsmethoden.

In der Forschung und der Technik sind bereits einige Methoden zur Bewertung vorhanden. Die "Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen" (DGNB) bewertet die Recyclingfähigkeit von Baustoffen im Kriterium TEC 1.6. Dabei wird im ersten Indikator die recyclingfreundliche Baustoffwahl anhand der üblichen Entsorgungswege (europäische Abfallrahmenrichtlinie) bewertet. Die daraus resultierenden Qualitätsstufen (Q0 bis Q2) werden an Punktbewertungen geknüpft. Im zweiten Indikator wird die Recyclingfähigkeit der Baukonstruktion anhand der Möglichkeit der zerstörungsfreien Entnahme beurteilt. [8, S. 475ff.]

Recyclingaspekte werden im Zuge dieses Bewertungssystems jedoch nur qualitativ bewertet [3, S. 67]. Beispielsweise kann keine Aussage über die potenzielle Menge an entstehendem Recyclingmaterial nach dem Lebenszyklus des Gebäudes getroffen werden.

Die Ökobilanz ist eine nach ISO 14040 standardisierte Methode zur Erfassung und Bewertung von Ressourcenverbrauch [9]. Diese bilanziert u.a. den Primärenergiebedarf (stofflich und energetisch) entlang des gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes und die damit verbundenen Umweltauswirkungen. Der Lebenszyklus umfasst die Herstellung- und Errichtungsphase (Modul A), die Nutzungsphase (Modul B) sowie die Entsorgungsphase (Modul C). Das Modul D beschreibt die potenziellen Vorteile und

Belastungen, die durch Wiederverwendung, Recycling und thermische Verwertung entstehen. Sie liegen laut DIN EN 15978 außerhalb des Lebenszyklus eines Gebäudes und müssen gesondert angegeben werden [10, S. 29]. Die Ökobilanz beinhaltet zudem Indikatoren, die Aussagen über den Verbrauch von Rohstoffen liefern. Zum Beispiel kann die Menge an eingesetztem Recyclingmaterial (SM) erfasst werden. Es können auch nach dem Lebenszyklus des Gebäudes entstehende Materialmengen mit dazugehörigen Verwertungs- und Entsorgungswegen (End-of-Life-Szenarien, kurz EoL) ermittelt werden. Beispiele dafür sind die Indikatoren Stoffe für das Recycling (MFR) und Stoffe für die Energierückgewinnung (MER).

Allerdings ist die Bewertung der Kreislauffähigkeit von Gebäuden mithilfe einer Ökobilanz in der Wissenschaft umstritten. Die Methode basiert ursprünglich auf dem Gedanken der linearen Wirtschaft *cradle to grave*, die im Gegensatz zur Kreislaufwirtschaft *cradle to cradle* den Lebenszyklus von Produkten nur bis zum Erreichen der Abfallei-genschaft betrachtet und ist nicht zur Bewertung von Kreislauffähigkeit geeignet [2, S. 30, 11, S. 1938].

In den letzten Jahren sind neue quantitative Methoden zur Bewertung der Kreislauffähigkeit von Gebäuden entstanden - sogenannte Zirkularitätsindikatoren. Beispiele für solche Methoden sind der *Building Circularity Indicator* von Verberne[12] oder der *Circularity Indicator* der Plattform *Madaster* [13]. Sie bewerten das Gebäude anhand mehrerer Parameter, wie z.B. dem Anteil an verwendetem Recyclingmaterial, dem Anteil an verwendeten nachwachsenden Rohstoffen oder dem Anteil an Materialien, die nach dem Lebenszyklus dem Recycling zugeführt werden. Eine erste Analyse der Methoden zeigt, dass sich die betrachteten Parameter der Bewertung zum Teil unterscheiden. So berücksichtigt der *Circularity Indicator* die Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen [13, S. 12], während der *Building Circularity Indicator* diesen Parameter vernachlässigt [12, S. 61]. Die tatsächliche Aussagekraft der neu entwickelten quantitativen Bewertungsmethoden ist damit unklar und bedarf einer näheren Betrachtung.

1.3. Zielsetzung und Vorgehen

Ziel dieser Arbeit ist die Analyse der Anwendbarkeit vorhandener quantitativer Methoden zur Bewertung der Kreislauffähigkeit von Gebäuden. Die Anwendbarkeit hängt zum einen von der Aussagekraft der Methoden ab – also der Einbindung der wesentlichen

Parameter in die Bewertung. Zum anderen beeinflussen verschiedene Herausforderungen, wie z.B. der Aufwand der Bewertung, die Anwendbarkeit der Methode.

Im ersten Schritt (Kapitel 2) wird zunächst mittels einer Literaturrecherche der Stand der Forschung und der Technik der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen analysiert. Daraus ergeben sich wesentliche Parameter, die die Kreislauffähigkeit von Gebäuden beeinflussen – im folgenden Einflussparameter genannt (Kap. 2.4).

Im zweiten Schritt werden vorhandene Methoden analysiert und auf besagte Einflussparameter verglichen (Kapitel 3). Der Vergleich soll dabei aufzeigen, welche Methode die meisten Parameter abbildet und damit für die Bewertung der Kreislauffähigkeit von Gebäuden zu bevorzugen ist. Auf Basis des Vergleichs wird die aussagekräftigste der Methoden an dem Forschungsgebäude Building.Lab angewendet (Kapitel 4).

In der Zusammenfassung und Interpretation (Kapitel 5) werden die ermittelten Ergebnisse aus dem Vergleich der Methoden und der Bewertung des Building.Lab zusammengefasst und diskutiert. Die Arbeit endet mit einem Fazit und Ausblick (Kapitel 6), das der Beantwortung der im Folgenden aufgelisteten Forschungsfrage und Hypothese dient, sowie weiteren Forschungsbedarf aufzeigt.

1.4. Forschungsfrage und Hypothese

F: Inwiefern lassen sich vorhandene quantitative Methoden zur Bewertung der Kreislauffähigkeit von Gebäuden bereits anwenden und wo bestehen Herausforderungen?

H: Derzeit vorhandene quantitative Bewertungsmethoden variieren in Umfang und Qualität der Bewertung. Eine objektive Bewertung der Kreislauffähigkeit von Gebäuden ist Stand der Technik noch nicht möglich.

2. Stand der Forschung und der Technik

Ziel dieses Kapitels ist die Zusammenfassung der Begriffen, Grundlagen und Rechtlichen Rahmendbedingungen, die für die Kreislaufwirtschaft im Bauwesen von wesentlicher Bedeutung sind. Über die Grundlagenrecherche hinaus werden für die Bewertung der Kreislauffähigkeit wesentlichen Einflussparameter identifiziert. Eine Auflistung dieser kann dem Kapitel 2.4 entnommen werden.

2.1. Begriffe

Im Zusammenhang mit der Rohstoffknappheit und der vorherrschenden Debatte zur Lösung dieser, werden Begriffe wie Kreislaufwirtschaft (engl. Circular Economy) oder Recycling häufig ungenau und pauschal verwendet. Die Begriffsdefinition ist daher der erste Bestandteil dieser Arbeit.

2.1.1. Circular Economy

Einer Untersuchung von Kirchherr et. al. hat im Jahr 2017 insgesamt 114 Definitionen für das Konzept der Circular Economy (CE) ermittelt [14, S. 221]. Zur Eingrenzung des Betrachtungsrahmens dieser Arbeit ist daher die Begriffsdefinition dieses Konzepts notwendig.

Circular Economy, beschreibt ein übergeordnetes Konzept der verantwortungsvollen und zirkulären Nutzung von Ressourcen. Im Gegensatz zu der vorherrschenden linearen Wirtschaft (take-make-waste) werden Güter nach ihrem Lebensende nicht entsorgt, sondern in den Stoffkreislauf zurückgeführt. Das geschieht bestenfalls verlustfrei in geschlossenen Kreisläufen, bei denen jeder Sekundärrohstoff eine neue Verwendung findet. Ziele des Konzepts sind der Schutz der Umwelt durch Ressourcenschonung, die Reduktion der Müllproduktion sowie die Entkoppelung von Ressourceneinsatz und Wirtschaftswachstum. [15, S. 10]

CE hat ihre Anfänge in den frühen 1990er Jahren, als Robert Ayres die Idee des Industriellen Metabolismus erfand [16]. Er beschreibt ihn als „die Gesamtheit der integrierten physikalischen Prozesse, die Rohstoffe und Energie sowie Arbeit in Fertigprodukte und Abfälle in einem (mehr oder weniger) stationären Zustand umwandeln.“ Er stellt weiterhin fest, dass geschlossene Kreisläufe geschlossen gehalten werden können, solange

Energie zugeführt wird. Eine logische Folge daraus ist, dass es zukünftig nur zwei mögliche Verwendungen für Abfälle gibt: Recycling oder Wiederverwendung (technischer Kreislauf). [16, S. 23]

Braungart und McDonough begründeten in den 1990er Jahren das Konzept des Cradle to Cradle (C2C), das neben den zuvor beschriebenen technischen Kreisläufen die Relevanz biologischer Kreisläufe hervorhebt. Anders als bei der vorherrschenden linearen Wirtschaft (cradle to grave), sollen Produkte demnach so entworfen werden, dass sie nach ihrer Nutzung in den technischen Kreislauf (Recycling) oder in den biologischen Kreislauf (Kompostierung) zurückgeführt werden (cradle to cradle). Demnach gibt es keinen Abfall, sondern nur Nährstoffe, die in der Bio- und Technosphäre zirkulieren (siehe Abb. 1) [17]. Der technische Kreislauf lässt sich, laut Braungart, nur mit einem hochwertigen Recycling schließen (siehe Definition Recycling 2.1.2). Das bedeutet, dass die Qualität des Sekundärstoffs durch die Wiederaufbereitung nicht geschmälert, sondern auf gleichem Niveau verwertet wird. Im Gegensatz dazu steht das heutzutage häufig angewendete Downcycling, bei dem die Verwertung in abfallenden Degradationsstufen stattfindet (z.B. Downcycling von Beton siehe Kap. 2.2.3). [18]

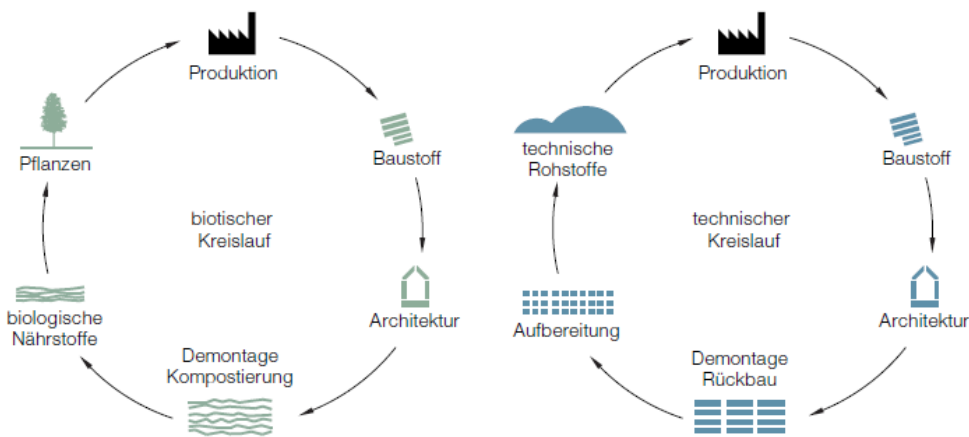


Abb. 1 Biologischer und technischer Kreislauf nach Cradle to Cradle [2, S. 60]

Stahel führt 1994 den Begriff des *Closed-Loops-Systems* (dt. geschlossene Kreislaufsysteme) ein. Darin enthalten sind zwei mögliche Nachnutzungen von Gütern: Recycling und Wiederverwendung. Mit Zweiterem meint Stahel, neben der Wiederverwendung an sich auch die Entwicklung langlebiger Güter und die Verlängerung der Produktlebensdauer, durch z.B. Reparatur oder Instandsetzung. [19, S. 308]

Bocken fasst in Anlehnung an Stahel, Braungart und McDonough zwei Strategien zur Verfolgung von stofflichen Kreislaufwirtschaft wie folgt zusammen [19, S. 308]:

1. Slowing resource loops: Verlängerung der Lebensdauer von Produkten durch langlebiges Design und Erhaltungsmaßnahmen
2. Closing resource loops: Recycling von Gütern

Ressourcen können zudem durch die Implementierung innovativer CE-Geschäftsmodelle geschont werden. Strategien wie Multifunktionalität oder Nutzungsintensivierung von Produkten fördern die CE, indem sie den Konsum neuer Produkte verhindern oder neue Konsummuster schaffen. Mieten, teilen oder poolen durch Produkt-Service-Systeme (PSS) sind dabei wichtige Instrumente zur Förderung von CE. Zudem gehören auch Herstellerrücknahmesysteme zu CE-Geschäftsmodellen. Durch die Rücknahme der eigenen Produkte, wird ein hochwertiges und produktspezifisches Recycling ermöglicht. [20, S. 453]

In der Baubranche existieren bereits vereinzelt CE-Geschäftsmodelle. Hersteller, wie z.B. *Tarkett*, nehmen ihre Produkte nach der Verwendung zurück, um sie anschließend dem selbstorganisierten Recycling zuzuführen. Erste Firmen bieten auch das Leasen von Bauprodukten oder Gebäuden an [21].

Diese Arbeit wird, in Anlehnung an Bocken, den Betrachtungsrahmen auf die folgenden zwei CE-Strategien richten: das Schließen bzw. Verlangsamen von Stoffkreisläufen durch Recycling, Wiederverwendung und einer hohen Lebensdauer von Bauprodukten.

2.1.2. Verwertungs- und Entsorgungswege

Rohstoffe werden für das Bauwesen abgebaut oder aus sekundären Quellen (Recyclingmaterial) zu Bauprodukten verarbeitet und anschließend zur Herstellung von Bauwerken verwendet. An deren Lebensende werden diese zurückgebaut und durchlaufen verschiedene Verwertungs- bzw. Entsorgungswege, im Folgenden als End-of-Life-Szenarien (kurz, EoL-Szenarien) bezeichnet. Abb. 2 zeigt die möglichen Szenarien, die im Weiteren näher erläutert werden. Die Verwertungs- bzw. Entsorgungsquoten in der Praxis sind dem Kapitel 2.2.5 zu entnehmen.

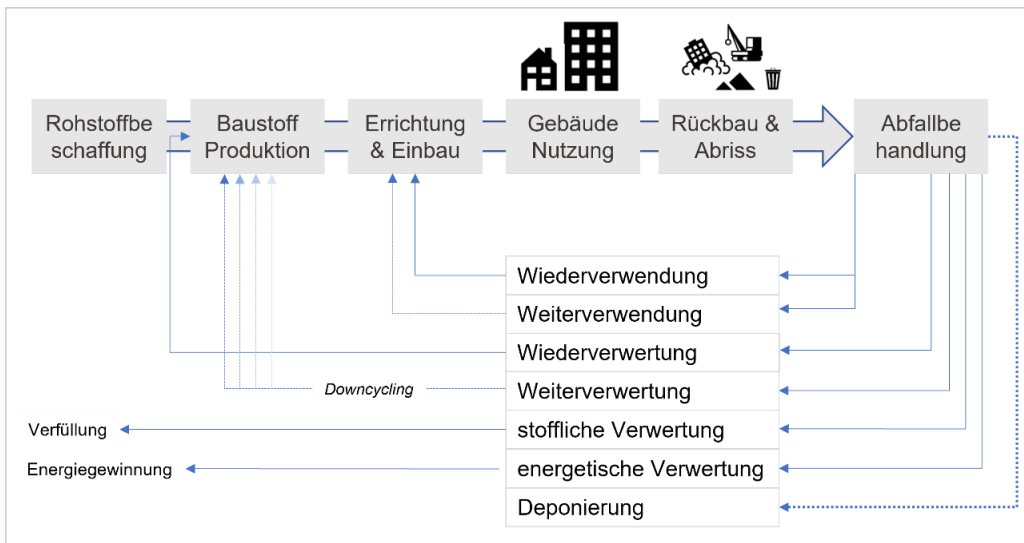


Abb. 2 Ressourcennutzung von Gebäuden (eigene Darstellung, nach [22, S. 20])

Wiederverwendung und Weiterverwendung

Bei der Wieder- und Weiterverwendung werden Produkte unter Beibehaltung der Produktgestalt erneut eingesetzt [2, S. 59, 23, §3]. Das Ziel im Sinne der Kreislaufwirtschaft dabei ist, die Lebensdauer des Produktes zu verlängern. In Anlehnung an die zuvor genannte Beschreibung der CE-Strategien von Bocken, führt dieses Nachnutzungsszenario zur Verlangsamung des Kreislaufs (slowing the loop) und verhindert den Einsatz neuer Ressourcen (Primärressourcen) [19, S. 308].

Wird ein Produkt dem gleichen Zweck, für den es ursprünglich bestimmt war, zugeführt, handelt es sich hierbei um Wiederverwendung (engl.: Re-Use) [23, §3]. Beispielsweise können Türen oder Fenster nach ihrer Nutzung, rückgebaut und erneut verwendet werden [24, S. 29]. Voraussetzung dafür ist, dass sie in einem technisch einwandfreien Zustand sind. Die Wiederverwendung ist also ganz im Sinne einer geschlossenen Kreislaufwirtschaft. Letztendlich kann auch der Erhalt von Bausubstanz in Bestandsgebäuden als Wiederverwendung auf Gebäudeebene betrachtet werden.

Bei Weiterverwendung (engl: Further Use) wird das Produkt anderweitig eingesetzt [3, S. 24]. Alte Ziegelsteine können beispielsweise als Gartensteine verwendet werden. Die Weiterverwendung ist häufig mit einem Qualitätsverlust verbunden [3, S. 24]. Die Weiterverwendung ist daher als Downcycling anzusehen.

Recycling

Recycling spielt, neben den zuvor genannten Szenarien, in der Bauwirtschaft eine wesentliche Rolle bei der Rückgewinnung eingesetzter Rohstoffe. Nach § 3 des deutschen Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG), fällt darunter „jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfälle zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen (...) aufbereitet werden“ [23, §3 Abs. 25]. Dabei kann das Rezyklat laut besagten Paragraphen, für den ursprünglichen Zweck oder andere Zwecke verwendet werden. Ausgeschlossen wird die endgültige energetische Verwertung (Verbrennung), die Aufbereitung für die Verwendung als Brennstoff sowie die endgültige stoffliche Verwertung (Verfüllung).



Abb. 3 Recycling Definitionen nach KrWG §3 und VDI 2243 (eigene Darstellung, nach [23, 25])

Laut Richtlinie 2243 des *Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) – Recyclingorientierte Produktentwicklung* – zählt sowohl das stoffliche also auch energetische Verwerten, also das Verbrennen von Abfällen mit dem Ziel der Energiegewinnung, zum Recycling dazu (siehe Abb. 3) [25, S. 10]. Daher ist beim Begriff *Recycling* auf die Definition des jeweiligen Verwenders zu achten.

Recycling wird von Hillebrandt im einschlägigen Sammelwerk *Atlas Recycling*, weiterhin in Wiederverwertung und Weiterverwertung unterteilt (siehe Abb. 3). Die Wiederverwertung, *gleichwertige stoffliche Verwertung* genannt, bezeichnet „den Aufbereitungsprozess gebrauchter (Bau-)stoffe und Produkte unter Auflösung ihrer Gestalt aber unter Beibehaltung ihrer inhärenten Eigenschaften zu Ausgangsstoffen für Werkstoffe derselben Qualitätsstufe“ [2, S. 59, 3, S. 23]. Materialien können so, nahezu endlos in Materialkreisläufen geführt werden. Der Einsatz von Primärrohstoffen wird so beinahe obsolet.

Ein bekanntes Beispiel für ein Material, das sich theoretisch in der gleichen Qualitätsstufe unendlich oft recyceln lässt, ist Aluminium. Vorausgesetzt eine sortenreine Rückgewinnung ist erfolgt, kann es eingeschmolzen und zu neuen gleichwertigen Werkstoffen verarbeitet werden (siehe Kap. 2.2.3) [26, S. 7].

Das Recycling in Form einer Weiterverwertung, auch *Downcycling* oder minderwertige stoffliche Verwertung genannt, hat hingegen eine qualitätsmindernde Veränderung der inhärenten Eigenschaften eines (Bau-)Stoffes oder Bauteils zur Folge [3, S. 24]. In Deutschland wird weitgehend weiterverwertet (siehe Kap. 2.2.5). Die mehrfach hintereinander geschaltete Nutzung von Materialien, in abfallenden Qualitätsstufen, nennt man Kaskadennutzung. Dabei werden entstehende Sekundärmaterialien verschiedenen Produktzyklen zugeführt. Es handelt sich daher um einen offenen Kreislauf (open loop) [3, S. 24]. Siehe Abb. 4 zum Vergleich der Verwertungswege im offenen und geschlossenen Kreislauf.

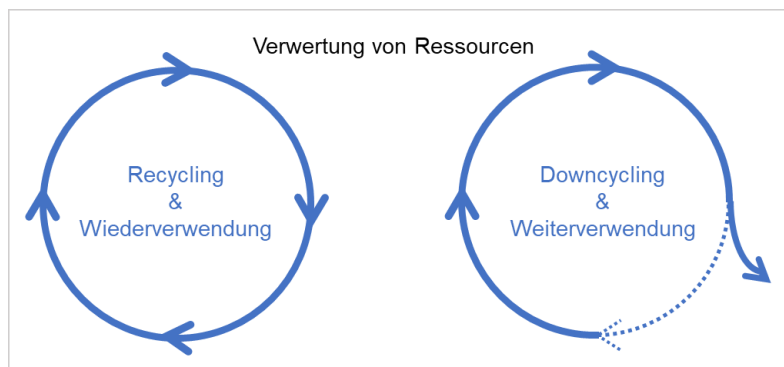


Abb. 4 Verwertung in geschlossenen und offenen Kreisläufen (eigene Darstellung)

In dieser Arbeit wird im Folgenden für die Wiederverwertung und Weiterverwertung der einfacheren Lesbarkeit wegen die jeweiligen Begriffe Recycling und Downcycling verwendet.

Energetische Verwertung

Von energetischer Verwertung spricht man, wenn Abfälle als Brennstoff zur Energierückgewinnung genutzt werden. Nach § 6 des KrWG (siehe Kapitel 2.3) zählt diese Art der Verwertung zusammen mit der Verfüllung zur *sonstigen Verwertung*. [23, §6]

Verfüllung

Bei der Verfüllung – auch endgültige stoffliche Verwertung genannt – wird Abfalls in Gruben, Brüchen und Tagebauen zur Stabilisierung und zur Wiederherstellung der Bodenfunktion genutzt. Zum Beispiel werden im Bergbau durch den Abbau von Bodenschätzen (z.B. Steinkohle) Absenkungen der Tagesoberfläche verursacht. In manchen Fällen, zum Beispiel bei angrenzender Bebauung, kann eine Reduktion dieser Absenkung durch Verfüllung notwendig sein. [27]

Deponierung

Der Anteil der Stoffmenge, der nicht zur stofflichen oder energetischen Rückgewinnung aufbereitet werden kann, wird auf Deponien gelagert.

Zirkularität der End-of-Life- Szenarien

Bei der energetischen und endgültigen stofflichen Verwertung wird der Abfall zwar einem dem Menschen weiterhin dienlichen Zweck zugeführt, sie entsprechen jedoch nicht dem Prinzip der zirkulären Rohstoffnutzung.

Das Downcycling und die Weiterverwertung verlangsamen den Kreislauf (slowing the loop) und führen zunächst zur Minderung von Primärrohstoffverbrauch, letztendlich aber endet der Rohstoff jedoch nach mehreren Degradierungsstufen auf Deponien. Auch wenn diese Verwertungsarten nicht auf einem gleichen Qualitätsniveau durchgeführt werden, also keine geschlossenen Kreisläufe nach sich ziehen, bilden diese ebenfalls wichtige Strategien für die Ressourcenschonung. Ganz im Sinne einer Kreislaufwirtschaft sind das gleichwertige Recycling und die Wiederverwertung. Sie ermöglichen einen geschlossenen Kreislauf ohne jeglichen Qualitätsverlust.

2.2. Grundlagen

Welchen der Szenarien Baumaterialien nach ihrer Nutzung zugeführt werden können bzw. wie recyclingfähig, und rückbaubar sie sind, wird maßgeblich in der Phase des Entwurfs und des Rückbaus beeinflusst (siehe Abb. 5) [3, S. 13]. Dieses Kapitel setzt sich daher zunächst mit den Einflussparametern der beiden Phasen auseinander. Daraufhin werden die Recyclingpotenziale von wesentlichen Baustoffen erläutert sowie ein Beispiel für eine rückbaubare Baukonstruktion vorgestellt. Darauf folgt ein Überblick über die deutsche Verwertungspraxis. Als letztes werden die gesetzlichen Rahmenbedingungen zur Förderung der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen analysiert.

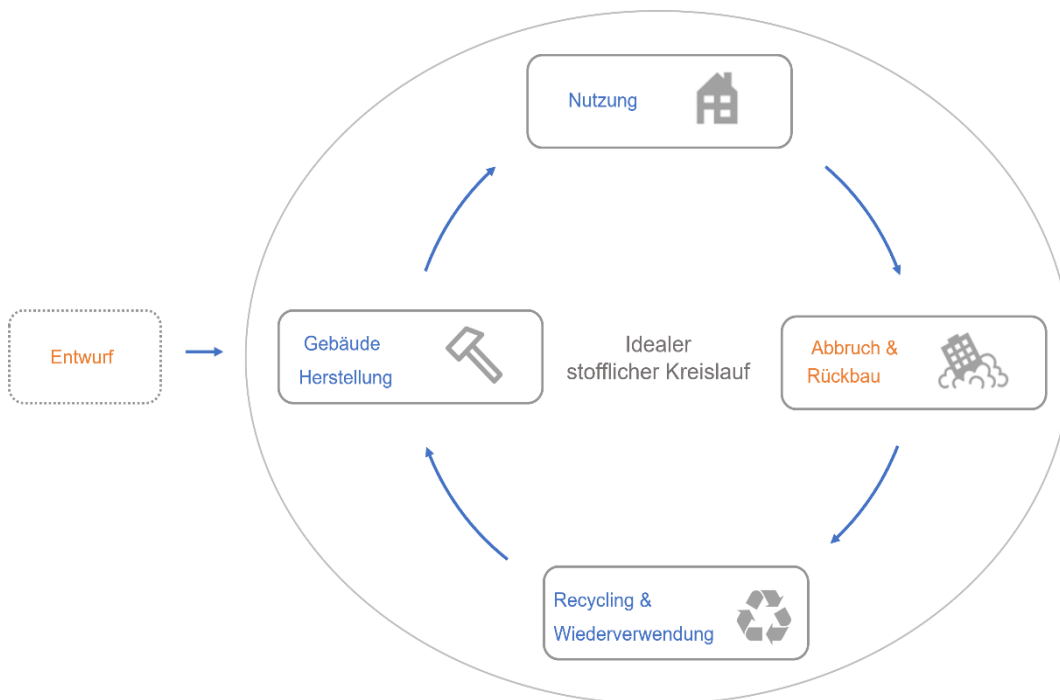


Abb. 5 Phasen mit Einfluss auf hochwertige EoL-Szenarien (eigene Darstellung)

2.2.1. Entwurfsphase

Schon in der Entwurfsphase nehmen die Architekten und Planer bei der Wahl der Materialien und der Entwicklung von Konstruktionsdetails Einfluss auf den späteren Verbleib der Rohstoffe. Im Folgenden sind die wesentlichen Einflussparameter für recyclinggerechte und rückbaubare Gebäude angeführt.

Materialwahl

Ein wichtiger Parameter für kreislaufgerechtes Design ist die recyclinggerechte Materialwahl. Müssen Gemische aus verschiedenen Stoffgruppen voneinander getrennt werden, so hat dies nach heutigem Stand der Technik einen hohen wirtschaftlichen und zeitlichen Aufwand zur Folge. Zielführend im Hinblick auf eine gute Recyclingfähigkeit von Gebäuden ist es daher, möglichst zirkuläre Materialien zu verwenden, also solche die sich nahezu in geschlossenen technischen oder biologischen Kreisläufen recyceln lassen. Hierbei handelt es sich zumeist um monomaterielle Baustoffe (z.B.: Holz, Lehm, oder Stahl), die frei von für das Recycling beeinträchtigenden Zusätzen sind (siehe Schadstofffreiheit). [2, S. 14]

Auch auf Bauteil bzw. Konstruktionsebene ist eine Monomaterialität bzw. Einstofflichkeit erstrebenswert, so müssen Bauteile nach ihrem Ausbau nicht getrennt werden. Ein

Beispiel dafür kann die diffusionsoffene Holztafelbauweise sein. Diese Bauweise erlaubt es alle notwendigen Funktionen wie Tragen, Dämmen und Feuchteschutz, auf Holzbasis zu realisieren [2, S. 42]. Das Ständerwerk ist dabei aus Brettschichtholz, raumseitig werden OSB-Platten (Aussteifung und Dampfbremse) verwendet und als Dämmung kann Holzfaserdämmung dienen.

Rückbaubarkeit im Design

Ein Bauwerk besteht aus einer Vielzahl an Materialien und Bauteilen, die miteinander verbunden sind. Lösbare Verbindungen, wie Schraub- und Steckverbindungen lassen sich schnell und wirtschaftlich demontieren und anschließend verwerten. Wohingegen geklebte Verbindungen und Verbundkonstruktionen gar nicht oder nur kostenintensiv lösbar sind. Ersteres ermöglicht eine sortenreine Rückgewinnung und ist daher wesentlich für ein hochwertiges Recycling. Ein weiterer Vorteil von lösbaren Verbindungen ist die vereinfachte Reparatur und Modernisierung, wodurch sie sich positiv auf die Dauerhaftigkeit des Bauwerks auswirken (slowing the loop). Auch die Wiederverwendung von Bauteilen wird durch lösbare Verbindungen ermöglicht. [2, S. 13]

Die VDI Richtlinie 2243 unterscheidet zudem in zerstörungsfrei lösbare, teilzerstörbare und zerstörende Verbindungen [25, S. 15]. Neben der Art der Verbindungen nimmt laut der Richtlinie auch deren Zugänglichkeit, Erkennbarkeit sowie Demontagezeit Einfluss auf die Rückbaubarkeit.

Eine weitere Unterscheidung von Verbindungen lässt sich auf der Basis der drei physikalischen Wirkprinzipien vollziehen: Formschluss, Kraftschluss und Stoffschluss [2, S. 43].

Beim Formschluss greifen zwei Verbindungspartner ineinander. Beispiele dafür sind Niete, Klettverschlüsse, Drehriegel oder Steckverbindungen aus dem Holzbau. Abb. 6 zeigt beispielhafte Steckverbindungen, die zerstörungsfrei und sortenrein lösbar sind.

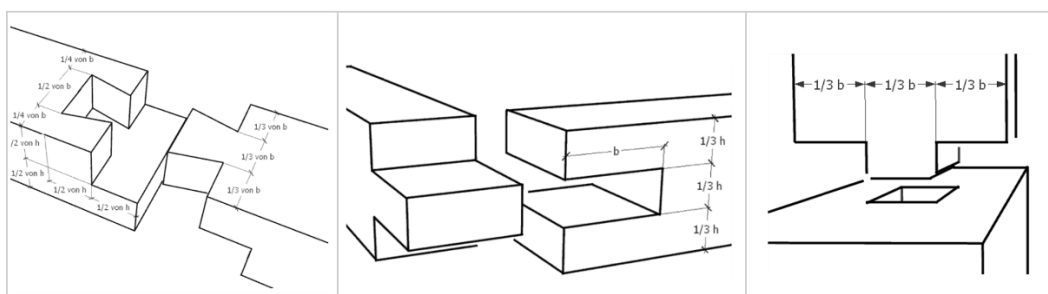


Abb. 6 Beispielhafte Steckverbindungen aus dem Holzbau: Schwalbenschwanz, Scherzapfen und Zapfen [28]

Der Kraftschluss entsteht durch das Einwirken einer Normalkraft und die daraus resultierende Haftreibung. Beispiele dafür sind Schrauben, Nägel, Bolzen oder lose Auflagen. Der Stoffschluss ergibt sich durch atomare oder molekulare Verbindungen der Verbindungspartner, wie zum Beispiel Kleben, Schweißen, Lötten oder Adhäsion. Stoffschlussverbindungen sind in der Regel nicht lösbar, wohingegen kraft- und formschlüssige Verbindungen mit Aufnahme der Niete lösbar sind. Die Einteilung in *lösbar* und *nicht lösbar* ist jedoch nicht immer möglich, da Faktoren wie Witterungseinfluss (Feuchteintrag, Frost und thermische Längenänderungen), Materialität der zu verbindenden Bauteile oder der Anzahl der Hilfsfügeteile Einfluss auf die Lösbarkeit nehmen können. [2, S. 43]

ISO 20877:2020 definiert weiterhin sieben Designprinzipien zur Förderung der Rückbaubarkeit in der Entwurfsphase (engl. Design for Disassembly, kurz Dfd) [29, S. 13]. Und wirft einen etwas breiteren Blick auf die für die Rückbaubarkeit notwendigen Entwurfsparameter. Prinzipien für die Umsetzung von Rückbaubarkeit sind demnach:

1. Leichte Zugänglichkeit zu Baukomponenten
2. Unabhängigkeit zwischen Gebäudeschichten zur Förderung des Austausches (Layerprinzip nach Brand [30])
3. Verzicht auf nicht notwendige Beschichtungen
4. Unterstützung von Wiederverwendung
5. Einfaches Bauen
6. Standardisierung (Dimensionen, Komponenten, Verbindungen)
7. Sicherheit beim Rückbau

Langlebiges Design

Langlebige Materialien und Produkte führen nach der zweiten CE-Strategie von Bocken zur Verlangsamung des Stoffkreislaufs. Dieser Einflussparameter kann jedoch dem der recyclingfähigen Materialwahl widersprechen. So hat beispielsweise eine Außenwand Holzbekleidung nach der Tabelle für Nutzungsdauern des BNB (Bewertungssystem für Nachhaltiges Bauen) eine zu erwartende Nutzungsdauer von 40 Jahren wohingegen Betonsteinplatten bis zu 50 Jahren genutzt werden können [31, S. 5]. Beton besteht dabei zu 100% nicht nachwachsenden Materialien und lässt sich zudem nur schwer recyceln (siehe Kap. 2.2.3).

Schadstofffreiheit

Entscheidend in welchem Maße die Rückgewinnung eines Baustoffes vollzogen werden kann, ist auch dessen Schadstoffbelastung. Schadstoffe mindern die Qualität des Recycling-Materials oder machen das stoffliche Recycling sogar unmöglich. Die Schadstofffreiheit von Baumaterialien ist also eine Grundvoraussetzung für geschlossene Kreisläufe [2, S. 61]. Ist zum Beispiel Bauholz mit Holzschutzmittel behandelt, lässt sich dieses bei Überschreitung der Schadstoffvorgaben aus der Altholzverordnung (siehe Kap. 2.3.2), nur noch energetisch verwerten. Die Belastung ist in manchen Fällen bei der Planung und Errichtung nicht bekannt oder kann aus bestimmten bautechnischen Gründen nicht umgangen werden [32, S. 47].

2.2.2. Abriss- und Rückbauphase

Die Qualität des Recycling-Baustoffes hängt von der Homogenität der durch den Abriss und Rückbau gewonnenen Stoffmasse ab [32, S. 63]. Ist die Masse homogen oder sogar sortenrein, kann mit geringem technologischem Aufwand ein Recyclingmaterial mit hoher Qualität hergestellt werden. Ist sie hingegen inhomogen, also besteht sie aus vielen verschiedenen Stoffen, so ist der Aufwand höher.

Die Sortenreinheit lässt sich zwar durch die Wahl der Materialität und Verbindungen schon beim Entwurf indirekt beeinflussen (Monomaterialität, Trennbarkeit). Die Art und Weise wie der Rückbau bzw. Abbruch erfolgt, spielt jedoch die Schlüsselfunktion hinsichtlich der Verwertung von Abbruch- bzw. Rückbaumassen [3, S. 50]. Denn je selektiver der Rückbau bzw. Abriss erfolgt, desto sortenreiner lassen sich die Materialien zurückgewinnen und die Qualitätsanforderungen an das Rezyklat erfüllen.

Abbruch- und Rückbauverfahren

Die Entsorgungsphase eines Gebäudes setzt sich zusammen aus dem Rückbau/ Abriss, dem Transport sowie der Abfallbehandlung bzw. -beseitigung. Schröder beschreibt in seinem Grundlagenbuch *Abbrucharbeiten* vier Abbruchmethoden nach ihrem aufsteigenden Separierungsgrad: konventioneller Abbruch, selektiver Abbruch, selektiver Rückbau und Demontage [33]. Tab. 1 zeigt einen Überblick über diese Methoden.

Abbruch- und Rückbaumethoden			
Konventioneller Abbruch <ul style="list-style-type: none"> • größte Form des Abrisses • Anwendung bei einfachen Konstruktionen • erfolgt meist durch Zertrümmern • keine vorige Entkernung und Separierung • nachträgliche Sortierung notwendig 	Selektiver Abbruch <ul style="list-style-type: none"> • häufigstes Verfahren Stand der Technik • mit voriger Entkernung • Sortierung des Baumaterials vor, nach und während des Abbruchs • selektive Erfassung aus wirtschaftlichen und entsorgungstechnischen Gründen 	Selektiver Rückbau <ul style="list-style-type: none"> • Baumaterialien werden vor dem Abbruch hochgradig sortenrein rückgebaut • hohes Maß an Handarbeit notwendig • hoher Zeit und Kostenaufwand 	Demontage <ul style="list-style-type: none"> • zerstörungsfreier Rückbau von Bauteilen in umgekehrter Montagefolge beispielsweise durch Lösen von Schrauben • hoher Separierungsgrad

Tab. 1 Überblick über Abbruchmethoden nach Separierung (eigene Darstellung, nach [2, S. 20, 34, S. 27])

Der konventionelle Abbruch stellt die größte Art der Beseitigung von Bauwerken dar. Gebäude werden dabei ohne vorherige Entkernung oder begleitende Separierung abgebrochen, was zu einer Vermischung der Materialien führt. Darauf folgt entweder eine nachträgliche Sortierung (maschinell/manuell) oder eine komplette Entsorgung als Baumischabfall. Aufgrund der hohen Entsorgungskosten findet diese Art des Abbruchs nur noch bei kleinen Objekten mit wenig unterschiedlichen Materialien statt. [3, S. 50]

In Deutschland ist selektiver Abbruch Stand der Technik, wobei das Bauwerk vor dem Abbruch strukturiert entkernt wird [34, S. 27]. Abbruchfraktionen können vor, während und nach den Abbrucharbeiten sortiert und erfasst werden. Die Wahl des Zeitpunkt der Sortierung wird nach wirtschaftlichen und entsorgungstechnischen Aspekten ausgewählt [33, S. 243]. Abb. 7 zeigt links ein Beispiel von selektivem Abbruch mittels Abbruchzange.



Abb. 7 Selektiver Abbruch mittels Abbruchzange (links), selektiver Rückbau von Installationen aus Mauerwerk (rechts) [3, S. 51]

Der selektive Rückbau entstand in den 1990er Jahren als Reaktion auf die Problematik von Gebäudeschadstoffen [33, S. 243]. Inzwischen wird er im Allgemeinen für einen hohen Selektierungsgrad verwendet [3, S. 51]. Hier werden die Materialien vor dem Abbruch der Tragkonstruktion hochgradig sortenrein rückgebaut und erfasst [33, S.

243]. Diese Rückbaumethode erfordert ein hohes Maß an Handarbeit und ist folglich mit einem hohen Zeit- und Kostenaufwand verbunden. Das Ergebnis ist jedoch ein hoher Grad an Sortenreinheit. Abb. 7 zeigt rechts den selektiven Rückbau einer Installation aus der Mauerwerkswand. Ein konsequenter selektiver Rückbau wird in Deutschland nur selten angewendet [3, S. 138].

Die vierte Abbruchmethode ist die Demontage. Bei dieser handelt es sich um das zerstörungsfreie Herauslösen von Bauteilen aus dem Bauwerk. Also den sorgfältigen Rückbau von Bauteilen in umgekehrter Montagefolge. Es wird vor allem beim Rückbau von Stahlkonstruktionen angewendet, die mittels Lösens von Schraubverbindungen oder Abtrennen von Schweißnähten demontiert und anschließend unbeschädigt wiederverwendet werden. Diese Methode kann ergänzend zu den anderen ausgeführt werden. [33, S. 244]

Die Wahl der Rückbau- bzw. Abbruchmethode sowie der dazugehörigen Verfahren, wird in der Regel dem Abbruchunternehmer überlassen. Der Bauherr haftet nach DIN 18007 lediglich für die ordnungsgemäße Entsorgung und nicht für die Qualität der Verwertung. [3, S. 52]

In Einzelfällen weist diese Norm jedoch auf die Notwendigkeit der Vorgaben bestimmter Abbruchverfahren hin. Die Vorgabe sei notwendig, sobald umwelttechnische Aspekte zu berücksichtigen sind [35, S. 21]. Verzichteten jedoch die Genehmigungsbehörde und der Bauherr darauf, wird das Abbruchunternehmen stets die wirtschaftlichste Methode wählen [3, S. 52].

Die Wirtschaftlichkeit des Rückbaus ist also ausschlaggebend für die Wahl der Methode und damit auch für ein hochwertiges End-of-Life-Szenario [2, S. 108]. Sie kann also als Einflussparameter für die Bewertung der Kreislauffähigkeit von Gebäuden gesehen werden. Die Kosten für den selektiven Rückbau setzen sich (neben baustellenspezifischen Kosten) zusammen aus: Kosten für den Arbeitsaufwand, Entsorgungskosten sowie eventuellen Erlösen aus der Verwertung [2, S. 108].

Neben dem Aufwand für den Rückbau spielt also der Restwert der Materialien mit in die Wahl der Methode hinein. Je niedriger der Arbeitsaufwand für den Rückbau und je höher der Restwert der Materialien, desto wirtschaftlicher ist der selektive Rückbau [2, S. 116].

2.2.3. Recyclingpotenzial von Baustoffen

Die Rückführbarkeit von Baustoffen in den Stoffkreislauf wird durch deren Materialeigenschaften bestimmt. Baustoffe lassen sich laut [2, S. 58] nach ihrer Recyclingfähigkeit in vier Stoffgruppen biotisch, fossil, mineralisch und metallisch einteilen. Im Folgenden werden die auf das Recycling bezogenen Eigenschaften der Stoffgruppen sowie die dazugehörigen wesentlichen Baustoffe erläutert. Der Überblick über den Anfall von Bauabfällen sowie den Verwertungsquoten ist dem Kapitel 2.1.8 zu entnehmen.

Biotische Baustoffe

Biotische Materialien sind sämtliche tierische und pflanzliche Stoffe, die nicht in fossile Rohstoffe umgewandelt werden [36]. Es handelt sich hier also um nachwachsende Rohstoffe (NaWaRo). Dazu gehören beispielweise Holz, Wachs oder Wolle. Unbehandelte biotische Materialien sind von Natur aus in geschlossenen Stoffkreisläufen. Sie verrotten an ihrem Lebensende und dienen dann der Natur als Nährstoff. Zudem sind sie theoretisch unendlich verfügbar. Sie sind also ganz im Sinne der Ressourcenschonung und Abfallvermeidung [2, S. 58].

Es ist jedoch zu beachten, dass diese Materialien aus nachhaltiger Bewirtschaftung stammen, so dass eine Kreislaufführung im Sinne eines ausgewogenen Verhältnisses der Entnahme und der benötigten Regenerationszeit gewährleistet ist. Auch die Gefahr durch eine übermäßige Kultivierung bestimmter Pflanzen und Tiere, andere Arten zu verdrängen, muss in Betracht gezogen werden.

Für Holz wird nachhaltige Bewirtschaftung bereits 1993 in der Helsinki-Deklaration [37, S. 1] definiert als: „ (...) Nutzung und Betreuung von Wäldern und Waldflächen auf eine Weise und in einem Ausmaß, welche deren biologische Vielfalt, Produktivität, Regenerationsfähigkeit und Vitalität erhält und ihre Fähigkeit, gegenwärtig und in Zukunft wichtige ökologische, wirtschaftliche und soziale Funktionen auf lokaler, nationaler und globaler Ebene zu erfüllen gewährleistet, ohne dass dies zu Schäden an anderen Ökosystemen führt“. Entsprechende Zertifikate für nachhaltige Waldwirtschaft: Wie PEFC ("Programme for the Endorsement of Forest Certification Schemes") und FSC (Forest Stewardship Council) sind freiwillig zu führen. In Deutschland beträgt der Anteil der zertifizierten Flächen 2021 79,2 % [36].

Holz wird in den meisten Fällen aufgrund der langsamen Verrottungszeit und dem guten Heizwert, energetisch verwertet [2, S. 61]. Abhängig von der Verunreinigung durch

Lacke, Holzschutzmittel oder Beschichtungen kann Holz in einer sogenannten Kaskadennutzung stofflich verwertet werden. Das heißt mehrmals hintereinander mit sinkendem Qualitätsniveau verwertet werden. Den Grad der erlaubten Verunreinigung wird in der Altholzverordnung festgeschrieben (siehe Kap. 2.3.2). In Deutschland werden von den jährlich anfallenden sieben Millionen Tonnen Altholz, etwa 30% (2,2 Mio. t) stofflich verwertet [38]. Die weitere Verarbeitung erfolgt zumeist in der Spanplattenindustrie. Aus kreislaufwirtschaftlicher Sicht ist die Kaskadennutzung von nachwachsenden Rohstoffen grundsätzlich positiv zu bewerten [2, S. 60].

Andere biotische Baustoffe, wie z.B. Schafschurwoll-, Stroh- oder Seegrasdämmung, lassen sich nach ihrer Verwendung in den biotischen Verwertungskreislauf der Verrottung in Kompostierungsanlagen zuführen. In dem Fall gilt die Bioabfallverordnung (Bio-AbfV). Sie gilt für alle Erzeuger und Besitzer von Bioabfällen. Es ist jedoch nicht geregelt, wie in Zukunft mit potenziell steigenden Bioabfallströmen aus der Baubranche umgegangen werden soll [2, S. 61].

Fossile Baustoffe

Fossile Materialien sind zwar erneuerbar, die Reproduktionsfähigkeit überschreitet jedoch bei Weitem den für das Bauwesen relevanten Zeithorizont [2, S. 61]. Daher wird ihre Verfügbarkeit als endlich eingestuft. Zu der Materialgruppe gehören zum Beispiel Kunststoffe auf Erdölbasis die im Bauwesen für Fenster, Abdichtungen oder Dämmung benutzt werden. Jährlich werden nach Angaben des deutschen Umwelt Bundesamtes (UBA), etwa 2,6 Tonnen davon im Bauwesen verbaut [39]. Nur der Verpackungssektor hat einen höheren Einsatz. Die breite Anwendung ist unter anderem auf die Flexibilität und Vielfältigkeit des Stoffes zurückzuführen. Kunststoffe sind jedoch inert, das bedeutet sie sind kaum einer Mineralisation unterworfen [40]. Man geht davon aus, dass sie stetig kleinteiliger werden (Microplastik), sich jedoch nie vollständig zersetzen. Im Bauwesen eingesetzt, erreichen sie, in den meisten Fällen nicht die erwünschte Lebensdauer von 50 Jahren. Die Verwertung ist teilweise möglich, die Qualitätsunterschiede sind jedoch stark von der verwendeten Art anhängig [2, S. 56]. Thermoplaste, sind die einzigen erdölbasierten Kunststoffe die recyclingfähig sind [41, 91ff]. Darunter auch der im Bauwesen weit verbreitete Kunststoff PVC (Polyvinylchlorid). 2016 betrug der Branchenanteil der jährlichen PVC Produktion 60% [42, S. 29]. Dieser lässt sich in eigens entwickelten Recyclingverfahren gut recyceln. Der Einsatz des Stoffes ist jedoch aus gesundheitlicher Sicht problematisch. Eine Studie des UBA aus dem Jahr 2011, belegt dass PVC-Bodenbeläge und PVC-Tapete karzinogene, mutagene und

reproduktionstoxische Stoffe beinhalten. Zudem kann es im Falle von Brand zu schweren Dioxinverseuchungen kommen. Daher soll, trotz guter Recyclingfähigkeit, vom Einsatz von PVC abgesehen werden [2, S. 62].

Auch bei Kunststoffen ist die Sortenreinheit entscheidend für die Recyclingfähigkeit. Es fehlt derzeit jedoch noch an geeigneten Vorgaben für das Recycling von Kunststoffen, sodass diese aktuell häufig als Baumischabfälle entsorgt werden [39]. Sie müssen nach der Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV) getrennt in den Gruppen: Kunststoffe, Bitumengemische und Dämmmaterial gesammelt werden. Doch gerade das Dämmmaterial (z.B. WDVS) besteht häufig noch aus anderen Stoffen, wie Stein- oder Glaswolle. So kommt es zu einer dem Recycling erschwerenden werkstofflichen Durchmischung [43, S. 80]. Kunststoffe werden nach ihrer Nutzung im Bauwesen daher häufig verbrannt. Nach Angaben des Umwelt Bundesamtes lag 2019 die branchenübergeordnete Recyclingquote bei 46,6% [44]. Mehr als die Hälfte (52,8%) wurde verbrannt und 0,6% beseitigt.

Metallische Baustoffe

Eine sehr gute Recyclingfähigkeit hat die Gruppe der metallischen Materialien. Sie lassen sich theoretisch, abhängig von der Legierung und dem Grad der Verschmutzung, unendlich oft recyceln. Dabei ist dies in vielen Fällen mit deutlichen Einsparungen bei den Kosten und dem Energiebedarf verbunden [42, S. 36]. Metalle stammen aus langfristigen natürlichen Prozessen und vererden am Ende ihrer Lebenszeit. Gemessen an der Erneuerungszeit zum menschlichen Zeithorizont, sind sie als endlich einzustufen. Zu den im Bausektor am häufigsten eingesetzten Metallen gehören: Baustahl, Aluminium und Kupfer. Das Recycling von Baustahl findet eine breite Anwendung. Rund 99% werden recycelt oder direkt wiederverwendet. Magnete dienen dazu, das Material aus der Abbruchmasse von Bauwerken getrennt zu sammeln. Auch Kupfer wird sehr häufig recycelt. Etwa 90% des in der zivilen Infrastruktur eingesetzten Kupfers ist heute noch im Gebrauch [45]. Dies ist auf das geringe Kupfervorkommen und den damit verbundenen hohen Anschaffungspreisen für das Primärmaterial zurückzuführen. Kupferrecycling spart im Vergleich zur Primärrohstoffgewinnung 85% Energie und 33% CO₂ ein [45].

Aluminium findet seine breite Anwendung im Fenster- und Fassadenbau. Auch dieses Metall lässt sich sehr gut recyceln. Allerdings wird heutzutage, trotz hoher Recyclingrate, im Bauwesen immer noch häufig Primäraluminium verwendet. Das ist auf die

vielen verschiedenen Legierungen, die je nach Einsatzort und Anforderungen benötigt werden, zurückzuführen. Durch das Recyceln kann der hohe Energieverbrauch und CO₂ Ausstoß, der bei der Herstellung von Primäraluminium entsteht, um 95% gesenkt werden. [42, S. 36]

Das Recycling von Metallen spart neben Kosten, Energie und CO₂ auch enorme Mengen an Wasser und Fläche ein. Deutschland ist zudem aufgrund seines geringen Vorkommens an Eisenerzen fast ausschließlich auf Importe angewiesen. Diese stammen häufig aus Ländern, die als politisch und wirtschaftlich instabil gelten. Dem nahezu perfekt funktionierenden Recycling ist also eine hohe Bedeutung beizumessen [2, S. 61].

Mineralische Baustoffe

Mineralische Materialien sind genau wie metallische endlich und stammen aus natürlichen Prozessen, an deren Ende die Vererdung steht. [2, S. 59] Ein gravierendes Beispiel für die Endlichkeit von mineralischen Ressourcen ist Sand. Er wird im Bauwesen hauptsächlich für die Herstellung von Beton, aber auch als Zuschlag für Putz, Mörtel und Asphalt verwendet. Nach Wasser ist Sand die weltweit am stärksten genutzte Ressource. Der weltweite Sandverbrauch beträgt laut eines Berichts des *United Nations Environment Programm* (UNEP) mehr als 50 Mrd. Tonnen pro Jahr [46, S. 21]. Die Nachfrage hat sich in den letzten 20 Jahren verdreifacht. Die Folgen für die Küsten und Flusslandschaften, sind laut UNEP drastisch. Es wird dem Bericht der UNEP zufolge zwangsläufig zu mehr Überschwemmungen sowie Artensterben kommen. Hauptgrund für den Anstieg des Sandverbrauchs ist die Zunahme der weltweiten Bautätigkeit.

Mineralische Materialien werden oftmals als Verbundwerkstoffe wie Beton und Mauerwerkstoffe eingesetzt. Das Abbruchmaterial wird lediglich als Füllmaterial im Straßenbau verwendet (Downcycling) oder deponiert [47]. Dafür gibt es im Wesentlichen drei Ursachen: Die Heterogenität des Abbruchmaterials, das Gipsstreiben und die Feinfraktion. Die Gipsanteile im Bauschutt erschweren die hochwertige stoffliche Verwertung. Die darin enthaltenen Sulfate können in Verbindung mit Wasser und anderen reaktionsrelevanten Stoffen, aufquellen und Gefügestörungen verursachen. Die Belastungsfähigkeit des Sekundärmaterials, wäre durch das sogenannte Gipsstreiben stark beeinträchtigt [47].

Die notwendige gütergesicherte Aufbereitung von mineralischem Abbruchmaterial zu Recyclingbaustoffen, verursacht durch mechanische Beanspruchung einen erheblichen

Anteil an Feinfraktion (< 2mm). Diese erschwert äußerst die Weiterverarbeitung des Materials und enthält eine erhöhte Konzentration an Stoffkomponenten, die für die anspruchsvolle Verwendung nachteilig ist: geringfeste Bestandteile, Gipsanteile, Zementanteile. [48, S. 29]

Der meistbenutzte Baustoff mit einem Anteil von 40 Massen-% in Deutschland ist Beton [48, S. 21]. So spielt sein Recyclingpotenzial hinsichtlich Ressourcenschonung eine besonders wichtige Rolle. Beton ist ein Gemisch aus Zement, Gesteinskörnung (Sand u. Kies) sowie Wasser. Weiterhin können Zusatzmittel und Zusatzstoffe sowie Fasern hinzugefügt werden. Für die Zement- und Betonherstellung werden enorme Energiemengen benötigt (z. B. Zement mit ca. 4000 MJ/t, Beton ca. 7000 MJ/t,) [2, S. 62]. Zwei Drittel des Betons besteht aus Sand [49]. Die stoffliche Verwertung am Lebensende ist eingeschränkt. Nur 40% der Gesteinskörnung hat, laut einer Untersuchung des BBSR, die benötigte Korngröße, um wiederverwendet zu werden. Die restlichen 60% unterliegen einem Downcyclingprozess und werden als Schüttgut für Trag- und Frostsichten eingesetzt [50, S. 65]. Ein weiteres Problem sind die Transportkosten von Recyclingbeton. So lohnt sich dessen Einsatz derzeit nur, wenn die Sekundärquelle unmittelbar in der Nähe der Neubaugstelle liegt (z.B. On-site-Recycling) [2, S. 70]. Derzeit werden deutschlandweit nur 0,6% und EU-weit 6% des Betonabbruchs in Form von Recycling-Gesteinskörnung für neuen Beton verwendet und findet bislang nur bei Betonen bis Festigkeitsklasse C 30/37 Anwendung.

Entgegen der oben genannten Untersuchung ist Fees, ein 2018 mit dem Umweltbundespreis ausgezeichnete Experte für Baustoffrecycling, der Meinung, dass bis zu 90% des Kieses und des steinhaltigen Materials wieder einsetzbar wäre. Es fehle Architekten jedoch an Fachwissen, um den Recyclingbeton einzusetzen, er fordert daher Weiterbildung und plädiert für weitere Pilotprojekte für die Erkundung von Substitutionsmöglichkeiten durch den RC-Beton.[51]

Es existieren schon seit Jahren technische Verfahren, wie die elektrodynamische oder elektrohydraulische Fragmentierung, die das Zerlegen von Beton in Zement und Kies ermöglichen [52]. So wird statt gebrochenem Material Rundkies gewonnen. Allerdings sind diese Verfahren noch nicht im großen industriellen Maßstab umsetzbar. Übrig bleibt auch das Problem der fehlenden Möglichkeit der Rückgewinnung von Zement. Dieser muss derzeit noch zur recycelten Gesteinskörnung neu zugemischt werden.

2.2.4. Rückbaubare und recyclingfähige Baukonstruktionen

Das Recyclingpotenzial muss aufgrund der Bedeutung der Fügetechnik für die Rückbaubarkeit und ein hochwertiges Recycling auch auf der Ebene der Bauteile betrachtet werden. Im Folgenden wird als Beispiel für eine gut rückbaubare und recyclingfähige Bauweise, die Massivholzbauweise vorgestellt.

Im Laufe der letzten Jahre wurden einige Systeme für Massivholzwände und Decken auf den Markt gebracht, die ganz ohne Klebstoffe oder Metallfügeteile auskommen und folglich sortenrein dem Recycling zugeführt werden können [2, S. 48]. Sie nutzen dabei traditionelle Fügemethoden aus dem Holzbau, die durch ein geometrisches Ineinandergreifen der Verbindungspartner (Formschluss), oder durch den Einsatz monomaterielle Fügeteile (z.B. Holzschrauben) gefügt sind. Diese Systeme sind meist winddicht und diffusionsoffen und daher ohne Folien ausgeführt. Die Dämmung kann, je nach System, innen, außen oder innerhalb des Systems angebracht werden. Die Verbindung der Wandelemente untereinander, sowie zu den Decken kann dabei durch große Schrauben oder Stahlwinkel erfolgen.

Ein Beispiel für solch ein System, ist die Vollholzwand des Herstellers Holzius. Sie besteht ganz aus Holz und ist leimfrei ausgeführt [53]. Dazu werden nebeneinanderstehende Bretter mit einer mehrfachen Nut-Feder-Verbindung zu einem Brettstapelwandelement (siehe Abb.8) gefügt. Um die gewünschte Dicke für die Erreichung von Luft- und Winddichtigkeit zu erlangen, werden drei solcher Elemente mit einer ebenfalls formschlüssigen Schwalbenschwanzverbindung gefügt. Mit im Sortiment des Herstellers sind auch Vollholzdecken. Diese werden ebenfalls leimfrei durch den Einsatz der Nut-Feder-Verbindung gefügt und können untereinander und mit den Wänden mit Holzschrauben verbunden werden.

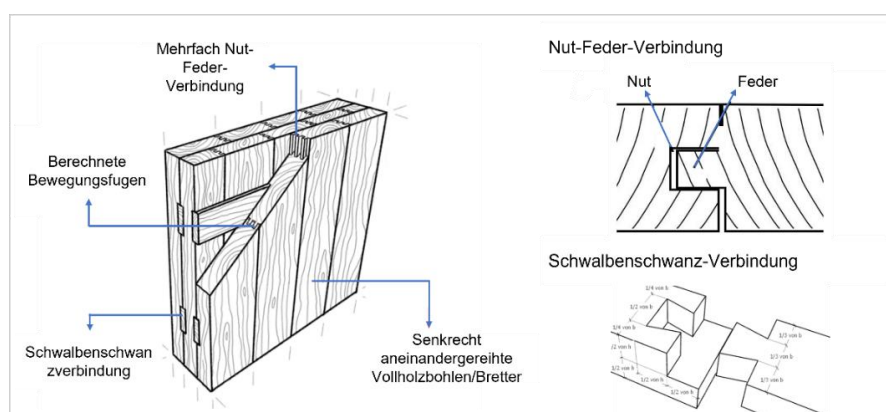


Abb. 8 Wandaufbau Vollholzwand von Holzius [53, S. 21]

2.2.5. Verwertung in der Praxis

Abfallaufkommen

Die Grenze der Wiederverwendung bzw. Weiterverwendung und den anderen Nutzungsszenarien bildet nach dem KrWG der Abfallbegriff [23, § 3]. Alle zurückgebauten Materialien, die nicht der Wiederverwendung und Weiterverwendung zugeführt werden, sind als Abfall zu deklarieren. Bau- und Abbruchabfälle machen in Deutschland 2018 mit 218,8 Millionen Tonnen 52% des gesamten Abfallaufkommens aus [54].

In der Baupraxis fallen Abfälle in den Fraktionen: Bodenaushub, Straßenabbruch, Bauschutt, Baustellenabfälle und Baustellenabfälle auf Gipsbasis an. In Abb. 9 sind die praxisüblichen Fraktionen mit ihren Anteilen abgebildet. Boden und Steine machen mit 59,6% den größten Teil aus. Gefolgt von Bauschutt mit 27,3 %, dazu gehören die Baustoffe: Beton, Ziegel, Fliesen, Keramik sowie deren Gemische. An dritter Stelle stehen der Straßenaufbruch und die Baustellenabfälle mit jeweils 6,4%. Zu den Baustellenabfällen zählen: Holz, Glas, Kunststoffe, Metalle, Dämmmaterial sowie deren Gemische.

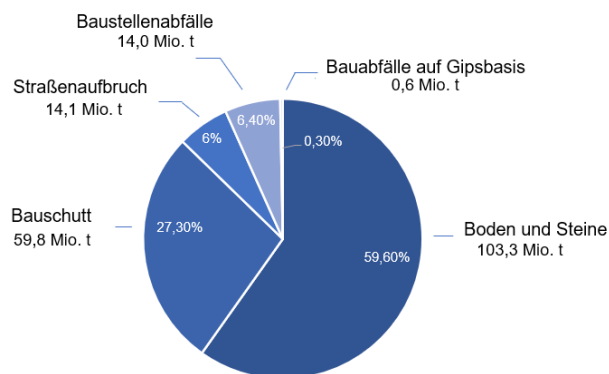


Abb. 9 Bau- und Abbruchabfälle 2018 in Fraktionen [55]

Verwertungsquoten

Die Initiative Kreislaufwirtschaft Bau, veröffentlicht im zweijährigen Turnus Statistiken über mineralische Abfälle und deren Verbleib. Von den 218,8 Mio. t nicht gefährlichen Bau- und Abbruchabfällen wurden im Jahr 2018 demnach 89,7% verwertet [55, S. 12]. Mit in die Verwertung wird aber auch die *sonstige Verwertung* einbezogen. Dabei handelt es sich insbesondere um die Verfüllung von zum Beispiel Bauschutt und Bodenabfällen in Gruben des Tagebaus [2, S. 12].

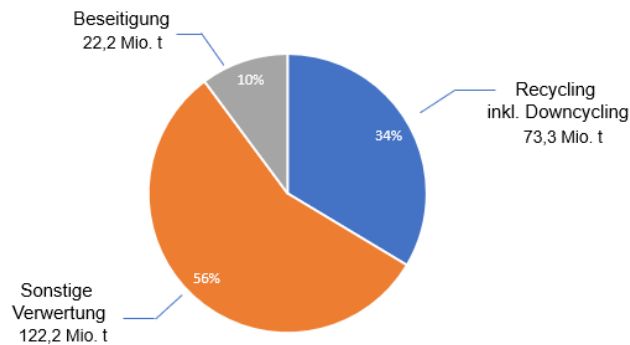


Abb. 10 Verbleib von Bau- und Abbruchabfällen 2018 (eigene Darstellung, nach [55])

Unterscheidet man zwischen Recycling, sonstige Verwertung und Beseitigung so wurden 2018 lediglich 34% (73,3 Mio. t) der Bauabfälle recycelt, 56% (122,7 Mio. t) wurden der sonstigen Verwertung zugeführt und 10% (22,2 Mio. t) entsorgt (siehe Abb. 10).

Boden und Steine machen ca. 60% des Bau- und Abfallaufkommens aus. Der größte Teil davon wird zur Verfüllung von Gruben verwendet (76%), aus 10,2% wurden Recycling-Baustoffe hergestellt [55, S. 7]. Der Rest wurde in Deponien beseitigt (siehe Abb. 11). Betrachtet man die Abfälle aus dem Hochbau, so bildet Bauschutt, also Beton, Ziegel, Keramik etc, den weitaus größten Anteil. Dieser wurde 2018 laut Statistik zu 93,9 % recycelt. Davon wurden 77,9% im Sinne des Downcyclings gebrochen und als Gesteinskörnung, vorwiegend im Straßenbau, eingesetzt. Ein geringer Teil der RC-Gesteinskörnung wurde 2010 für die Herstellung von Betonen verwendet [2, S. 19]. Dies ist jedoch nur unter Zugabe von neuem Zement möglich. Es handelt sich hier ebenfalls um keinen geschlossenen Kreislauf. Die restlichen 16% des Bauschutts wurden verfüllt und 6,1% beseitigt.

Zu der Fraktion von Baustellenabfällen gehören Holz, Kunststoff, Glas sowie Dämmstoffe. Im Jahr 2018 bestanden diese rund 50% aus Eisen und Stahl, 20% aus Altholz und 5% aus Glas, Kunststoff, Metall und Dämmmaterialien. Die angefallenen 14 Mio. t wurden insgesamt gesehen zu 96,9% der sonstigen Verwertung zugeführt, also zumeist thermisch verwertet. Der Rest wurde etwa zu gleichen Teilen recycelt oder beseitigt. Derzeit werden die einzelnen Recyclingmengen, der aus den Baustellenabfällen stammenden Materialien (Glas, Holz, Kunststoffe oder Dämmmaterialien) nicht im *Kreislaufwirtschaft Bau Monitoring* amtlich erfasst. [55, S. 9]

Verwertungsquoten von Bauabfällen im Jahr 2018

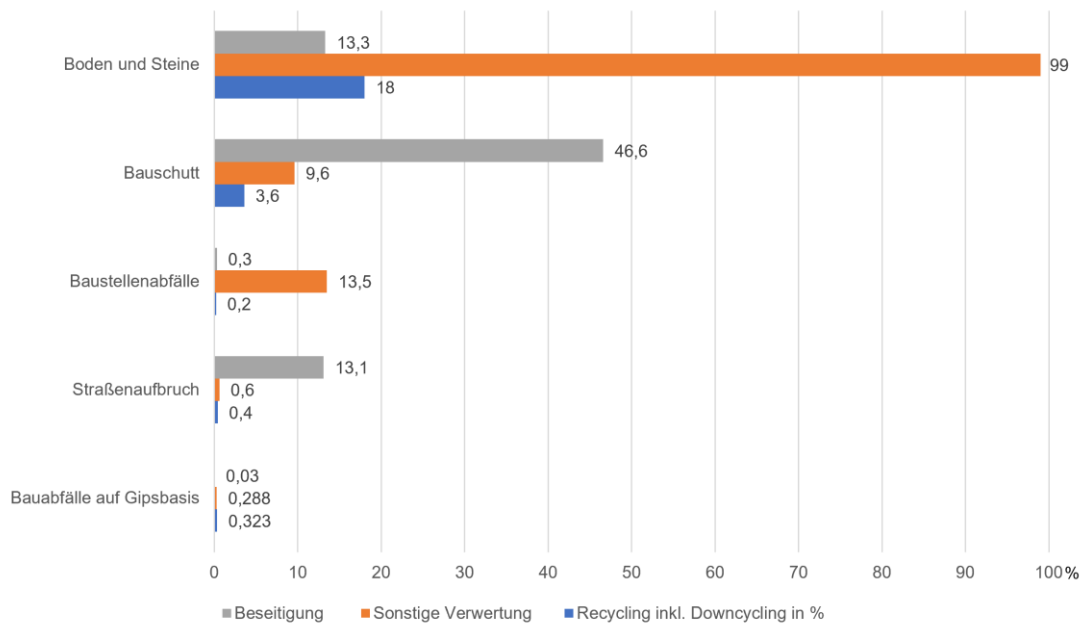


Abb. 11 Verwertungsquoten nach Abfallfraktionen (eigene Darstellung, nach [55])

Das Recycling von Abbruchabfällen aus dem Straßenbau wird häufig angewendet. Mehr als 90% der Abbrüche werden im Sinne des Downcyclings verwertet, nur 4% verfüllt und 2% beseitigt. Rund 50% Gipsabfälle werden derzeit beseitigt. Etwa 45% werden im Deponie- und Bergbau verfüllt und nur 4,7% minderwertig recycelt. [55, S. 8]

Wiederverwendung

Vor der Industrialisierung war die Wiederverwendung von Bauteilen eine pragmatische Praxis. Es bestand keine klare Arbeitsteilung zwischen Planen und Bauen. Mit dem Material musste in gewissem Sinne haushälterisch umgegangen werden. Heute ist Bauen komplex. Schallschutz, Brandschutz und Denkmalschutz sind nur einige Bereiche, die mit in die Planung eingehen. Zudem sind die Zeit und das Budget knapp. Planer und Bauherren nutzen die Möglichkeit Bauteile präzise und termingerecht fertigen zu lassen. [56, S. 59]

Derzeit ist die Wiederverwendung von Bauteilen europaweit nicht etabliert und findet nur im geringen Umfang statt [24, S. 12]. Etwa 1% der heute in Neubauten eingesetzten Materialien sind wiederverwendet [57, S. 79-89].

In Europa existieren schon seit einigen Jahren verschiedene Bauteilbörsen, die sich allerdings vorwiegend mit dem Verkauf von historischen Bauteilen beschäftigen. Dort werden hauptsächlich hochwertige Ein- und Ausbauelemente, wie Türen, Fenster

und Sanitärgegenstände verkauft. Diese stammen zumeist aus der Gründerzeit. In Deutschland ansässige Bauteilbörsen werden im Bundesverband Bauteilnetz e.V. zusammengeschlossen. Die Schweiz hat ihre Bauteilbörsen auf der Plattform *Bauteilclick* zusammengefasst. [24, S. 29]

Die Probleme solcher Bauteilbörsen liegen bei den hohen Kosten für Lagerung und Ausbau sowie die Unsicherheit über den tatsächlichen Verkauf von Bauteilen. Voraussetzung für eine Nachnutzung ist der selektive Rückbau der Bauteile, sowie die anschließende Reinigung. Der Ausbau wird in den meisten Fällen durch die Bauteilbörsen organisiert. Die Kosten für den Abbruch werden jedoch häufig pauschal mit dem Abbruchunternehmen abgerechnet. Anschließend werden die Bauteile bis zu ihrer neuen Nutzung eingelagert. [58, S. 12]

Eine digitale und online basierte Lösung für die Kosten und Lagerproblematik bieten in den letzten Jahren entstandene Onlineplattformen wie Concular und SALZA.

Das Prinzip, von der aus der Schweiz stammenden Plattform SALZA basiert darauf, Bauteile von der Abbruchbaustelle direkt zum Neubauprojekt zu transportieren. Verfügbare Bauteile werden durch SALZA noch vor dem Ausbau online, inklusive technischer Daten, aufgelistet. Und nur im Fall eines real existierenden Bedarfs ausgebaut. Neben der Kostenersparnis für Lagerung minimiert dies auch das Risiko nicht verkaufter aber bereits ausgebaute Bauteile. Die Größe der Plattform und die Wartezeit für Bauteile führt derzeit dazu, dass SALZA lediglich von kleinen private Einzelprojekten genutzt wird [24, S. 29]. Sie organisieren die Demontage und Abholung selbst. Von etwa 3200 jährlichen Abbrüchen in der Schweiz werden 30 auf die Plattform geladen. Aktuell befinden sich durchschnittlich 100 Bauteile online, darunter hauptsächlich: Möbel, Heizungen, Fenster und Türen. Davon werden derzeit etwa 20% verkauft. Der Nutzer hat ergänzend die Möglichkeit eine Benachrichtigung zu aktivieren, sobald ein Bauteil zu Verfügung steht. Rückbau und Verkauf von größeren Bauteilen sind aufgrund der höheren Risiken unwirtschaftlich. Für den Rückbau müssen in der Regel Abbruch- und Rückbauunternehmen beauftragt werden, die den Preis bestimmen.

Etwas weiter verbreitet ist die Plattform *Restado*. Sie ist nach eigenen Angaben die größte Bauteilbörse Deutschlands [59]. Bei Restado können Händler ihre Baustoffe anbieten und diese nach Anfrage über die Plattform an den Käufer versenden. Sie funktioniert also nach dem Prinzip anderer Gebrauchsgüterplattformen wie Ebay oder Hood. Neben den Baustoffen und Bauteilen, wird auch Beratung für nachhaltige Bauprodukte

angeboten. Für private Nutzer ist die Plattform kostenlos, gewerbliche Nutzer zahlen 8% des Verkaufserlöses.

Eine Weiterentwicklung von Restado ist die Plattform *Concular* [60]. Das Angebot der Webseite richtet sich an Architekten und Planer. Ähnlich wie bei SALZA werden die Bauprodukte noch vor ihrem Ausbau digital erfasst. Dazu erstellt Concular ein Jahr vor Abbruch eines Gebäudes digital einen Gebäudematerialpass. Darin enthalten sind alle wiederverwendbaren Bauteile mit den dazugehörigen technischen Kennwerten. Architekten können so auf der Plattform einsehen, welche Bauteile zur Verfügung stehen und diese in den frühen Planungsprozess einbeziehen. Concular übernimmt dann die Abriss- und Rückbauplanung des Gebäudes und kann auf die Nachfrage reagieren. Mit Schadstoff belastete Bauteile werden in Prüflaboren getestet. Die Kosten für Rückbau, Transport und die Gewährleistung werden ebenfalls von dem Unternehmen getragen. Dabei wird dem Gebäudebesitzer die digitale Erfassung des Objekts pro m², sowie ein Mitgliedschaftsbeitrag bis zum Abriss des Gebäudes (i.d.R. 12 Monate) berechnet. Zudem berechnet Concular eine Provision auf den Verkaufserlös. Laut Gründer ist das Modell kostentragend und lukrativer als ihre parallellaufende Plattform Restado.

Es bleiben jedoch einige Hürden für die Etablierung der Wiederverwendung von Bauteilen [24, S. 37]. Sie sind neben den Vorurteilen zur Qualität der Bauteile, in den rechtlichen Bedingungen zu finden. Zum Beispiel ist die Wettbewerbsfähigkeit der alten Bauteile gegenüber den neuen durch eine erforderliche Einzelzulassung erschwert. Nach Meinung von John, Expertin für Wiederverwendung im Bauen an der Hochschule Konstanz, wird nicht genau erwogen, ob diese Einzelzulassungen notwendig seien [24, S. 37]. So können Backsteine aus Vorsatzschalen problemlos ohne Prüfung wiederverwendet werden. Weitere Probleme der Auflage stellen sich bei der Prüfung von Stahlträgern auf ihre Tragfähigkeit dar. Dabei werden diese mindestens erheblich beschädigt, eine Wiederverwendung ist in diesem Fall also nicht möglich. Die Einzelzulassung ist im privaten Bereich nicht notwendig, so sind die Preise bei Restado streckenweise um 50% günstiger.

2.3. Gesetzliche Rahmenbedingungen

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die für das Bauwesen relevanten rechtlichen Grundlagen für Rückbau, Recycling und Abfall. Es bezieht sich auf deutsche sowie europäische Regelungen. Ziel des Kapitels ist es, die gesetzlichen Rahmenbedingungen

zur Förderung der Kreislaufwirtschaft zu analysieren sowie den möglichen Hintergrund der niedrigen Verwertungsquoten aus dem Bauwesen zu ermitteln.

Im Juni 2020 hat die Bundesregierung das deutsche Ressourceneffizienzprogramm ProgRess III beschlossen. Das Hauptziel des Programms, ist die Entkoppelung von Wirtschaftswachstum und Rohstoffeinsatz. Ein wichtiger Indikator zur Messung dieser Entkoppelung ist die Gesamtrohstoffproduktivität. Zur Steigerung der Rohstoffproduktivität, wird der Bundestag aufgefordert eine Reihe von Maßnahmen zu ergreifen. Darunter auch die Verabschiedung von Gesetzen und Richtlinien zur Förderung der Kreislaufwirtschaft. Sie gibt Auskunft darüber, wie viel Wertschöpfung in einem bestimmten Zeitraum pro Tonne Rohstoffeinsatz erwirtschaftet werden. [61, S. 23]

Das Ziel des vorigen Ressourceneffizienzprogramms (ProgRess II) ist die Steigerung der Gesamtrohstoffproduktivität um 30% bis zum Jahr 2030 im Vergleich zu 2010. Das entspricht einer jährlichen Steigerungsrate von 1,5%. Das Wachstum im Zeitraum von 2010 bis 2018 lag laut UBA jedoch lediglich bei 1%. [62]

2.3.1. Bauproduktverordnung

Seit März 2011 gilt in der EU die Bauproduktverordnung (EUBauPVO) [63]. Diese legt Grundanforderungen an Bauwerke, sowie wesentliche Merkmale von Bauprodukten fest. Sie bildet die rechtliche Grundlage für die CE-Kennzeichnung von Bauprodukten und die Leistungserklärung der Hersteller. Bauwerke müssen nach dieser Verordnung so entworfen, errichtet und abgerissen werden, dass natürlichen Ressourcen geschont werden. Das Bauwerk und die darin verbauten Baustoffe und Bauteile, müssen nach dem Abriss wiederverwendet oder weiterverwertet werden können. Die Nutzung von umweltverträglichen Rohstoffen sowie Sekundärbaustoffen ist ebenfalls vorgeschrieben [63, S. 10]. Darin enthalten sind jedoch keine Anforderungen an die Qualität oder Quantität des Recyclings [2, S. 16]. Baustoffe und Bauteile sollen so gewählt bzw. entworfen werden, dass die Dauerhaftigkeit dieser gewährleistet ist.

2.3.2. Abfallrecht

Das Ziel der Abfallpolitik ist es, Abfall zu vermeiden und zu verwerten [64]. Neben technischen, gesellschaftlichen und politischen Rahmenbedingungen existiert in Deutschland das Abfallrecht mit zahlreichen Gesetzen, Richtlinien und Verordnungen. Im Folgenden werden die für das Bauwesen relevantesten gesetzlichen Regeln erläutert.

Abfallrahmenrichtlinie

Das Abfallrecht ist auf europäischer Ebene durch die Abfallrahmenrichtlinie (AbfRR) vom 19. November 2008 geregelt. Sie definiert Vorgaben für politische Maßnahmen, die den Übergang in eine Kreislaufwirtschaft schaffen sollen. Siehe Abb. 12 zur Einordnung des Abfallrechts zu den Ebenen der Gültigkeit.

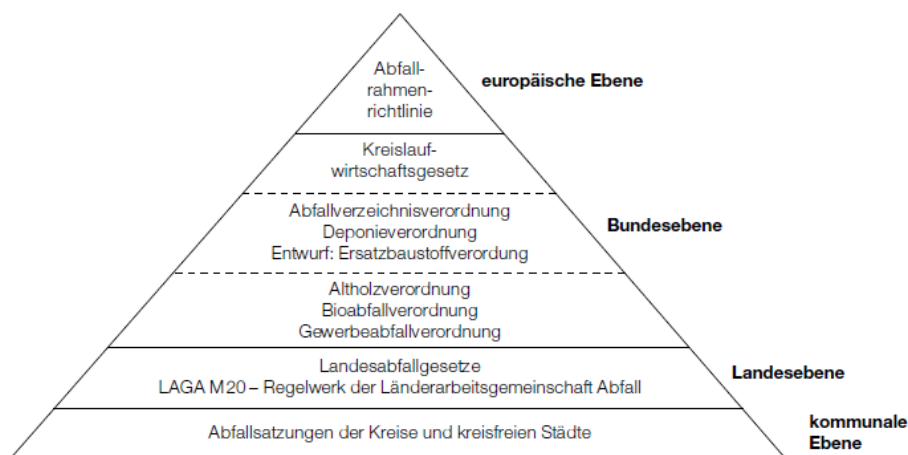


Abb. 12 Ebenen des Abfallrechts mit Relevanz für Rückbau und Recycling im Bauwesen [2, S. 17]

Ein elementarer Bestandteil der Richtlinie ist die neue fünfstufige Abfallhierarchie aus dem Jahr 2008 [65, Art. 5]. An oberster Stelle der Hierarchie steht die Abfallvermeidung. Der Hersteller wird dazu verpflichtet, bereits beim Produktdesign auf rohstoffarme Gestaltung und Herstellungsverfahren zu achten. So können zum Beispiel große Verschnitte, durch ein entsprechendes Design, vermieden werden. An zweiter Stelle der Hierarchie, steht die Wiederverwendung und ihre Vorbereitung (z.B. durch Reinigung). Ein Beispiel dafür kann die Nutzung von Mehrwegsystemen sein. Die nächste Priorität gilt dem Recycling, also der stofflichen Verwertung. Ist diese nicht möglich, so kann der Abfall sonstigen Verwertungswegen zugeführt werden, beispielsweise der energetischen Verwertung. Am Ende der Hierarchie steht die Beseitigung auf der Deponie.

Um die Kreislaufwirtschaft weiter zu fördern, wurde die europäische Abfallrahmenrichtlinie 2018 novelliert. Darin enthalten sind fünf für das Bauwesen relevante Änderungen [3, S. 40-42]. Eine wichtige Änderung betrifft den selektiven Abbruch. Laut Artikel 11 Absatz 1 sollen Bau- und Abbruchabfälle in der Zukunft in allen Mitgliedstaaten in folgende fünf Rohstoffgruppen einheitlich getrennt werden: Holz, mineralische Fraktionen (Beton/Back- und Ziegelstein/Fliesen/Keramik/Steine), Metall, Glas und Gips [66, Art. 11 Abs. 1].

Dies soll ein *hochwertiges Recycling* ermöglichen, sowie eine Entsorgung von gefährlichen Stoffen sichern. Die 2017 in Deutschland erlassene Gewerbeabfallverordnung geht jedoch bereits über die genannte Stofftrennung der EU-Verordnung hinaus.

Nach Ansicht von Rosen – Expertin für Kreislaufwirtschaft im Bauwesen – geht diese Änderung nicht weit genug. Zum einen sei das hochwertige Recycling nicht klar definiert, zum anderen sei ein höherer Selektierungsgrad erforderlich, als jener der genannten Stoffe [3, S. 40-42]. Die letzte relevante Änderung betrifft die Verwertungsquoten. Siedlungsabfälle müssen laut der Novellierung schrittweise bis 2023 zu 65 Gewichtsprozent für die Wiederverwendung und das Recycling vorbereitet werden. Der Rest darf weiterhin verbrannt und deponiert werden. Für Bau- und Abbruchabfälle werden keine Erhöhungen vorgesehen. Aber für Ende 2024 wird eine neue Zielvorgabe für die Wiederverwendung und das Recycling in Betracht gezogen.

Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)

Die Abfallrahmenrichtlinie wird in Deutschland auf nationaler Ebene im Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) umgesetzt. Die Novellierung 2018 betrifft auch dieses Gesetz. Auf nationaler Ebene wurde bei nicht gefährlichen Bau- und Abbruchabfälle mit Ausnahme von Boden, bis 1. Januar 2020 eine Verwertungsquote von 70% gefordert [23, § 14].

Die Novellierung geht jedoch nach Ansicht von Experten nicht weit genug. Kurth vom *Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft e.V.*, kritisiert den Verzicht auf die vom Bundesumweltministerium initiierte *Minimal Content* Rezyklat-Initiative [67]. Diese sah eine Verankerung eines minimalen Anteils an Sekundärstoffen in bestimmten Produkten vor. Eine wirkliche Rohstoffwende könne nur gelingen – so Kurth – wenn es einen legislativen Dreiklang aus nachhaltiger Beschaffung, Recyclinglabel und Minimal Content gibt.

Auch nach der Ansicht des Zentralverbands Deutsches Baugewerbe (ZDB) und des Deutschen Abbruchverbandes (DA) geht das aktuelle Kreislaufwirtschaftsgesetz nicht weit genug [68]. Eine konditionierte Bevorzugungspflicht für Recyclingmaterialien in öffentlichen Bauvorhaben, würde den Bund stärker in die Verantwortung ziehen. Das könne nur gelingen, wenn dies nicht mit unzumutbaren Mehrkosten verbunden wäre und somit die Vergabe beeinflussen würde, resümiert Pakleppa der Hauptgeschäftsführer des ZDB. Zudem verpasse die Novellierung, so Pocher, Geschäftsführer des DA,

die Bauherren in die Pflicht zu nehmen. Diese sollten schon in der Planungsphase zu einem kosten- und ressourceneffizienten Entsorgungskonzept, mit einer möglichst hohen Recyclingquote verpflichtet werden.

Nach Ansicht von Miller, Bundesgeschäftsführers des Naturschutzbundes (NABU), fehlen im Gesetz verbindliche Vermeidungsziele. Deutschland sollte hier eine Vorreiterrolle einnehmen und nicht bloß EU- Vorschriften anwenden [69].

Das Kreislaufwirtschaftsgesetz wird noch in einer Vielzahl von Rechtsverordnungen konkretisiert. Darunter die Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV), die Deponieverordnung (DepV), die Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV) oder die Altholzverordnung (AltholzV).

Laut AltholzV, die die Verwertung und Beseitigung von Altholz in Deutschland regelt, werden stoffliche und energetische Verwertung gleichermaßen als hochwertig eingestuft [70, § 4]. Ein Entwurf für die Novelle der Verordnung liegt seit Mai 2022 vor, diese sieht unter anderem vor, dass Altholz der Kategorie AI (naturbelassenes Altholz) vorrangig der stofflichen Verwertung zugeführt werden soll. Zudem sollen ab 1. Januar 2023 mindestens 40 Massenprozent und ab 1. Januar 2025 mindesten 60 Massenprozent der Kategorie AI recycelt werden [71, § 8].

Im Juni 2021 wurde die Ersatzbaustoffverordnung unter dem Namen: „*Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung*“, verabschiedet [35]. Dieses Verordnungspaket wird auch *Mantelverordnung* genannt. Ab August 2023 treten damit erstmalig bundeseinheitliche und rechtsverbindliche Anforderungen an die Herstellung und Einbau mineralischer Ersatzbaustoffe (MEB) in Kraft. Zu den MEB zählen mineralische Abfälle oder Nebenprodukte, die aus Aufbereitungsanlagen, Baumaßnahmen oder Straßen anfallen. Ziele der Verordnung sind unter anderem die Reglementierung der Verwertung, eine Erhöhung der Recyclingquote sowie ein erhöhter Schutz von Menschen, Boden und Grundwasser beim Einbau der Stoffe.

Die Hauptverwertungswege von MEB befinden sich derzeit im Deponie-, Straßen- und Wegebau. Trotz einer hohen Verwertungsquote von 90%, wird das Recyclingpotenzial laut Leal-Filho nicht vollständig ausgeschöpft [72, S. 118].

Die Ursachen dafür liegen laut [72] zum einen in den ersten Sättigungseffekten bei den Hauptverwertungswegen, zum anderen werden durch die Mantelverordnung nun auch höhere Anforderungen hinsichtlich des Schutzniveaus für Mensch, Boden und Grundwasser gestellt. Durch das Inkrafttreten der Verordnung werden die Verwertungsmöglichkeiten im Rahmen der Verfüllungsmaßnahmen voraussichtlich stark eingeschränkt.

Die Folge dessen ist ein Anstieg von Deponierung der MEB. Das dürfte in Zukunft zu weiteren Engpässen bei bereits überlasteten Deponien führen. Eine vom UBA in Auftrag gegebene Studie *Planspiel Mantelverordnung* geht von etwa 50% Steigerung der Deponiemenge aus [73, 211 ff]. Die Studie geht von einer Erhöhung der Recyclingquote von lediglich 2,2%. Das Ziel der erhöhten Recyclingquote sei eher verfehlt, kritisierten der Hauptverband der Deutschen Bauindustrie, der Deutsche Abbruchverband und der Zentralverband Deutsches Baugewerbe [74]. Zudem werden die Entsorgungskosten steigen. Ein weiteres Problem ist, laut ZDB Hauptgeschäftsführer Pekleppa, dass MEB weiterhin als Abfall angesehen werden. Die Aufnahme des Kriteriums zum Erreichen des Abfallendes wurde, trotz des Einsatzes seitens der Bundesminister:innen, nicht in die Verordnung aufgenommen.

Die Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV) gilt für die Bewirtschaftung, also Erfassung Vorbehandlung und Vorbereitung zur Wiederverwendung, Recycling und sonstige Verwertung von Siedlungsabfällen und bestimmten Bau- und Abbruchabfällen [75, § 8]. Im Zuge der Novellierung im Jahr 2017, müssen Bau und Abbruchabfälle nach folgenden zehn Stoffarten getrennt werden und sind „nach Maßgabe des § 8 Absatz 1 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes vorrangig der Vorbereitung zur Wiederverwendung oder dem Recycling zuzuführen [75, § 8]:

1. Glas (Abfallschlüssel 17 02 02),
2. Kunststoff (Abfallschlüssel 17 02 03),
3. Metalle, einschließlich Legierungen (17 04 01 bis 17 04 07 und 17 04 11)
4. Holz (Abfallschlüssel 17 02 01),
5. Dämmmaterial (Abfallschlüssel 17 06 04),
6. Bitumengemische (Abfallschlüssel 17 03 02),
7. Baustoffe auf Gipsbasis (Abfallschlüssel 17 08 02),
8. Beton (Abfallschlüssel 17 01 01),
9. Ziegel (Abfallschlüssel 17 01 02) und
10. Fliesen und Keramik (Abfallschlüssel 17 01 03)

Die Hersteller und Besitzer der Abfälle werden laut der Verordnung zur Dokumentation verpflichtet. Bei fehlender technischer Möglichkeit der Abfalltrennung (z.B. wegen Platzmangel), oder bei wirtschaftlicher Unzumutbarkeit (z.B. hoher Verschmutzungsgrad oder geringe Menge), kann von der Dokumentationspflicht abgesehen werden. Die Deutsche Gesellschaft für Abfallwirtschaft (DGAW) bemängelt drei Jahre nach Inkrafttreten der Verordnung erhebliche Vollzugsdefizite [76]. Pflichten werden offenbar seitens der Gewerbetreibenden missachtet, das führe zu Lasten für die Umwelt. Auch die stellvertretende Bundesgeschäftsführerin der Deutsche Umwelthilfe (DHU) Metz, bemängelt die Umsetzung, sowie die lückenhafte Kontrolle seitens der Behörden. Das bestätigt auch die 2018 vollzogene Umfrage der DBU, aus der hervorgeht, dass zwölf Bundesländer keinerlei Angaben zum Vollzug der Gewerbeabfallverordnung machen [77]. Die Ausnahmeregelungen führen zu großen Mengen an gemischten Abfallmengen, die sich nur aufwändig recyceln lassen. Mit fatalen Folgen für den Wettbewerb: Recyclingprodukte sind zu teuer. So werden in der Baupraxis Primärbaustoffe weiterhin vorgezogen. [3, S. 42].

2.3.3. Rückbaurecht

Wesentliche Regelungen im Rückbaurecht sind: DIN 18007, DIN 18459 und VDI-Richtlinie 6210 Abbruch von baulichen und technischen Anlagen. Die Anforderungen aus diesen Normen sind an die des Abfallrechts angelehnt. Da das Abfallrecht keinerlei Qualitätsanforderungen an das Recycling des Abbruchmaterials stellt, wird auch der Abbruch in der Praxis nicht den hohen Ansprüchen des selektiven Rückbaus (siehe Kap. 2.1.5) gerecht [2, S. 18].

2.4. Fazit und Einflussparameter

Zur Förderung von Kreislaufwirtschaft in der Gebäudeherstellung können die CE-Strategien *slowing* und *closing the loop* verfolgt werden. Diese lassen sich durch Recycling, Wiederverwendung und die Nutzung bzw. Gestaltung von langlebigen Produkten umsetzen. Statt dem kontinuierlichen Abbau von Primärmaterialien aus der Natur, sollten unsere Gebäude und Städte als Rohstoffquelle betrachtet und genutzt werden (Urban Mining). Rückgebaute und abgerissene Materialien aus Bauwerken können dem Recycling, der Wiederverwendung, der sonstigen Verwertung (Verfüllung/Verbrennung) zugeführt oder auf Deponien beseitigt werden.

Beim Wort Recycling ist dabei auf die genaue Bedeutung zu achten. Stoffkreisläufe können nur dann geschlossen werden, wenn das Recycling auf gleichwertigem Qualitätsniveau, des Vorproduktes oder Materials, stattfindet. Sinkt das Qualitätsniveau nach der Verwertung oder ist der Einsatz von neuem Primärrohstoff notwendig, so spricht man von Downcycling. In der Wissenschaft sind die Einflussparameter für ein hochwertigeres Verwerten bereits definiert. Dabei spielen die Materialwahl, Rückbaubarkeit der Verbindungen, langlebiges Design und Schadstofffreiheit bereits in der Entwurfsphase eine wichtige Rolle für den späteren Verbleib der Materialien. Auch die Phase des Rückbaus nimmt entscheidenden Einfluss auf die Qualität der Verwertung. Werden Bauteile selektiv und zerstörungsfrei rückgebaut bzw. demontiert, können diese im späteren Verlauf einem hochwertigeren End-of-Life Szenario zugeführt werden. Diese formulierten Qualitätsanforderungen bzw. Einflussparameter finden in der Praxis noch wenig Umsetzung. Baustoffe wie Glas, Aluminium und Holz sind zwar theoretisch gut zu recyceln, in der Praxis kommt es jedoch zu Verunreinigung und Vermischung der Materialien, was die Rückgewinnung schwierig macht. Bauteile werden häufig mittels Klebverbindungen oder anderen schwer lösbaren Fügmethoden ausgeführt (Bsp. Wärmedämmverbundsystem). Der zeit- und kostenintensive selektive Rückbau wird wenig angewendet. Aufgrund mangelnder Vorgaben, ist hauptsächlich die Wirtschaftlichkeit das Kriterium bei der Wahl der Rückbaumethode und kann als weiterer Einflussparameter für die Bewertung der Kreislauffähigkeit definiert werden.

Die Hälfte der Abfälle in Deutschland kommen aus dem Bausektor. Laut der offiziellen Statistik der Initiative Kreislaufwirtschaft wurden 2018 rund 90% davon verwertet. Die gesetzlich vorgegebene Verwertungsquote von 70% wurde somit eingehalten. Mit in die Verwertung zählt allerdings neben dem Recycling, auch die sonstige Verwertung

(Verfüllung und Verbrennung). Schaut man die Verwertungswege genau an, so wurde die Hälfte (56%) der sonstigen Verwertung zugeführt. Zehn Prozent werden beseitigt. Der Rest (34%) werden recycelt. Mit in das Recycling zählt in der Statistik auch das Downcycling. In Deutschland wird überwiegend im Sinne des Downcyclings verwertet. Nur 1% der im Neubau eingesetzten Materialien und Baustoffe sind wiederverwendet. Die hohen Abfallaufkommen in Verbindung mit der gering stattfindenden und qualitätsmindernden Verwertung deuten auf den enormen Ressourcenverbrauch des Sektors hin. Es zeigt auch das beträchtliche Verbesserungspotenzial im Hinblick der Umsetzung der in der Wissenschaft formulierten Einflussparameter.

Die europäische Union und die deutsche Bundesregierung haben bereits eine Reihe von Gesetzen und Regelungen zur Förderung von Recycling und Kreislaufwirtschaft erlassen. Diese greifen jedoch häufig zu kurz. Die Qualität und Quantität des Rezyklats sind nicht fest vorgeschrieben. Dies wäre jedoch nach Meinung von Experten notwendig, um eine Wende hin zur einer echten Kreislaufwirtschaft einzuleiten.

Deutsche Vorgaben für die Trennung von Abfällen gehen weiter als die der EU, reichen jedoch nicht aus, um ein hochwertiges Recycling zu gewährleisten. Das Ergebnis ist ein aufwändiger Recyclingprozess, der zu hohen Kosten und einer schwachen Nachfrage der Sekundärstoffe führt.

Aus der Literaturrecherche wurden folgende sechs Einflussparameter ermittelt:

1. Recyclinggerechte Materialwahl (technischer und biologischer Kreislauf)
2. Wiederverwendung bzw. Erhalt von Bausubstanz (Sanierung)
3. Rückbaubarkeit
4. Langlebigkeit
5. Schadstofffreiheit
6. Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus (Arbeitsaufwand und Restwert)

Um die Bewertungsmethoden im Kap. 3 detailliert vergleichen zu können, wurden die sechs Parameter weiterhin in elf Parameter ausdifferenziert (siehe Tab. 2). Bei der Materialwahl wird zwischen der Förderung des biologischen und technischen Kreislaufs unterschieden. Weiterhin soll untersucht werden, ob in den Methoden zwischen Recycling und Downcycling unterschieden wird. Die Rückbaubarkeit wird in die zwei Parameter: Trennbarkeit und Demontierbarkeit ausdifferenziert.

Entwurf	Nutzung	Rückbau
<ol style="list-style-type: none"> 1. Förderung des biologischen Kreislaufs 2. Förderung des technischen Kreislaufs 3. Differenzierung der Qualitätsstufen Recycling & Downcycling 4. Wiederverwendung von Baustoffen und Bauteilen 5. Erhalt von bestehender Gebäudesubstanz 6. Schadstofffreiheit 	<ol style="list-style-type: none"> 7. Einsatz langlebiger Materialien und Bauprodukte 8. Verlängerung der Lebensdauer durch Reparatur, Wartung und Instandsetzung 	<ol style="list-style-type: none"> 9. Trennbarkeit von Verbindungen zwischen Bauteilschichten 10. Demontierbarkeit von Bauteilen 11. Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus

Tab. 2 Einflussparameter für die Bewertung der Kreislauffähigkeit von Gebäuden

3. Bewertungsmethoden

Ziel dieses Kapitels ist die Darstellung und Analyse der in der Forschung und Technik existierenden quantitativen Methoden zur Bewertung der Kreislauffähigkeit von Gebäuden. Rein qualitative Methoden stehen außerhalb des Betrachtungsrahmens dieser Arbeit (siehe Tab. 3). Nach der Analyse der Methoden werden diese systematisch hinsichtlich deren Abbildung der Einflussparameter verglichen. Da die Analyse und der Vergleich der Methoden im Fokus der Arbeit liegen, wird dieses Kapitel trotz seiner Zugehörigkeit zum *Stand der Forschung und der Technik*, gesondert aufgeführt.

Methodenbezeichnung	Herkunft	Umfang	
1. Material Reutilization Score (MRS)	Cradle to Cradle	Produkt	qualitativ
2. Tec. 1.6 Rückbau und Recyclingfähigkeit	DGNB*	Gebäude	
4. Recyclinggraph	E.Stötl/ D.Schwede	Bauteil	
5. Transformation Capacity (TC)	E. Durmisevic	Bauteil	
6. Ökobilanz	ISO 14040	Produkt/Gebäude	quantitativ
7. Material Circularity Indicator (MCI)	Ellen McArthur Foundation	Produkt	
8. Circularity Indicator (CI)	Madaster	Gebäude	
9. Building Circularity Indicator (BCI)	J.Verberne	Gebäude	
10. Building Circularity Index (BCI)	Alba Concept	Gebäude	
11. Urban Mining Index (UMI)	A. Rosen	Gebäude	

Tab. 3 Übersicht der Methoden zur Bewertung der Kreislauffähigkeit (eigene Darstellung)

Bewertungsmethoden dienen in Allgemeinem der Information über die Erfüllung von festgelegten Qualitätsanforderungen oder Standards und können während eines Entwicklungsprozesses als Entscheidungshilfe oder nach einem Prozess als Messinstrument im Hinblick auf die Erfüllung gesetzter Ziele dienen. Die Kreislaufwirtschaft hat das Ziel der Schonung von Ressourcen durch Strategien, die das Schließen und Verlangsamten von Stoffkreisläufen (slowing/closing the loop) ermöglichen und somit auch zur Abfallvermeidung führen [19, S. 308]. Bezogen auf die Bewertung der Kreislauffähigkeit von Gebäuden steht demzufolge die Messung dieser Ziele unter Einbezug der recherchierten Einflussparameter im Vordergrund.

3.1. Ökobilanzierung

Die Ökobilanzierung, oder englisch Life Cycle Assessment (LCA), ist eine nach der ISO 14040 standardisierte Methode zur Darstellung von entstehenden ökologischen Umweltauswirkungen einer funktionalen Einheit, entlang des gesamten Lebenszyklus eines Produktsystems [78, S. 9]. Umweltauswirkungen schließen dabei sowohl die erzeugten Emissionen in Luft, Wasser und Boden als auch den Ressourcenverbrauch (Energie, Material, Wasser) ein [79, S. 38]. In der sog. *Sachbilanz* werden alle Input- und Outputströme erfasst und dargestellt. Als Input-Ströme gelten dabei alle eingesetzten Material- und Energieflüsse. Die aus dem Ressourcenverbrauch resultierenden Emissionen und Abfälle, stellen die Output-Ströme dar. Die nach der Sachbilanz durchgeführte *Wirkungsabschätzung* dient nach [78], der Einschätzung der Größe und Bedeutung von potenziellen Umweltauswirkungen.

3.1.1. Bilanzierung von Recyclingpotenzial

Die Ökobilanzierung von Gebäude ist in der DIN EN 15978 reguliert [10]. Darin beschrieben sind die Lebenszyklusphasen eines Gebäudes (siehe Abb.13). Der Lebenszyklus umfasst demnach die Herstellung- und Errichtungsphase (Modul A), die Nutzungsphase (Modul B) sowie die Entsorgungsphase (Modul C). Das Modul D beschreibt die potenziellen Vorteile und Belastungen, die durch die Wiederverwendung, Recycling und thermische Verwertung entstehen. Das Modul D liegt laut Norm, außerhalb der betrachteten Systemgrenze und muss gesondert angegeben werden [10, S. 29].

Je nach Bilanzierungszweck und angestrebter Normkonformität wird bei der Ökobilanzierung von Gebäuden das Modul D berücksichtigt. Sowohl die DGNB Zertifizierung [8, S. 62] als auch das Bewertungssystem für nachhaltiges Bauen (BNB) [80, S. 4] beziehen das Modul D in die Bewertung mit ein. Das US-amerikanische Zertifizierungssystem LEED, das der gemeinnützigen Nichtregierungsorganisation *Green Building Council* zugehörig ist, betrachtet hingegen nur die Module A bis C [81].

Der Einbezug von Modul D wird in der Wissenschaft kontrovers diskutiert. Obwohl die Relevanz des Moduls bereits durch Untersuchungen bestätigt wurde [82], erschweren Datenlücken die Erstellung von belastbaren Ergebnissen. Die Arbeitsgruppe *Modul D*, der Forschungsinitiative *Zukunft Bau* des *Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit*, stellt ihrem Endbericht fest, dass große Teile der in

den Berechnungen betrachteten Bauprodukte, keine Daten zu Modul D enthalten [83, S. 92].

Hintergrund dafür ist, dass die DIN EN 15804 bis zum Jahr 2022, lediglich den Einbezug der Module A1 bis A3 in die von Herstellern erstellten *Umweltproduktdeklarationen* von Bauprodukten vorgesehen hat [84, S. 17]. Seit der Novellierung der Norm im März 2022 müssen diese auch das Modul C und Modul D beinhalten [85, S. 17].

Neben diesen spezifischen Herstellerdaten können auch generische Daten für die Erstellung von Ökobilanzen dienen. Generische Daten sind allgemeingültige Durchschnittsdaten, die im Falle für des Moduls D, Informationen zur Aufbereitung oder Entsorgung von bestimmten Produktgruppen geben [86, S. 14].

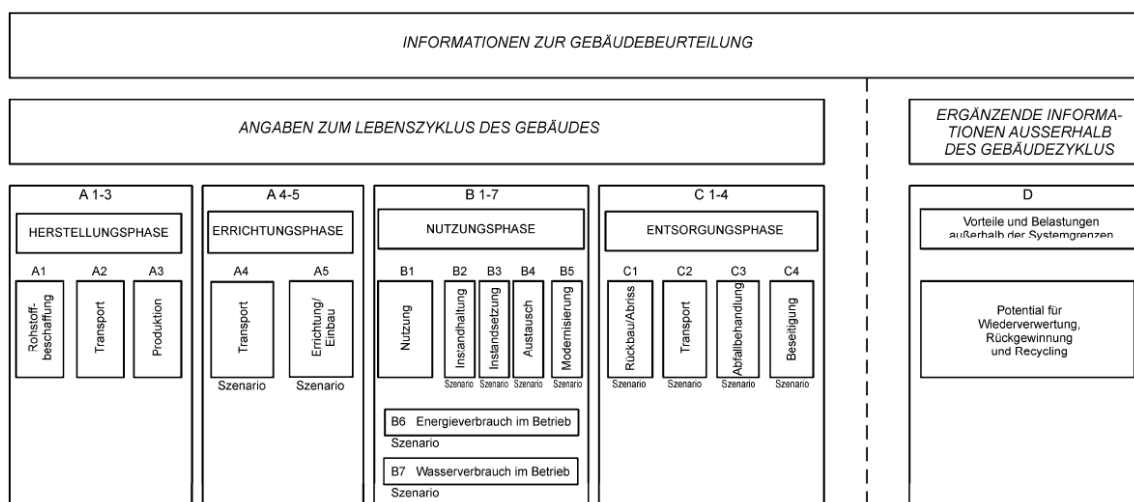


Abb. 13 Ökobilanzmodule A - D nach DIN EN 15978 [87, S. 21]

3.1.2. Indikatoren zur Beurteilung des Ressourcenverbrauchs

Input und Output basierte Indikatoren

Die Sachbilanz gibt eine Reihe von Indikatoren aus, die zur Beurteilung des Rohstoffverbrauchs dienen. Input basierte Indikatoren können der Tab. 4 entnommen werden. So geben beispielsweise die Indikatoren PENRM und PERM, die Menge an eingesetzter nicht erneuerbarer und erneuerbarer Primärenergie für die stoffliche Nutzung an. Mithilfe dieser Indikatoren kann die Menge an eingesetztem Material in MJ eingeschätzt werden. Auch die Menge an verwendetem Sekundärmaterial (Indikator SM) kann mithilfe der Sachbilanz ermittelt werden.

Tab. 5 zeigt Output-basierte Indikatoren der Ökobilanz von Bauprodukten. Diese geben Auskunft über mögliche Szenarien der Stoffströme. Ein Beispiel dafür ist der Indikator *Stoffe für das Recycling* (MFR). Die Einschätzung der möglichen EoL-Szenarien wird jedoch auf Ebene des Bauproduktes getroffen. Eine Berücksichtigung der jeweilige Einbausituation im Gebäude und der damit verbundenen Rückbaubarkeit, findet nicht statt [86, S. 15]. Die Ökobilanz kann die Recyclingpotenziale von Baukonstruktionen deshalb nur sehr eingeschränkt abbilden.

ERGEBNISSE DER ÖKOBILANZ RESSOURCENEINSATZ: 1 m ² Bodenbelag															
Parameter	Einheit	A1-A3	A4	A5	B1	B2	C2	C3/3	C4/1	C4/2	C4/3	D	D/1	D/2	D/3
PERE	[MJ]	11,14	0,14	1,85	0,00	0,68	0,01	0,11	0,19	0,03	0,00	-0,14	-0,50	-4,64	-0,24
PERM	[MJ]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PERT	[MJ]	11,14	0,14	1,85	0,00	0,68	0,01	0,11	0,19	0,03	0,00	-0,14	-0,50	-4,64	-0,24
PENRE	[MJ]	183,69	2,54	11,33	0,00	6,29	0,14	0,51	3,01	2,77	0,00	-1,41	-2,40	-46,84	-70,15
PENRM	[MJ]	68,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PENRT	[MJ]	252,00	2,54	11,33	0,00	6,29	0,14	0,51	3,01	2,77	0,00	-1,41	-2,40	-46,84	-70,15
SM	[kg]	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
RSF	[MJ]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NRSF	[MJ]	3,36E-2	1,77E-4	1,37E-3	0,00E+0	5,07E-4	9,83E-6	7,08E-5	5,29E-3	1,46E-4	0,00E+0	-1,60E-4	-3,30E-4	-5,35E-3	-7,00E-4
FW	[m ³]	4,51E-2	2,49E-4	6,19E-3	0,00E+0	3,89E-3	1,39E-5	2,17E-4	4,01E-4	1,72E-2	0,00E+0	-2,81E-4	-1,01E-3	-9,36E-3	-6,67E-3
Legende	PERE = Erneuerbare Primärenergie als Energieträger; PERM = Erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung; PERT = Total erneuerbare Primärenergie; PENRE = Nicht-erneuerbare Primärenergie als Energieträger; PENRM = Nicht-erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung; PENRT = Total nicht erneuerbare Primärenergie; SM = Einsatz von Sekundärstoffen; RSF = Erneuerbare Sekundärbrennstoffe; NRSF = Nicht erneuerbare Sekundärbrennstoffe; FW = Einsatz von Süßwasserressourcen														

Tab. 4 Ausschnitt Umweltproduktdeklaration eines Teppichbodens Input basierte Indikatoren (Parameter)

ERGEBNISSE DER ÖKOBILANZ OUTPUT-FLÜSSE UND ABFALLKATEGORIEN: 1 m ² Bodenbelag															
Parameter	Einheit	A1-A3	A4	A5	B1	B2	C2	C3/3	C4/1	C4/2	C4/3	D	D/1	D/2	D/3
HWD	[kg]	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0	0,00E+0
NHWD	[kg]	6,55E-3	9,57E-3	5,79E-1	0,00E+0	6,43E-1	5,32E-4	1,19E-1	3,81E+0	1,56E+0	0,00E+0	-1,54E-1	-5,56E-1	-5,12E+0	-5,99E+1
RWD	[kg]	5,60E-3	3,47E-6	2,39E-4	0,00E+0	4,11E-4	1,93E-7	7,70E-5	5,06E-5	1,43E-4	0,00E+0	-9,89E-5	-3,59E-4	-3,30E-3	-1,30E-4
CRU	[kg]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
MFR	[kg]	0,02	0,00	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,50	0,00	0,00	0,00	0,00
MER	[kg]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,90	0,00	0,00	0,00	0,00
EEE	[MJ]	0,00	0,00	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	1,02	9,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
EET	[MJ]	0,00	0,00	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	20,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Legende	HWD = Gefährlicher Abfall zur Deponie; NHWD = Entsorgter nicht gefährlicher Abfall; RWD = Entsorgter radioaktiver Abfall; CRU = Komponenten für die Wiederverwendung; MFR = Stoffe zum Recycling; MER = Stoffe für die Energierückgewinnung; EEE = Exportierte Energie elektrisch; EET = Exportierte Energie thermisch														

Tab. 5 Ausschnitt Umweltproduktdeklaration eines Teppichbodens Output basierte Indikatoren (Parameter)

Wirkungsbasierte Indikatoren

Auch im Rahmen der Wirkungsabschätzung gibt es Indikatoren, die Auskunft über den Ressourcenverbrauch des Gebäudes liefern. Einer der Indikatoren ist das *Abiotische Ressourcenabbaupotenzial für Elemente* (ADPE). Dieser dient der Abbildung der geologisch bedingten Knappheit von abiotischen (nicht erneuerbaren) Ressourcen. Dabei wird die "Ultimative Reserve" der in der Erdkruste vorkommenden Ressourcen sowie die jährliche Extraktionsrate berücksichtigt [3, S. 30]. Zu den abiotischen Ressourcen zählen unter anderem mineralische Rohstoffe, Metallerze und fossile Brennstoffe.

Der Indikator ADPE wird derzeit jedoch wenig verwendet. Zum einen fehlt es für die Interpretation des Indikators derzeit an Referenzwerten, da sie erst seit 2015 in der

DGNB-Zertifizierung ermittelt werden. Zum anderen ist dieser für den Anwender schwer nachvollziehbar. Das liegt daran, dass das ADPE in Äquivalenten von Antimon (Sb) gemessen wird. Dabei handelt es sich um ein seltenes chemisches Element, das die Knappheit repräsentiert. Die Ergebnisse der Bilanzierung liegen dabei sowohl auf Baustoff- als auch auf Gebäudeebene im Nachkommabereich (Bsp. Knappheit von 1 kg Kupfer liegt bei 0,0000154 Sb-Äquivalenten). [3, S. 30]

3.1.3. Fazit

Die Ökobilanz liefert einige Indikatoren, die zur Einschätzung des Ressourcenverbrauchs dienen. Die Fülle der Informationen, die sie aus den Indikatoren angeben, ermöglicht dabei keine gesamtheitliche Beurteilung der Kreislauffähigkeit des Gebäudes. Die Betrachtung von Recyclingpotenzialen liegt laut Norm außerhalb der Systemgrenzen und spielt in der Ökobilanz eine Sonderrolle. Neben der Problematik der Datenlücken bezüglich möglicher EoL-Szenarien von Bauprodukten, vernachlässigt die Methode bei der Zuordnung der Szenarien auch die Trennbarkeit der verschiedenen Bauteilschichten im Gebäude. Daher ist die Ökobilanz derzeit nur eingeschränkt dazu geeignet, Kreislaufpotenziale von Gebäuden darzustellen und liegt im Folgenden außerhalb des Betrachtungsrahmens dieser Arbeit.

3.2. Material Circularity Indicator

Der Material Circularity Indicator (MCI) wurde 2015 von der Ellen MacArthur Foundation (EMF) entwickelt. Er ist derzeit der weltweit am häufigsten angewendete Zirkularitätsindikator [88, S. 3]. Er dient laut Initiatoren dazu, das Design von Produkten im Hinblick auf deren Zirkularität zu optimieren [89, S. 4]. Obwohl dieser Indikator nicht für die Bewertung von Gebäuden vorgesehen ist, basieren die nachfolgenden drei Indikatoren (BCI von Verberne, CI von Madaster und BCI von Alba Concept) auf dem MCI, weshalb dessen Systematik im Folgenden kurz erläutert wird.

3.2.1. Systematik

Der MCI misst das Ausmaß, wie in einem Produkt der lineare Materialanteil im Materialstrom minimiert und der kreislauffähige maximiert wird [89, S. 22]. Der Indikator erfasst zudem, wie lange und intensiv das Produkt im Vergleich zu der durchschnittlichen Nutzungsdauer der Branche genutzt wird.

Dabei werden im Wesentlichen drei Produkteigenschaften betrachtet:

1. Die Menge an Primärrohstoffen **V**
2. Die Menge an nicht verwertbaren Abfall **W**
3. Die Produktnutzungsdauer im Vergleich zum Branchendurchschnitt **X**

Zur Berechnung des MCI wird von dem Wert 1 das Produkt aus dem Linear Flow Index (LFI) und der Ausnutzung (F(x)) abgezogen. Die Formel lautet [89, S. 30]:

$$\text{MCI} = 1 - \text{LFI} \times \text{F(x)}$$

Daraus ergibt sich ein Wert von 0 bis 1, der der Zirkularitätsbewertung 0% bis 100% entspricht. Der Linear Flow Index misst dabei das Verhältnis von eingesetztem, nicht-erneuerbarem Primärmaterial (V) zu nicht verwertbaren Abfällen (W) des Produktes. Als Primärmaterial gilt dabei der Anteil des Produktes der nicht aus Sekundärmaterialien oder nachwachsenden Rohstoffen besteht oder wiederverwendet wird [89, S. 24]. Als Abfall gilt wiederum der Anteil des Produktes, der dem EoL-Szenario *Verbrennung* oder *Beseitigung* zugeführt wird [89, S. 25].

Die Ausnutzung des Produktes wird unter Berücksichtigung der *Lebensdauer*, sowie der *Intensität der Nutzung* ermittelt. Die Berechnung beruht auf der Annahme, dass bei einer Verdopplung der Lebensdauer eines Produkts die Abfälle und die pro Jahr für den linearen Teil des Produktflusses verbrauchten neuen Materialien halbiert werden. Wenn die Lebensdauer eines Produkts halbiert wird, verdoppelt sich sowohl die Abfallmenge als auch die Menge an neuen Rohstoffen die jährlich für den linearen Teil des Produktstroms verbraucht werden. Gleiches gilt aus für die Intensität der Nutzung. [89, S. 29]

Formeln für den MCI der EMF können dem Anhang 1 entnommen werden.

Neben den zuvor genannten Indikatoren wird der MCI auch in der für die Berechnung der Ökobilanzierung vorgesehenen Software *Gabi* des Unternehmens *sphera* angeboten. Im sogenannten *Circularity Toolkit*, soll es dem Anwender bei der Auswahl der Baumaterialien möglich sein den MCI zu berechnen [90]. Weitere Angaben zur Art der Berechnung gibt es seitens des Unternehmens nicht. Ein Zugang zur Software sowie Erläuterungen zur Berechnungsweise ist nur unter Bezahlung der Lizenzgebühr erhältlich.

3.3. Building Circularity Indicator

Der Building Circularity Indicator (BCI) wurde 2016 im Rahmen einer Masterarbeit an der Technischen Universität Eindhoven durch den Studenten Verberne entwickelt [12]. Der Indikator basiert auf dem MCI der EMF und wurde auf die Bewertung von Gebäuden übertragen. In den nachfolgenden Jahren wurde dieser Indikator jeweils von den privaten Unternehmen *Madaster* und *Alba Concept (AC)* aufgegriffen und in der Systematik abgeändert. Die daraus entstehenden Berechnungsmethoden CI und BCI_{AC} stehen als Software auf den Plattformen der Unternehmen zur Verfügung und werden nachfolgend in Kap. 3.4 und 3.5 erläutert.

3.3.1. Systematik

Der Entwicklung des Indikators gehen Experteninterviews mit 19 Teilnehmern aus Wirtschaft und Wissenschaft voraus. Diese erfolgten mit dem Ziel der Ermittlung von *Key Performance Indicators* (dt. Erfolgsfaktoren), die in die Bewertung der Kreislauffähigkeit von Gebäuden eingehen sollen. Mit einem darauffolgenden Expertenpanel wurden die ermittelten Erfolgsfaktoren weiterhin eingegrenzt und den Bereichen: Technische Anforderungen, Voraussetzungen und Treiber zugeordnet (siehe Tab 6).

Technische Anforderungen	Vorbedingungen	Treiber
<ul style="list-style-type: none"> • Art/Qualität des Input- und Output-Materialstroms • Technische Lebensdauer • Möglichkeit zur Demontage/Trennung • Kreisläufe (technisch und biologisch) 	<ul style="list-style-type: none"> • Materialgesundheit/Schadstoffe • CO₂- Fußabdruck • Nutzung von erneuerbaren Energien • Umweltauswirkungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Materialknappheit • Potenzieller Restwert der Materialien • Absatzmarkt für die Wiederverwendung

Tab. 6 Erfolgsfaktoren für die Messung von Kreislauffähigkeit nach [12, S. 57]

Das aus den Erfolgsfaktoren und dem MCI entwickelte Berechnungsmodell ist der Abb. 14 zu entnehmen. Die ermittelten Vorbedingungen wie Materialgesundheit oder CO₂-Fußabdruck, liegen laut Verberne außerhalb der Betrachtung der Bewertung der Kreislauffähigkeit. Dem Anwender ist es freigestellt, die dafür benötigten Bewertungsmethoden durchzuführen. Als Methode kann dabei die Ökobilanzierung der einzelnen Produkte zur Bewertung des CO₂-Fußabdrucks und des Einsatzes von erneuerbaren Energien dienen.

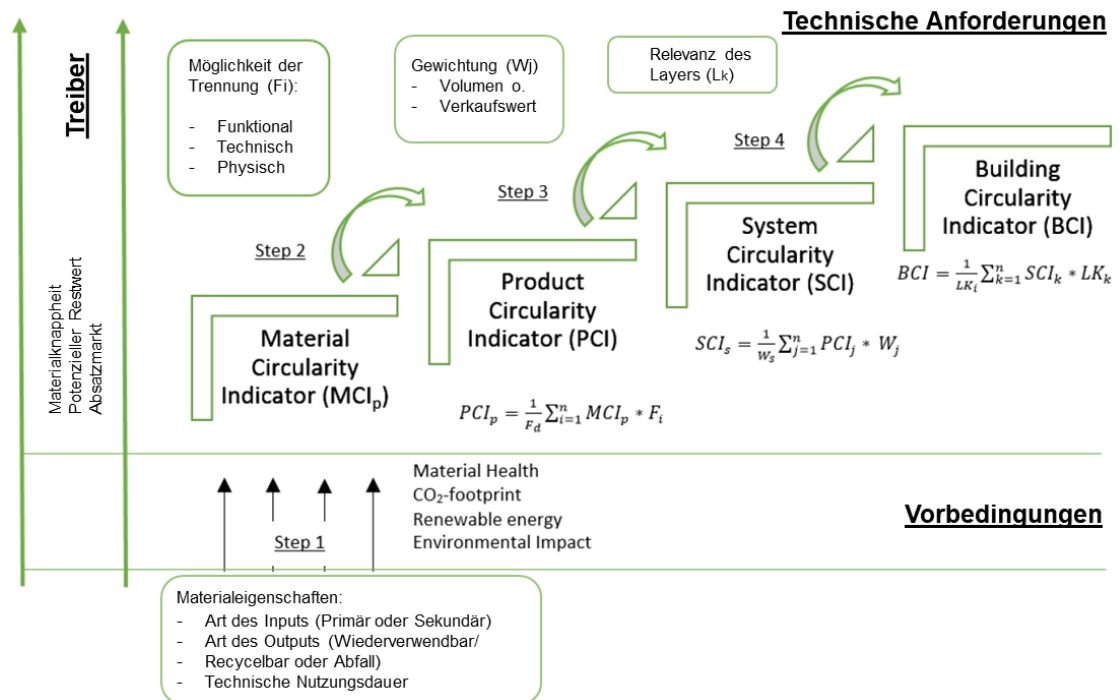


Abb. 14 Berechnungsmodell des BCI nach J.Verberne [12, S. 57]

Zur Beurteilung der Materialgesundheit wird das Cradle-to-Cradle Zertifikat für Materialgesundheit vorgeschlagen, Verberne gibt jedoch hier zu bedenken, dass die strengen Anforderungen des Zertifikates im Einzelfall eingehalten werden können. Letztendlich ist es eine individuelle Abwägung des Anwenders, wo der Bewertungsschwerpunkt liegen soll. [12, S. 72]

Im ersten Schritt der Bewertung werden die Materialeigenschaften der verwendeten Bauprodukte ermittelt (siehe Abb. 14). Diese richten sich nach den erforderlichen Angaben für die Berechnung des MCI. Der Anwender bestimmt die Eigenschaften des Materialinputs (primär/sekundär), dem nach dem Abriss entstehenden Abfall, der der Verbrennung und Deponierung zugeführt wird, sowie die technische Nutzungsdauer des Produktes. In den folgenden vier Schritten werden der *Material Circularity Indicator*, der *System Circularity Indicator*, der *Product Circularity Indicator* und schließlich – das Endergebnis der *Building Circularity Indicator* ermittelt.

3.3.2. Material Circularity Indicator

Der *Building Circularity Indicator* (BCI) beruht auf der Hypothese, dass ein Gebäude eine Zusammenstellung von Materialien ist, die alle in einer Art und Weise miteinander verbunden sind [12, S. 60]. Jedes dieser Materialien hat seine eigenen Eigenschaften bezüglich seiner Zirkularität und dementsprechend einen eigenen Zirkularitätswert der

mit Hilfe des MCI der *Ellen MacArthur Foundation* bewertet werden kann. Der MCI wird dabei abhängig vom Detailgrad der vorhandenen Gebäudeinformation im BOM (Bill of Materials – dt. Bauteilkatalog) auf Ebene des Bauteils (hier Produkt genannt), der Komponenten oder Materialien bestimmt [12, S. 62].

Analog zur Definition der EMF setzt der Zirkularitätswert von 100% einen Anteil an Sekundärmaterial von 100% in der Entwurfsphase, sowie einen Anteil von 100% wiederverwendbaren bzw. rezyklierbaren Materialien nach der Nutzung voraus [12, S. 61]. Der biologische Kreislauf wird entsprechend einer alten MCI-Version aus dem Jahr 2015 vernachlässigt. Die Nutzung nachwachsender Rohstoffe geht nicht positiv in die Bewertung ein. Die Begründung des Autors ist dabei, dass Gebäude größtenteils aus Materialien bestehen, die für den technischen Kreislauf bestimmt sind. Als Abfall wird, analog zur EMF Methode, der Anteil des Produktes, der für die Verbrennung und Deponierung bestimmt ist, definiert. [12, S. 51]

Die Formel für den MCI für Gebäude lautet [12, S. 56]:

$$MCI_{p(a)} = 1 - LFI_{p(a)} \times F(X_{p(a)})$$

$LFI_{p(a)}$: Linear Flow Index

$F(X_{p(a)})$: Nutzfunktion

Dazugehörige Formel für den *Linear Flow Index* (LFI) [12, S. 64] lautet:

$$LFI = \frac{V + W}{2 M}$$

V: Gesamtes Primärmaterial (engl. Virgin Feedstock) für die Herstellung aller Produkte, Materialien und Komponenten des Gebäudes

W: Gesamter Abfall (engl. Waste) der nach der Nutzung der Verbrennung bzw. Deponierung zugeführt wird

Der lineare Flow Index (LFI) misst den Anteil des Materials, der auf lineare Weise fließt, mit 100 % unverändertem Ausgangsmaterial zu Beginn und 100 % Abfall am Ende des

Lebenszyklus. Der Index nimmt einen Wert zwischen 1 und 0 an, wobei 1 für einen vollständig linearen und 0 für einen vollständig zirkulären Materialfluss steht [12, S. 63].

Der Anteil des Primärmaterials wird für jede(s) Produkt/ Komponente/Material mit folgender Formel berechnet [12, S. 36]:

$$V_{(x)} = M_{(x)} (1 - NV_{RC(x)})$$

M: Masse des/der Produktes/Komponente/Materials (x)

$NV_{RC(x)}$: Anteil an recycelten und wiederverwendeten Materialien

Der Anteil an Abfall, der der Deponie und Verbrennung zugeführt wird, wird durch den Abzug des Anteils mit dem EoL-Szenario Recycling und Wiederverwendung ermittelt [12, S. 53]:

$$W = M (1 - F_{RU})$$

M: Masse des/der betrachteten Produktes/Komponente/Materials (x)

F_{RU} : Anteil des/der Produktes/Komponente/Materials, der für das Recycling und die Wiederverwendung geeignet ist

Der letzte Bestandteil des MCI ist die Nutzfunktion $F(X)$. Diese misst entsprechend der EMF-Methode das Verhältnis zwischen der technischen Nutzungsdauer des Produktes zu der Lebensdauer des Branchendurchschnitts. Allerdings wird hier die Komponente der *Intensität der Ausnutzung* vernachlässigt (siehe Anhang 1). Der Wert für den Branchendurchschnitt wird je nach Zugehörigkeit des Produktes zu einer der Gebäudeschichten (engl. Layer) nach der Theorie von Brand [30] zugeordnet, wobei die technische Nutzungsdauer vom Anwender geschätzt werden muss (siehe Abb.15). [12, S. 64]

$$F(X) = \frac{0,9}{X} \quad \text{mit} \quad X = \frac{L}{L_{av}}$$

- L: Potenzielle technische Nutzungsdauer eines Produktes in Jahren
 L_{av}: Lebensdauer der Gebäudeschicht (nach der Brand Gebäude-Layer-Theorie) des Produktes in Jahren
 0,9: Gebrauchskonstante

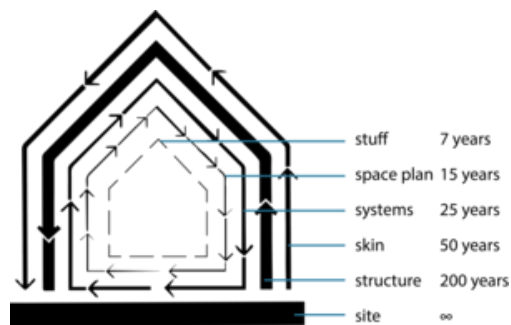


Abb. 15 Building Layers nach Brand mit üblichen Lebensdauern [91]

Die Gebrauchskonstante sorgt dafür, dass ein Produkt mit einer Lebensdauer gleich dem Branchendurchschnitt ($x=1$) und aus vollständig linearen Materialien besteht, ($LFI=1$) einen Zirkularitätsindikator von 0,1 also 10% erhält [13, S. 16]. Ein Gebäude, das hingegen aus 100% Sekundärmaterialien oder nachwachsenden Rohstoffen besteht, die nach der Nutzung vollständig recycelt werden, hätte einen Zirkularitätsindikator von 100%, unabhängig von der Nutzungsdauer. Denn wenn $LFI=0$, hat $F(X)$ keine Auswirkungen auf die Berechnung. [12, S. 64]

3.3.3. Product Circularity Indicator

Der zuvor ermittelte MCI ist laut Verberne ein *theoretischer* Zirkularitätswert, da dieser die Verbindungen zwischen den Bauteilen und deren Schichten vernachlässigt. Im zweiten Schritt wird deshalb der *praktische* Wert – Product Circularity Indicator (PCI) genannt – ermittelt.

Der *PCI* dient der Abbildung der Demontierbarkeit von Bauteilen (Produkten) und der Trennbarkeit von Bauteilschichten. Dafür wird der zuvor ermittelte MCI durch den *Design for Disassembly Faktor F_i* (dt. *Trennbarkeitsfaktor*) auf einer Skala von 0,1 (nicht lösbar) bis 1,0 (lösbar) gewichtet. Daraus entsteht folgende Formel für die Berechnung des PCI [12, S. 69]:

$$PCI_{p(a)} = \frac{1}{F_d} \sum_{i=1}^n MCI_p \times F_i$$

$$\text{mit } F_d = \sum_{i=1}^n F_i$$

F_i: Trennbarkeitsfaktor je Material/Komponente

F_d: Summe aller Trennbarkeitsfaktoren im Bauteil (Produkt)

Der Trennbarkeitsfaktor beurteilt die Rückbaubarkeit nach sieben Kriterien aus der Veröffentlichung von Durmisevic et al. (siehe Tab. 7) [92, S. 5-7]. Verberne greift zur Vereinfachung der Berechnung nur eine Auswahl von Kriterien auf, insgesamt definiert Durmisevic 17 Kriterien zur Beurteilung der Rückbaubarkeit.

Kriterium	Unterkriterien	Fi	Kriterien	Unterkriterien	Fi
Funktionale Abtrennung	Trennung nach Funktion	1,0	Art der Verbindung	Externer Anschluss oder Anschlussystem als Zubehör	1,0
	Integration von Funktionen derselben Lebensdauer in einem Element	0,6		Direkter Anschluss mit zusätzlichen Befestigungsvorrichtungen	0,8
	Integration von Funktionen verschiedener Lebensdauer	0,1		Direkter Integralanschluss mit Einsätzen (mit und ohne Stift)	0,6/0,5
Funktionale Abhängigkeit	Modulare Aufteilung	1,0	Verbindungselement, das an einem Zubehörteil oder einer Halterung angebracht ist	0,4	
	Geplante gegenseitige Durchdringung für verschiedene Anwendungen	0,8	Gefüllter Chemische Verbindung (weich/hart)	0,2/0,1	
	Geplant für eine Anwendung	0,4	Direkter chemischer Anschluss	0,1	
	Ungeplante Durchdringung	0,2	Zugänglichkeit zu Befestigungen	Erreichbar	1,0
	Totale Abhängigkeit	0,1		Erreichbar mit Aufwand und o. Schaden	0,8
Standardisierung der Montagepunkte	Vorgefertigte Geometrie	1,0	Erreichbar mit Aufwand mit reparierbaren Schaden	0,6	
	Teil standardisierte Geometrie	0,5	Erreichbar mit Schaden	0,4	
	Vor Ort gefertigte Geometrie	0,1	Nicht erreichbar	0,1	
Geometrie der Montagepunkte	Offen und gerade	1,0	Montage-reihenfolge nach Produktlebens-dauer	lang/lang oder kurz/ kurz oder lang/ kurz	1,0
	Symmetrisch überlappend			medium/ lang	0,5
	Überlappend auf einer Seite			kurz/ medium	0,3
	Unsymmetrisch überlappend			kurz/ lang	0,1
	Auf einer Seite eingefügt				
Auf beiden Seiten eingefügt					

Tab. 7 Sieben der insgesamt 17 DfD Faktoren nach Durmisevic (eigene Darstellung, nach [12, 65 ff.])

Die Kriterien lassen sich zudem in die Bereiche funktional, physisch und technisch einteilen. Nachfolgend werden die von Verberne betrachteten Kriterien und die dazugehörigen Unterkriterien kurz erläutert.

Funktionale DfD Kriterien

Funktionale Faktoren beurteilen die Trennung und Abhängigkeit verschiedener Funktionen innerhalb eines Bauteils. Bei Bauteilen kann laut Durmisevic zwischen den tragenden, umschließenden, schützenden und abtrennenden Funktionen unterschieden werden. Diese können integriert, teilintegriert oder separiert sein. Das optimale Szenario für die Rückbaubarkeit ist die komplette Separierung verschiedener Funktionen. Im Falle des Austausches einer Komponente, werden die Funktionen anderer Komponenten nicht beeinträchtigt. Die funktionale Unabhängigkeit wird dadurch bestimmt, ob ein Ersatz oder eine Größenänderung von Komponenten, die Funktionsfähigkeit anderer Komponenten, die anderen Funktionen dienen, beeinflussen. Das optimale Szenario ist dabei die vollkommene Unabhängigkeit zwischen den Funktionen. [93, S. 160]

Physische DfD Kriterien

Physische Faktoren betreffen die Beurteilung der Kriterien: Standardisierung der Montageformen, Geometrie der Produktkanten, die Art der Verbindung, sowie die Zugänglichkeit zu Montagepunkten. Standardisierte Montageformen ermöglichen die Demontage mit handelsüblichen Werkzeugen und erleichtern damit die Demontage. In dem Kriterium *Geometrien der Produktkanten*, werden die Schnittstellen zwischen Komponenten beurteilt. Geometrien können dabei offen, überlappend oder durchdringend sein. Ersteres erleichtert die Demontage. Die *Art der Verbindung* ist eines der wichtigsten DfD Kriterien und beurteilt zusammen mit der *Geometrie der Produktkante* den Freiheitsgrad zwischen Komponenten. Dabei wird zwischen direkter Verbindung, Verbindung mit Hilfe von Zubehör (z.B. Schrauben, Klemmen) sowie chemischen Verbindungen (z.B. mit Kleber) unterschieden. Die Verbindung mittels Zubehörs, ist dabei am leichtesten rückbaubar. Die Zugänglichkeit zu Montagepunkten ist das letzte Kriterium und beurteilt schlicht, ob eine Komponente leicht und/oder ohne Schädigung demontierbar ist. [93, S. 175]

Technische DfD Kriterien

Die technischen Kriterien für die Rückbaubarkeit beurteilen die Hierarchisierung und Anordnung verschiedener Komponenten bezüglich ihrer Lebensdauer [93, S. 168]. Verberne bezieht in seine Berechnung das Unterkriterium *Montagereifolge nach Produktlebensdauer* mit ein. Das Produkt mit der kürzeren Lebensdauer sollte dabei weiter vorne angeordnet sein, so dass bei der Demontage kein anderes Produkt zurückgebaut werden muss.

3.3.4. System Circularity Indicator

Jedes Produkt kann einem Layer nach Brand zugeordnet werden [12, S. 68]. Die Summe der Produkte werden als *System* bezeichnet. Um alle berechneten MCI_p (theoretisch) und PCI_p (praktisch) für eine Anzahl (n) an Produkten zu einem systematischen Wert zu summieren, wird ein Normalisierungsfaktor verwendet. So erhält man einen gewichteten Durchschnitt für jedes Produkt. Als Normalisierungsfaktor wird die Produktmasse in kg verwendet [12, S. 77]. Daraus ergibt sich folgende Formel zur Berechnung des *System Circularity Indicators* (SCI) [12, S. 69]:

$$SCI_{p(a)} = \frac{1}{W_s} \sum_{i=1}^n PCI_j \times W_j$$

$$\text{mit } W_s = \sum_{i=1}^n W_j$$

W_j : Produktmasse des Produktes j

W_s : Gesamte Masse der Produkte eines Systems (j,n)

3.3.5. Building Cirularity Indicator

Aus der Literaturrecherche, den Experteninterviews und dem Expertenpanel von Verberne geht hervor, dass die Kreislauffähigkeit von Produkten mit kürzerer Lebensdauer wichtiger ist, als die von Produkten mit längerer Lebensdauer (z. B. ist die Kreislauffähigkeit für die Inneneinrichtung (7 Jahre) wichtiger, als für die Tragstruktur (200 Jahre). Auf der Grundlage der Schichten von Brand (1994) kann so jedem System eine bestimmte Relevanz L_k auf einer Skala von 0 bis 1 zugewiesen werden (siehe Tab. 8). [12, S. 78]

Layer/ System	Lebensdauer	Relevanz L_k
Stoff	7 Jahre	1,0
Space Plan	15 Jahre	0,9
Services	25 Jahre	0,8
Skin	50 Jahre	0,7
Structure	200 Jahre	0,2
Site	∞	0,1

Tab. 8 Relevanz der Layer von Brand (eigene Darstellung, nach [12, S. 69])

Der Building Circularity Indicator (BCI) ergibt sich aus der Summe der ermittelten SCI mit der Gewichtung der jeweiligen Relevanz des Systems:

$$BCI_p = \frac{1}{LK} \sum_{k=1}^n SCI_{(p)k} \times LK_k$$

$$\text{mit } LK = \sum_{k=1}^n LK_j$$

LK_k: Relevanz des Systems k

LK: Summe der Relevanz aller Systeme

3.3.6. Fazit

Der BCI von Verberne bezieht alle drei wesentlichen Lebenszyklusphasen in die Bewertung ein. In der Entwurfsphase wird der Anteil der aus dem Recycling stammenden Materialien berücksichtigt. Nachwachsende Rohstoffe gehen, trotz ihres Vorteils für die Kreislaufwirtschaft, nicht in die Bewertung ein. Anteile aus dem Recycling und der Wiederverwendung, gehen mit gleicher Gewichtung in den BCI ein, obwohl die Wiederverwendung bezüglich der Ressourcenschonung dem Recycling vorzuziehen ist. Des Weiteren wird nicht zwischen den Qualitätsstufen Recycling und Downcycling unterschieden.

Besonders zum Tragen kommt die Phase der Nutzung. Die Bedeutung der Lebensdauer für die Kreislauffähigkeit wird zum einen im MCI mittels der Nutzfunktion, als auch auf der Ebene der Gebäudebewertung in Form des Relevanzfaktors abgebildet.

In der Rückbauphase kann der Anwender abschätzen welches EoL-Szenario für das betrachtete Produkt oder Material zutreffen wird. Dabei werden die Verbrennung und Deponierung als nicht zirkuläre Szenarien definiert.

Zur Abbildung der Rückbaubarkeit bedient sich Verberne der DfD-Kriterien der Wissenschaftlerin Durmisevic. Diese behandeln sieben detaillierte Kriterien zur Beurteilung. Trotz der Eingrenzung der Faktoren durch Verberne auf sieben, ist davon auszugehen, dass die Zuordnung durch den Anwender aufgrund der Anzahl der Faktoren und der notwendigen Detailtiefe der Informationen über die Konstruktion aufwändig ist.

Die Trennbarkeitsfaktoren sind voneinander unabhängig abgebildet. Jeder Faktor hat dabei den gleichen Einfluss auf die Bewertung der Trennbarkeit. Was in der Realität nicht der Fall sein dürfte. Da das Minimum des Fi Faktors bei 0,1 liegt, werden auch Bauteile, die nicht lösbar sind, berücksichtigt.

Der BCI von Verberne ist ein theoretisches Modell, bei dem Fragen über die Herkunft der erforderlichen Angaben wie technische Nutzungsdauern oder typische EoL-Szenarien der Produkte nicht geklärt sind.

3.4. Circularity Indicator

Der Madaster-Zirkularitätsindikator (engl. Circularity Indicator – CI) wurde von Madaster Services B.V. entwickelt und 2018 veröffentlicht [94]. Madaster ist ein webbasiertes Kataster, in dem die Eigenschaften und der Einsatzort von Materialien in Gebäuden mithilfe eines Materialpasses registriert werden können. Es wurde 2017 von der Betriebswirtin Sabine Oberhuber und dem Architekten Thomas Rau initiiert und von der *Madaster Foundation* in den Niederlanden entwickelt. Weitere an der Entwicklung des CI beteiligte private Institute sind [95]:

- Copper8, Unternehmensberatung für Circular-Economy-Strategien, NL
- EPEA GmbH, ehemals Internationales Umweltforschungsinstitut, seit 2019 Teil des Bauunternehmens Drees& Sommer
- TNO32, Organisation für angewandte naturwissenschaftliche Forschung, NL

Der CI ist dabei Teil des Materialpasses. Er soll dazu beitragen die Zirkularität in der Gebäudeplanung zu messen und Gebäude hin zu mehr Zirkularität zu optimieren und er verfolgt dabei den Entwicklern zufolge drei Grundprinzipien [13, S. 5]:

1. Verwendung von so vielen recycelten und/oder wiederverwendeten und/oder schnell erneuerbaren Materialien wie möglich
2. Verlängerung der Nutzungsdauer durch Verwendung von Produkten mit überdurchschnittlicher Nutzungsdauer (Branchenvergleich)
3. Sammeln von so vielen Materialien und Produkten wie möglich zum Recycling und zur Wiederverwendung

3.4.1. Systematik

Der CI basiert auf dem MCI von der *Ellen McArthur Foundation* und bewertet die Zirkularität von Gebäuden auf einer Skala von 0 bis 100%. In die Berechnung des Indikators gehen die drei Lebenszyklusphasen: Bau, Nutzung und End of Life ein [13, S. 3].

Der Anwender kann sein Gebäudedaten mittels eines 3D BIM-Modells (Building Information Modelling) oder eines Bauteilkatalogs (Excel) auf die Plattform hochladen [96, S. 8]. Die Vollständigkeit der Gebäudedaten wird mit in die Berechnung einbezogen. Als Grundlage für die Prüfung der Vollständigkeit dienen dabei die Kostengruppen nach DIN 276. Die Bauteile und Materialien werden anschließend mit Zirkularitätsdaten (siehe Kap. 3.4.7) aus den Datenbanken der Plattform automatisch verknüpft und mit Hilfe der Formel des CI bewertet. Dem Anwender stehen dabei insgesamt vier Indikatoren zur Beurteilung des Gebäudes zur Verfügung. Sie setzen sich aus den drei Indikatoren für die Lebenszyklusphasen Bau, Nutzung und End-of-Life und dem auf dem MCI basierenden Indikator für das gesamte Gebäude CI zusammen. [94, S. 8]

3.4.2. CI Bauphase

Bei dem CI für die Bauphase (Konstruktion) werden die Materialien und Produkte beurteilt, die für das Gebäude verwendet werden [94, S. 12]. Die Formel setzt sich dabei wie folgt zusammen:

$$CI_{\text{Konstruktion}} = F_R + F_{RR} + F_U$$

F_R : Anteil (engl. Fraktion) an Recyclingmaterial (in % der Produktmasse)

F_{RR} : Anteil an schnell nachwachsenden Rohstoffen (in % der Produktmasse)

F_U : Anteil wiederverwendeter Produkte und/oder Komponenten

3.4.3. CI Nutzungsphase

Der Zirkularitätsindikator der Nutzungsphase wird durch das Verhältnis zwischen potenzieller Nutzungsdauer mit der branchenüblichen Lebensdauer nach der Gebäude-Layer-Theorie von Brand errechnet [30, 94, S. 13].

$$CI_{Nutzung} = L / L_{av}$$

L: Potenzielle technische Nutzungsdauer eines Produktes in Jahren

L_{av} : Lebensdauer der Gebäude-Layer (nach Brand Gebäude-Layer-Theorie) des Produktes in Jahren

3.4.4. CI End-of-Life Phase

Zur Ermittlung des Zirkularitätsindikators für die End-of-Life Phase, wird durch den Anwender das potenzielle Nachnutzungsszenario für jedes Material und/oder Produkt angegeben [94, S. 14]. Das Szenario Recycling und Wiederverwendung geht in die Berechnung des CI mit ein, während Verbrennung und Deponierung außen vor bleiben.

$$CI_{End-of-Life} = C_R \times E_C + C_U$$

C_R : Anteil der Materialien, die am Ende der Nutzung potenziell recycelt werden können (in % der Produktmasse)

E_C : Effizienz des Recyclingprozesses in der EoL-Phase (in % der Produktmasse)

C_{RU} : Anteil von Komponenten und/oder Produkten, die am Ende der Nutzungsdauer potenziell wiederverwendet werden können (in % der Produktmasse)

3.4.5. CI Gebäudebewertung

Auf Gebäudeebene lässt sich der CI mit Hilfe der Formel des MCI ermitteln. Der CI berechnet sich hierbei genau andersherum, nämlich durch den Abzug des nicht zirkulären Teils der Materialflüsse (Linear Flow Index – LFI) unter Berücksichtigung der Nutzungsfunktion ($F(x)$) [13, S. 15]:

$$CI = 1 - LFI \times F(X)$$

Analog zu der Berechnung des MCI ist der LFI ein Quotient aus der Summe der für die Herstellung verwendeten, nicht erneuerbaren Primärrohstoffe und aller Abfälle, die nach der Nutzung auf der Deponie oder in der Verbrennung landen, sowie der doppelten Masse aller eingesetzten Materialien zuzüglich der Abfälle, die durch das Recycling erzeugt werden. Die Formel des LFI lautet demnach:

$$LFI = \frac{V + W}{2M + \frac{W_F - W_C}{2}}$$

Die dazugehörigen Unterformeln lauten [94, S. 15ff.]:

$$V = M (1 - F_R - F_{RR} - F_U)$$

V: Masse der bei der Produktherstellung verwendeten Primärrohstoffe (kg)

M: Produktmasse (kg)

$$W = W_0 + \frac{W_F + W_C}{2}$$

W: Abfallmasse (kg)

W_0 : Abfallmasse (kg), die nach der Nutzungsdauer eines Produktes auf der Deponie oder in einer Verbrennung landet

W_F : Abfallmasse (kg), die durch den Recyclingprozess erzeugt wird, der die zur Herstellung eines Produktes verwendeten Materialien liefert (d.h. Anteil der nicht verwertet wurde)

W_C : Abfallmasse (kg), die durch den Recyclingprozess nach der Nutzungsdauer des Produktes entsteht (d.h. Anteil der nicht verwertet werden kann)

$$W_0 = M(1 - C_R - C_U)$$

C_R : Anteil der Materialien mit dem Abfall-Recycling-Szenario

C_U : Anteil der Materialien mit dem Szenario zur Wiederverwendung von Abfällen (in % der Produktmasse)

$$W_F = M \frac{(1 - E_F) F_R}{E_F}$$

E_F : Effizienz des Recyclingprozesses, der die Materialien liefert, um ein Produkt herzustellen (%). Es wird der Standardwert von 75% angenommen, der vom Anwender manuell verändert werden kann, solange die erforderlichen Daten nicht verfügbar sind.

$$W_C = M (1 - E_C) C_R$$

E_C : Effizienz des Recyclingprozesses (%) für ein Produkt mit einem Abfall-Recycling-Szenario. Es wird der Standardwert von 75% angenommen, der vom Anwender manuell verändert werden kann, solange die erforderlichen Daten nicht verfügbar sind.

Die Nutzungsfunktion $F(X)$ wird analog zum BCI von Verberne mit folgender Formel ermittelt [94, S. 16]:

$$F(X) = \frac{0,9}{X} \quad \text{mit} \quad X = \frac{L}{L_{av}}$$

0,9: Gebrauchskonstante

L: Potenzielle Nutzungsdauer eines Produktes (in Jahren)

L_{av} : Branchenübliche Nutzungsdauer eines Produktes (in Jahren)



Abb. 16 Darstellung des Ergebnisses der Indikatoren bei Madaster [94, S. 6]

Das Ergebnis ergibt sich aus dem nach Massen gemittelten Durchschnittswert und wird in Kreisdiagrammen pro Phase und pro Layer sowie für das gesamte Gebäude dargestellt (siehe Abb. 16).

3.4.6. Abbildung der Rückbaubarkeit

Für das EoL-Szenario der Wiederverwendung und der damit einhergehenden Zuordnung der Materialmasse zu F_U existieren drei qualifizierende Bedingungen bezüglich der Demontierbarkeit [94, S. 14]:

1. Die Montagepunkte sind leicht zugänglich, und das Produkt kann leicht entfernt werden, ohne andere Teile des Gebäudes zu beschädigen (ja/nein).
2. Das Produkt kann mit Standardwerkzeugen leicht demontiert werden, ohne dass das Objekt oder die Objekte, an denen das Produkt befestigt ist, beschädigt werden (ja/nein).
3. Die Montagepunkte und Montagemethoden, die zur Installation des Produkts verwendet werden, sind standardisiert und vorgefertigt (ja/nein).

Eine Bedingung für die Zuteilung von Materialien zum Recycling-Szenario, beispielsweise auf Basis der Art der Verbindung zwischen Bauteilschichten bzw. der sortenreinen Trennbarkeit, wird nicht gestellt.

3.4.7. Daten zur Berechnung des CI

Der Anwender kann Bauteile und Materialien mit Datensätzen aus Systemdatenbanken der Plattform verknüpfen oder mit eigenen Daten anreichern. Die mit der Plattform verknüpften Datenbanken sind sowohl aus privater als auch aus öffentlicher Hand. Private Daten stammen dabei sowohl von Madaster selbst, als auch von Produktherstellern aus der Baubranche (Bsp. Holcim GmbH) [96, S. 24]. Darüber hinaus ist die Datenbank des Informationsportals für nachhaltiges Bauen *Ökobaudat*, des *Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen* (BMWSB) mit der Plattform verknüpft. Die für die Berechnung erforderliche Angaben zur Zirkularität der Materialien und Produkte sind der Tab. 9 zu entnehmen.

<u>Bauphase</u>	<u>Nutzungsphase</u>	<u>End-of-Life Phase</u>
Anteil Sekundärrohstoffe	Lebensdauer	Anteiliges EoL-Szenario
Anteil NaWaRos		Recyclingeffizienz
Recyclingeffizienz		

Tab. 9 Für die Berechnung des CI erforderliche Zirkularitätsdaten (eigene Darstellung)

Die potenzielle Lebensdauer der verwendeten Bauprodukte muss seitens des Anwenders selbst abgeschätzt oder recherchiert werden. Die anderen Zirkularitätsdaten sind in den Datensätzen vorhanden. Allerdings sind die Datensätze nicht immer vollständig. Der Anwender kann die Angaben durch eigene Recherche vervollständigen. Ob die angereicherten Daten seitens Madaster geprüft werden, ist nicht ersichtlich. Die Angaben in den Datensätzen derselben Materialien können dabei stark abweichen (siehe Tab. 10). Der Auszug zeigt einen Vergleich zweier generischer Datensätze für das Material *Spanplatte*. Ein Datensatz ist dabei von dem Bauunternehmen *Epea GmbH* erstellt. Der andere Datensatz stammt von der Seite der *Ökobaudat*, Beide Datensätze sind nach Angaben der Ersteller nach der Norm für die *Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklaration* DIN EN 15804 + A1 und DIN EN 15804 + A2 konform. Die Datensätze unterscheiden sich zum einen in den Angaben zum Anteil an erneuerbaren Rohstoffen, zum anderen an der Vorhersage des EoL-Szenarios. Durch die freie Wahl der zu verknüpfenden Datensätze, ist das Ergebnis durch den Anwender beeinflussbar. In dem beispielhaften Vergleich kann der Anwender zwischen dem EoL-Szenario *Recycling* und *Verbrennung* wählen.

Eine Frage wirft die Kategorisierung des Holzwerkstoffs zu erneuerbaren Rohstoffen auf: Im Datensatz der *Epea GmbH* sind 90% als erneuerbar eingestuft, allerdings wird kein schnell nachwachsender Anteil ausgewiesen. Das Material Holz wird also an dieser Stelle nicht als schnell nachwachsend eingestuft. Eine wissenschaftliche Grundlage für die Kategorisierung in *schnell* nachwachsend und *nachwachsend* bleibt seitens des Inhabers der Plattform aus.

Im Datensatz der *Ökobaudat* hingegen, ist kein Anteil an erneuerbaren Rohstoffen ausgewiesen. Das ist offensichtlich auf die mangelnden Angaben zu dieser Eigenschaft in der Originaldatei zurückzuführen und bedarf der eigenen Recherche. Bei den beispielhaft angeführten Auszügen handelt es sich um nach der europäischen Norm konforme Daten. Die Normkonformität ist jedoch nicht Voraussetzung für die Aufnahme in die Bewertung. So haben Produkthersteller die Möglichkeit auch ohne wissenschaftliche Überprüfung oder Drittzertifizierung, z.B. ISO 14020 Umweltproduktdeklaration, Angaben zum Produkt hochzuladen.

Generischer Datensatz für eine Spanplatte (EPEA GmbH)			
Primärrohstoffe:	100%	Zur Wiederverwendung	0%
Erneuerbare Rohstoffe:	90%	verfügbar:	
<i>Erneuerbare Rohstoffe nachhaltig produziert:</i>	0%	Verfügbar für das Recycling (Effizienz des Recyclingprozesses):	100% (100%)
<i>Schnell erneuerbare Rohstoffe:</i>	0%	Deponierung:	0%
<i>Schnell erneuerbare Rohstoffe nachhaltig produziert:</i>	0%	Verbrennung:	0%
Nicht erneuerbare Rohstoffe:	10%		
Sekundärrohstoff:	0%		
Wiederverwendet:	0%		
Recycelt (Effizienz des Recyclingprozesses):	0% (100%)		
Generischer Datensatz für eine Spanplatte (Okobaudat)			
Primärrohstoffe:	100%	Zur Wiederverwendung	0%
Erneuerbare Rohstoffe:	0%	verfügbar:	
<i>Erneuerbare Rohstoffe nachhaltig produziert:</i>	0%	Verfügbar für das Recycling (Effizienz des Recyclingprozesses):	0% (0%)
<i>Schnell erneuerbare Rohstoffe:</i>	0%	Deponierung:	0%
<i>Schnell erneuerbare Rohstoffe nachhaltig produziert:</i>	0%	Verbrennung:	100%
Nicht erneuerbare Rohstoffe:	100%		
Sekundärrohstoff:	0%		
Wiederverwendet:	0%		
Recycelt (Effizienz des Recyclingprozesses):	0% (0%)		

Tab. 10 Auszug Datensätze Madaster: Vgl. Spanplatte Epea GmbH u. Okobaudat (Screenshot Madaster Plattform)

Der Verfasserin dieser Arbeit war es mithilfe der Bezahlung einer Jahreslizenz für Studierende möglich, Einblick in die verwendeten Datenbanken auf der Plattform zu bekommen. Im Gegensatz zu der Berechnungsformel gibt es dazu keine öffentlich zugänglichen Angaben.

3.4.8. Fazit

Der CI betrachtet alle für die Kreislauffähigkeit von Gebäuden wesentlichen Lebenszyklusphasen: Entwurf (hier: Konstruktion), Nutzung und End-of-Life. Das Ergebnis wird übersichtlich in Diagrammen dargestellt. Der Nutzer hat durch die gesonderte Berechnung des CI nach Phasen einen guten Einblick in das Verbesserungspotenzial des Gebäudes hinsichtlich dessen Zirkularität. Der Indikator berücksichtigt sowohl den

Anteil an wiederverwendeten und recycelten Materialien als auch den aus nachwachsenden Rohstoffen. Eine Zertifizierung für die nachhaltige Bewirtschaftung (z.B. FSC-Zertifikat siehe Kap. 2.1.6), wird allerdings nicht vorausgesetzt. Des Weiteren wird in der Bewertung aufgrund der Verwendung der EMF-Methode, nicht zwischen Recycling und Downcycling unterschieden. Als Voraussetzung für die Zuteilung von Materialmassen zu dem EoL-Szenario *Wiederverwendung*, muss die zerstörungsfreie Demontage möglich sein. Eine weitergehende Beurteilung der Bauteile hinsichtlich der Trennbarkeit einzelner Bauteilschichten bzw. Materialien findet nicht statt. Es werden keine Anforderungen an die Schadstofffreiheit von Materialien gestellt. Der CI ähnelt sehr der Methodik von Verberne, wobei die Abbildung der Rückbaubarkeit stark vereinfacht als *Vorbedingung für die Wiederverwendung* umgesetzt wurde. Dies dient offensichtlich der Anwenderfreundlichkeit, beeinträchtigt jedoch die Wissenschaftlichkeit der Berechnung. Es bedient sich zudem im Gegensatz zum BCI von Verberne, der neueren Version (2021) des MCI, wobei auch nachwachsende Rohstoffe berücksichtigt werden.

Die auf der Plattform bereitgestellten Daten sind teils lückenhaft und müssen auf Plausibilität geprüft werden. Des Weiteren müssen diese keiner Norm oder Zertifizierung entsprechen. Daten zur Nutzungsdauer beruhen auf der Einschätzung des Nutzers. Dem Anwender ist es freigestellt, welche Datensätze er für seine Berechnung verwendet. Diese können sich dabei erheblich unterscheiden.

Der Indikator weist in einigen Punkten Verbesserungspotenzial auf. Besonders zu bemängeln ist dabei der fehlende wissenschaftliche Ansatz bezüglich der Bewertung der Rückbaubarkeit, sowie mangelnde Transparenz im Hinblick verwendeter Daten. Der Indikator befindet sich nach Aussage des Urhebers, trotz der Bereitstellung auf der Plattform, noch in der Entwicklungsphase [100].

3.5. Building Circularity Index

Das Projektmanagement Unternehmen *Alba Concept* (AC) aus den Niederlanden – seit 2020 Teil des Unternehmens *Planon* – hat 2021 den Building Circularity Index (BCI_{AC}) entwickelt [97]. Der Indikator ist genau wie der CI von Madaster, eine Abwandlung des BCI von Verberne und wird in Form einer privaten Software kostenpflichtig zur Bewertung der Kreislauffähigkeit von Gebäuden angeboten [98]. Die Anwendbarkeit der

Software ist auf den niederländischen Sprachraum begrenzt. Der BCI_{AC} wird im Folgenden mit Hinblick auf die Abweichungen zur Methode von Verberne erläutert. Der Verfasserin der Arbeit wurde kein kostenfreier Zugang zur Verfügung gestellt. Einen Einblick in die verwendeten Daten war daher nicht möglich. Die Beurteilung der Methode erfolgt auf Basis der Veröffentlichung [98] des Anbieters.

3.5.1. Systematik

Der BCI_{AC} wird, wie die Methodik von Verberne, in vier Schritten ermittelt. Allerdings wird die Systemebene durch die Elementebene ersetzt (siehe Abb. 17). Des Weiteren werden Umweltfolgekosten in die Berechnung einbezogen.

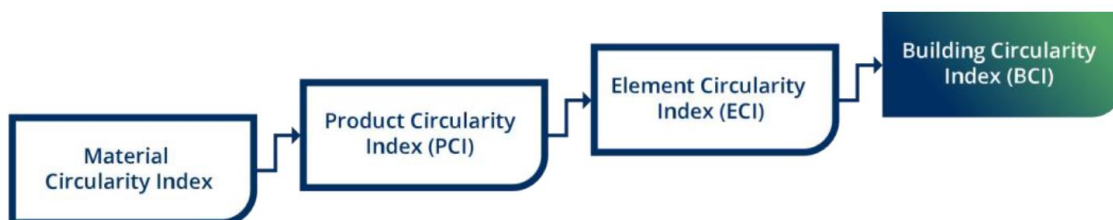


Abb. 17 Systematik der Berechnung des BCI von Alba Concept [97, S. 5]

3.5.2. Material Circularity Index

Der Material Circularity Index (MCI), gleicht dem von Verberne, berücksichtigt jedoch nachwachsende Rohstoffe als zirkuläre Materialien. Die Formel zur Berechnung des MCI lautet [97, S. 6]:

$$MCI_p = 1 - LFI_p \times F(X_p)$$

$$LFI = \frac{np+sp+vp}{2}$$

np: Anteil Primärrohstoffe der nicht aus Recycling, Wiederverwendung stammt oder aus NaWaRos besteht (in % der Produktmasse)

sp: Anteil an Abfall für die Deponierung (in % der Produktmasse)

vp: Anteil an Abfall für die Verbrennung (in % der Produktmasse)

Der Nutzfaktor $F(x)$ wird analog zur Methodik von Verberne berechnet. Als Referenzwert für die technische Nutzungsdauer von Bauprodukten werden Daten der Veröffentlichung *Lebensdauer von Bauprodukten* von Straub et. Al [99] verwendet.

3.5.3. Product Circularity Index

Der Product Circularity Index (PCI) berücksichtigt die Rückbaubarkeit von *Produkten* und *Elementen*. Ein Produkt wird dabei als Bauteil definiert, das auf der Baustelle ankommt und im Gebäude verbaut wird. Ein Element besteht aus mehreren Bauteilen, die als eine zusammengesetzte Einheit auf der Baustelle geliefert werden. [97, S. 11]

In Anlehnung an die Methode von Verberne wurden zur Berechnung des PCI die Trennbarkeitsfaktoren aus der Forschung von Durmisevic verwendet. Alba Concept schränkt den Betrachtungsrahmen jedoch weiter auf vier der insgesamt siebzehn Faktoren ein (siehe Tab. 11). Es werden weiterhin Vereinfachungen in der Anzahl der Kriterien sowie den Formulierungen vorgenommen. So wird beispielsweise der Faktor *Funktionale Abhängigkeit* – hier Durchdringungen genannt – von fünf auf drei Unterkriterien vereinfacht. Trotz Vereinfachung bleiben jedoch die Gewichtung der Unterkriterien bzw. die Skalen gleich. [97, S. 9]

Zur Berücksichtigung der Rückbaubarkeit im PCI, dient der *Rückbaubarkeitsindex* LI_P . Dieser bewertet die Rückbaubarkeit anhand der Trennbarkeitsfaktoren zwischen 0,1 (nicht lösbar) und 1,0 (lösbar) und setzt sich aus dem geometrischen Mittel des *Demontageindex* LI_c und des *Trennbarkeitsindex* LI_s zusammen. [97, S. 11]

Kriterium	Unterkriterien		Kriterien	Unterkriterien	
Durchdringungen (DK)	Modulare Aufteilung, keine Durchdringung von Produkten oder Elementen aus verschiedenen Schichten	1,0	Geometrie der Montagepunkt (RO)	Offen ohne Hindernis für Entnahme	1,0
	*Funktionale Abhängigkeit			Überlappung, teilweise Behinderung der Entnahme von Produkten/Elementen	0,4
	Gelegentliche Kreuzung von Produkten und Elementen aus verschiedenen Schichten	0,4		Geschlossen, vollständiges Hindernis für die Entnahme	0,1
	Vollständige Integration von Produkten oder Elementen aus verschiedenen Schichten	0,1			
Art der Verbindung (TV)	Trockene Verbindung	1,0			
	Verbindung mit Zubehör	0,8			
	Direkter Integralanschluss	0,6			
	Weiche chemische Verbindung	0,2			
	Harte chemische Verbindung	0,1			
Zugänglichkeit zu Befestigungen (ToV)	Erreichbar	1,0			
	Erreichbar mit Aufwand und o. Schaden	0,8			
	Erreichbar mit Aufwand mit reparierbaren Schaden	0,6			
	Erreichbar mit Aufwand mit reparierbaren Schaden der mehr als 20% des Wertes beträgt	0,2			
	Nicht zugänglich - irreparable Schäden am Produkt oder an umliegenden Produkten	0,1			

Tab. 11 Trennbarkeitsfaktoren im BCI_{AC} (eigene Darstellung, nach [97, S. 9])

Der PCI wird wie folgt berechnet:

$$PCI_p = \sqrt{(MCI_p \times LI_P)}$$

LI_P: Rückbaubarkeitsindex für Produkt p

$$LI_P = \frac{2}{\frac{1}{LI_C} + \frac{1}{LI_S}}$$

LI_C: Demontageindex

LI_S: Trennbarkeitsindex

$$LI_C = \frac{2}{\frac{1}{DK_P} + \frac{1}{RO_P}}$$

DK_P: Durchdringungen im Produkt (Bauteil)

RO_P: Geometrie der Montagepunkte (Produktkanten)

$$LI_S = \frac{2}{\frac{1}{TV_p} + \frac{1}{ToV_p}}$$

TV_p: Art der Verbindung der Bauteilschichten

ToV_p: Zugänglichkeit zu den Befestigungen

3.5.4. Element Circularity Index

Im *Element Circularity Index* (ECI) wird die Rückbaubarkeit von Elementen berücksichtigt. Elemente sind dabei ein oder mehrere Bauteile, die sich nicht mehr trennen lassen. Dies wird auf Basis des Trennbarkeitsfaktors *Zugänglichkeit zu Montagepunkten* (ToV) unterschieden. Haben ein oder mehrere Bauteile den ToV-Faktor 0,1, handelt es sich um Elemente. Neben der Bewertung der Rückbaubarkeit, werden im (ECI) auch Umweltfolgekosten – im sogenannten Umweltfolgekostenindikator MKI (nl. Milieu Kosten Indicator) – einbezogen (siehe Kap. 3.5.6). [97, S. 21ff.]

Für Elemente erfolgt eine erneute Berechnung des MCI unter Berücksichtigung des MKI der jeweiligen Anteile: aus Primärrohstoffen (n), des Szenarios Verbrennung (v) und des Szenarios Deponierung (s). Die Formeln zur Berechnung des ECI lauten [97, S. 11]:

$$ECI = \sqrt{(MCI_e \times LI_e)}$$

$$LI_e = \frac{2}{\frac{1}{LI_c} + \frac{1}{LI_s}}$$

MCI_e: Material Circularity Indicator für Element e mit allen Teilprodukten p

LI_e: Rückbaubarkeitsindex von Element e

$$MCI_e = 1 - LFI_e \times F(X_e)$$

$$LFI_e = \frac{1}{\sum_{i=1}^p MKI} \times \frac{((\sum_{i=1}^p MKI_p \times n_p) + (\sum_{i=1}^p MKI \times s_p) + (\sum_{i=1}^p MKI_p \times v_p))}{2}$$

LFI_e: Linear Flow Index des Elements e

MKI: Umweltfolgekostenindikator der Teilprodukte p, die Teil des Elements e sind

3.5.5. Building Circularity Index

Im Building Circularity Index (BCI_{AC}) werden die Ergebnisse aus dem PCI und ECI unter Berücksichtigung des Umweltfolgekostenindikators MKI aufsummiert. Das Ergebnis ergibt die Bewertung der Kreislauffähigkeit von 10% bis 100% auf der Gebäudeebene. [97, S. 22]

Die Formel für den BCI lautet:

$$BCI = \frac{1}{\sum_{i=1}^n MKI_n} \times \sum_{i=1}^n \left((MKI_p \times PCI_p) + \sum_{i=1}^p MKI_p \times ECI_d \right)$$

MKI_p : Umweltkostenindikator der Produkte (Bauteile)

MKI_n : Umweltkostenindikator der Produkte und Elemente (n)

3.5.6. Umweltkostenindikator

Der von Alba Concept verwendete Umweltkostenindikator *MKI* bildet elf Umweltwirkungskategorien einer Ökobilanzierung von Bauprodukten ab. Genauere Angaben zur Auswahl der Kategorien werden nicht veröffentlicht. Die Ergebnisse der LCA werden in einer Ein-Punkt-Bewertung als Gewichtungsfaktor (MKI) in der Berechnung des ECI und BCI verwendet. [97, S. 14]

Auch an dieser Stelle fehlen Angaben zur genauen Überführung der LCA zum MKI. Der MKI berücksichtigt laut Alba Concept die Produktmasse sowie die Austauschhäufigkeit im Lebenszyklus des Gebäudes. Der Einbezug der Umweltauswirkungen in die Berechnung des BCI ist laut Alba Concept auf die Definition der niederländischen privaten Plattform CB'23 zurückzuführen. Diese definiert im *Leitfaden zur Messung der Kreislauffähigkeit* drei Ziele der Kreislaufwirtschaft: Schutz von Materialbeständen, Umweltschutz und Schutz von bestehenden Werten. Der MKI bezieht sich dabei auf das zweite Ziel. [97, S. 14]

Die Initiatoren der Plattform CB'23, haben das Ziel der Vereinheitlichung der Bewertungsmethoden für die Kreislauffähigkeit von Gebäuden in den Niederlanden [100]. Im Leitfaden sind allerdings – anders als im MKI von Alba Concept – sechzehn Umweltwirkungskategorien vorgesehen.

3.5.7. Fazit

Der BCI betrachtet alle für die Bewertung von Kreislauffähigkeit wesentlichen Lebenszyklusphasen. In der Entwurfsphase berücksichtigt die Bewertung die Wiederverwendung, die Nutzung von Recyclingmaterial sowie die Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen. Genau wie bei den anderen MCI-basierten Methoden, wird nicht zwischen

Recycling und Downcycling unterschieden. Die Schadstofffreiheit gehört nicht zum Bewertungsrahmen des BCI. Bauprodukte mit einer überdurchschnittlichen Lebensdauer gehen, analog zur MCI der EMF, positiv in die Bewertung mit ein. Als nicht zirkuläres EoL-Szenario wird die Verbrennung und Deponierung definiert.

Die Trennbarkeit von Bauteilen wird anhand der Trennbarkeitsfaktoren der Forschung von Durmisevic beurteilt. Es werden jedoch lediglich vier der insgesamt siebzehn Trennbarkeitsfaktoren berücksichtigt. Dadurch wird der wissenschaftlich definierte Bewertungsrahmen reduziert.

Der BCI berücksichtigt die Umweltfolgekosten von Bauprodukten. Der Betrachtungsrahmen des BCI entspricht damit nicht der Definition der Kreislaufwirtschaft dieser Forschung. Umweltauswirkungen sind wesentlicher Bestandteil der Nachhaltigkeitsbewertung und können durch eine Ökobilanzierung nach DIN EN 1504 durchgeführt werden. Durch den direkten Einbezug in die Berechnung, ist zum einen der Fokus auf die Bewertung der Kreislauffähigkeit der Baukonstruktion nicht gegeben, zum anderen lässt sich nicht beurteilen, welchen Anteil die Umweltfolgekosten in der gesamten Berechnung ausmachen.

3.6. Urban Mining Index

Der Urban Mining Index (UMI) wurde von Rosen im Rahmen der gleichnamigen Doktorarbeit entwickelt und im Jahr 2020 veröffentlicht. Der Index wurde mit dem Ziel entwickelt, die Kreislauffähigkeit von Baukonstruktionen und Gebäuden in der Neubauplanung zu bewerten [3, S. 8]. Eine Online-Anwendung zur Berechnung des UMI ist derzeit, nach Angaben der Urheberin, in Planung [3, S. 175].

3.6.1. Systematik

Im Rahmen der Bewertung werden sowohl die in der Entwurfsphase (Pre-Use-Phase) verwendeten Materialien, als auch die nach der Rückbauphase (Post-Use-Phase) resultierenden Abbruchmaterialien (hier *Wertstoffe* genannt) und deren Qualitätsstufen bezüglich ihrer Herkunft bzw. Nachnutzungsmöglichkeiten betrachtet [3, S. V]. Analog zu den bisher analysierten Methoden, spielt zum einen die Wahl der Materialien als auch die möglichen EoL-Szenarien nach dem Rückbau eine Rolle in der Bewertung der Kreislauffähigkeit. Abb. 18 zeigt die Systematik der Bewertung in den zwei Phasen. Der Anwender hat die Möglichkeit Konstruktionsvarianten zu vergleichen und diese auf ihr

Kreislaufpotenzial bezüglich der Herkunft der Materialien (Pre-Use) und der Nachnutzung von Wertstoffen (Post-Use) zu optimieren.

Zusätzlich soll der Anwender, nach Fertigstellung der Software, die Möglichkeit haben den CO₂-Footprint verschiedener Konstruktionsvarianten zu vergleichen. In die Berechnung sollen dabei die Modulen A-D einer Ökobilanz nach DIN 15978 eingehen. Der CO₂-Footprint, geht jedoch nicht in die Bewertung der Kreislauffähigkeit mit ein. [3, S. 34]

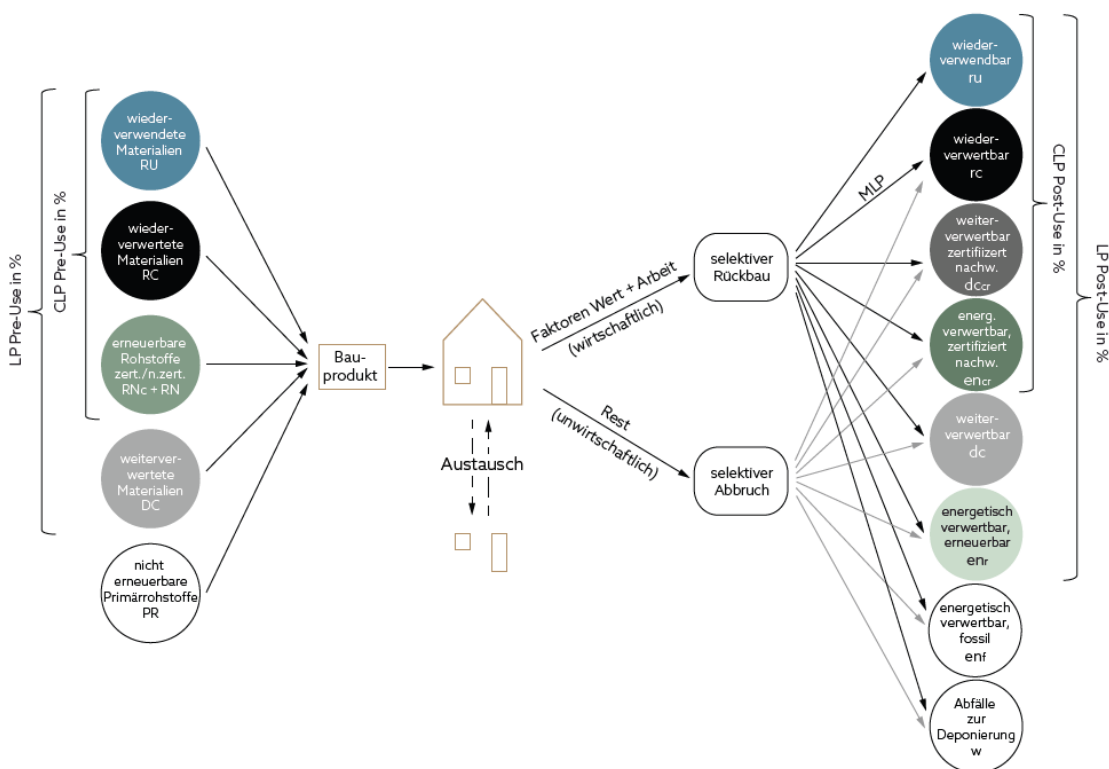


Abb. 18 Urban Mining Index Systematik [3, S. 175]

Im folgenden Kapitel wird die Definition und Berechnung des Kreislaufpotenzials auf der Ebene des Bauteils im Urban Mining Index erläutert. Tab. 12 zeigt eine Übersicht der im Laufe der Berechnung verwendeten Parameter.

Lebenszyklusphase	Parameter	Maßstab/ Einheit	Maßstab/ Einheit
Pre-Use	Wiederverwendung	Massenanteil in %	Variable
	Material-Recycling-Content MRC Nach Qualitätsstufen	Massenanteil in %	Variable
Post-Use	EoL-Szenarien	Massenanteil in %	Variable
	Sortenreinheit	Störstoffe in %	Ausschlusskriterium
	Zerstörungsfreie Lösbarkeit	-	qualifizierendes Kriterium für Wiederverwendung
	Material-Loop Potenzial (MLP)	Massenanteil in %	Koeffizient
	Arbeit	Megajoule (MJ)	Koeffizient
	Wert	Euro	Koeffizient
	Schadstofffreiheit	Grenzwert in %	Ausschlusskriterium

Tab. 12 Übersicht der Parameter zur Berechnung des UMI (eigene Darstellung, nach [3, S. 106])

3.6.2. Kreislaufpotenzial im Urban Mining Index

Rosen definiert für den *Urban Mining Index* zwei Arten von Kreislaufpotenzial: das *Closed-Loop-Potenzial* (CLP) und das *Loop-Potenzial* (LP). Das CLP bildet die Materialien ab, die in geschlossenen Kreisläufen geführt werden. Das LP bildet darüber hinaus die Materialien ab, die in offenen Kreisläufen geführt werden. Offene Kreisläufe sind dabei solche, bei denen zwar eine Nachnutzung erfolgt, diese aber mit einem Qualitätsverlust verbunden ist. Je nach Phase – ob Pre-Use oder Post-Use – ordnet Rosen dem CLP und LP verschiedene Qualitätsstufen bzw. EoL-Szenarien zu (siehe Abb. 19). Je nach Massenanteil und Qualitätsstufe der verwendeten Materialien kann die Bewertung im CLP und LP zwischen 0 und 200% liegen. [3, S. 25]

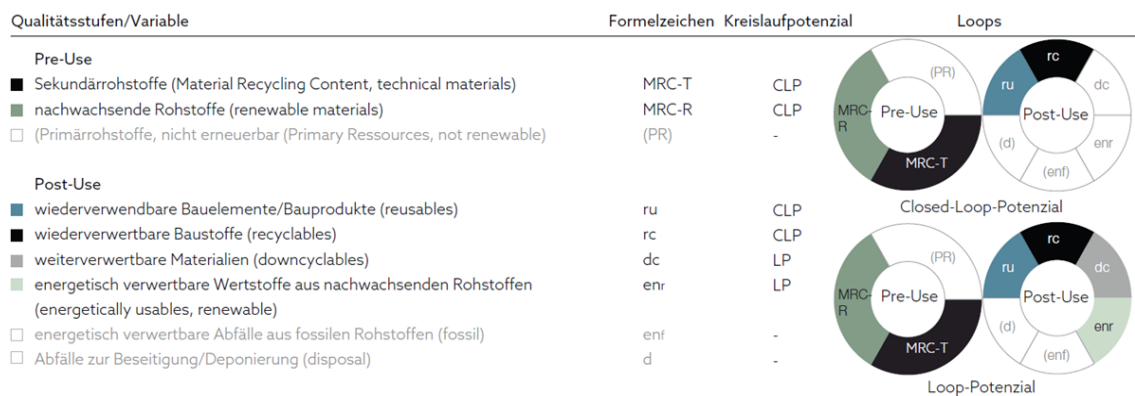


Abb. 19 Kreislaufpotenziale im Urban Mining Index [3, S. 161]

Abb. 19 zeigt rechts die Darstellung der Kreislaufpotenziale in den Kreisdiagrammen auf der Bauteilebene. Die Definition des Kreislaufpotenzials in den beiden Phasen wird im Folgenden erläutert.

3.6.3. Kreislaufpotenzial Pre-Use-Phase

In der Pre-Use-Phase werden die Massenanteile der Baukonstruktion ausgewertet, die bezüglich ihrer Herkunft Kreislaufpotenzial besitzen. Zum *Closed-Loop-Potenzial* gehört dabei [3, S. 172]:

1. Wiederverwendung von Materialien und Bauteilen (RU)
2. Nutzung von recycelten Materialien ohne Downcycling (RC)
3. Nutzung von erneuerbaren Rohstoffen (RN)

Die dazugehörige Formel lautet:

$$CLP_{pre-use} = RU + RC + RN$$

RU: Massenanteil der wiederverwendeten Bauteile, Bauelemente oder Bauprodukte (RU für engl. Reuse)

RC: Massenanteil der wiederverwerteten Materialien (RC für engl. Recycle)

RN: Massenanteil der erneuerbaren Rohstoffe (RN für engl. Renewable)

Das *Loop-Potenzial* der Pre-Use-Phase bindet über den Qualitätsstufen des CLP noch das Downcycling (DC) mit ein. Es setzt sich dabei wie folgt zusammen [3, S. 172]:

1. Wiederverwendung von Materialien und Bauteilen (RU)
2. Nutzung von recycelten Materialien ohne Downcycling (RC)
3. Nutzung von erneuerbaren Rohstoffen (RN)
4. Downcycling (DC)

Die Nutzung von nicht erneuerbaren Primärrohstoffen (PR) wird nicht in das Kreislaufpotenzial eingebunden. Die Formel für das Loop Potenzial der Pre-Use-Phase lautet:

$$LP_{pre-use} = CLP_{pre-use} + DC$$

DC: Massenanteil der weiterverwerteten Materialien

Zur Quantifizierung der Massenanteile von recycelten Materialien benutzt Rosen den an der bergischen Universität Wuppertal berechneten *Material Recycling Content* (MRC) [3, S. 94]. Dieser gibt an, zu welchem Anteil ein Material bzw. Produkt derzeit aus Recyclingstoffen hergestellt wird. Als Datengrundlage wurden allgemeingültige Quellen, aber auch produktspezifische Angaben verwendet (z.B. Herstellerangaben, Produktinformationen, EPDs) [2, S. 64].

3.6.4. Kreislaufpotenzial Post-Use-Phase

In der Bewertung der Post-Use-Phase werden die EoL-Szenarien der zurückgebauten Materialien betrachtet. Abb. 19 zeigt die Szenarien, die in die Betrachtung eingehen. Auch diese Phasenbewertung des Post-Use setzt sich aus dem CLP und LP zusammen. Um zu den Szenarien Wiederverwendung, Wiederverwertung und Downcycling zugeordnet werden zu können, muss ein Material zunächst die in Tab. 13 abgebildeten Voraussetzung erfüllen [3, S. 97].

EoL-Szenario	Voraussetzungen
Wiederverwendung	zerstörungsfrei trennbar Absatzmarkt vorhanden langlebig dem technischen Fortschritt nicht unterworfen
Wiederverwertung	sortenrein trennbar
Downcycling	sortenrein trennbar

Tab. 13 Voraussetzung für das Kreislaufpotenzial Post-Use [3, S. 97]

Zum *Close-Loop-Potenzial* der Post-Use-Phase gehören die Massenanteile der folgenden vier EoL-Szenarien [3, S. 172]:

1. Wiederverwendung (ru)
2. Recycling (rc)
3. Downcycling von zertifiziert nachwachsenden Wertstoffen (d_{cr})
4. Energetisch verwertbare zertifizierte Wertstoffe (e_{cr})

Die Formel lautet demnach:

$$\text{CLP}_{\text{Post-use}} = ru + rc + dc_{\text{cr}} + en_{\text{cr}}$$

ru: Massenanteil der wiederverwendbaren Bauteile, Bauelemente oder Bauprodukte nach der Demontage

rc: Massenanteil der wiederverwertbaren Wertstoffe nach dem Rückbau inkl. Kompost

dc_{cr}: Massenanteil der weiterverwertbaren (Downcycling) Wertstoffe aus zertifiziert nachwachsenden Rohstoffen nach dem Rückbau

en_{cr}: Massenanteil der energetisch verwertbaren Wertstoffe aus zertifizierten nachwachsenden Rohstoffen nach dem Rückbau

Das Loop-Potenzial der Post-Use-Phase enthält neben den EoL-Szenarien des CLP im Post-Use, noch die Szenarien *weiterverwertbare Materialien* (dc) und *energetisch verwertbare erneuerbare Materialien* (en_r). [3, S. 174]

Es setzt sich somit aus folgenden sechs Szenarien zusammen:

1. Wiederverwendung (ru)
2. Recycling (rc)
3. Downcycling von zertifiziert nachwachsenden Materialien (dc_{cr})
4. Energetisch verwertbare zertifizierte Materialien (en_{cr})
5. Weiterverwertbare (Downcycling) Wertstoffe (dc)
6. Energetisch verwertbaren Wertstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen (en_r)

Die dazugehörige Formel lautet wie folgt:

$$\text{LP}_{\text{Post-use}} = \text{CLP}_{\text{Post-use}} + dc + en_{\text{r}}$$

dc: Massenanteil an weiterverwertbaren Wertstoffen nach dem Rückbau

en_r: Massenanteil an energetisch verwertbaren Wertstoffen aus nachwachsenden Rohstoffen nach dem Rückbau

Die sonstigen energetisch verwerteten Wertstoffe sowie die Wertstoffe zur Deponierung werden nicht mit in das Kreislaufpotenzial einbezogen.

Vorhersage und Quantifizierung in der Post-Use-Phase

Zur Vorhersage und anschließenden Quantifizierung der anteiligen Massen der EoL-Szenarios, hat Rosen einen eigenen Ansatz entwickelt. Die Materialien werden dabei je nach der Wirtschaftlichkeit ihres selektiven Rückbaus zu den Szenarien zugeordnet. [3, S. 13]

Dieser Ansatz geht auf die Annahme zurück, dass die Kosten für den Rückbau, entscheidend für die Wahl der Rückbaumethode und somit auch für die Sortenreinheit des Materials sind. Je sortenreiner ein Material nach dem Rückbau ist, desto hochwertiger ist sein EoL-Szenario. Rosen stellt fest, dass in den meisten Fällen der selektive Rückbau die Methode ist, bei denen das EoL-Szenario hochwertiger ist [3, S. 14]. Wird Holz beispielsweise selektiv zurückgebaut, so kann es anschließend weiterverwertet werden, wird es jedoch selektiv abgebrochen, so ist lediglich eine energetische Verwertung möglich (siehe Tab. 14). Es gibt jedoch Ausnahmen, die der Tab 14 zu entnehmen sind. So spielt es beispielsweise bei Fliesen und Keramik keine Rolle bezüglich des EoL-Szenarios, ob diese im Verfahren des selektiven Rückbaus oder Abbruchs zurückgebaut werden. In beiden Fällen kommt es nach der Nutzung zum Downcycling.

Der Berechnung des Kreislaufpotenzials der Post-Use-Phase geht eine Zuteilung der EoL-Szenarien nach Tab. 14 zu den Abbruchmethoden voraus.

	Wertstoff	End-of-Life-Szenarien			
		Reuse	Recycling	Downcycling	Energy Recovery renewable * fossil †
■ hochwertigstes End-of-Life-Szenario: nur Baustoffe, für die ein etablierter Gebrauchmarkt existiert oder absehbar ist (z.B. hochwertige Klinker, großformatige Natursteine, wertvolle Hölzer wie Eichenbalken), Demontage erforderlich	Beton		■	□	
	Ziegel/Mauersteine	■	■	□	
	Fliesen und Keramik			■□	
■ hochwertiges End-of-Life-Szenario, selektiver Rückbau erforderlich	Naturstein	■		■□	
	Boden/Lehmbaustoffe		■	□	
□ übliches End-of-Life-Szenario, selektiver Abbruch	Holz A1 und A2 nach AltholzV	■		■	□
	biologische Faserstoffe (Kompost)		■		□
	Glas		■	□	
	Kunststoff, nach Kunststoffart			■	□ □
	Bitumengemische		■		
	Schrott, nach Metallart	■	■□		
	Hersteller-/Verbandsrücknahme (z. B. Mineralwolle, Gipsbaustoffe)		■		

Tab. 14 EoL-Szenarien verschiedener Werkstoffe nach Rückbaumethode [3, S. 92]

Daraus ergeben sich zwei Szenarien, denen die Wertstoffmasse zugeteilt wird. Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit hat Rosen den *Faktor Wert* und *Faktor Arbeit* entwickelt. Dieser wird im folgenden Abschnitt erläutert. Der Rest der Masse wird dem selektiven Abbruch und dem dazugehörigen EoL-Szenario zugeteilt.

Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus

Im Allgemeinen lässt sich die Wirtschaftlichkeit einer Handlung durch das Verhältnis zwischen Aufwand und Ertrag bestimmen [3, S. 98]. Ist der Ertrag größer als der Aufwand, so ist eine Handlung wirtschaftlich. Gleiches gilt auch für die Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus. Wie in Kapitel 2.1.5 erläutert, lässt sich die Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus in erster Linie durch den Rückbau- bzw. Demontageaufwand und den Entsorgungskosten bzw. Verwertungserlösen (Restwert) bestimmen [3, S. 98]. Rosen fasst diese in den Faktoren *Arbeit* und *Wert* zusammen. Wobei im Faktor *Arbeit*, der Arbeitsaufwand für Maschinen und Personen (Einheit MJ) abbildet. Dieser dient der Abschätzung der Wahrscheinlichkeit des selektiven Rückbaus bezogen auf Basis des Arbeitsaufwands. Der Faktor *Wert* bildet die Entsorgungskosten und die Verkaufserlöse (Einheit €/t) eines Abbruchmaterials ab. Er dient der Abschätzung der Wahrscheinlichkeit des selektiven Rückbaus aus Basis des Wertes. Das Produkt der beiden Faktoren gibt schlussendlich die Wahrscheinlichkeit an, ob ein Abbruchunternehmer das Baumaterial selektiv zurückbauen wird (siehe Beispielrechnung auf S. 98). Das Produkt kann maximal 1,0 betragen, da nicht mehr als 100% des Materials zurückgewonnen werden kann. Die Herleitung der Faktoren *Wert* und *Arbeit* durch Rosen wird im Folgenden erläutert.

Faktor Wert

Im Gegensatz zur Kostenermittlung im Hochbau, gibt es keine öffentlich verfügbaren Daten zu den Rückbaukosten (z.B. vergleichbar mit dem Baukostenindex) [3, S. 54]. So wird auch der Restwert des Abbruchmaterials nirgends erfasst. Rosen führt daher zur Herleitung des *Faktors Wert* eigene empirische Untersuchungen durch, um die Kosten und Erlöse von Abbruchmaterialien zu ermitteln. Dazu befragte sie im Jahr 2016 und 2019 insgesamt 36 Abbruch- und Entsorgungsunternehmen in ganz Deutschland. Das Ergebnis, die durchschnittlichen Kosten und Erlöse von Abbruchmaterialien in Deutschland, sind den Abb. 20 und 21 zu entnehmen. Dabei wird deutlich, dass derzeit vor allem Metalle zu Verkaufserlösen führen. Der überwiegende Teil des Abfalls führt zu Entsorgungskosten.

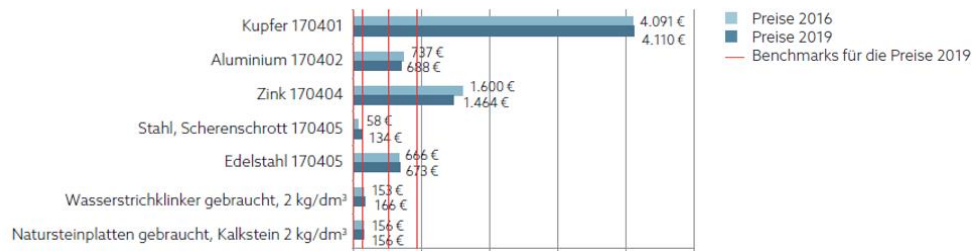


Abb. 20 Verkaufserlöse von Abbruchmaterialien deutschlandweiter Durchschnitt

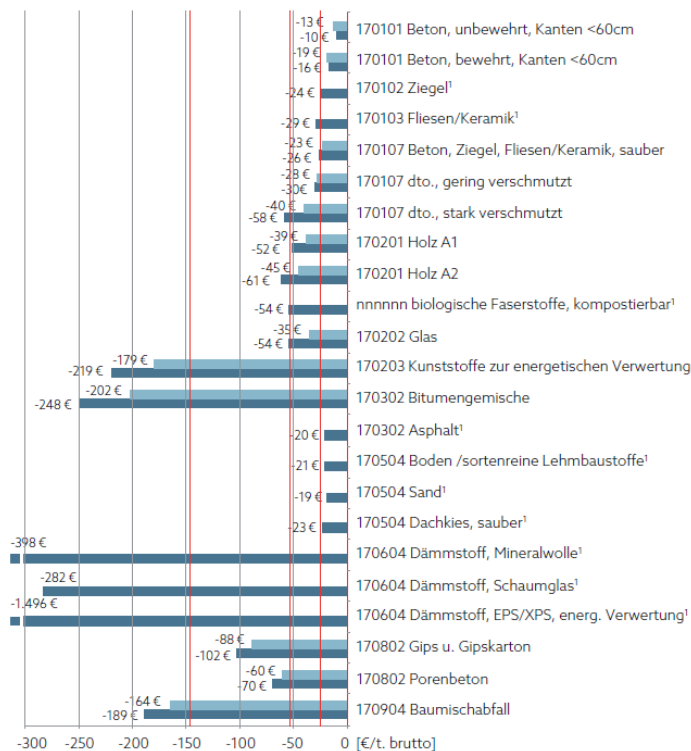


Abb. 21 Entsorgungskosten von Abbruchmaterialien deutschlandweiter Durchschnitt

Die ermittelten Daten wurden in Quartile unterteilt, also in vier gleich große Teile (siehe rote Linien in Abb. 20 und Abb. 21). Aus diesen Quartilen lassen sich Skalen von *äußerst negativ* bis *äußerst positiv* bilden. Den Skalen ordnet Rosen den Faktor Wert (fv) zu. Der Faktor reicht dabei von 0,6 bis 1,3 (siehe Tab. 15).

Preis	Bewertung	Faktor Wert (fv)
880 €/t	äußerst positiv	1,3
420 €/t	sehr hoch positiv	1,2
150 €/t	hoch positiv	1,1
0 €/t	leicht positiv	1,0
-23 €/t	leicht negativ	0,9
-54 €/t	hoch negativ	0,8
-146 €/t	sehr hoch negativ	0,7
	äußerst negativ	0,6

Tab. 15 Durchschnittliche Erlöse bzw. Kosten mit Skalen und dem Faktor Wert [3, S. 115]

Ist der Faktor gleich Eins oder größer als Eins, so können aus den Materialien Erlöse erwirtschaftet werden und die Wahrscheinlichkeit der Rückgewinnung steigt. Liegt er unterhalb von Eins so ist mit Entsorgungskosten zu rechnen, was die Wahrscheinlichkeit des selektiven Rückbaus mindert. Materialien ohne Restwert, erhalten dabei den Faktor 1. Es wird davon ausgegangen, dass solche Materialien vollständig in den Kreislauf zurückgehen, da keine Entsorgungskosten entstehen. Ein Faktor Wert der $> 1,0$, kann so ggf. erhöhten Rückbauaufwand, ausgleichen. [3, S. 162]

Faktor Arbeit

Die Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus wird neben den zuvor erläuterten Entsorgungskosten bzw. Erlösen durch die Rückbau- bzw. Demontagekosten bestimmt. Diese setzen sich zusammen aus dem Aufwand für Personal und Maschinen sowie dem dazugehörigen Material (z.B. Schutzausrüstung, Sicherungsmaßnahmen) [3, S. 54]. Zur Quantifizierung des Aufwands für den Rückbau wird der Zeitaufwand für Personen und Maschinen herangezogen.

Rosen entwickelt für den *Urban Mining Index* einen Bauteilkatalog, der den personellen und maschinellen Aufwand für ein breites Spektrum an Bauteilen abbildet (siehe Anhang 3). Als Datenquelle verwendet sie zum einen Aufwandsdaten der Wissenschaftler Schultmann et. Al [101] und Grabner et. Al [102], zum anderen führt sie mit dem Ziel einer Vervollständigung eigene Untersuchungen auf Rückbaustellen und in Versuchsständen durch. Der Bauteilkatalog enthält 163 Bauteile bzw. Bauteilschichten. Analog zu der Einteilung beim Faktor Wert werden die ermittelten Daten in Quintile eingeteilt und der jeweilige Durchschnittswert ermittelt. Der Rückbau- bzw. Demontageaufwand wird anschließend, mittels einer fünfstufigen Bewertungsskala eingeordnet von *sehr gering* bis *sehr hoch*. Der *Faktor Arbeit* wird diesen Stufen zugeordnet und reicht von 1,0 bis 0,6 (siehe Tab. 16). [3, S. 162]

Arbeit [MJ/m ²]	Bewertung	Faktor (f_w)
≤ 1. Quintil	sehr gering	1,0
≤ 2. Quintil	gering	0,9
≤ 3. Quintil	mittel	0,8
≤ 4. Quintil	hoch	0,7
> 4. Quintil	sehr hoch	0,6

Tab. 16 Faktor Arbeit mit der Zuteilung zu den Quintilen [3, S. 163]

Rosen stellt jedoch fest, dass die Aufwandswerte der 163 Bauteile lediglich eine erste Datenbasis darstellen und zukünftig aufgrund der Vielzahl an unterschiedlichen

Konstruktionen und ständiger Neuentwicklungen fortlaufend ergänzt werden müssten. [3, S. 296]

Beispielrechnung für ein Stahlbetonbauteil

Diese Beispielrechnung ist aus der Veröffentlichung des Urban Mining Index entnommen und dient der Veranschaulichung der Anwendung zuvor beschriebener Zuteilungen zu den Szenarien und zeigt die Verwendung der Faktoren Wert und Arbeit [3, S. 163]. Des Weiteren wird die Verwendung des Material-Loop-Potenzials (MLP) aufgezeigt. Als Beispiel dient dabei eine 50-cm-Bodenplatte aus wasserundurchlässigem Stahlbeton.

1. Schritt: Massenberechnung

1.232 kg Beton
115 kg Stahl
<hr/>
1.347 kg gesamt

2. Schritt: Zuteilung EoL-Szenarien

Die untersuchte Bodenplatte ist nicht mit einer verklebten Abdichtung oder sonstigen Fremdstoffen verunreinigt, deshalb können die Materialien sortenrein zurückgewonnen werden. Anhand der Tab. 14 auf S. 94 werden den Wertstoffen folgende Szenarien zugeordnet:

	Hochwertiges EoL-Szenario Selektiver Rückbau	Übliches EoL-Szenario Selektiver Abbruch
Beton	Recycling	Downcycling
Stahl	Recycling	Recycling

3. Schritt: Zuweisung der Faktoren Wert und Arbeit

Für den Beton wird nach dem Bauteilkatalog (Anhang 3) der Rückbauaufwand als *sehr hoch* eingestuft, der Faktor Arbeit hat somit den Wert 0,6. Der Restwert des Betons wird nach Abb. 21, als leicht negativ eingestuft. Der Faktor Wert beträgt somit 0,9. Die Anwendung der Faktoren für den Bewehrungsstahl erübrigt sich, da dieser unabhängig von der Abbruchmethode nach Tab. 14 dem Recycling zugeführt wird.

4. Schritt: Zuweisung des *Material-Loop-Potenzial* (MLP)

Da beide Materialien dem Szenario *Recycling* zugeordnet werden, wird zur Quantifizierung der Massen neben den Faktoren Wert und Arbeit noch das sogenannte MLP aus dem *Atlas Recycling* verwendet [2, S. 64]. Dieser Wert gibt den idealen Recyclinganteil eines Materials an, sofern die Produktion des Recyclingmaterials maximal optimiert wäre. Die Angaben beruhen dabei, auf Testreihen und Versuchen wissenschaftlicher Institute sowie von Verbänden oder auf Aussagen von Produktionsfirmen.

	Material-Loop-Potenzial
Beton	39%
Stahl	100%

5. Schritt: Quantifizierung

Beton	Masse/ m ²	Faktor Wert	Faktor Arbeit	MLP
rc	= 1.232 kg	* 0,9	* 0,6	* 0,39
	= 259,5 kg	→ 21,1%		

Die Wahrscheinlichkeit, mit der das Material Beton das hochwertige EoL-Szenario Recycling erreicht, beträgt in diesem Fall 21%. Der übrige Beton wird dem heute üblichen EoL-Szenario Downcycling zugeordnet.

	Masse/ m ²	Anteil rc
dc	= 1.232 kg	- 259,5 kg
	= 972,5 kg	→ 78,9 %

Für Stahl ist die Anwendung der Koeffizienten nicht notwendig, da das übliche EoL-Szenario dem hochwertigen EoL-Szenario entspricht. Stahl wird bereits heute im üblichen selektiven Abbruch aus dem Betonstahl gelöst und nahezu in geschlossenen Kreisläufen geführt. Im Folgenden werden die gesamten Mengen des für das Recycling und Downcycling bestimmten Materials ermittelt. Dazu werden die Massen der jeweiligen Szenarien addiert und durch die Gesamtmasse der Bauteilschicht geteilt:

	Beton	Stahl	Gesamt
rc gesamt	= (259,5 kg/m ² + 115 kg/m ² / 1.347 kg/m ²)		
	= 0,278 → 27,8%		
dc gesamt	= 972,5 kg / 1.347 kg		
	= 0,722 → 72,2%		

3.6.5. Use-Phase

Neben der Pre-Use und Post-Use-Phase, wird im UMI auch die Nutzungsphase betrachtet. Im Fokus steht dabei die Quantifizierung des gestiegenen Materialeinsatzes, der durch den Austausch von Bauteilen innerhalb der Lebensdauer des Bauwerks entsteht [3, S. 33]. Die technische Nutzungsdauer von Bauteilen wird nach der Tabelle *Nutzungsdauern von Bauteilen* des BBSR zugeordnet [31]. Diese wird auch für die Erstellung von Lebenszyklusanalysen verwendet. Darin enthalten ist auch die Austauschhäufigkeit von Bauteilen über eine durchschnittliche Lebensdauer eines Bauwerks von 50 Jahren. Wird ein Bauteil nach dieser Tabelle innerhalb der 50 Jahre ausgetauscht, verdoppelt sich auch der Materialeinsatz, sowie das Wertstoff- bzw. Abfallaufkommen in der Bewertung.

3.6.6. Schadstofffreiheit

Für die Aufnahme der Materialien in die Bewertung des UMI, gilt die Schadstofffreiheit als Ausschlusskriterium [3, S. 90]. Zur Bewertung der Schadstofffreiheit nutzt Rosen die Kriterien des Gebäudezertifizierungssystems *der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen DGNB*. Enthält ein Material einen Stoff, der die Grenzwerte der DGNB nicht einhält, besitzt das Material kein Kreislaufpotenzial und wird nicht in die Rechnung einbezogen. Eine Übersicht, der innerhalb des DGNB verwendeten Kriterien für die Schadstofffreiheit, ist dem Anhang 2 zu entnehmen.

3.6.7. Urban Mining Indicator

Die Bewertung auf der Gebäudeebene erfolgt im *Urban Mining Indicator*. Dieser setzt sich jeweils aus 50% der Phasenergebnisse der Bauteilbewertung zusammen. Um den Qualitätsverlust der in offenen Kreisläufen geführten Materialien abzubilden, geht deren Anteil nur zur Hälfte in die Bewertung mit ein. Zur Ermittlung des Anteils wird eine

Differenz zwischen LP und CLP gebildet. Diese wird anschließend mit dem Faktor 0,5 gewichtet (siehe Abb. 22). Bei der Bewertung auf der Gebäudeebene wird der Massenanteil des Bauteils am gesamten Gebäude berücksichtigt. [1, S. 281]

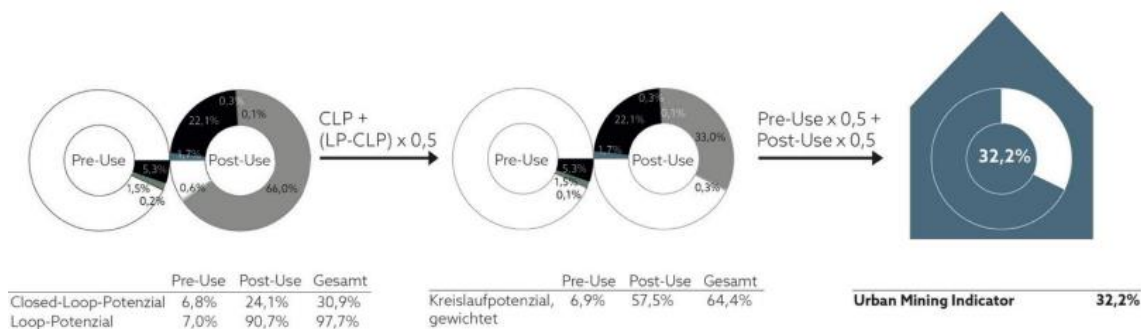


Abb. 22 Schritte zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials auf Gebäudeebene [103, S. 95]

3.6.8. Fazit

Der Urban Mining Index betrachtet alle drei wesentlichen Lebenszyklusphasen für die Bewertung von Kreislaufpotenzialen. Das Kreislaufpotenzial der Materialien wird gemessen an den Qualitätsstufen, die bezüglich seiner Herkunft gebildet werden, und der potenziellen Nachnutzung. Dabei werden die Stufen: Wiederverwendung, Recycling (biologischer und technischer Kreislauf) und Downcycling unterschieden. Bei der Berücksichtigung nachwachsender Rohstoffe wird zwischen zertifizierten und nicht zertifizierten Rohstoffen unterschieden. Auf Gebäudeebene gehen Materialien, die in geschlossenen Kreisläufen geführt werden, doppelt in die Bewertung ein. Damit ist der UMI die einzige Methode, die zwischen Recycling und Downcycling unterscheidet.

Voraussetzung für die Bewertung des Potenzials für Recycling und Wiederverwendung ist die sortenreine Trennbarkeit bzw. zerstörungsfreie Lösbarkeit von Bauteilschichten bzw. Bauteilen. Das Potenzial der Wiederverwendung wird – anders als bei den zuvor analysierten Methoden – nur für Bauteile berücksichtigt, für die aktuell ein Absatzmarkt existiert.

Die Prognose der EoL-Szenarien beruht auf der Wahrscheinlichkeit der schonenden Rückbaumethode - dem selektiven Rückbau. Ist dieser wirtschaftlich bezogen auf den Restwert der Materialien und den Arbeitsaufwand für den Rückbau, so erfolgt die Zuteilung der Materialmasse zu den dazugehörigen hochwertigen EoL-Szenarien. Als Basis für die Einschätzung der Wirtschaftlichkeit dienen sowohl von der Verfasserin vorgenommene empirische Untersuchungen als auch Arbeiten anderer Wissenschaftler.

Materialien gehen nur in die Bewertung des UMI ein, wenn sie den Grenzwerten für Schadstoffe nach der DGNB entsprechen. Der Anwender der Software soll zukünftig die Möglichkeit haben, neben den Kreislaufpotenzialen, auch den CO₂-Footprint zu berechnen. So hat der Anwender die Möglichkeit zu kontrollieren, ob kreislaufoptimierte Konstruktionen auch zur Verminderung des CO₂-Footprints führen. Rosen stellt jedoch fest, dass in den allermeisten Fällen die kreislaufoptimierten Konstruktionen mit weniger Emissionen verbunden sind [3, S. 302].

Der UMI ist für die Bewertung in der Neubauplanung und der damit einhergehenden Möglichkeit der Optimierung der Baukonstruktionen ausgerichtet. Eine Bewertung bereits gebauter Gebäude ist jedoch auch möglich. Wobei das Optimierungspotenzial in der Entwurfsphase liegt.

Auch bei dieser Bewertungsmethode ist unklar, wie mit Sanierungsprojekten umgegangen wird. Die Frage, ob ein Vorteil durch die Wiederverwendung vorhandener Bausubstanz abgebildet werden kann, bleibt bisher ungeklärt.

3.7. Vergleich der Methoden

Die zuvor analysierten Methoden werden im Folgenden systematisch nach den elf ermittelten Einflussparametern verglichen. Zur Gegenüberstellung der Methoden, dient ein tabellarischer Vergleich mit Zuordnung der Abbildungstiefe nach der folgenden Skala:

- Einflussparameter wird nicht abgebildet (0 Punkte)
- Einflussparameter wird eingeschränkt abgebildet (1 Punkte)
- Einflussparameter wird abgebildet (2 Punkte)

Die Bewertungsmethoden können nach der Skala die maximale Punktzahl von 24 Punkten erreichen. Die Einflussparameter sind in diesem Vergleich alle gleich gewichtet. Die Gewichtung der Parameter ist nicht Teil dieser Forschung. Das Ergebnis des Vergleichs ist der Tab. 17 zu entnehmen.

Einflussparameter (EP)		BCI _V	CI	BCI _{AC}	UMI
Entwurf	Biologischer Kreislauf	0	++	++	++
	Technischer Kreislauf	++	++	++	++
	Diff. Recycling & Downcycling	0	0	0	++
	Wiederverwendung	++	++	++	++
	Erhalt von Bausubstanz	0	0	0	0
	Schadstofffreiheit	++	0	0	++
Nutzung	Langlebigkeit	++	++	++	0
	Reparatur & Instandsetzung	0	0	0	0
Rückbau	Trennbarkeit	++	0	+	++
	Demontierbarkeit	++	+	+	++
	Wirtschaftlichkeit*	0	0	0	++
Ergebnis		12	9	10	16

++ EP wird abgebildet
 + EP wird eingeschränkt abgebildet
 0 EP wird nicht abgebildet
 Maximale Punktzahl 22
 * des selektiven Rückbaus

Tab. 17 Vergleich der Bewertungsmethoden hinsichtlich der Abbildung der EP

3.7.1. Abbildung der Entwurfsphase

Die Hauptunterschiede in der Abbildung der Einflussfaktoren in der Entwurfsphase liegen in den Parametern *Differenzierung zwischen Recycling und Downcycling* und *Schadstofffreiheit*. Der UMI ist die einzige Methode, die das Recycling und das Downcycling unterscheidet und somit mit verschiedener Gewichtung in die Berechnung mit einbezieht. Die Schadstofffreiheit wird in den BCI_V und im UMI als Vorbedingung für die Berechnung betrachtet. Die Nutzung von Sekundärmaterial aus dem technischen Kreislauf oder der Wiederverwendung wird in allen Methoden berücksichtigt. Der biologische Kreislauf – also die Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen – wird in der Methode von Verberne vernachlässigt. Die Zertifizierung der verwendeten nachwachsenden Rohstoffe wird allerdings nur im UMI betrachtet. Keine der Methoden bildet den Vorteil der Weiternutzung von gebauter Bausubstanz ab. Der Erhalt von Gebäudeteilen ist jedoch – vergleichbar mit der Wiederverwendung von Bauprodukten – von großer Bedeutung für die Kreislaufwirtschaft.

3.7.2. Abbildung der Nutzphase

Der Vorteil einer langen Nutzung von Rohstoffen wird in allen drei MCI basierten Methoden abgebildet. Hat ein Bauteil eine überdurchschnittliche Lebensdauer, so verbessert sich auch das Ergebnis der Bewertung. Der UMI betrachtet zwar die Nutzungsphase, es wird jedoch lediglich die Steigerung des Rohstoffeinsatzes durch den Austausch von Bauteilen berücksichtigt. Die Langlebigkeit von Produkten oder Materialien

geht somit nicht in die Bewertung mit ein. Der Parameter *Wartung und Instandhaltung* wird in keiner der Methoden berücksichtigt.

3.7.3. Abbildung der Rückbauphase

Die MCI basierten Methoden beurteilen die Rückbaubarkeit nach den Faktoren von Durmisevic. Der BCI_V bezieht dabei die meisten Faktoren (Anzahl 7) mit ein. Diese betreffen sowohl die Trennbarkeit von Bauteilschichten als auch die Möglichkeit der Demontage. Der BCI_{AC} betrachtet lediglich vier Faktoren. Allerdings werden sowohl die Trennbarkeit als auch die Demontierbarkeit betrachtet. Die Rückbaubarkeit wird dabei immer mit einem Wert zwischen 0,1 und 1,0 bewertet. Da der Wert Null ausgeschlossen ist, werden auch nicht rückbaubare Bauteile berücksichtigt.

Der CI bezieht die Rückbaubarkeit nur auf Basis der Demontierbarkeit von Bauteilen. Dies ist Voraussetzung für das EoL-Szenario Wiederverwendung. Bei den Bedingungen sind Parallelen zu den Faktoren von Durmisevic erkennbar. Diese werden jedoch stark vereinfacht als Vorbedingung mit einbezogen.

Bei dem UMI hingegen, ist die sortenreine Trennbarkeit der Bauteilschichten ein Ausschlusskriterium und wird bei dem Aufwand für den selektiven Rückbau berücksichtigt. Weiterhin wird die Demontierbarkeit von Bauteilen für das Szenario der Wiederverwendung vorausgesetzt. Im Gegensatz zu den MCI-basierten Methoden, kann der Anwender des UMI das EoL-Szenario nicht selbst abschätzen. Die Auswahl unterliegt der Prognose der Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus. Dabei wird sowohl der Restwert als auch der Rückbauaufwand als Basis für die Prognose betrachtet. Obwohl die Wirtschaftlichkeit der Abbruchmethode, maßgebend für die Qualität des Rückbaus und des möglichen EoL-Szenarios ist, wird diese nicht in die Betrachtung der anderen drei Methoden mit einbezogen.

3.8. Ergebnis und Auswahl der Methode

Der Urban Mining Index schneidet mit 16 Punkten, gefolgt vom BCI_V (12 Punkte), dem BCI_{AC} (10 Punkte) und CI (8 Punkte), am besten ab (siehe Tab 17). Das ist maßgeblich auf die verstärkte Abbildung der Einflussparameter der Rückbauphase zurückzuführen. Weitere Vorteile hat die Methode in Bezug auf die Abbildung der Schadstofffreiheit sowie der Differenzierung der zwischen Recycling und Downcycling. Die ermittelte Varianz

hinsichtlich der Abbildung der Einflussparameter ist auf die derzeit fehlende Standardisierung seitens nationaler und internationaler Normung zurückzuführen [11, S. 1938].

Der BCI_V und BCI_{AC} sind sehr ähnlich. Der entscheidende Unterschied bezüglich der Abbildung der Parameter liegt in der Beurteilung der Rückbaubarkeit. Die niedrigste Punktzahl erreicht der CI von Madaster. Dieser bildet die Rückbaubarkeit nur sehr bedingt ab. Des Weiteren wird die Schadstofffreiheit von Baumaterialien nicht betrachtet.

Auf Basis des durchgeführten Vergleichs mit der Punktebewertung ist der Urban Mining Index die Methode mit dem differenziertesten Blick auf die Bewertung der Kreislauffähigkeit im Bauwesen. Des Weiteren spricht für diese Methode, die zugrunde liegende Wissenschaftlichkeit bei der Entwicklung derselben. Rosen verwendet zum einen Erkenntnisse anderer Wissenschaftler, zum anderen fließen eigene empirische Untersuchungen in die Methode ein. Aus den diesen genannten Gründen wird der UMI als Bewertungsmethode für das Forschungsprojekt *Building.Lab* gewählt.

4. Bewertung des Building.Labs

In diesem Kapitel werden die Kreislaufpotenziale des Forschungsgebäudes Building.Lab mit der Methode Urban Mining Index bewertet. Unter 4.1 wird zunächst das Building.Lab vorgestellt und einer ersten Analyse der im Entwurf verwendeten Materialien unterzogen. Darauf folgt die Darstellung der wissenschaftlichen Methodik im Kapitel 4.2. Die Bewertung der Kreislaufpotenziale auf Bauteil- bzw. Gebäudeebene wird in den Kapiteln 4.3 und 4.4 dargestellt.

4.1. Das Building.Lab

4.1.1. Entstehung und Nutzungskonzept

Der Gebäudeentwurf für das *Building Lab* auf dem Tech-Campus in Regensburg entstand 2019 aus einem durch den *Bayerischen Bauindustrieverband e.V* (BBVI) geförderten studentischen Wettbewerb. Beteiligt waren dabei Studenten sowie Lehrbeauftragte der *Ostbayerischen Technischen Hochschule Regensburg*, des Lehrstuhls für Immobilienmanagement des IRE-BS-Instituts für Immobilienwirtschaft der Universität Regensburg, sowie der *Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen* der Technischen Universität München. Der Entwurf wurde im Anschluss an den studentischen Wettbewerb von dem Architekturbüro *Lang Hugger Rampp* weiterentwickelt. [104]

Wie der Name bereits andeutet soll das Building Lab nach seiner geplanten Fertigstellung im November 2022 ein Innovationszentrum und Begegnungsort für Akteure aus dem Bauwesen werden. Es bietet, laut Initiatoren des BBVI, Raum für Begegnung der Akteure aus: Handwerk, Industrie, Wirtschaft, Wissenschaft und Verwaltung. Der Hauptmieter ist dabei die OTH, die Labore und Seminarräume für den *Fachbereich Digitales Bauen* mit dem Schwerpunkt BIM (Building Information Modelling) nutzen wird. Ein Drittel der Fläche soll zudem – gemäß Vorgaben der Stadt Regensburg – als kostengünstiger Wohnraum für Studierende und Wissenschaftler/innen zur Verfügung stehen. [104, 105]

4.1.2. Baukonstruktion und Materialität

Das Gebäude erstreckt sich auf vier Etagen und umfasst 2660 m² Nettoraumfläche. Ein in der Mitte des Gebäudes liegendes Atrium teilt das Gebäude in Süd- und Nordabschnitt. Bei dem Gebäude handelt sich größtenteils um eine Stahlbeton Massivbauweise. Die tragenden Außenwände, Stützen, Decken, Dächer und Fundamente, – sind überwiegend aus Stahlbeton. Eine Ausnahme bilden dabei die ebenfalls tragende Innenwand aus Ziegelmauerwerk, die an Atrium grenzt. Der Rest der Innenwände sind nicht tragend und aus Gipskarton ausgeführt. Die Gebäudehülle bilden auf der Ost-, West- und Südseite Stahlbeton Fertigteilwände mit innenliegender Dämmung (Sandwichwände). Auf der Nordseite ist die Fassade als Pfosten-Riegel-Fassade ausgeführt (Abb. 23).

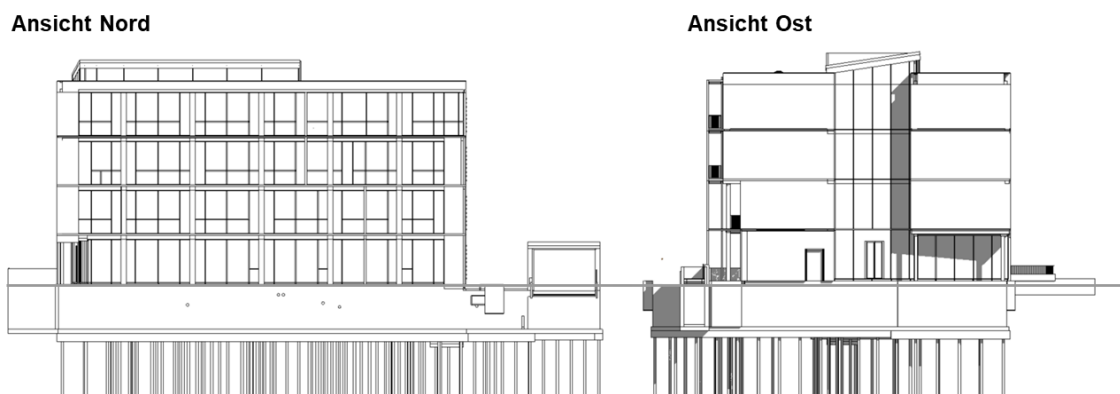


Abb. 23 Building.Lab Ansichten

Abb. 24 und 25 zeigen die Materialzusammensetzung des Gebäudes nach dem Baustoff bzw. nach der Materialherkunft. Die Anteile sind dabei auf Basis der Masse in Kilogramm berechnet. Aus der Materialanalyse ist erkennbar, dass der Baustoff Beton mit einem Anteil von 86% den Hauptteil der Gebäudesubstanz ausmacht (siehe Abb. 24). Zusammen mit den anderen mineralischen Baustoffen wie Mauerwerk, Mineralwolldämmung und Gipskarton ergibt sich ein Anteil von 93% mineralischen Baustoffen (siehe Abb. 25). Den zweitgrößten Anteil bilden mit 6% metallischen Baustoffen, die auf den Bewehrungsstahl, das Aluminium für die Pfosten-Riegel-Fassade sowie das Gusseisen auf die Pfahlgründung zurückzuführen sind. Der Anteil von 0,7% an fossilen Materialien im Bauwerk wird in Form von Kunststoffen zur Abdichtung von Dächern und Decken sowie für Fensterrahmen verwendet. Den kleinsten Anteil bilden die biotischen Materialien mit 0,2%. Diese sind in Form von Linoleum als Bodenbelag sowie Holztüren zu finden.

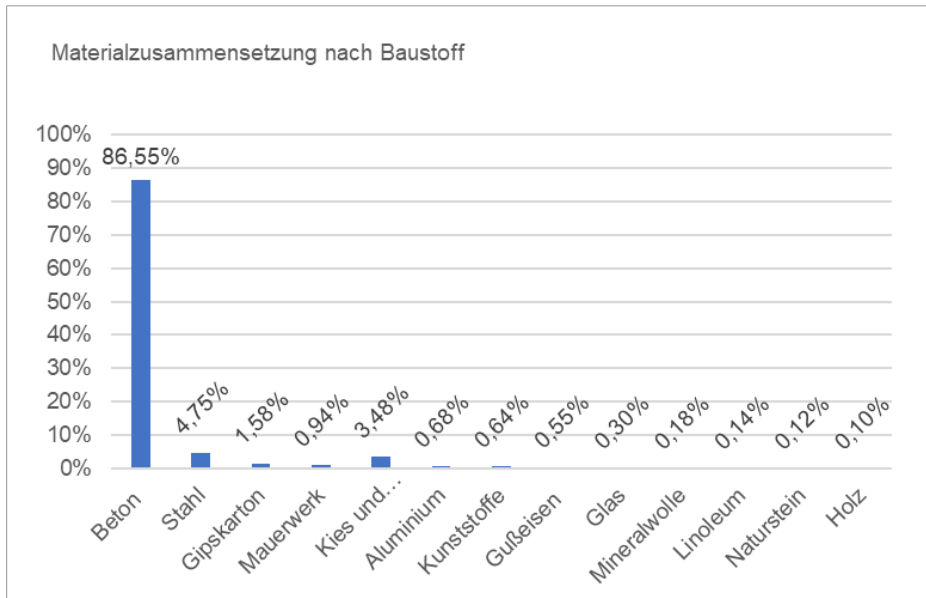


Abb. 24 Materialzusammensetzung Building.Lab nach dem Baustoff (eigene Darstellung)

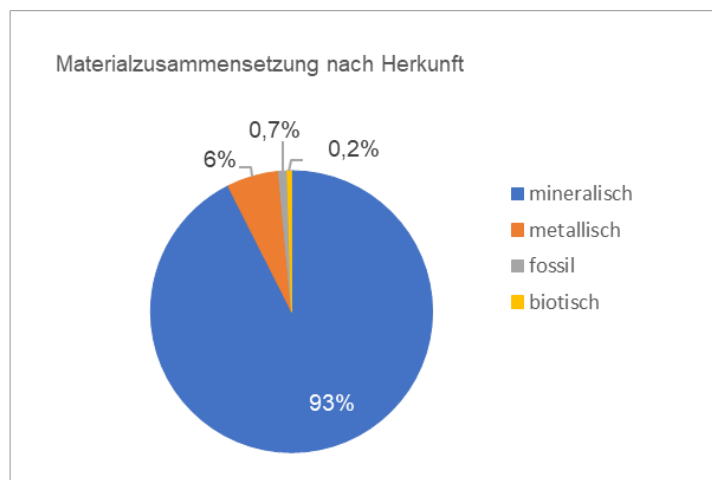


Abb. 25 Materialzusammensetzung des Building.Labs nach Materialherkunft (eigene Darstellung)

Die erste Materialanalyse lässt erkennen, dass das Gebäude zum Großteil (99,8%) aus nicht nachwachsenden (mineralisch/metallisch/fossil) Materialien konzipiert ist. Der dominierende Baustoff ist dabei Beton, der neben dem enormen Energiebedarf für die Herstellung (7000 MJ/t) eine eingeschränkte Recyclingfähigkeit aufweist [2, S. 62]. Das MLP liegt laut Atlas Recycling für Konstruktionsbeton bei 40% [2, S. 71]. Dieser Wert setzt jedoch voraus, dass der Recyclingprozess hinsichtlich des Sekundärrohstoffanteils maximal optimiert ist [2, S. 64]. In Deutschland wird zur Zeit nur 0,5% des Betonabbruchs wieder zu Recycling-Gesteinskörnung für neue Betone verwendet [2, S. 70].

Im Folgenden wird die Bewertung der Kreislauffähigkeit des Gebäudes mit dem *Urban Mining Index* bewertet, um ein ganzheitliches Bild des Recyclingpotenzials des Gebäudes zu erhalten.

4.2. Methodik

4.2.1. Bewertungstool

Da es zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieser Forschung kein öffentlich zugängliches Bewertungstool gibt, wurde für diese Arbeit ein Excel-Tabellenwerkzeug erstellt. Dieses entspricht dem in der Dissertation erläuterten Tabellenwerkzeug [3, S. 175ff.]

Der CO₂-Fußabdruck ist nicht Teil der Bewertung dieser Arbeit. Eine Ökobilanzierung des Building.Labs wurde bereits im Rahmen des Forschungsprojekts durchgeführt.

4.2.2. Untersuchungsrahmen

Der UMI bewertet die Baukonstruktion des Bauwerks und damit die Bauteile der Kostengruppe 300 nach DIN 276. Die dazugehörigen Bauteilgruppen sind [106, S. 17ff]:

- 320 Gründung
- 330 Außenwände
- 340 Innenwände
- 350 Decken
- 360 Dächer
- 370 Baukonstruktive Einbauten

Um den Untersuchungsaufwand einzugrenzen, beschränkt sich die Bewertung auf die wesentlichen Bauteile des Gebäudes. Die Auswahl wurde dabei auf die massebezogen schwersten Bauteile je Bauteilgruppe getroffen. Die zu bewertenden Bauteile sind der Tab. 18 zu entnehmen. Die Kostengruppe 370, entfällt da im Building.Lab keine baukonstruktiven Einbauten verbaut sind. In Kostengruppe 330 wurde drei Bauteile ausgewählt, da sie einen ähnlichen Aufbau haben. Die Materialmasse des Untersuchungsrahmens macht 51% der gesamten Masse des Building.Labs aus.

DIN 276	Beschreibung	Bauteil	Bauteilschicht	Material	Gewicht in kg
320	Gründung				
		Bodenplatte	Lastabtragung	Beton	569.858,40
			Armierung	Stahl	44.789,59
330	Außenwände				
		Außenwand 1 Sandwich	Vorsatzschale	Beton	57.600,00
			Dämmung	Steinwolle	840,00
			Tragschale	Beton	115.200,00
			Armierung	Stahl	10.010,48
		Außenwand 2 (Sandwich)	Vorsatzschale	Beton	76.800,00
			Dämmung	Steinwolle	1.120,00
			Tragschale	Beton	192.000,00
		Außenwand 3 (Ortbeton)	Armierung	Stahl	13.347,31
			Vorsatzschale	Beton	57.600,00
			Dämmung	Steinwolle	840,00
			Tragschale	Beton	180.000,00
			Armierung	Stahl	7.977,40
340	Innenwände				
		Innenwand (Ortbeton)	Lastabtragung	Beton	325.380,00
			Dämmung	Steinwolle	165,06
			Armierung	Stahl	14.247,65
350	Decke				
		Hohlraumdecke	Belag	Linoleum	1.947,00
			Estrich	Zementestrich	97.025,50
			Abdichtung	PE-Folie	1.207,14
			Dämmung	EPS-Dämmung	584,10
			Dämmung	EPS-Dämmung	1.168,20
			Lastabtragung	Beton	257.004,00
			Armierung	Stahl	4.906,44
360	Dach				
		Flachdach - Hohlkammerdecke	extensive Begrünung	Vegetationssubstrat	49.770,00
			Kies	Kies	17.064,00
			Abdichtung	Bautenschutzmatte Gummigranulat	1.706,40
			Abdichtung	FPO-Kunststoffabdichtung	469,26
			Dämmung	PIR-Dämmung	1.137,60
			Dämmung	PIR-Dämmung	995,40
			Abdichtung	Dampfsperre Bitumen Schweißbahn	2.559,60
			Abdichtung	Bitumen Voranstrich (40% Bitumen)	118,50
			Lastabtragung	Beton	93.852,00
			Armierung	Stahl	1.791,72
Summe Untersuchungsrahmen					2.201.082,75
Gesamte Masse Gebäude					4.308.203,83
Anteil Untersuchungsrahmen					51%

Tab. 18 Betrachtete Bauteile in der Bewertung des Building Labs

Abb. 26 und 27 zeigen die Materialzusammensetzung der betrachteten Bauteile nach Baustoff und nach Materialherkunft. Mit Blick auf die Materialanalyse auf Gebäudeebene im Kapitel 4.1.2 fällt auf, dass die Materialzusammensetzung des Untersuchungsrahmens repräsentativ der des ganzen Gebäudes ist. Lediglich kleine Anteile unter 0% der Baustoffe: Holz, Glas, Naturstein und Mauerwerk bleiben außerhalb der Untersuchung. Analog zur Materialzusammensetzung des Gebäudes, ist der Baustoff Beton mit 91% der dominierende Baustoff, gefolgt von Stahl, Vegetationssubstrat, Kies, Kunststoffen, Mineralwolle und Linoleum.

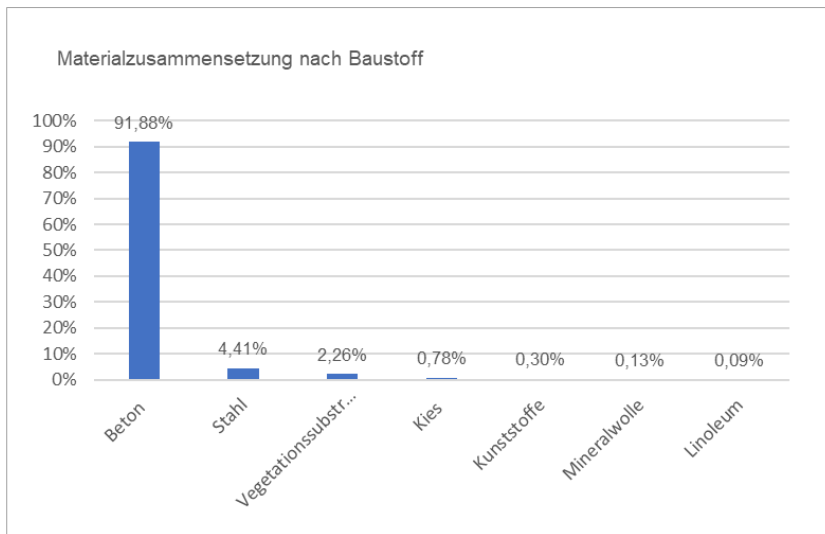


Abb. 26 Materialzusammensetzung des Untersuchungsrahmens nach Baustoff (eigene Darstellung)

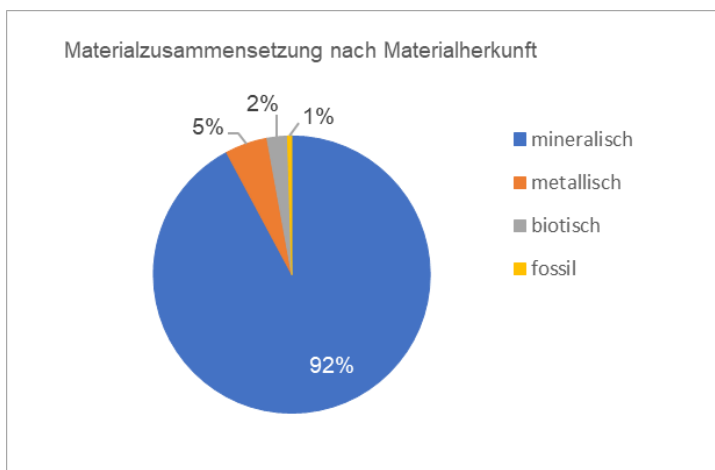


Abb. 27 Materialzusammensetzung der Untersuchungsrahmens nach Herkunft (eigene Darstellung)

4.2.3. Systemgrenzen und Abschneideregeln im Urban Mining Index

Der UMI betrachtet den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes und berücksichtigt sowohl die Vornutzung als auch die Nachnutzung. Da beim zirkulären Bauen der Übergang zwischen den beiden Phasen fließend ist, müssen Systemgrenzen festgelegt werden. [3, S. 33]

Die bei dem Produktionsprozess von Bauprodukten entstandenen Nebenprodukte, Hilfsstoffe und Abfälle liegen außerhalb der Systemgrenze. Die Systemgrenze bildet das fertig eingebaute Material oder Produkt. In der Nutzungsphase wird der Austausch von Bauteilen berücksichtigt. Die Austauschhäufigkeit richtet sich nach der Tabelle *Nutzungsdauern von Bauteilen des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung*. [31]. Sie bestimmt sowohl den berücksichtigten Materialeinsatz als auch das Wertstoff- oder Abfallaufkommen (Post-Use). In der Nachnutzungsphase werden die Materialien

berücksichtigt, die das Gebäude verlassen. Die im End-of-Life-Prozess zusätzlich anfallenden Abfälle werden vernachlässigt. [3, S. 34]

Geringfügige Massen der Bauteile (<1%) werden im UMI nicht betrachtet. Diese können Fugenmaterial oder Befestigungsmittel betreffen. Die Verbindungsart wird jedoch aufgrund ihres wesentlichen Einflusses auf die Trennbarkeit beim Rückbauaufwand und den EoL-Szenarien berücksichtigt. [3, S. 34]

Bei dem Restwert der Abbruchmaterialien handelt sich um Annahmepreise der Verwerter/Entsorger aus dem Jahr 2019. Die tatsächlichen Verkaufspreise des Verwerter/Entsorgers können abweichen. Der Arbeitsaufwand für den selektiven Rückbau (siehe Anhang 4) beinhaltet den direkten Personenaufwand und den direkten Betrieb von Maschinen. Der Aufwand für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung von Maschinen wird nicht berücksichtigt. [3, S. 34]

4.2.4. Daten und Annahmen für die Bewertung

Für die Bewertung der Qualität in der Pre-Use-Phase werden Angaben über die Materialzusammensetzung (z.B. Anteil an nachwachsenden Rohstoffen) benötigt. Diese Information kann beim jeweiligen Hersteller oder aus dem Atlas Recycling (Material Recycling Content) entnommen werden. Ist der Hersteller nicht bekannt, oder das Material im Atlas Recycling nicht angegeben, werden Zusammensetzungen vergleichbarer Produkte der Bewertung zugrunde gelegt.

Zur Beurteilung der Schadstofffreiheit gelten die von Rosen zusammengefassten Kriterien des DGNB (siehe Anhang 2). Die Abfrage der Einhaltung der Grenzwerte erfolgt beim Hersteller der betreffenden Produkte/Materialien. Ist der Hersteller nicht bekannt, so werden die Grenzwerte der gleichen Produkte anderer Hersteller geprüft.

Zur Beurteilung des Arbeitsaufwands des selektiven Rückbaus mit dem Faktor Arbeit dient der Bauteilkatalog von Rosen (siehe Anhang 3). Dieser umfasst 163 Bauteile/Materialien mit spezifischer Einbausituation (z.B. geklebte EPS-Dämmung auf Stahlbetonaußenwand). Ist der Arbeitsaufwand des Rückbaus des Bauteils/Materials nicht im Bauteilkatalog erfasst, so werden Werte aus Beispielbewertungen der Dissertation *Urban Mining Index* entnommen, die die gleichen Materialien/Bauteile mit gleicher Einbausituation besitzen. Sind Werte für das vorliegende Material/Bauteil nicht vorhanden, so

werden Werte für vergleichbare Materialien/Bauteile mit gleicher oder ähnlicher Einbausituation aus dem Bauteilkatalog übernommen.

Der Anwender kann die Recyclingfähigkeit in der Post-Use-Phase auch optional anhand des Störstoffanteils einschätzen. Diese Option dient dem Fall, wenn kein Arbeitsaufwand im Bauteilkatalog erfasst ist. Materialspezifische maximal zulässige Störstoffanteile für ein hochwertiges Recycling sind im Rahmen des Urban Mining Index nicht erforscht worden. Rosen schlägt vor, diese zukünftig als Information seitens der Hersteller im EPD aufzunehmen. Ein möglicher Richtwert ist $>1\%$ [3, S. 179]. Auf diesen Bewertungsansatz wurde aufgrund der damit verbundenen Informationslücke nicht zurückgegriffen. Die Verfasserin dieser Arbeit entschied sich für die Abschätzung des Aufwandes mittels vergleichbarer Bauteile im Bauteilkatalog.

Der Wert der Abbruchmaterialien lässt sich anhand der durch Rosen durchgeführten Befragungen quantifizieren (siehe S. 96).

Der Anteil der Materialien die hochwertig recycelt werden können, wird mit MLP (Material-Loop-Potenzial) bemessen. Er kann zusammen mit dem MRC aus dem Atlas Recycling, S.71 ff entnommen werden. Ist das MLP nicht vorhanden, wird auf Angaben aus der Dissertation von Rosen oder von Herstellern zurückgegriffen.

Die Zuordnung der Wertstoffe zu den EoL-Szenarien erfolgt im Excel-Tool von Rosen automatisch durch die Auswahl der Materialien im Bauteilkatalog [3, S. 179]. Sie richtet sich nach der derzeitigen Verwertungspraxis aber auch der *absehbaren* Verwertungspraxis. So ist z.B. laut Rosen das Recycling von Gips noch nicht etabliert, jedoch in der näheren Zukunft absehbar. Es gibt in Deutschland bereits drei Recyclinganlagen. Des Weiteren wird durch den Ausstieg aus der Kohleverstromung immer weniger Gips als Nebenprodukt aus Rauchgasentschwefelungsanlagen (REA) zur Verfügung stehen. Folglich kann bei der Bewertung davon ausgegangen werden, dass weitere Recyclinganlagen gebaut werden und sich das Recycling von Gips etablieren wird [3, S. 259].

Weiterhin ist bei der Zuordnung zu beachten, dass manche Baustoffe oder Bauteile von den Herstellern nach dem Ausbau zurückgenommen und recycelt werden (z.B Rewindo für Kunststofffenster). In diesem Fall kann das Recycling-Szenario prognostiziert werden.

In dieser Forschung wird die Zuordnung, nach den Beispielbewertungen der Dissertation von Rosen sowie nach der Tab. 14 auf S. 94 durchgeführt. Es wird weiterhin geprüft, ob Herstellerrücknahmesysteme vorhanden sind.

4.3. Bewertung Bauteile

In diesem Kapitel werden die Kreislaufpotenziale der sieben ausgewählten Bauteile (siehe Tab. 18 auf S. 110) des Building.Labs bewertet. Im Kap. 4.4 wird das Ergebnis der Bauteilbewertung in die Gebäudebewertung – den *Urban Mining Indicator* – überführt.

4.3.1. Bodenplatte

Die betrachtete Bodenplatte ist in der Tiefgarage des Gebäudes verbaut und grenzt an das Erdreich. Es handelt sich hierbei um ein einfaches Stahlbetonbauteil, das ohne Dämmung oder Beschichtung auskommt. Der Beton und der Bewehrungsstahl werden in der Bewertung jeweils als Schicht betrachtet. Beton besteht nach den Angaben des Atlas Recycling aus 100% Primärmaterial. Er wird nach Tab.14 den EoL- Szenarien *Recycling* im selektiven Rückbau und *Downcycling* im selektiven Abbruch zugeordnet. Wird der Beton nach dem Rückbau sortenrein zurückgebaut, so kann er laut Atlas Recycling bis zu 40% recycelt werden [2, S. 71]. Der Aufwand für den selektiven Rückbau einer ungedämmten Bodenplatte wird nach dem Bauteilkatalog als *sehr hoch* (Faktor Arbeit 0,6) eingestuft. Die Entsorgungskosten lagen im Jahr 2019 bei 16,00 €/t und damit im leicht negativen Bereich (Faktor Wert 0,9). Bewehrungsstahl stammt laut Atlas Recycling aus 100% Recyclingmaterial [2, S. 71]. Er wird unabhängig von der Rückbaumethode dem Recycling zugeführt [3, S. 92] und besitzt einen MLP von 100% [2, S. 71].

Die Anwendung der Faktoren *Wert* und *Arbeit* ist aufgrund der identischen EoL-Szenarien in den beiden Rückbaumethoden nicht notwendig. Trotzdem ist eine Einschätzung der Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus von Bewehrungsstahl möglich. In Anlehnung an eine Beispielbewertung aus dem Urban Mining Index, ist der Arbeitsaufwand als *sehr hoch* (Faktor Arbeit 0,6), und der Erlös mit 134 €/t als *leicht positiv* (Faktor Wert 1,0) einzustufen [2, S. 188]. Der Durchschnittliche Arbeitsaufwand für den Rückbau der Bodenplatte liegt bei 0,6 und ist damit sehr hoch. Der Faktor Wert liegt im Durchschnitt bei 0,95 und ist leicht negativ. Abb. 28 zeigt die Auswertung der Kreislaufpotenziale. Nach der Berücksichtigung der Massenanteile der Bauteilschichten ergeben sich in der

Pre-Use-Phase ein CLP und LP von lediglich 7%. Dieser Wert ist einzig auf den Bewehrungsstahl zurückzuführen. In der Post-Use-Phase erreicht das Bauteil durch die Anteile aus Stahl und Beton für das Recycling 27%, unter Berücksichtigung des Szenarios des Downcyclings des Betons, steigt der Wert des LP auf 70%. Das Ergebnis ist bezogen auf den maximal erreichbaren Wert von 200% in CLP bzw. LP sehr niedrig.

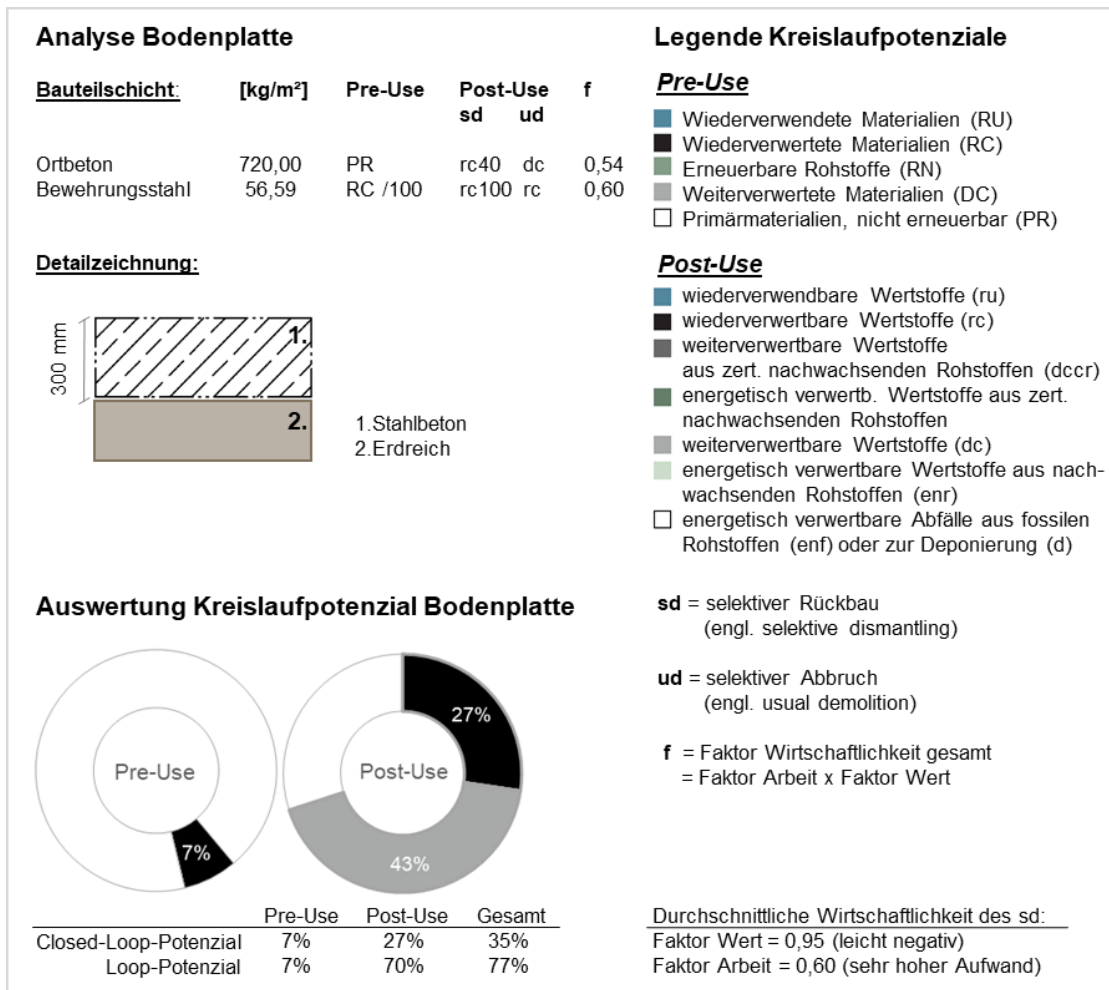


Abb. 28 Bewertung des Kreislaufpotenzials der Bodenplatte

4.3.2. Außenwände

Außenwände 1 und 2

Bei den beiden Außenwänden AW1 und AW2, handelt es sich um Sandwichwände, die als Fertigteil an die Baustelle geliefert werden. Bei der Herstellung im Werk, wird eine Steinwolldämmung zwischen zwei Stahlbetonschalen – die Vorsatzschale und die Trag-schale – geklemmt. Die Schalen werden mittels einer Sandwichplattenverankerung zu-sammengehalten, die bei der Fertigung mit einbetoniert wird (siehe Detailzeichnung

Abb. 29). Die Qualitätsstufen von Beton und Stahl in der Pre-Use-Phase, können von der Betrachtung der Bodenplatte übernommen werden. Steinwolle besteht laut Atlas Recycling je nach Hersteller aus 45% bis 60% Sekundärmaterial [2, S. 90]. Hier wird der Mittelwert von 53% angenommen, da der tatsächliche Hersteller unbekannt ist. Saubere Steinwolle wird vom aktuell marktführenden Hersteller zurückgenommen und recycelt [107, S. 8]. Steinwolle hat einen MLP von 97% [3, S. 250] .

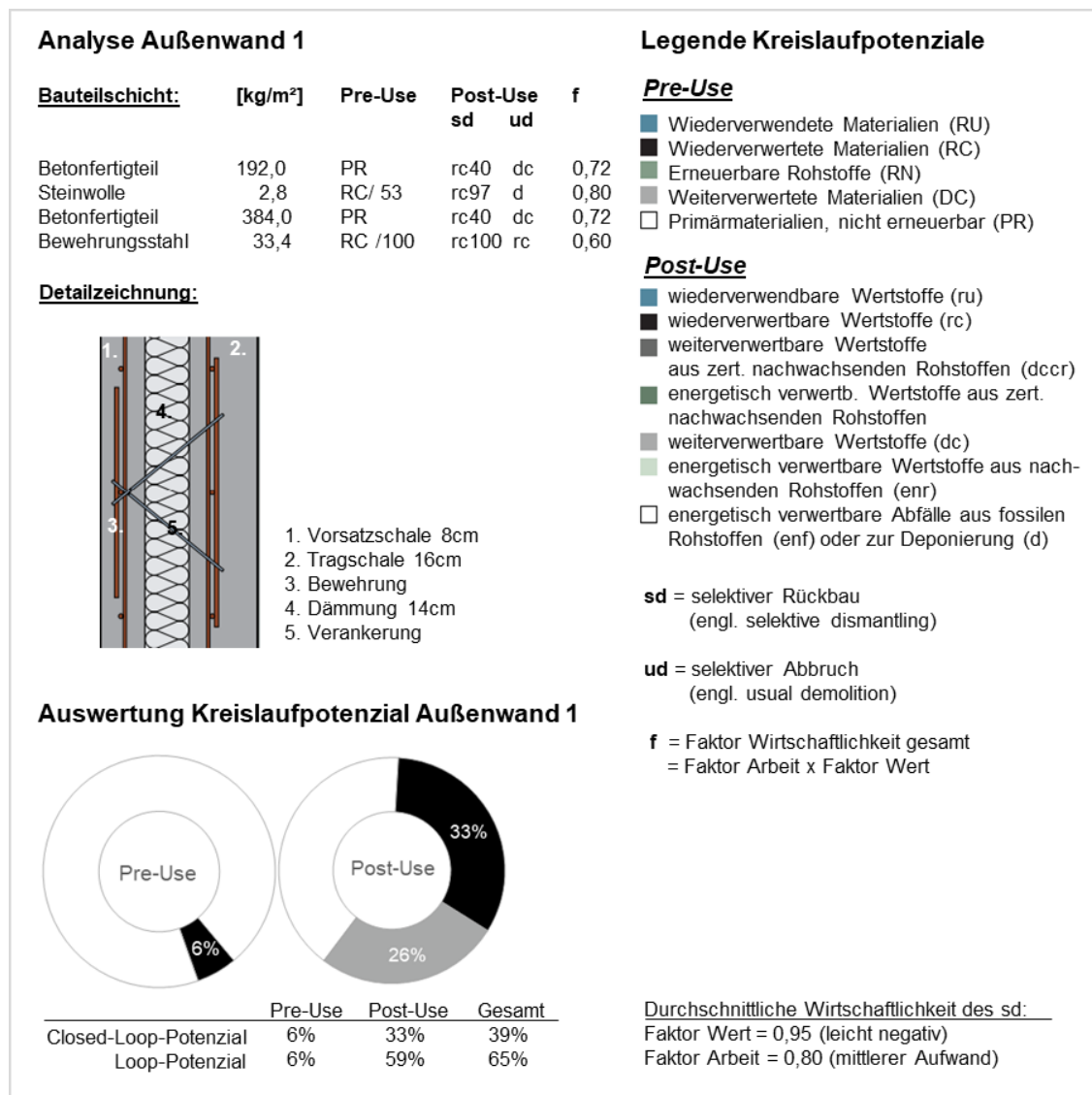


Abb. 29 Bewertung des Kreislaufpotenzials der Außenwand 1 (Detailzeichnung von [108])

Da die Steinwolle ohne Verklebung auskommt, wird das Szenario der Herstellerrücknahme angenommen, das den Faktor Wert von 1,0 zufolge hat. Der Rückbauaufwand von Steinwolle, die zwischen zwei Betonschalen geklemmt ist, wird im Bauteilkatalog nicht angeführt. Daher wird die Annahme getroffen, dass der Rückbauaufwand aufgrund der kraftschlüssigen Verbindung, vergleichbar ist mit dem Rückbauaufwand einer

Hanffaserdämmung, die zwischen einem Holzständerwerk geklemmt wird. Dieser ist im Bauteilkatalog als *sehr gering* (Faktor Arbeit 1,0) eingestuft. Bei dem Rückbau der zwei Schalen wird von zwei Betonwänden ausgegangen, die mit *mittlerem* Aufwand (Faktor Arbeit 0,8) selektiv zurückgebaut werden können.

Der Rückbau der AW1 ist im Durchschnitt *mittel*. Der Wert der Wertstoffe ist im Durchschnitt *leicht negativ*. Die Auswertung des Kreislaufpotenzials der AW1 in der Abb. 29 zeigt in der Pre-Use-Phase ein niedriges Kreislaufpotenzial von 6%. Dieser ist geringer als bei der Bodenplatte, da der Stahlanteil geringer ist. Die Vorteile des Sekundärrohstoffanteils der Steinwolle, werden aufgrund der geringen Masse kaum abgebildet. In der Post-Use-Phase ist das CLP mit 33% etwas größer als das der Bodenplatte. Hier ist sowohl der Vorteil der Recyclingfähigkeit der Steinwolle erkennbar als auch der etwas geringere Rückbauaufwand der Betonwände gegenüber der Bodenplatte. Die 26% der Wertstoffmasse stammen aus dem Downcycling des Betons. Insgesamt ist das Kreislaufpotenzial, ähnlich wie das der Bodenplatte, als sehr niedrig einzustufen.

Die AW2 hat den gleichen Aufbau wie die AW1. Lediglich die Tragschale ist mit einer Dicke von 20cm dicker als die der AW1. Die Qualitätsstufen beider Außenwände in der Post-Use und Pre-Use-Phase sind daher gleich. Auch der Aufwand für den Rückbau ist der gleiche. Die Kreislaufpotenziale der beiden Wände weichen aufgrund des gering unterschiedlichen Massenanteils des Betons nur minimal und werden daher nicht weiter erläutert.

Außenwand 3

Die Außenwand 3 (AW3) ist mit den gleichen Materialien wie die AW1 und AW2 hergestellt. Die Wand wurde allerdings vor Ort gefertigt. Dazu wurde erst die Tragschale aus Stahlbeton hergestellt, dann die Steinwolldämmung mit Hilfe von Dübelankern an dieser befestigt (siehe Abb. 30). Anschließend wurde die Vorsatzschale hergestellt.

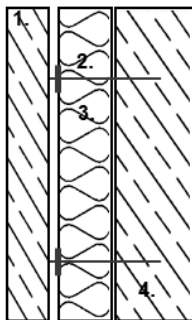
Die Qualitätsstufen in der Pre-Use-Phase bleiben, aufgrund der identischen Materialität zu AW1 und AW2, gleich. Die im Vergleich zur AW1 geringere Bewertung des Kreislaufpotenzials in der Pre-Use-Phase ist auf den geringeren Anteil des Bewehrungsstahls in der Konstruktion zurückzuführen. Der Faktor Arbeit der Betonschalen kann übernommen werden. Da die Dämmung allerdings nicht lose verlegt, sondern verdübelt ist, muss hier von einem höheren Rückbauaufwand ausgegangen werden. Auch hier bietet der Bauteilkatalog nicht das erforderliche Bauteil und es bedarf einer Einschätzung seitens

des Anwenders. Dämmungen im Bauteilkatalog sind entweder zwischen Holzständern lose verlegt (sehr geringer Aufwand) oder sowohl auf eine Betonwand verdübelt als auch geklebt (hoher Aufwand). Es wird hier angenommen, dass der Aufwand für den Rückbau etwas geringer ist als der des verklebten und verdübelten Dämmstoffs, da keine Klebverbindung zu lösen ist. Er wird daher als *mittel* mit dem Faktor 0,8 bewertet. Der durchschnittliche Aufwand für den selektiven Rückbau der AW3 ist *hoch* und der durchschnittliche Wert der Wertstoffe *leicht negativ*. Auch hier ist die Herstellerrücknahme der Steinwolle nach dem Rückbau möglich, da aufgrund der reversiblen Verbindung keine Restanhaftung zu erwarten sind. Das CLP in der Post-Use-Phase ist trotz des erhöhten Rückbauaufwands der Dämmung nur um zwei Prozentpunkt niedriger, da der Anteil der Dämmung bezogen auf die Gesamtmasse des Bauteils sehr gering ist. Auch dieses Bewertungsergebnis ist im Hinblick auf den zu erreichenden Wert von 200% im CLP bzw. LP als niedrig einzustufen.

Analyse Außenwand 3

Bauteilschicht:	[kg/m ²]	Pre-Use	Post-Use	f
			sd ud	
Ortbeton	192,0	PR	rc40 dc	0,72
Steinwolle	2,8	RC/ 53	rc97 d	1,00
Ortbeton	660,0	PR	rc40 dc	0,72
Bewehrungsstahl	26,6	RC /100	rc100 rc	0,60

Detailzeichnung:



1. Vorsatzschale 8cm
2. Dämmung 14cm
3. Dübelanker
4. Tragschale 25 cm

Legende Kreislaufpotenziale

Pre-Use

- Wiederverwendete Materialien (RU)
- Wiederverwertete Materialien (RC)
- Erneuerbare Rohstoffe (RN)
- Weiterverwertete Materialien (DC)
- Primärmaterialien, nicht erneuerbar (PR)

Post-Use

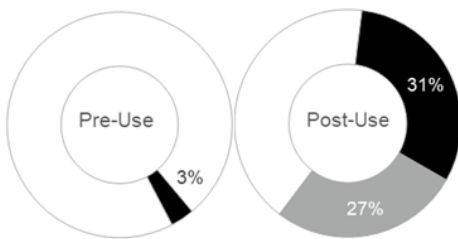
- wiederverwendbare Wertstoffe (ru)
- wiederverwertbare Wertstoffe (rc)
- weiterverwertbare Wertstoffe aus zert. nachwachsenden Rohstoffen (dccb)
- energetisch verwertb. Wertstoffe aus zert. nachwachsenden Rohstoffen
- weiterverwertbare Wertstoffe (dc)
- energetisch verwertbare Wertstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen (enr)
- energetisch verwertbare Abfälle aus fossilen Rohstoffen (enf) oder zur Deponierung (d)

sd = selektiver Rückbau
(engl. selective dismantling)

ud = selektiver Abbruch
(engl. usual demolition)

f = Faktor Wirtschaftlichkeit gesamt
= Faktor Arbeit x Faktor Wert

Auswertung Kreislaufpotenzial Außenwand 3



	Pre-Use	Post-Use	Gesamt
Closed-Loop-Potenzial	3%	31%	34%
Loop-Potenzial	3%	58%	61%

Durchschnittliche Wirtschaftlichkeit des sd:
Faktor Wert = 0,95 (leicht negativ)
Faktor Arbeit = 0,75 (hoher Aufwand)

Abb. 30 Bewertung des Kreislaufpotenzial der Außenwand 3

4.3.3. Innenwand

Die betrachtete Innenwand befindet sich im Untergeschoss des Gebäudes und grenzt an die Tiefgarage. Aus diesem Grund ist sie gedämmt. Die IW gleicht von der Materialität und deren Herkunft den zuvor betrachteten Außenwänden (siehe Abb. 31). Die Lastabtragung erfolgt über eine 28cm dicke Stahlbetonwand, gedämmt mit einer 10cm dicken Steinwolldämmung. Die Dämmung ist mittels Mörtelkleber und Dübeln auf die Wand befestigt. Der Aufwand für den Rückbau wird unter Berücksichtigung dieser Verbindungsart im Bauteilkatalog als *hoch* mit dem Faktor Arbeit von 0,7 eingestuft. Anders als bei den Außenwänden wird bei dieser Steinwolldämmung nicht von einer Hersteller-rücknahme ausgegangen, da die Dämmung nicht ohne Restanhaftung zurückgebaut werden kann. Die Kosten für die Entsorgung der Mineralwolle liegen laut

Kostenermittlung bei 398,00€ und sind damit als *äußerst negativ* mit dem Faktor Wert 0,6 zu bewerten.

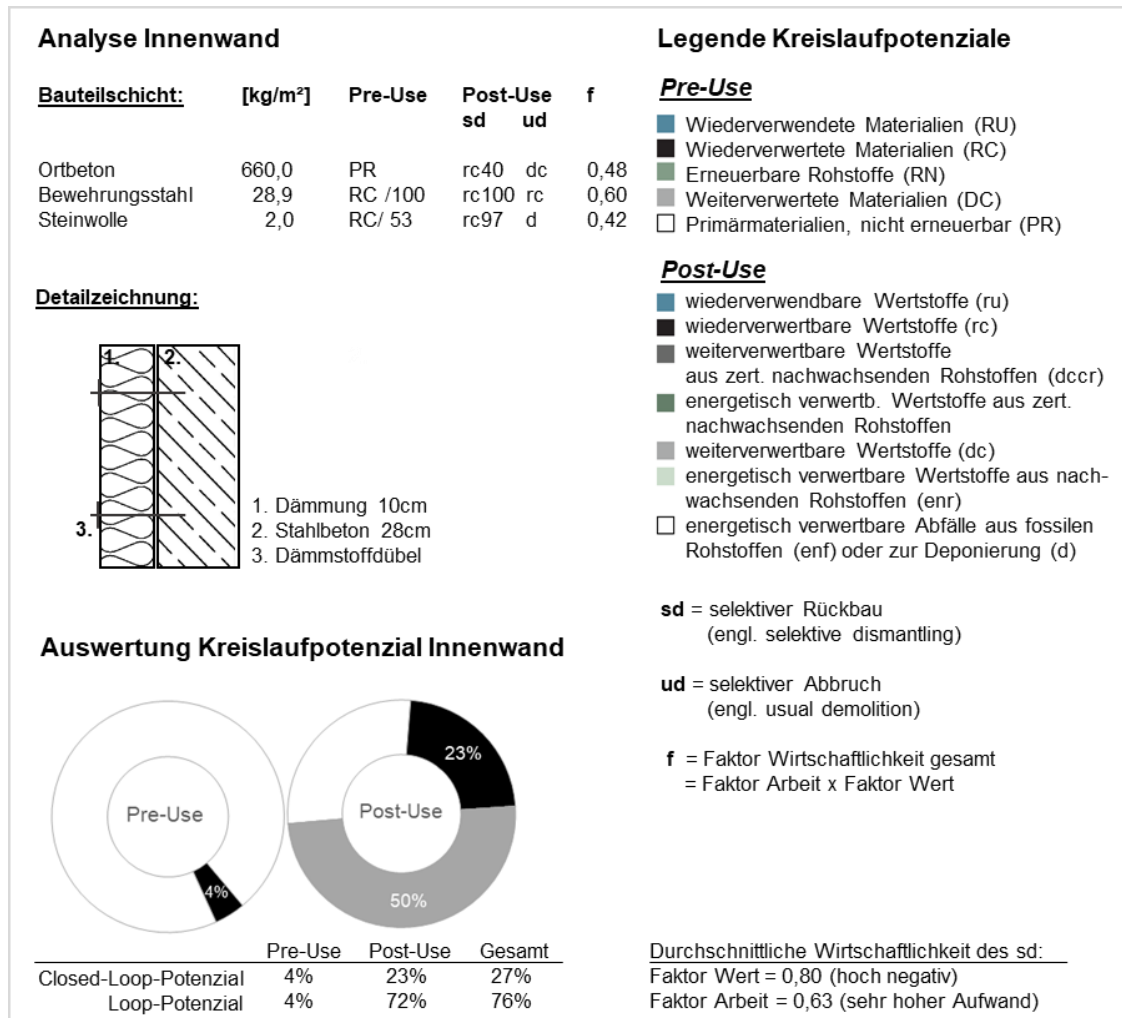


Abb. 31 Bewertung des Kreislaufpotenzials der Innenwand

Es gibt keine Bewertung des Rückbauaufwands einer Innenwand aus Stahlbeton im Bauteilkatalog. Da aber Außenwände und Decken aus Stahlbeton im Bauteilkatalog unabhängig von der Position im Gebäude den gleichen Aufwand *mittel* mit einem Faktor Arbeit von 0,8 aufweisen, wird auch für die betrachtete Innenwand derselbe Aufwand angenommen. Die Kosten für die Entsorgung des leicht verschmutzten Betons liegen bei 30,00€ und sind als *hoch negativ* mit dem Faktor Wert von 0,8 einzustufen. Der durchschnittliche Aufwand für den Rückbau ist sehr hoch. Der durchschnittliche Faktor Wert ist *hoch negativ*.

Der Abb. 31 ist die Auswertung des Kreislaufpotenzial zu entnehmen. In der Pre-Use-Phase liegt analog zu den bisher betrachteten Bauteilen ein niedriger Wert von 4% vor, der auf MLP vom Bewehrungsstahl und der Mineralwolle zurückzuführen ist.

In der Post-Use-Phase spiegelt sich der erhöhte Rückbauaufwand für das Bauteil in den Qualitätsstufen der EoL-Szenarien wider. Im Vergleich zu den Außenwänden wird daher bei der IW1 ein größerer Anteil dem Downcycling zugeordnet. Was einen verminderten Anteil am Recyclingszenario zufolge hat. Das CLP der Konstruktion ist daher im Vergleich zu Bodenplatte und Außenwand niedriger. Auch dieses Bewertungsergebnis ist als niedrig einzustufen.

4.3.4. Decke

Der Aufbau der zu bewertenden Decke ist der Detailzeichnung in Abb. 32 zu entnehmen. Auf der Stahlbeton Hohlraumdecke sind zwei Lagen expandiertes Polystyrol (EPS) lose aufgelegt. Die Lagen dienen als Wärme- bzw. Trittschalldämmung. Den darüber verlegten Zementestrich mit innenliegender Fußbodenheizung trennt eine ebenfalls lose verlegte Polyethylen Trennlage (PE). Die Materialität der Heizrohre ist unbekannt, daher wird angenommen, dass diese in Anlehnung zum Beispiel [3, S. 216] aus vernetztem Polyethylen (PEX) bestehen. Auf dem Heizestrich ist ein Linoleumboden nach der DIN EN 12 529 stuhlrollengeeignet mittels eines Dispersionsklebstoffs aufgeklebt. Ein hochwertiges und materialspezifisches Recycling wäre nach dem Rückbau laut Hersteller prinzipiell möglich [109]. Da der Hersteller jedoch keine Rücknahme des Bodenbelags anbietet, wird dieser in Anlehnung an das Rechenbeispiel aus [3, S. 240] nach dem Ausbau unabhängig von der Rückbaumethode energetisch verwertet. Der Linoleumboden besteht laut Hersteller aus 76% nachwachsendem Rohstoff und hat einen Recyclinganteil von 40% [110].

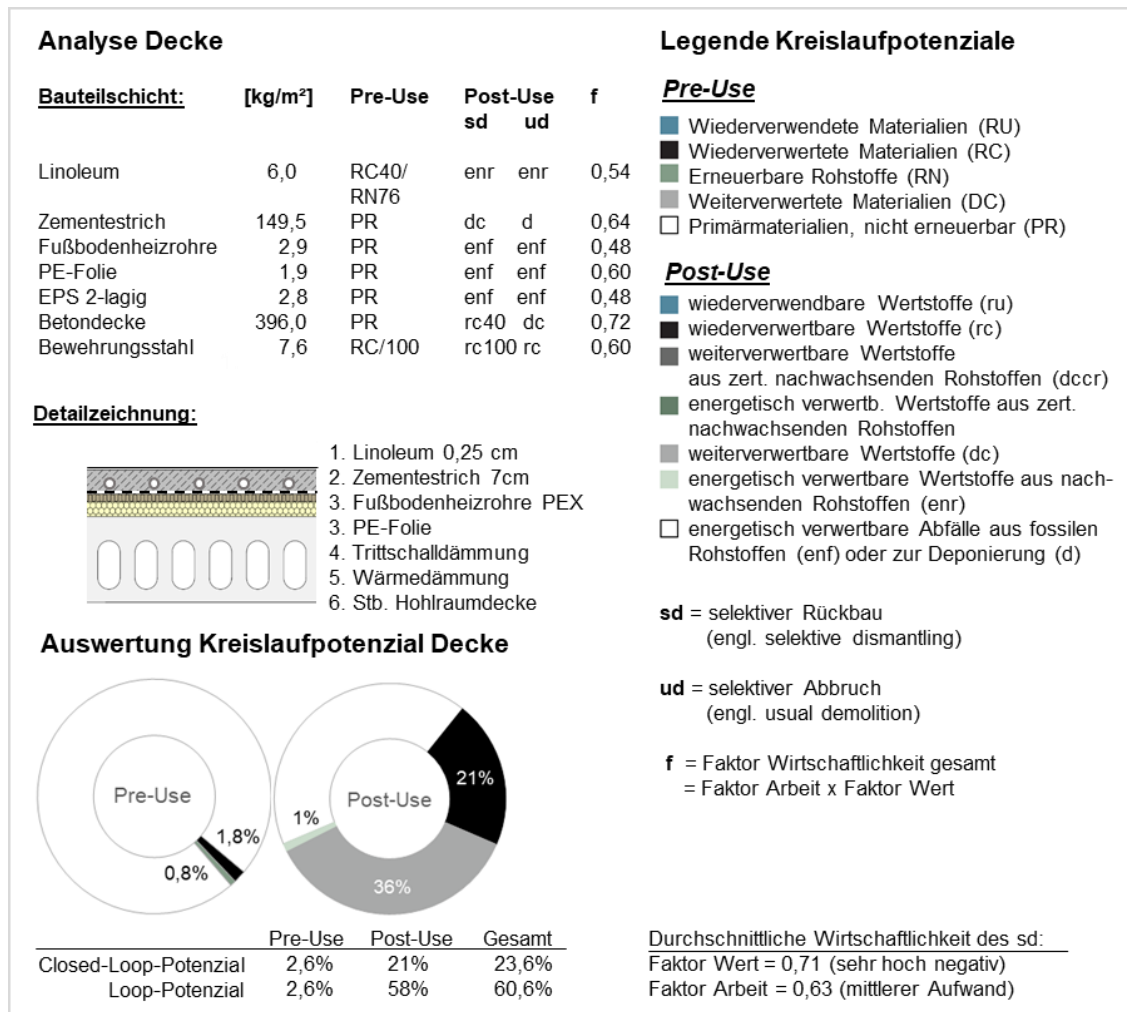


Abb. 32 Bewertung des Kreislaufpotenzials der Decke

Für die kunststoffbasierten Bauteilschichten – also die PE-Folie, die Kunststoffrohre und das EPS – existieren derzeit keine stofflichen Verwertungsmöglichkeiten. Sie werden daher unabhängig von der Rückbaumethode der energetischen Verwertung zugeführt. Die Anwendung der Faktoren ist daher nicht notwendig. Der Aufwand für den Rückbau der Heizrohre ist laut [3, S. 216] *mittel* und liegt bei 0,6. Die Kosten für die Entsorgung sind äußerst negativ und liegen bei 219 €/t, der Faktor Wert liegt damit bei 0,6. Es existiert kein Wert für eine PE-Trennlage im Bauteilkatalog. Für den Rückbauaufwand wird der Faktor Wert der Beispielrechnung der exakt gleichen Bauteilschicht aus [3, S. 216] übernommen. Die Kosten für die Entsorgung sind die gleichen wie die für die Heizrohre. Der Rückbau der EPS Folie wird im Bauteilkatalog zusammen mit der Zementestrich veranschlagt und ist mit dem Faktor 0,8 als *mittel* zu bewerten. Die Kosten für die Entsorgung sind äußerst negativ und liegen bei 1495 €/t. Die Kosten für die Entsorgung des Estrichs sind mit 26 €/t *hoch negativ* und sind mit dem Faktor Wert 0,8 zu bewerten. Er kann nach dem selektiven Rückbau dem Downcycling zugeführt werden. Wird der

Estrich selektiv abgebrochen, muss dieser jedoch deponiert werden. Der Rückbau der Betondecke ist laut Bauteilkatalog mittel und mit dem Faktor Arbeit 0,8 zu bewerten. Die EoL-Szenarien und die Kosten der Entsorgung sind identisch zu den bisher betrachteten Betonbauteilen.

Das CLP in der Pre-Use-Phase der Deckenkonstruktion, setzt sich aus dem Recyclingpotenzial des Linoleums und des Bewehrungsstahls (1,8%) sowie des Anteils an nachwachsenden Rohstoffen im Linoleum (0,8%) zusammen. Das CLP der Post-Use-Phase ist auf den im selektiven Rückbau gewonnenen Beton der Hohlraumdecke und den Bewehrungsstahl (21%) zurückzuführen. Der Anteil an erneuerbaren Rohstoffen für die energetische Verwertung des Linoleums (1%) zählt, anders als in der Pre-Use-Phase, aufgrund der nicht vorhandenen Zertifizierung zum LP. Der Anteil, der in der Post-Use-Phase dem Downcycling zugeführt wird (36%) setzt sich zusammen aus sortenrein erfasstem Zementestrich sowie dem Beton, der selektiv abgebrochen wird.

4.3.5. Flachdach

Die Lastabtragung des Flachdachs wird, wie bei der Decke, über eine Hohlraumdecke ausgeführt (siehe Abb. 33). Diese wurde mit einem Bitumen Voranstrich versiegelt, und anschließend mit einer Bitumen-Dampfsperr-Schnellschweißbahn mit Thermstreifen abgedichtet. Diese wurde an den Stößen aufgeschweißt [111]. Auf Anfrage beim Hersteller werden die Thermstreifen auf den Untergrund geschweißt. Die Schweißfläche beträgt dabei 80% der Gesamtfläche.

Auf die Bitumenabdichtung wurden zwei lagen Polyisocyanurat-Dämmung (PIR) verlegt. PIR ist laut WECOBIS – eines Baustoffinformationssystem des Bundes - eine Weiterentwicklung des Polyurethan-Hartschaums (PUR). Es besitzt wegen seines höheren Isocynat-Anteils eine höhere Stabilität. Sowohl PIR als auch PUR lassen sich unter Qualitätsverlust recyceln, es existiert jedoch kein Herstellerrücknahmesystem. [112]

Auf die Dämmung wurde eine Kunststoffbahn des flexiblen Polyolefin Kunststoff (FPO) lose aufgelegt. Für saubere Kunststoffdachabdichtungen existiert in Europa das Rücknahmesystem *Roofcollect*, dieses umfasst allerdings derzeit nur die Kunststoffarten: PVC, PE und EVA [113, 89 ff.].

Auf die Dachabdichtung wurde eine Bautenschutzmatte aus PUR-gebundenen Gummigranulat und -fasern verlegt. Diese dient als mechanische Schutzlage der Dachabdichtung vor der darüber liegenden Kiesschicht [113, S. 95]. Über die Kiesschicht wurde eine Substratschicht verlegt. Da Angaben zur genauen Zusammensetzung dieses Substrates fehlen, werden der Bewertung die Angaben aus der Ökobaudat mit der Zusammensetzung: 80% Ziegelbruch aus gebrauchten Ziegeln, 10% Bims, 8% Humus und 2% Torf zugrunde gelegt [114].

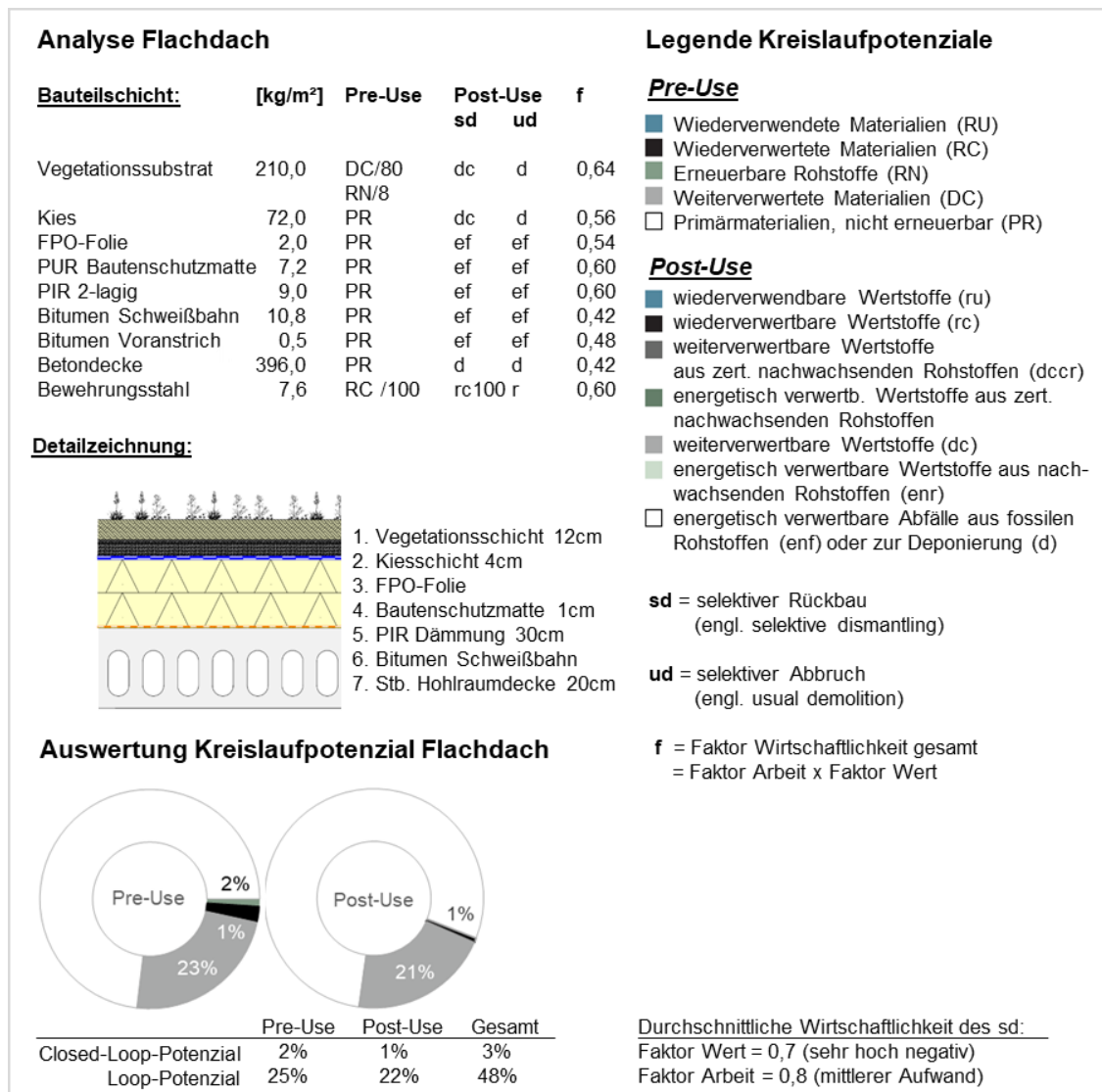


Abb. 33 Bewertung des Kreislaufpotenzials des Flachdachs

Da keine Trennlage (aus z.B. Vlies) zwischen der Kiesschicht und der Substratschicht vorhanden ist, kommt es zur Durchmischung der beiden Schichten. Kies hat im sortenreinen Zustand laut [3, S. 123] ein Wiederverwendungspotenzial. Das Gemisch wird in diesem Fall zu der Abfallfraktion 170107 *Bauschutt sauber* mit den Entsorgungskosten

von 26 €/t zugeteilt. Die organischen Anteile können von den mineralischen Anteilen in Aufbereitungsanlagen heraus gesiebt bzw. gewaschen werden. Weiteres kann anschließend dem Downcycling zugeführt werden. Der Arbeitsaufwand für den Rückbau einer Substratschicht ist nicht im Bauteilkatalog aufgeführt. Der Aufwand für eine Kies-schicht inkl. Trennlage ist *hoch* (Faktor Arbeit 0,7). Es wird angenommen, dass der Aufwand für die Vegetationsschicht aufgrund der Ähnlichkeit des Baustoffs und der Einbau-situation ähnlich ist. Da jedoch keine Trennschicht zu entfernen ist, wird der Aufwand von *hoch* auf *mittel* heruntergestuft.

Auch für die Bautenschutzmatte, sowie die FPO-Folie gibt es keine exakte Übereinstim-mung im Bauteilkatalog. Es werden jedoch andere lose aufgelegte Folien wie PE-Folie (Faktor Arbeit 1,0) und PIB-Kunststoffbahn (Faktor Arbeit 0,9) aufgeführt. Der Arbeits-aufwand der beiden Schichten kann als ähnlich angenommen werden. Gleiches gilt für die PIR-Dämmung, hier existiert eine ebenfalls lose auf eine Bitumenbahn verlegte XPS-Dämmung im Bauteilkatalog (Faktor Arbeit 1). Die Kosten für die Entsorgung der Kunststoffe betragen bei den Dachbahnen 219 €/t und für die Dämmstoffe sogar 1495 €/t. Die Wirtschaftlichkeit bezogen auf den Restwert ist in beiden Fällen als *äußerst ne-gativ* mit dem Faktor 0,6 zu bewerten. Da jedoch sowohl beim selektiven Rückbau als auch beim selektiven Abriss alle hier verbauten Kunststoffe der energetischen Verwer-tung zugeführt werden, wirken sich die zuvor zum Teil unter Annahme quantifizierten Faktoren nicht auf die Bewertung aus.

Die Betondecke wird durch den Bitumenanstrich stark verschmutzt und wird in Anleh-nung zu der Bewertung aus [3, S. 208] unabhängig von der Rückbaumethode der De-ponierung zugeordnet. Die Kosten für die Entsorgung des stark verschmutzten Bau-schutts betragen 248 €/t. Der Rückbauaufwand für eine Betondecke ist laut Bauteilka-talog *mittel* (Faktor Arbeit 0,8). Für eine vollverschweißte Bitumen Schweißbahn wird der Aufwand mit 0,7 als *hoch* bewertet. Die Kosten für die Entsorgung von Bitumenge-mischen betragen 249 €/t und sind somit äußerst negativ. Bitumen wird nach der Nut-zungsdauer unabhängig von der Rückbaumethode energetisch verwertet. So erübrigt sich die Anwendung der Faktoren bei der Betondecke und den Bitumenwerkstoff.

Die Dachkonstruktion hat bisher das höchste LP in der Pre-Use-Phase (25%), was zu 23% auf den Ziegelsplitt der Vegetationsschicht, zu 2% auf den erneuerbaren Hummus und zu 1% auf den Bewehrungsstahl zurückzuführen ist. Das Kreislaufpotenzial der Post-Use-Phase ist mit 26% dagegen das niedrigste aller Bauteile. Das liegt an der

Verschmutzung der Betondecke durch den Bitumenanstrich. Das CLP beträgt lediglich 1%, das auf den Stahl zurückzuführen ist. Im LP (22%) wird zusätzlich das Potenzial für das Downcycling (21%) des mineralischen Gemisches aus Substrat und Kies aufgezeigt. In der Gesamtbetrachtung scheidet das Flachdach mit einem CLP von 3% und LP von 48% am schlechtesten ab.

4.3.6. Schadstofffreiheit

Die Schadstofffreiheit wird auf Basis, der im Anhang 2 aufgeführten Anforderungen an die Schadstoffgrenzwerte überprüft. Diese sind dabei für neun Bauteile bzw. Materialien definiert. Im vorliegenden Fall betreffen die Anforderungen alle kunststoffbasierten Materialien des Flachdachs und der Decke (PE, EPS, PIR, PUR und FPO) sowie den Bodenbelag aus Linoleum. Die Anfrage bei den Herstellern hat ergeben, dass alle Materialien die Schadstoffgrenzwerte einhalten und somit die Voraussetzungen für die Bewertung des Kreislaufpotenzials erfüllen. Bei der Prognose der EoL-Szenarien hat sich jedoch herausgestellt, dass alle kunststoffbasierten Materialien der betrachteten Bauteile dem Szenario *energetische Verwertung fossiler Rohstoffe* zuzuordnen sind- und daher ohnehin kein Kreislaufpotenzial besitzen. So hat sich die Einhaltung der Schadstoffgrenzwerte lediglich im Fall des Bodenbelags aus Linoleum auf die Bewertung ausgewirkt.

4.4. Bewertung des Gebäudes

Für die Bewertung auf der Gebäudeebene werden zunächst die Kreislaufpotenziale aller zuvor berechneten Bauteile nach ihrem Massenanteil zusammengefasst (siehe Nr. 1. Abb. 34). Materialien, die in offenen Kreisläufen geführt werden, gehen nur zur Hälfte in das Kreislaufpotenzial des Gebäudes ein. Im zweiten Schritt werden dazu diese offenen Kreislaufpotenziale ermittelt und mit dem Faktor 0,5 gewichtet. Sie ergeben sich aus der Differenz zwischen CLP und LP. Zusammen mit dem CLP ergibt sich dann das gewichtete Kreislaufpotenzial des Gebäudes aus der Pre-Use und Post-Use-Phase (siehe Nr. 2 Abb. 34). Im letzten Schritt wird jeweils die Hälfte der beiden Phasen zum *Urban Mining Indikator* zusammengefasst. Nach der Durchführung dieser Schritte ergibt sich für das Building.Lab ein Kreislaufpotenzial von 24,4%. Dieses setzt sich zusammen aus 2,9% aus der Pre-Use-Phase und 21,6% aus der Post-Use-Phase. Die Bewertung fällt wie bereits in der ersten Materialanalyse (Kap. 4.1.2) vermutet, äußerst niedrig aus. Sie

zeigt die Grenzen des Recyclings des im Building.Lab in großen Mengen verwendeten Betons auf.

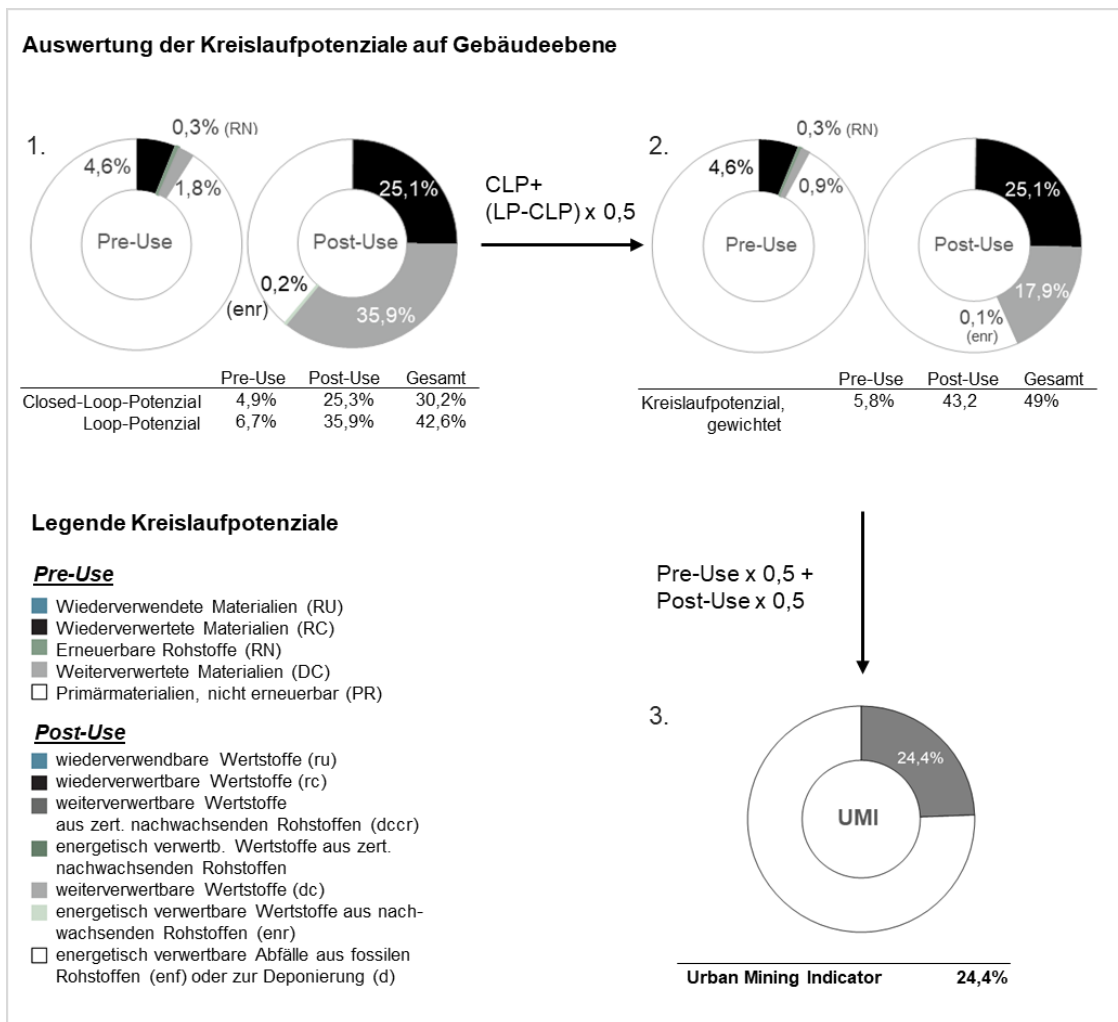


Abb. 34 Bewertung der Kreislaufpotenziale des Buildings.Lab

Ganze 93% der Materialien stammen aus Primärrohstoffen (siehe Nr. 1. Abb. 34). Nur ein geringer Massenanteil von 6,4% ist aus Sekundärrohstoffen und setzt sich zusammen aus den Anteilen aus Stahl, Steinwolle und Ziegelsplitt. Lediglich 0,3% sind aus nachwachsenden Rohstoffen und sind auf die Linoleumböden und den Hummusanteil der Substratschicht zurückzuführen. Im Post-Use können zukünftig der Methode des Urban Mining Index nach nur 25,1% hochwertig zurückgewonnen werden, 35% werden dem Downcycling zugeführt und 0,2% werden dem EoL-Szenario *energetische Verbrennung von nachwachsenden Wertstoffen* zugeordnet. Der Rest – also der weiße Teil des Loops – setzt sich zusammen aus 38,7% Deponierung und 0,1% energetischer Verbrennung fossiler Rohstoffe.

5. Zusammenfassung und Interpretation

Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der Anwendbarkeit von quantitativen Methoden zur Bewertung der Kreislauffähigkeit von Gebäuden. Dabei wurde die Anwendbarkeit auf Basis der Aussagekraft der Methoden und der Herausforderungen bei der Anwendung ermittelt.

5.1. Untersuchung der Aussagekraft der Methoden

Zur Beurteilung der Aussagekraft der Methoden wurden im ersten Schritt mithilfe einer Grundlagenrecherche elf Parameter ermittelt, die die Kreislauffähigkeit von Baukonstruktion bzw. Gebäuden beeinflussen (siehe Kap. 2.4). Sie definieren die Qualität des Gebäudes hinsichtlich der Einhaltung der zwei Strategien der Kreislaufwirtschaft nach Brocken – das Schließen und Verlangsamen von Stoffkreisläufen im Produktionsprozess mittels Recyclings und der Nutzung langlebiger Produkte.

Im zweiten Schritt wurden vorhandene quantitative Bewertungsmethoden im Hinblick auf die Abbildung zuvor beschriebener Einflussparameter untersucht und somit auch die Aussagekraft der Methoden herausgearbeitet. Die Ökobilanz wurde dabei als geeignete Methode zur Bewertung der Kreislauffähigkeit ausgeschlossen, da sie wesentliche Voraussetzungen der Kreislauffähigkeit von Gebäuden vernachlässigt. Es wurden vier quantitative Bewertungsmethoden ermittelt: Building Circularity Indicator (BCI_V) aus der Masterarbeit von Verberne, Circularity Indicator der Plattform Madaster (CI), Building Circularity Index (BCI_{AC}) des Unternehmens Alba Concept und Urban Mining Index (UMI) aus der Dissertation von Rosen.

Der Vergleich der Methoden hat gezeigt, dass die betrachteten Parameter variieren. Die Varianz zwischen den Methoden ist auf die derzeit fehlende Standardisierung seitens nationaler und internationaler Normung zurückzuführen [11, S. 1938]. So ist beispielsweise der UMI die einzige Methode, die zwischen dem hochwertigen Recycling und dem Downcycling unterscheidet. Materialien, die aus dem Downcycling stammen oder diesem nach der Nutzung zugeführt werden, gehen nur zur Hälfte in das Kreislaufpotenzial ein. Die zwei Methoden UMI und BCI_V legen die Schadstofffreiheit der Materialien als Voraussetzung für ein hochwertiges EoL-Szenario (Recycling/ Downcycling/ Kompostierung) fest; wobei die zwei anderen Methoden diesen wichtigen Parameter

vernachlässigen. Alle vier Methoden bilden den für das Recycling wesentlichen Aspekt der Rückbaubarkeit von Bauteilschichten und Bauteilen ab. Das geschieht jedoch in einer unterschiedlichen Abbildungstiefe. Der CI berücksichtigt lediglich den Parameter Demontierbarkeit als Voraussetzung für die Wiederverwendung von Bauteilen. Die Trennbarkeit von Bauteilschichten bzw. von Materialien wird hingegen gar nicht mit einbezogen. Die Methoden BCI_V und BCI_{AC} nutzen die Trennbarkeitsfaktoren von Durmisevic et al. [92, 5 ff.], diese stufen die Trennbarkeit von Bauteilschichten – wie z.B. die Art der Verbindung als auch die Demontierbarkeit von Bauteilen – wie z.B. die Zugänglichkeit zu Montagepunkten auf einer Skala von 0,1 (nicht lösbar) bis 1,0 (lösbar) ein. Der UMI bildet ebenfalls die Trennbarkeit ab. Er setzt die sortenreine Trennung der Materialien für das Recycling und Downcycling voraus. Die Methode geht jedoch einen Schritt weiter und beurteilt zudem die Wirtschaftlichkeit der sortenreinen Trennung, die mit Hilfe des selektiven Rückbaus ermöglicht wird. Diese wird auf Basis des Arbeitsaufwandes für den selektiven Rückbau und des Restwerts der zurückgebeugten Materialien prognostiziert. Keine der Methoden bildet den Vorteil der Weiternutzung von bereits bestehender Bausubstanz ab, obwohl diese vergleichbar mit der Wiederverwendung zur Ressourcenschonung führt.

Aus dem systematischen Vergleich der Methoden mittels der Einteilung der Abbildung aller elf Einflussparameter in *wird abgebildet* (2 Punkte), *wird eingeschränkt abgebildet* (1 Punkt) und *wird nicht abgebildet* (0 Punkte) wurde ermittelt, dass der UMI mit 16 Punkten, gefolgt von BCI_V mit 12 Punkten, BCI_{AC} mit 10 Punkten und CI 9 Punkten, die Methode ist, die die Einflussparameter am besten abbildet und folglich Stand der Forschung die aussagekräftigste Methode zur Bewertung der Kreislauffähigkeit ist. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass in dieser Masterarbeit alle Einflussparameter mit gleicher Gewichtung betrachtet wurden. So konnte nicht ermittelt werden, ob beispielsweise der Parameter Schadstofffreiheit einen genau so großen Einfluss auf die Kreislauffähigkeit von Gebäuden hat, wie die Trennbarkeit von Bauteilschichten.

5.2. Bewertung des Building.Labs

Im letzten Schritt wurde die Methode des Urban Mining Index am Forschungsgebäude Building.Lab angewendet (Kapitel 4). Um den Bewertungsaufwand einzugrenzen, wurde aus jeder Kostengruppe der Konstruktion das massenbezogen (kg/m^2) schwerste Bauteil ausgewählt und bewertet. Der Betreuungsumfang betrifft sieben Bauteile, die

zusammen 51% der gesamten Gebäudemasse ausmachen. Die Bewertung wurde zunächst auf der Bauteilebene und anschließend auf der Gebäudeebene durchgeführt.

Im UMI wird zwischen Closed-Loop-Potenzial (CLP) und Loop-Potenzial (LP) unterschieden (siehe Kap. 3.6.2). Diese werden sowohl für die Entwurfsphase (Pre-Use) als auch für die Rückbauphase (Post-Use) ermittelt. Das theoretische Maximum beider Kreislaufpotenziale beträgt 200%. Die Bauteile des Building.Labs erreichen im CLP lediglich Werte zwischen 3% und 39%. Dabei schneidet das Flachdach mit einem CLP von 3% am schlechtesten ab und die Außenwand (AW1) mit 39% am besten ab. Das LP der Bauteile fällt etwas besser aus, ist jedoch in Bezug auf das Maximum von 200% niedrig. Die Werte für das LP liegen zwischen 48% und 77%. Auch hier schneidet das Flachdach am schlechtesten ab. Den besten Wert erreicht die Bodenplatte. Die Ergebnisse der Bauteilbewertung lassen sich zu der Gebäudebewertung – dem Urban Mining Indicator – zusammenfassen. Dieser erreicht für die untersuchten Bauteile des Building.Labs den Wert von 24%; wobei das theoretische Maximum 100% beträgt. Der niedrige Wert ist zum einen auf den hohen Primärrohstoffanteil von 93% in der Herstellung der Bauteile zurückzuführen. Zum anderen ergibt er sich aus der Prognose der EoL-Szenarien, die auf Basis des Rückbauaufwandes und der Kosten bzw. Erlöse bei der Entsorgung der Materialien getroffen wurde. Diese Szenarien setzen sich für das Building.Lab aus 25% Recycling, 35% Downcycling und 0,2% energetische Verwertung nachwachsender Rohstoffe, 1% energetische Verwertung fossiler Rohstoffe sowie 40% Deponierung zusammen. Dieser Wert war insofern zu erwarten, als dass die erste Analyse der verwendeten Materialien ergab, dass 91% der betrachteten Bauteilmassen aus Beton besteht. Dieser besteht aus 100% Primärrohstoffen und hat im besten Fall – also einer sortenreinen Rückgewinnung – ein Recyclingpotenzial von lediglich 40%.

Das Bewertungsergebnis muss jedoch auch im Hinblick auf die zugrundeliegenden Informationslücken seitens des Forschungsprojekts interpretiert werden. So waren zwei Materialien und fünf Hersteller der insgesamt 35 betrachteten Materialien/Bauteilschichten unbekannt und mussten geschätzt werden.

5.3. Herausforderungen bei der Bewertung

Bei der Bewertung wurden insgesamt fünf Herausforderungen ermittelt. Diese werden im Folgenden erläutert.

Die Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus im Hinblick auf den Arbeitsaufwand für Personen und Maschinen konnte anhand des von Rosen entwickelten Bauteilkatalogs (Anhang 3) bewertet werden. Darin enthalten sind Aufwandswerte, die aus Versuchen von Rosen sowie Werten der Wissenschaftler Graubner et al. stammen [102]. Allerdings waren 17 Bauteilschichten (45%) nicht im Bauteilkatalog abgebildet. Neun der 17 fehlenden Aufwandswerte konnten aus Beispielbewertungen der Dissertation von Rosen entnommen werden und wurden offensichtlich von der Verfasserin selbst abgeschätzt. Die restlichen acht Werte mussten durch die Verfasserin dieser Arbeit geschätzt werden. Dafür wurden auf Basis von gleicher Einbausituation und vergleich-barer Materialität der Bauteilschichten, Werte aus dem Bauteilkatalog herangezogen. Diese von Rosen bereits aufgeführte Informationslücke [3, S. 296] wurde durch die Untersuchungen dieser Arbeit somit bestätigt und stellt die erste Herausforderung der Methode dar.

Die zweite Herausforderung der Methode liegt in dem Aufwand für die Bewertung. Für die Bewertung müssen einige Daten recherchiert werden. Ein besonderer Bewertungsaufwand hat sich dabei bei der Einholung von Schadstoffnachweisen ergeben. Von den neun erforderlichen Nachweisen mussten acht explizit bei dem jeweiligen Hersteller angefragt werden und waren nicht bereits veröffentlicht. Der Aufwand für die Recherche der erforderlichen Materialkennwerte Material Recycling Content (MRC) und Material Loop Potenzial (MLP) war hingegen übersichtlich. Im durchgeführten Bewertungsbeispiel notwendige Werte für den MRC konnten dem Atlas Recycling und der Dissertation von Rosen entnommen werden. Das MLP war nur für drei Bauteilschichten zu ermitteln, da sonst kein hochwertiges Recyclingszenario prognostiziert wurde. Auch diese Werte konnten aus dem Atlas Recycling sowie der Dissertation entnommen werden. Auch die Recherche nach vorhandenen Herstellerrücknahmesystemen gehört zu den Aufgaben der Bewertung durch den UMI. Bei jeder Bauteilschicht muss geprüft werden, ob der Hersteller diese zurücknimmt und wie er sie verwertet. Im Rahmen der Bewertung des Building.Labs wurde lediglich für die Steinwolldämmung der Außenwand ein Herstellerrücknahmesystem ermittelt.

Die Zuordnung der EoL-Szenarien musste ausschließlich auf der Basis von Beispielbewertungen und Tab. 14 auf S. 94 vollzogen werden, da die automatische Zuordnung durch das originale Tabellenwerkzeug nicht zur Verfügung stand, was aufwändig war. Diese wird zukünftig durch die Auswahl im Bauteilkatalog automatisch erfolgen, so würde sich zumindest ein Teil des Aufwands erübrigen. Allerdings waren im vorliegenden Fall 45% der Bauteilschichten nicht im Bauteilkatalog vorhanden und müssten auch zukünftig abgeschätzt werden. Hier wird vom Anwender ein gewisses Vorwissen im Bereich der Verwertungspraxis vorausgesetzt, das die Zuteilung der Szenarien nach dem selektiven Rückbau und selektiven Abbruch ermöglicht.

Der UMI nutzt in der Bewertung des Kreislaufpotenzials eine Vielzahl an Fachbegriffen wie MLP, MRC, CLP, LP, Faktor Arbeit oder Faktor Wert. Die Interpretation dieser benötigt eine Einarbeitungszeit seitens des Anwenders und macht die Methodik zunächst komplex. Im Pre-Use lassen sich die Kreislaufpotenziale gut durch die Darstellung in den Kreisdiagrammen nachvollziehen. Dabei richten sich die Qualitätsstufen nach dem Massenanteil der verwendeten Materialien. Die Interpretation der Potenziale des Post-Use ist hingegen komplex. Die Schwierigkeit liegt darin, dass die Berechnung der Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus die Potenziale beeinflusst, was aus der Darstellung nicht erkennbar ist. Die Komplexität der Methode stellt also die dritte Herausforderung dar. Diese ist jedoch nach der ersten Anwendung gut beherrschbar und ist daher kein grundsätzliches Hindernis für die Bewertung.

Die vierte Herausforderung der Methode liegt in der Bewertung des Kreislaufpotenzials nach Massenanteilen. Hat eine der bewerteten Bauteilschichten ein besonders hohes Gewicht im Vergleich zu den anderen Schichten, so dominiert auch ihr Potenzial die Gesamtbewertung des Bauteils. Die Auswertung der Kreislaufpotenziale der Außenwand hat gezeigt, dass der Vorteil der Nutzung der recyclingfähigen Dämmung aus Steinwolle kaum ablesbar ist, da ihr Gewicht mit $2,8 \text{ kg/m}^2$ deutlich geringer ist als das der Tragschicht aus Beton mit 576 kg/m^2 . Eine Betrachtung des Volumenanteils würde diese Problematik beheben. Dagegen spricht allerdings laut Rosen, dass leichte Baustoffe häufig Luft enthalten, die jedoch bei der Verwertung entweicht [3, S. 295]. So ist auch die Masse ausschlaggebend für die zirkuläre Verwendung der Materialien. Hier besteht weiterhin Diskussionsbedarf, inwiefern die Vorteile der Bewertung nach Massenanteilen überwiegen.

Die letzte ermittelte Herausforderung der Bewertungsmethode liegt in der Unsicherheit der durchgeführten Prognose des Aufwands für den Rückbau und der Kosten- bzw. Erlöse für die Entsorgung der Abbruchmaterialien. Das Zeitfenster der Prognose entspricht der Lebensdauer des Gebäudes und kann laut BNB mit 50 Jahren angenommen werden [31]. Bei der Beurteilung des Aufwands für den selektiven Rückbau wird ein in diesem Zeitraum stattfindender technischer Fortschritt bei Abbruchverfahren vernachlässigt. Besonders die maschinelle Abbruchtechnik war in den letzten 30 Jahren einer stetigen Entwicklung hin zu mehr Effizienz ausgesetzt [3, S. 52]. Auch die Prognose der Kosten und Erlöse ist mit Unsicherheiten verbunden. So sind Schwankungen der Rohstoffpreise durch Rohstoffknappheit zum Zeitpunkt der Bewertung nicht vorhersehbar. Die Prognose des Aufwands und des Restwerts bietet also lediglich einen Anhaltspunkt für die Bewertung.

6. Fazit und Ausblick

Die vorliegende Forschungsarbeit geht der Frage nach: Inwiefern lassen sich vorhandene quantitative Methoden zur Bewertung der Kreislauffähigkeit von Gebäuden bereits anwenden und wo bestehen Herausforderungen?

Als quantitative Methoden zur Bewertung der Kreislauffähigkeit von Gebäuden wurden folgende Methoden identifiziert: Building Circularity Indicator von Verberne (BCI_V), Circularity Indicator (CI) der Plattform Madaster, Building Circularity Index (BCI_{AC}) des Unternehmens Alba Concept und Urban Mining Index (UMI) aus der Dissertation von Rosen.

Zunächst wurden die Methoden auf ihre Aussagekraft über die wesentlichen Aspekte der Kreislaufwirtschaft untersucht. Um dies bewerten zu können, wurden zwölf Parameter identifiziert, die die Kreislauffähigkeit von Gebäuden beeinflussen (Einflussparameter). Im Rahmen dieser Arbeit wurde der UMI als die aussagekräftigste der betrachteten Methoden identifiziert, da er die meisten Einflussparameter in seiner Bewertung berücksichtigt. Daher ist diese Methode nach heutigem Stand der Forschung am besten für die Anwendung geeignet. Diese Methode zeichnet weiterhin aus, dass sie die Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus mit in die Bewertung einbezieht. UMI ermöglicht durch eine differenzierte Betrachtung der Wirtschaftlichkeit eine Prognose über den möglichen Verwertungsweg von Materialien nach dem Lebenszyklusende von Gebäuden. Außerdem unterscheidet er als einzige Methode zwischen dem Recycling und dem Downcycling.

Zur Analyse der Herausforderungen bei der Anwendung wurde das Forschungsgebäude Building.Lab mit der Methode des UMI bewertet. Dabei wurden drei wesentliche Herausforderungen ermittelt: fehlende Daten für die Ermittlung des Rückbauaufwands, die Unsicherheit in der Prognose der Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus und die Bewertung der Kreislaufpotenziale nach Massenanteilen. Die für die Beurteilung des Rückbauaufwands benötigten Aufwandswerte waren in dem Bewertungsbeispiel lediglich für 55% der Bauteilschichten vorhanden. Diese konnten aus dem Bauteilkatalog des Urban Mining Index entnommen werden. Die übrigen Aufwandswerte wurden auf Basis von gleicher Einbausituation und Materialität der Bauteilschichten geschätzt. Sollte sich

der UMI als Methode etablieren, ist es notwendig, den Bauteilkatalog kontinuierlich zu ergänzen.

Die Prognose des Arbeitsaufwandes des Rückbaus und des Restwerts der Materialien wird im UMI für das Zeitfenster von 50 Jahren Lebensdauer des Gebäudes getroffen. Dabei bleiben allerdings in dem Zeitraum stattfindende technische Fortschritte bei Abbruchverfahren unberücksichtigt. Zusätzlich erschweren Schwankungen der Rohstoffpreise durch z.B. Rohstoffknappheit eine Prognose des Restwerts. So ist insgesamt die Vorhersage über den möglichen Verwertungsweg der Materialien mit Unsicherheiten verbunden.

Die Bewertung der Kreislaufpotenziale nach Massenanteilen im UMI führt dazu, dass sich schwere Baustoffe stärker auf das Ergebnis auswirken als leichte. So fließen beispielsweise die Potenziale von leichten Dämmstoffen kaum in die Bewertung ein, sofern diese mit schweren Baustoffen wie Beton kombiniert werden. Die Bewertung auf Basis des Volumens behebt diese Problematik. Allerdings geht dabei die im Baustoff eingelagerte Luft in die Bewertung mit ein. Hier muss abgewogen werden, inwiefern der Vorteil einer volumenbezogenen Bewertung überwiegt.

Als nachgeordnete Herausforderungen wurden der Bewertungsaufwand und die Komplexität der Methodik ermittelt. Die Recherche und Interpretation der für die Bewertung erforderlichen Daten ist aufwändig und kann eine Hürde in der Bewertung darstellen. Diese lässt sich allerdings nach der mehrmaligen Anwendung der Methode senken.

Durch den Vergleich der Bewertungsmethoden hinsichtlich der Abbildung der Einflussparameter konnten deutliche Unterschiede herausgearbeitet werden. So bleibt beispielsweise der wesentliche Parameter der Trennbarkeit von Bauteilschichten im CI unberücksichtigt, während die übrigen Methoden diesen berücksichtigen. Als ein weiteres Beispiel, lassen sich Unterschiede anhand der Verwendung des Parameters Nutzungsdauer von Bauteilen aufzeigen. Während sich bei den Methoden BCI_V , BCI_{AC} und CI lange Nutzungsdauern von Bauteilen positiv auf die Kreislauffähigkeit auswirken, bleibt dieser Parameter beim UMI unberücksichtigt. Die Einbindung verschiedener Parameter in die Bewertung hat Einfluss auf das Ergebnis der Bewertung. Folglich lässt sich die Hypothese der Arbeit bestätigen, dass nach heutigem Stand eine objektive Bewertung der Kreislauffähigkeit nicht möglich ist.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden alle ermittelten Einflussparameter als gleichrangig angenommen. So wurde beispielsweise die Trennbarkeit von Bauteilschichten als gleichwertig gegenüber der Schadstofffreiheit der Materialien betrachtet. Die Ermittlung der Unterschiede in der Relevanz war nicht Teil dieser Forschung und bedarf einer anknüpfenden Untersuchung.

Die Erkenntnisse aus dem Vergleich der Methoden zeigen den Bedarf nach einer nationalen und internationalen Standardisierung der Bewertung auf. Diese sollte dabei, so wie die ISO 14040 für die Ökobilanzierung, genaue Bewertungskriterien definieren. Einen Anfang dafür macht die private Plattform CB'23 aus den Niederlanden, die im Guide Measuring circularity in the construction sector 2.0" ein Regelwerk für die Bewertung der Kreislauffähigkeit im Bauwesen definiert.

7. Literaturverzeichnis

- [1] DUDEN, *Benchmark*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Benchmark> (Zugriff am: 25. November 2022).
- [2] A. Hillebrandt, Hg., *Atlas Recycling: Gebäude als Materialressource*. München: Detail Business Information GmbH, 2021.
- [3] A. Rosen, „Urban Mining Index: Entwicklung einer Systematik zur quantitativen Bewertung der Kreislaufkonsistenz von Baukonstruktionen in der Neubauplanung“. Dissertation, Bergische Universität Wuppertal, 2020.
- [4] Earth Overshoot Day, *Press Release July 2022 German: Earth Overshoot Day*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.overshootday.org/newsroom/press-release-july-2022-german/> (Zugriff am: 26. November 2022).
- [5] Umweltbundesamt, *Ressourcennutzung und ihre Folgen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/ressourcennutzung-ihre-folgen> (Zugriff am: 7. November 2022).
- [6] Umweltbundesamt, *Bauabfälle*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/bauabfaelle#baustoffrecycling-wird-gefordert> (Zugriff am: 8. Juli 2022).
- [7] Umweltbundesamt, „Rohstoffeffizienz - Wirtschaft entlasten, Umwelt schonen“.
- [8] Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen, Hg., „DGNB System Kriterienkatalog Gebäude Neubau“, 2018. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dgnb.de/de/verein/publikationen/bestellung/downloads/DGNB_Kriterienkatalog_Nebau_EV_2018.pdf. Zugriff am: 12. Dezember 2022.
- [9] *Ökobilanz Grundsätze und Rahmenbedingungen*, DIN EN ISO 14040:2006 + A1:2020, Deutsches Institut für Normung e.V, Berlin, Feb. 2021.
- [10] *Nachhaltigkeit von Bauwerken: Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden - Berechnungsmethode*, DIN EN 15978:2011, Deutsches Institut für Normung e.V, Okt. 2012.
- [11] L. Rigamonti und E. Mancini, „Life cycle assessment and circularity indicators“, *Int J Life Cycle Assess*, Jg. 26, Nr. 10, S. 1937–1942, 2021, doi: 10.1007/s11367-021-01966-2.
- [12] J. Verberne, „Building Circularity Indicators: An approach for measuring circularity of a building“, Technische Universiteit Eindhoven, 18. Feb. 2016. [Online]. Verfügbar unter: <https://pure.tue.nl/ws/files/46934924/846733-1.pdf>. Zugriff am: 10.05.22.
- [13] Madaster Services B.V., „Madaster Circularity Indicator explained“, 2018. [Online]. Verfügbar unter: https://docs.madaster.com/files/Madaster_Circularity_Indicator_explained_v1.1.pdf. Zugriff am: 10.12.22.
- [14] J. Kirchherr, D. Reike und M. Hekkert, „Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions“, *Resources, Conservation and Recycling*, S. 221–232, 2017, doi: 10.1016/j.resconrec.2017.09.005.
- [15] F. Müller, R. Kohlmeyer und F. Krüger, „Leitsätze einer Kreislaufwirtschaft“, Dessau-Roßlau, 2020. [Online]. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020_04_27_leitlinie_kreislaufwirtschaft_bf.pdf. Zugriff am: 20.06.22.
- [16] R. Ayres, *Industrial metabolism: theory and policy, the greening of industrial ecosystems*. Washington DC: Natonal Academy Press, 1994.
- [17] M. Braungart, „Die Zukunft der Kunststoffe: Cradle to Cradle“, *plastverarbeiter*, 23. Juli 2020, 2020. [Online]. Verfügbar unter:

- <https://www.plastverarbeiter.de/verarbeitungsverfahren/kunststoffrecycling/die-zukunft-der-kunststoffe-cradle-to-cradle-351.html>. Zugriff am: 20. Juni 2022.
- [18] EPEA GmbH - Part of Drees & Sommer, *Cradle to Cradle*. [Online]. Verfügbar unter: <https://epea.com/ueber-uns/cradle-to-cradle> (Zugriff am: 26. November 2022).
- [19] N. Bocken, I. de Pauw, C. Bakker und B. van der Grinten, „Product design and business model strategies for a circular economy“, *Journal of Industrial and Production Engineering*, Nr. 5, S. 308–320, 2016, doi: 10.1080/21681015.2016.1172124.
- [20] G. Moraga *et al.*, „Circular economy indicators: What do they measure?“, 2019.
- [21] Lindner Group, *Produktleasing - Kreislaufwirtschaft im Bauwesen*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.lindner-group.com/de_DE/kompetenzen/green-building/produktleasing/ (Zugriff am: 11. November 2022).
- [22] S. Ebert, „Recycling: Ströme im End of Life“. München, 20. Jan. 2022.
- [23] *Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz): KrWG*, 2012. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/>
- [24] V. John und T. Stark, „Wieder- und Weiterverwendung von Baukomponenten (RE-USE)“, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2021/bbsr-online-27-2021-dl.pdf?__blob=publicationFile&v=3.
- [25] *Recyclingorientierte Produktentwicklung*, VDI 2243, Verein Deutscher Ingenieure, Berlin, Jul. 2002.
- [26] Fachverband Schrott, E-Schrott und Kfz-Recycling BVSE, *Fakten Metallrecycling*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bvse.de/dateien2020/2-PDF/06-Publikationen/04-Broschueren/0608-EuRIC_Metal_Recycling_Factsheet_GER_002.pdf (Zugriff am: 26. November 2022).
- [27] LfU Bayern, *Abfall - Sonstige Verwertung* -. [Online]. Verfügbar unter: https://www.lfu.bayern.de/abfall/sonstige_verwertung/index.htm (Zugriff am: 11. November 2022).
- [28] S. Schneider, *37 Holzverbindungen auf einen Blick*. [Online]. Verfügbar unter: <https://baubeaver.de/holzverbindungen/> (Zugriff am: 1. Juli 2022).
- [29] *Sustainability in buildings and civil engineering works: Design for disassembly and adaptability Principles, requirements and guidance*, ISO 20887, International Organization for Standardization, Genf, Jan. 2020.
- [30] S. Brand, *How buildings learn: What happens after they're built*. New York, NY, Toronto, London: Penguin Books, 1995.
- [31] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, *Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/baustoff_gebauedaten/BNB_Nutzungsdauern_von_Bauteilen_2017-02-24.pdf (Zugriff am: 26. November 2022).
- [32] A. Müller, *Baustoffrecycling: Entstehung - Aufbereitung - Verwertung*. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg, 2018.
- [33] M. Schröder, Hg., *Abbrucharbeiten: Grundlagen, Planung, Durchführung*, 3. Aufl. Köln: Rudolf Müller, 2015.
- [34] M. A. Heinrich, „Erfassung und Steuerung von Stoffströmen im urbanen Wohnungsbau - Am Beispiel der Wohnungswirtschaft in München-Freiham“. Dissertation, Technische Universität München; Hochschule München, München, 2018.
- [35] *Abbrucharbeiten: Begriffe, Verfahren, Anwendungsbereiche*, DIN 18007, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Jan. 2022.

- [36] Umweltbundesamt, *Biotische Rohstoffe*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/biotische-rohstoffe> (Zugriff am: 1. Juli 2022).
- [37] Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Hg., „Second Ministerial Conference on the Protection of Forests in Europe: RESOLUTION H1 General Guidelines for the Sustainable Management of Forests in Europe“, Helsinki, 1993. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/_Wald/ForestEuropeResolution.pdf. Zugriff am: 16. August 2022.
- [38] Umweltbundesamt, *Holzindustrie*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/industriebereiche/holz-zellstoff-papier-industrie/holzindustrie> (Zugriff am: 19. Juni 2022).
- [39] Umweltbundesamt, *Kunststoffrecycling in der Baubranche stärken*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/kunststoffrecycling-in-der-baubranche-staerken> (Zugriff am: 14. Juni 2022).
- [40] Umweltbundesamt, *Verrottet Plastik gar nicht oder nur sehr langsam?* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/service/uba-fragen/verrottet-plastik-gar-nicht-nur-sehr-langsam> (Zugriff am: 15. Juni 2022).
- [41] M. Hegger, Hg., *Baustoff Atlas*, 1. Aufl. Basel, Berlin, München: Birkhäuser; Ed. Detail, 2005.
- [42] O. Krauß und T. Werner, „Potenziale eines hochwertigen Recyclings im Baubereich: Kurzanalyse Nr. 8“, 2016. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/1_Themen/h_Publikationen/Kurzanalysen/Kurzanalyse_Nr_8_Hochwertiges_Recycling_im_Baubereich.pdf. Zugriff am: 10.11.22.
- [43] P. Bendix, H. Berg, S. Janos, M. Ritthoff und L. Perschel, „Förderung einer hochwertigen Verwertung von Kunststoffen aus Abbruchabfällen sowie der Stärkung des Rezyklateinsatzes in Bauprodukten im Sinne der europäischen Kunststoffstrategie“, Umwelt Bundesamt 151, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2021-11-23_texte_151-2021_rebaupro_0.pdf. Zugriff am: 14. Juni 2022.
- [44] Umwelt Bundesamt, *Kunststoffabfälle*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/kunststoffabfaelle#kunststoffvielfalt> (Zugriff am: 1. Oktober 2022).
- [45] Kupferinstitut, *Ressourcenschonung dank Recycling*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.kupferinstitut.de/kupferwerkstoffe/nachhaltigkeit/recycling/> (Zugriff am: 26. Oktober 2022).
- [46] „Sand and Sustainability: United Nation Environment Programme“, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/28163>. Zugriff am: 1. August 2022.
- [47] Umweltbundesamt, *Stoffstrommanagement im Bauwesen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/abfallwirtschaft/urban-mining/stoffstrommanagement-im-bauwesen#getrennte-erfassung-verbessern> (Zugriff am: 1. August 2022).
- [48] C. Deilmann und J. Reichenbach, „Materialströme im Hochbau: Potenziale für eine Kreislaufwirtschaft“, Bonn, 2017. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/zukunft-bauen-fp/2017/band-06-dl.pdf?__blob=publicationFile&v=2. Zugriff am: 16. Juni 2022.
- [49] WWF, *Ein begehrter Rohstoff: Sand*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.wwf.de/themen-projekte/wwf-projektregionen-in-asien/ein-begehrter-rohstoff-sand> (Zugriff am: 1. Dezember 2022).
- [50] A. Müller, „Erschließung der Ressourceneffizienzpotenziale im Bereich der Kreislaufwirtschaft Bau“, 2016. [Online]. Verfügbar unter:

- https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/programme/zb/Auftragsforschung/2NachhaltigesBauenBauqualitaet/2016/ressourceneffizienzpotenzi-ale/Endbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=2. Zugriff am: 16. Juni 2022.
- [51] „Recyclingbeton noch ohne Marktdurchdringung“, *EU-Recycling*, 01/2019, S. 26, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://eu-recycling.com/Archive/22163>
- [52] Fraunhofer-Institut für Bauohysik IBP, Hg., „Elektromagnetische Fragmentierung: Produktblatt“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/ibp-neu/de/dokumente/produktblaetter/mwb/produktblatt-fragmentierung.pdf>. Zugriff am: 16. Juni 2022.
- [53] „Holzius Katalog“, Jg. 2020. [Online]. Verfügbar unter: https://static.holzius.com/fd358b2206134a85/2022/04/holzius_katalog_web_2022.pdf
- [54] Statistisches Bundesamt, *Abfallaufkommen in Deutschland 2018 bei 417,2 Millionen Tonnen*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2020/06/PD20_195_321.html (Zugriff am: 17. Juni 2022).
- [55] Kreislaufwirtschaft Bau, Hg., „Mineralische Bauabfälle Monitoring 2018: Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2018“, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.kreislaufwirtschaft-bau.de/Download/Bericht-12.pdf>. Zugriff am: 10.10.22.
- [56] E. Stricker, Hg., *Bauteile wiederverwenden: Ein Kompendium zum zirkulären Bauen*. Zürich: Park Books, 2021.
- [57] F. Heisel, Hg., *Urban Mining und kreislaufgerechtes Bauen: Die Stadt als Rohstofflager*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2021.
- [58] F. Knappe, U. Dechantreiter, H. Daxbeck und S. Tschanen, „Bauteilnetz-Europä-Konferenz‘ zur grenzüberschreitenden Vernetzung und zum Erfahrungsaustausch 2014 in Bremen: Abschlussbericht“, 2015. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-31756.pdf>. Zugriff am: 22. November 2022.
- [59] restado, *restado - Der Marktplatz für zirkuläre Baustoffe*. [Online]. Verfügbar unter: <https://restado.de/ueber-restado/> (Zugriff am: 11. November 2022).
- [60] J. Schäufele, *Concular - Zirkuläres Bauen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://concular.de/de/> (Zugriff am: 11. November 2022).
- [61] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, Hg., „Deutsches Ressourceneffizienzprogramm III: 2020 bis 2023“, Berlin, 2020. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/ressourceneffizienz_programm_2020_2023.pdf. Zugriff am: 16. Juni 2022.
- [62] Umweltbundesamt, *Indikator: Gesamtrohstoffproduktivität*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-gesamtrohstoffproduktivitaet#wie-ist-die-entwicklung-zu-bewerten> (Zugriff am: 1. Dezember 2022).
- [63] *Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des europäischen Parlaments und des Rates vom 9. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates (Bauproduktverordnung): EUBauPVO*, 2011. [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=celex%3A32011R0305>
- [64] Umweltbundesamt, *Abfallrecht*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/abfallwirtschaft/abfallrecht> (Zugriff am: 23. Dezember 2022).
- [65] *Richtlinie des europäischen Parlaments über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien (Abfallrahmenrichtlinie): AbfRRL*, 2008. [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?qid=1602768647329&uri=CELEX:02008L0098-20180705>

- [66] *Richtlinie (EU) 2018/851 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle (Abfallrahmenrichtlinie): AbfRRL*, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32018L0851>
- [67] Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft e.V., *Kabinettsbeschluss zum Kreislaufwirtschaftsgesetz enttäuscht*, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bde.de/presse/kabinettsbeschluss-zum-kreislaufwirtschaftsgesetz-enttaeuscht/>
- [68] *Kreislaufwirtschaft: Baustoffrecycling braucht mehr als nur guten Willen*, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.zdb.de/meldungen/details/kreislaufwirtschaft-baustoffrecycling-braucht-mehr-als-nur-guten-willen>
- [69] NABU - Naturschutzbund Deutschland e.V., *Zu kleine Schritte auf dem Weg zur Kreislaufwirtschaft - NABU*, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.nabu.de/news/2019/09/27006.html>
- [70] *Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz (Altholzverordnung): AltholzV*, 2002. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/altholzv/>
- [71] *Entwurf zur Novellierung der Verordnung über die Bewirtschaftung von Altholz (Altholzverordnung): AltholzV*, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vku.de/themen/infrastruktur-und-dienstleistungen/bmu-leitet-novelle-der-altholzverordnung-mit-diskussionsentwurf-ein/>
- [72] W. Leal Filho, Hg., *Aktuelle Ansätze zur Umsetzung der UN-Nachhaltigkeitsziele*. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum, 2019.
- [73] D. Bleher, G. Dehoust, H. Alwast, V. Grass und et. al, „Planspiel Mantelverordnung: Aspekte der Kreislaufwirtschaft und des Bodenschutzes“, 2017. [Online]. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-11-08_texte_104-2017_planspiel-mantelvo.pdf. Zugriff am: 16. August 2022.
- [74] H. Simons, „Kritik an der Mantelverordnung“, *ibau GmbH*, 8. Juni 2021, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ibau.de/akademie/wissenswertes/kritik-an-der-mantelverordnung/>. Zugriff am: 24. Mai 2022.
- [75] *Verordnung über die Bewirtschaftung von gewerblichen Siedlungsabfällen und von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen (Gewerbeabfallverordnung): GewAbfV*, 2017. [Online]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/gewabfv_2017/
- [76] „Gewerbeabfallverordnung: Wachsende Kritik an Vollzugsdefizit“, *recyclingnews*, 2. März 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.recyclingnews.de/recycling/gewerbeabfallverordnung-wachsende-kritik-an-vollzugsdefizit/>
- [77] J. Resch und T. Fischer, *Deutsche Umwelthilfe kritisiert Bundesländer für fehlenden Vollzug der Gewerbeabfallverordnung*. Berlin, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.duh.de/presse/pressemitteilungen/pressemitteilung/deutsche-umwelthilfe-kritisiert-bundeslaender-fuer-fehlenden-vollzug-der-gewerbeabfallverordnung/>
- [78] *Ökobilanz Grundsätze und Rahmenbedingungen*, DIN 14040:2006 + A1:2020, Deutsches Institut für Normung e.V, Berlin, Feb. 2021.
- [79] H. König, N. Kohler, J. Kreißig und T. Lützkendorf, *Lebenszyklusanalyse in der Gebäudeplanung*. DETAIL, 2012.
- [80] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, *Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) Neubau Büro- und Verwaltungsgebäude: Bilanzierungsregeln für die Erstellung von Ökobilanzen*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bnb->

nachhaltigesbauen.de/fileadmin/steckbriefe/verwaltungsgebäude/neu-
bau/v_2015/LCA-Bilanzierungsregeln_BNB_BN_2015.pdf (Zugriff am: 26. No-
vember 2022).

- [81] The Green Business Certification Inc., *Whole building life cycle assessment through LEED v4*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.gbci.org/whole-building-life-cycle-assessment-through-leed-v4> (Zugriff am: 1. Juli 2022).
- [82] L. Wastiels und Van Dessel Johan, „Relevance of the recycling potential (module D) in building LCA: A case study on the retrofitting of a house in Seraing“, 2013.
- [83] C. Mielecke, T. Mielecke und T. Lützkendorf, „Forschungsinitiative Zukunft Bau Wissenschaftliche Begleitung der Arbeitsgruppe „Modul D“ des Runden Tisches Nachhaltiges Bauen“, 2017. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/programme/zb/Auftragsforschung/2NachhaltigesBauenBauqualitaet/2016/runder-tisch-modul-d/endbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=1. Zugriff am: 21.12.22.
- [84] *Nachhaltigkeit von Bauwerken: Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte*, DIN EN 15804:2012+A2:2019, Deutsches Institut für Normung e.V, Berlin, Mrz. 2020.
- [85] *Nachhaltigkeit von Bauwerken: Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte*, DIN EN ISO 14040:2006 + A1:2020, Deutsches Institut für Normung e.V, Berlin, Mrz. 2022.
- [86] S. Ebert, S. Ott, K. Krause, A. Hafner und M. Krechel, „Modell der Recyclingfähigkeit auf Bauteilebene“, *Bautechnik*, Jg. 97, S1, S. 14–25, 2020, doi: 10.1002/bate.201900109.
- [87] *Nachhaltigkeit von Bauwerken: Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden*, DIN EN 15643:2012-10, Deutsches Institut für Normung e.V, Berlin, Okt. 2012.
- [88] D. Cottafava und M. Ritzen, „Circularity indicator for residential buildings: Addressing the gap between embodied impacts and design aspects“, *Resources, Conservation and Recycling*, Jg. 164, S. 105120, 2021, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.105120.
- [89] Ellen MacArthur Foundation, Hg., „Circularity Indicators: An Approach to Measuring Circularity“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.truevaluemetrics.org/DBpdfs/Circular-Economy/Ellen-MacArthur-Circularity-Indicators-Non-Technical-Case-Studies-May-2015.pdf>. Zugriff am: 12. Juli 2022.
- [90] sphaera, *GaBi Circularity Toolkit*. [Online]. Verfügbar unter: <https://gabi.sphaera.com/deutsch/software/gabi-software/gabi-circularity-toolkit/> (Zugriff am: 1. Oktober 2022).
- [91] openbuilding, *MANIFESTO OPENBUILDING*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.openbuilding.co/manifesto> (Zugriff am: 12. November 2022).
- [92] E. Durmisevic, Ö. Ciftcioglu und C. J. Anunba, „Knowledge Model for Assessing Disassembly Potential of Structures“, Delft University of Technology, Faculty of Architecture, Department of Building Technology, 2006. [Online]. Verfügbar unter: https://www.4darchitects.nl/download/TG39_2003_2.pdf. Zugriff am: 12.10.22.
- [93] E. Durmisevic, „Transformable Building Structures: Design for disassembly as a way to introduce sustainable engineering to building design & construction“. Dissertation, Technische Universität Delft, 2006. [Online]. Verfügbar unter: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A9d2406e5-0cce-4788-8ee0-c19cbf38ea9a>
- [94] Madaster Germany, Hg., „Madaster Zirkularitätsindikator“, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://docs.madaster.com/files/de/Madaster%20-%20Zirkularit%C3%A4tsindikator.pdf>. Zugriff am: 10.07.22.

- [95] J. Verberne und G. Cox, *From Identity to Circularity*. [Online]. Verfügbar unter: <https://madaster.com/inspiration/from-identity-to-circularity/> (Zugriff am: 22. September 2022).
- [96] Madaster Germany, Hg., „Madaster Benutzerhandbuch“, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://docs.madaster.com/files/de/Madaster%20-%20Benutzerhandbuch.pdf>. Zugriff am: 26. September 2022.
- [97] Planon, Hg., „Building Circularity Index: BCI Gebouw gebruikershandleiding“, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://bcigebouw.nl/wp-content/uploads/2021/04/2021-V2.0-BCI-Gebouw-gebruikershandleiding.pdf>. Zugriff am: 10.12.22.
- [98] Planon, *Measure the degree of circularity of your projects with the BCI tool*. [Online]. Verfügbar unter: <https://planonsoftware.com/de/marketplace/bci/> (Zugriff am: 9. Juli 2022).
- [99] A. Straub, H. van Nunen und R. Janssen, Hg., *Levensduur van bouwproducten: Methode voor referentiewaarden*. Rotterdam: SBR, 2011.
- [100] Platform CB'23, Hg., „Guide Measuring circularity: Working agreements for circular construction“, 2020. [Online]. Verfügbar unter: https://platformcb23.nl/images/downloads/Platform_CB23_Guide_Measuring_circularity_2.0.pdf. Zugriff am: 10.11.22.
- [101] Schultmann F., Hg., *ISA: Immissionsschutz beim Abbruch - Minimierung von Umweltbelastungen (Lärm, Staub, Erschütterungen) beim Abbruch von Hoch-/Tiefbauten und Schaffung hochwertiger Recyclingmöglichkeiten für Materialien aus Gebäudeabbruch*. KIT Scientific Publishing, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://directory.doabooks.org/handle/20.500.12854/50699>
- [102] C.-A. Graubner und F. Ritter, *Analyse der Trennbarkeit von Materialschichten hybrider Innenbauteile bei Instandsetzungs- und Modernisierungsmaßnahmen - Erstellung einer praxisnahen Datenbank für die Nachhaltigkeitsbeurteilung: Abschlussbericht*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2010.
- [103] A. Rosen, „Gutachten „Ressourcenschonendes Bauen“ am Beispiel Rathaus Korbach“, Ibbenbüren, 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://umwelt.hessen.de/sites/umwelt.hessen.de/files/2022-08/rhk_gutachten_ressourcenschonendes_bauen.pdf. Zugriff am: 12.12.22.
- [104] Bayerischer Bauindustrieverband e.V., *Entstehung*. [Online]. Verfügbar unter: <https://building-lab.de/artikel-entstehung.html> (Zugriff am: 26. November 2022).
- [105] M. Schneider, *Spatenstich für das Building Lab Regensburg*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bauindustrie-bayern.de/spatenstich-fuer-das-building-lab-regensburg> (Zugriff am: 11. Dezember 2022).
- [106] *Kosten im Bauwesen*, DIN 276, Deutsches Institut für Normung e.V, Berlin, Dez. 2018.
- [107] Institut Bauen und Umwelt e.V. IBU, Hg., „Umweltproduktdeklaration“, Deutsche ROCKWOOL, Berlin, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.rockwool.com/syssiteassets/rw-at/nachhaltigkeit/umwelt-produktdeklarationen-epd/wu-umwelt-produktdeklaration-epd-niedrige-rd-rockwool-at.pdf>. Zugriff am: 22. November 2022.
- [108] Pfeiffer, *Sandwichplattenanker SPA: Als Traganker zur Verbindung der Trag- und Vorsatzschale von Dreischicht-Betonelementen*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.pfeifer.info/out/assets/PFEIFER_SPA-FLYER_PPDE.PDF (Zugriff am: 23. November 2022).
- [109] Gerflor, *Second Life: Gerflor Recycling Programm*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.gerflor.de/second-life.html> (Zugriff am: 16. November 2022).

- [110] Gerflor - *DLW Linoleum Collections Sustainable by Nature*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.gerflor.de/sustainable-by-nature.html> (Zugriff am: 26. November 2022).
- [111] Paul Bauder GmbH & Co. KG, *BauderTHERM DS 2*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bauder.de/de/flachdach/flachdach-produkte/bitumen-dachbahnen/dampfsperren/baudertherm-ds-2.html> (Zugriff am: 11. Dezember 2022).
- [112] WECOBIS - Ökologisches Baustoffinformationssystem, *Polyurethan-Hartschaum (PUR/PIR)*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.wecobis.de/bauproduktgruppen/daemmstoffe/aus-synthetischen-rohstoffen/polyurethan-hartschaum.html> (Zugriff am: 20. November 2022).
- [113] K. Sedlbauer, *Flachdach Atlas: Werkstoffe, Konstruktionen, Nutzungen*. Basel: Walter de Gruyter GmbH, 2010. [Online]. Verfügbar unter: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=3045470>
- [114] OEKOBAU.DAT, *Prozess-Datensatz: Vegetationssubstrat (de)*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.oekoaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=5cc8769c-da1b-4967-bb4d-c8fe7b4c359d&version=20.19.120&lang=de> (Zugriff am: 11. November 2022).

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Biologischer und technischer Kreislauf nach Cradle to Cradle	16
Abb. 2 Ressourcennutzung von Gebäuden.....	18
Abb. 3 Recycling Definitionen nach KrWG §3 und VDI 2243	19
Abb. 4 Verwertung in geschlossenen und offenen Kreisläufen.....	20
Abb. 5 Phasen mit Einfluss auf hochwertige EoL-Szenarien.....	22
Abb. 6 Beispielhafte Steckverbindungen aus dem Holzbau	23
Abb. 7 Selektiver Abbruch (links) selektiver Rückbau (rechts)	26
Abb. 8 Wandaufbau Vollholzwand von Holzius	33
Abb. 9 Bau- und Abbruchabfälle 2018 in Fraktionen	34
Abb. 10 Verbleib von Bau- und Abbruchabfällen 2018	35
Abb. 11 Verwertungsquoten nach Abfallfraktionen.....	36
Abb. 12 Ebenen des Abfallrechts mit Relevanz für Rückbau und Recycling	40
Abb. 13 Ökobilanzmodule A - D nach DIN EN 15978	50
Abb. 14 Berechnungsmodell des BCI nach J.Verberne.....	55
Abb. 15 Building Layers nach Brand mit üblichen Lebensdauern.....	58
Abb. 16 Darstellung des Ergebnisses der Indikatoren bei Madaster	67
Abb. 17 Systematik der Berechnung des BCI von Alba Concept	72
Abb. 18 Urban Mining Index Systematik	78
Abb. 19 Kreislaufpotenziale im Urban Mining Index	79
Abb. 20 Verkaufserlöse von Abbruchmaterialien deutschlandweiter Durchschnitt.....	85
Abb. 21 Entsorgungskosten von Abbruchmaterialien dt. Durchschnitt	85
Abb. 22 Schritte zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials auf Gebäudeebene	90
Abb. 23 Building.Lab Ansichten	96
Abb. 24 Materialzusammensetzung Building.Lab nach dem Baustoff	97
Abb. 25 Materialzusammensetzung des Building.Labs nach Materialherkunft	97
Abb. 26 Materialzusammensetzung des Untersuchungsrahmens nach Baustoff	100
Abb. 27 Materialzusammensetzung der Untersuchungsrahmens nach Herkunft	100
Abb. 28 Bewertung des Kreislaufpotenzials der Bodenplatte	104
Abb. 29 Bewertung des Kreislaufpotenzials der Außenwand 1	105
Abb. 30 Bewertung des Kreislaufpotenzial der Außenwand 3.....	108
Abb. 31 Bewertung des Kreislaufpotenzials der Innenwand.....	109
Abb. 32 Bewertung des Kreislaufpotenzials der Decke	111
Abb. 33 Bewertung des Kreislaufpotenzials des Flachdachs	113
Abb. 34 Bewertung der Kreislaufpotenziale des Buildings.Lab.....	116

Tabellenverzeichnis

Tab. 1 Überblick über Abbruchmethoden nach Separierung.....	26
Tab. 2 Einflussparameter für die Bewertung der Kreislauffähigkeit von Gebäuden	47
Tab. 3 Übersicht der Methoden zur Bewertung der Kreislauffähigkeit.....	48
Tab. 4 Ausschnitt Umweltproduktdeklaration eines Teppichbodens Input.....	51
Tab. 5 Ausschnitt Umweltproduktdeklaration eines Teppichbodens Output	51
Tab. 6 Erfolgsfaktoren für die Messung von Kreislauffähigkeit.....	54
Tab. 7 Sieben der insgesamt 17 DfD Faktoren nach Durmisevic	59
Tab. 8 Relevanz der Layer von Brand.....	61
Tab. 9 Für die Berechnung des CI erforderliche Zirkularitätsdaten	68
Tab. 10 Auszug Datensätze Madaster: Vgl. Spanplatte	70
Tab. 11 Trennbarkeitsfaktoren im BCI _{AC}	73
Tab. 12 Übersicht der Parameter zur Berechnung des UMI.....	79
Tab. 13 Voraussetzung für das Kreislaufpotenzial Post-Use.....	81
Tab. 14 EoL-Szenarien verschiedener Werkstoffe nach Rückbaumethode.....	83
Tab. 15 Durchschnittliche Erlöse bzw. Kosten mit Skalen und dem Faktor Wert.....	85
Tab. 16 Faktor Arbeit mit der Zuteilung zu den Quintilen	86
Tab. 17 Vergleich der Bewertungsmethoden hinsichtlich der Abbildung der EP	92
Tab. 18 Betrachtete Bauteile in der Bewertung des Building Labs	99

Anhang 1

MCI der Ellen McArthur Foundation [89]:

$$MCI^*_P = 1 - LFI \cdot F(X).$$

$$LFI = \frac{V + W}{2M + \frac{W_F - W_C}{2}}$$

$$W = W_0 + \frac{W_F + W_C}{2}.$$

$$W_F = M \frac{(1 - E_F)F_R}{E_F},$$

$$W_C = M(1 - E_C)C_R.$$

$$X = \left(\frac{L}{L_{av}}\right) \cdot \left(\frac{U}{U_{av}}\right).$$

$$F(X) = \frac{0.9}{X}$$

Anhang 2

relevante Bauteile/Baumaterialien	betrachteter Stoff	Anforderung
Bodenbeläge, textil	besonders Besorgnis erregende Stoffe (substances of very high concern – SVHC*)	GUT-Gütesiegel o. Umweltzeichen DE UZ 128 (Blauer Engel für textile Bodenbeläge)
Bodenbeläge, elastisch	SVHC	Gehalt an Chlorparaffinen und reproduktionstoxischen Phthalaten < 0,1%
Holzbauteile	Holzschutzmittel und Biozide	keine chemischen Holzschutzmittel (Produktart 8 nach 528/2012/EG) keine Biozide (Produktart 7 nach 528/2012/EG: Schutzmittel für Baumaterialien)
Beschichtungsstoffe für Metallbauteile	Schwermetalle Halogene	keine Blei-, Cadmium- und Chrom-VI-Verbindungen keine halogenierten Brandschutzbeschichtungen
Aluminium- und Edelstahlbauteile der Gebäudehülle	Passivierungsmittel	Chrom-VI-freie Passivierungsmittel
Erzeugnisse aus Kunststoffen	SVHC	SVHC < 0,1%
Kunststoffe zur Belegung von Oberflächen und an der Gebäudehülle	Blei- und zinnorganische Verbindungen	Gehalt an Blei < 0,1% und Zinn < 0,1%
Flammhemmend ausgerüstete Bauprodukte	Chlorparaffine (CP), Polybromierte Biphenyle (PBB), Diphenylether (PBDE) und SVHC	Gehalt an CPs < 0,1 %, PBB < 0,1 %, PBDE < 0,1 % und SVHC ≤ 0,1 %
Biozid- und flammhemmend ausgerüstete Bauprodukte	Borverbindungen	Gehalt an Borverbindungen < 0,1%

* gemäß REACH (= Europäische Chemikalienverordnung 1907/2006/EG)

Kriterien für die Schadstofffreiheit von Bauprodukten DGNB [3, S. 91]

Anhang 3

Bauteilgruppen nach Kostengruppen DIN 276	Bauteil-Nr.	Bauteil/Bauteilschicht	Datenquelle	Personenaufwand Rückbau	
				Arbeits- zeit	Bruttoarbeit Personen
A Primär- und Sekundärkonstruktion, flächig				[Min./m ²]	[MJ/m ²]
324	Unterböden und Bodenplatten	324.01_BO_Stb.-Bodenplatte, 20cm (auf Streifenfundamenten)	A	1,44	0,0080
		324.02_BO_Stb.-Bodenplatte, lastabtragend 50cm	A	3,60	0,0201
331	Außenwände, tragend	331.01_AW_Stahlbetonwand, 20cm	A	1,44	0,0080
		331.02_AW_Stahlbetonwand, erdberührt, 20cm, mit Bitumenabdichtung	A	8,04	0,0449
		331.03_AW_WU-Stahlbetonwand, 25cm	A	1,80	0,0101
		331.04_AW_Ziegel-Mauerwerk, tragend, 24cm	A	1,20	0,0067
		331.05_AW_Porenbeton-Mauerwerk, tragend, 24cm	A	1,15	0,0064
		331.06_AW_Holz-Massivbauweise, tragend, 20cm	A	1,44	0,0080
		331.07_AW_Holzständerwerk, 18cm, inkl. aussteifender OSB-Platte, Demontage zur Wiederverwendung	V	7,31	0,0408
341	Innenwände, tragend	341.01_IW_Kalksandsteinmauerwerk, tragend, 24cm	A	1,19	0,0067
		341.02_IW_Holz-Massivbauweise, tragend, 16cm	A	1,15	0,0064
342	Innenwände, nichttragend	342.01_IW_Ziegelmauerwerk, nicht tragend, 11,5cm	A	0,57	0,0032
		342.02_IW_Holz massiv, 12cm	A	0,86	0,0048
351	Deckenkonstruktionen	351.01_DE_Stahlbetondecke, 20cm	A	1,44	0,0080
		351.02_DE_Stahlbetondecke, 28cm	A	2,02	0,0113
		351.03_DE_Holzdecke, massiv, 24cm	A	1,73	0,0096
361	Dachkonstruktionen	361.01_DA_Flachdach, Stahlbeton, 16cm	A	1,15	0,0064
		361.02_DA_Flachdach, Holz massiv, 22cm	A	1,58	0,0088
		361.03_DA_Steildach (Kehlbalken/Sparren/Lattung)	B	0,75	0,0042
B Primär- und Sekundärkonstruktion, linear				[Min./m]	[MJ/m]
322	Flachgründungen	322.01_Streifenfundament, Stahlbeton, 60x80cm	A	2,30	0,0129
333	Außenstützen	333.01_Außenstütze, Stahlbeton, 25x25cm	A	0,45	0,0025
		333.02_Außenstütze, Holz, 25x25cm	A	0,23	0,0013
343	Innenstützen	343.01_Innenstütze, Stahlbeton, 40x40cm	A	1,15	0,0064
		343.02_Innenstütze, Holz, 20x20cm	A	0,14	0,0008
		343.03_Innenstütze, Stahlhohlprofil, 150 mm Ø	A	0,40	0,0023
351	Deckenkonstruktionen	351.04_Deckenträger, Stahlprofil HEB 200	A	1,46	0,0082
C Nichttragende Bauteile, Fassade				[Min./m ²]	[MJ/m ²]
334	Außentüren und -fenster	334.01_AF_Isolierverglasung, geklemmt	V	1,40	0,0078
		334.02_AF_Fensterprofile Aluminium, verschraubt	V	5,60	0,0313
335	Außenwandbekleidungen außen	335.01_AB_Profilholzschalung 20mm, verschraubt, Abbruch zur stofflichen Verwertung	A	1,73	0,0096
		335.02_AB_Rhombus-Holzleisten, verschraubt, manuelle Demontage zur Wiederverwendung	V	7,45	0,0416
		335.03_AB_Holz-UK, verschraubt	V	1,72	0,0096
		335.04_AB_Winddichtungsbahn, getackert	V	0,23	0,0013
		335.05_AB_VHF-Fassade, Faserzement mit Hinterschnittankern, Demontage z. Weiterverwendung	V	0,20	0,0011
		335.06_AB_VHF-Fassade, Faserzement, genietet	V	4,90	0,0274
		335.07_AB_AlU-Unterkonstruktion für VHF-Fassade	V	5,86	0,0327
		335.08_AB_VHF-Fassade, Naturstein, inkl. UK, manuelle Demontage zur Wiederverwendung	V	25,40	0,1418
		335.09_AB_VHF-Fassade, Alublechkassette, geklemmt	V	9,34	0,0521
		335.10_AB_Stahlbetonfertigteile, 10cm	A	0,72	0,0040
		335.11_AB_Klinkerfassade, vermörtelt, manuelle Demontage zur Wiederverwendung	V	69,90	0,3903
		335.12_AB_Ziegelfassade im Trockenstapelsystem, manuelle Demontage zur Wiederverwendung	V	8,20	0,0458
		335.13_AB_WDVS-Putz: mineralischer Putz mit Glasfasergewebe auf Mineraldämmplatte	V	0,55	0,0031
		335.14_AB_WDVS-Putz: Mittelwert	A		
335.15_AB_WDVS-Dämmung: Mittelwert	A				
335.16_AB_WDVS-Putz: Silikonharzputz mit Glasfaserarmierung auf EPS	A	0,90	0,0050		
335.17_AB_WDVS-Putz: Silikonharzputz mit Glasfaserarmierung auf Holzfaserdämmung	A	1,02	0,0057		
335.18_AB_WDVS-Putz: Silikatputz mit Glasfaserarmierung auf EPS oder Mineralwolle	A	0,78	0,0044		
335.19_AB_WDVS-Putz: Silikatputz mit Glasfaserarmierung auf Mineralwolle	A	0,90	0,0050		
335.20_AB_WDVS-Putz: Mineralischer Putz mit Glasfaserarmierung auf EPS oder Holzfaserdämm.	A	1,02	0,0057		
335.21_AB_WDVS-Putz: Mineralischer Putz mit Glasfaserarmierung auf Mineralwolle	A	0,78	0,0044		
335.22_AB_WDVS-Dämmung: Mineraldämmplatte auf Porenbeton (monolithisch)	V	0,06	0,0003		
335.23_AB_WDVS-Dämmung: EPS, geklebt auf Beton	A	8,22	0,0459		
335.24_AB_WDVS-Dämmung: EPS, geklebt auf Kalksandsteinmauerwerk	A	19,68	0,1099		

Maschine	Maschinenaufwand Rückbau						Arbeit (W)				Einordnung Demontageaufwand	ggf. Korrektur			
	Leistung brutto	Kraftstoffbedarf	Einsatzzeit	Kraftstoff		Arbeit Maschinen	gesamt	1. Quintil	2. Quintil	3. Quintil			4. Quintil		
				Bedarf	Heizwert										
	[W]	[l/h]	[min/m²]	[l/m²]	[MJ/l]	[MJ/m²]	[MJ/m²]								
Hydraulikbagger		29,0	0,72	0,348	35,6	12,39	12,40						hoch	sehr hoch	
Hydraulikbagger		29,0	1,80	0,870	35,6	30,97	30,99						sehr hoch		
Hydraulikbagger		27,0	0,72	0,324	35,6	11,53	11,54						mittel		
Hydraulikb. + Elektrohammer		Bauteile 331.01 + 363.11					11,60	11,64						hoch	
Hydraulikbagger		27,0	0,90	0,405	35,6	14,42	14,43						sehr hoch		
Hydraulikbagger		22,0	0,60	0,220	35,6	7,83	7,84						gering		
Hydraulikbagger		22,0	0,58	0,211	35,6	7,52	7,53						gering		
Hydraulikbagger		25,0	0,72	0,300	35,6	10,68	10,69						mittel		
Akkuschrauber + Bohrmaschine	550 780		1,20 1,40	-	-	0,11	0,15						sehr gering		
Hydraulikbagger		22,0	0,65	0,238	35,6	8,46	8,47	7,1	8,7	11,5	12,6		gering		
Hydraulikbagger		25,0	0,58	0,240	35,6	8,54	8,55						gering		
Hydraulikbagger		22,0	0,29	0,105	35,6	3,75	3,76						sehr gering		
Hydraulikbagger		25,0	0,43	0,180	35,6	6,41	6,41						sehr gering		
Hydraulikbagger		27,0	0,72	0,324	35,6	11,53	11,54						mittel		
Hydraulikbagger		27,0	1,01	0,454	35,6	16,15	16,16						sehr hoch		
Hydraulikbagger		25,0	0,86	0,360	35,6	12,82	12,83						sehr hoch		
Hydraulikbagger		27,0	0,58	0,259	35,6	9,23	9,23						mittel		
Hydraulikbagger		25,0	0,79	0,330	35,6	11,75	11,76						hoch		
Motorsäge				0,002	31,7	0,07	0,07						sehr gering		
			[min/m]	[l/m]		[MJ/m]	[MJ/m]								
Hydraulikbagger		29,0	1,15	0,557	35,6	19,82	19,83						sehr hoch		
Hydraulikbagger		27,0	0,23	0,101	35,6	3,60	3,61						mittel		
Hydraulikbagger		21,0	0,11	0,039	35,6	1,40	1,40	1,8	3,5	7,0	12,0		sehr gering		
Hydraulikbagger		27,0	0,58	0,259	35,6	9,23	9,23						hoch		
Hydraulikbagger		21,0	0,07	0,025	35,6	0,90	0,90						sehr gering		
Hydraulikbagger		29,0	0,20	0,098	35,6	3,48	3,48						gering		
Hydraulikbagger		29,0	0,73	0,353		12,70	12,71						sehr hoch		
			[min/m²]	[l/m²]		[MJ/m²]	[MJ/m²]								
Akkuschrauber	550		2,22	-	-	0,07	0,105						gering		
Hydraulikbagger		21,0	0,0012	0,000	35,6	0,01	0,025						hoch		
Akkuschrauber	550		3,37	-	-	0,11	0,153						gering		
Akkuschrauber	550		0,77	-	-	0,03	0,035						hoch		
-				-	-	-	0,001						mittel		
-				-	-	-	0,001						sehr gering		
-				-	-	-	0,001						sehr gering		
Bohrmasch. + Akkuschr.				-	-	-	0,027						gering		
Akkuschrauber	550		4,6	-	-	0,15	0,185						sehr hoch		
Trennschleifer	1100		4,4	-	-	0,29	0,432						sehr hoch		
-				-	-	-	0,052						mittel		
Hydraulikbagger		26,0	0,36	0,156	35,6	5,55	5,558						sehr hoch		
Bohrhammer	850		3,2	-	-	0,16	0,553	0,01	0,03	0,06	0,18		sehr hoch		
Akkuschrauber	550		0,5	-	-	0,02	0,062						hoch		
Trennschleifer	1200		0,5	-	-	0,04	0,039						mittel		
-							0,005						sehr gering		
-							0,291						sehr hoch		
-							0,005						sehr gering		
-							0,006						gering		
-							0,004						sehr gering		
Gabelstapler (Ersatz f. Abbruchbagger)	2,5	0,038	0,002	35,6	0,06	0,06	0,057						mittel		
-							0,046						mittel		
Elektrohammer, Energieaufwand nach Graubner et al.						0,21	0,315						sehr hoch		

Bauteilgruppen nach Kostengruppen DIN 276	Bauteil-Nr.	Bauteil/Bauteilschicht	Datenquelle	Personenaufwand Rückbau	
				Arbeits- zeit	Bruttoarbeit Personen
C Nichttragende Bauteile, Fassade (Fortsetzung)				[Min./m ²]	[MJ/m ²]
336 Außenwand- bekleidungen außen	335.25_AB_WDVS-Dämmung: EPS, geklebt auf Ziegelmauerwerk	A	17,88	0,0998	
	335.26_AB_WDVS-Dämmung: EPS, geklebt auf Porenbeton	A	20,58	0,1149	
	335.27_AB_WDVS-Dämmung: EPS, geklebt + gedübelt auf Beton	A	14,58	0,0814	
	335.28_AB_WDVS-Dämmung: EPS, geklebt + gedübelt auf Kalksandsteinmauerwerk	A	15,06	0,0841	
	335.29_AB_WDVS-Dämmung: EPS, geklebt + gedübelt auf Ziegelmauerwerk (porosiert)	A	14,04	0,0784	
	335.30_AB_WDVS-Dämmung: Mineralwolle, geklebt + gedübelt auf Beton	A	8,28	0,0462	
	335.31_AB_WDVS-Dämmung: Mineralwolle, geklebt + gedübelt auf Kalksandsteinmauerwerk	A	17,64	0,0985	
	335.32_AB_WDVS-Dämmung: Mineralwolle, geklebt + gedübelt auf Ziegelmauerwerk (porosiert)	A	21,96	0,1226	
	335.33_AB_WDVS-Dämmung: Mineralwolle, geklebt + gedübelt auf Porenbeton	A	22,98	0,1283	
	335.34_AB_WDVS-Dämmung: Holzfaser, geklebt + gedübelt auf Beton	A	15,30	0,0854	
	335.35_AB_WDVS-Dämmung: Holzfaser, geklebt + gedübelt auf Kalksandsteinmauerwerk	A	19,62	0,1095	
	335.36_AB_WDVS-Dämmung: Holzfaser, geklebt + gedübelt auf Ziegelmauerwerk (porosiert)	A	21,30	0,1189	
	335.37_AB_WDVS-Dämmung: Holzfaser, geklebt + gedübelt auf Porenbeton	A	12,18	0,0680	
	335.38_AB_Dämmung Mineralwolle, mit Dämmstoffhalter auf Kalksandsteinmauerwerk befestigt	V	0,65	0,0036	
	335.39_AB_Dämmung flexible Hanffaser, geklemmt zwischen Holzständerwerk	V	0,40	0,0022	
	336 Außenwand- bekleidungen innen	336.01_AB_OS-Platte, verschraubt, Fugen mit Luftdichtheitsband verklebt (mit Restanhaftungen)	V	2,64	0,0147
		336.02_AB_MDF-Platte, verschraubt	V	1,10	0,0061
337 Außenwände, elementiert	337.01_AE_Pfosten-Riegel-Fassade, Aluminium mit Isolierverglasung, Dichtungen EPDM, mit Anpressprofilen geklemmt	V	7,50	0,0419	
D Nichttragende Innenbauteile				[Min./m ²]	[MJ/m ²]
344 Innentüren und -fenster	344.01_IT_Holzinnentür, einflügelig, mit Holzarge, mechanisch befestigt	B	1,96	0,0109	
	345.01_IB_Kunstharz-Oberputz innen, ca. 2mm, auf haftgrundiertem Unterputz	B	0,30	0,0017	
345 Innenwand- bekleidungen	345.02_IB_Fliesen, verklebt u. verfugt mit kunststoffmodifiz. mineral. Mörtel auf Gipskartonwand	A	12,00	0,0670	
	345.03_IB_Fliesen, verklebt u. verfugt mit kunststoffmodifiz. mineral. Mörtel auf Ziegelmauerwerk mit Zementputz	A	12,00	0,0670	
	345.04_IB_Fliesen, verklebt u. verfugt mit kunststoffmodifiz. mineral. Mörtel auf Ziegelmauerwerk mit Gipsputz	A	7,80	0,0436	
	345.05_IB_Fliesen, verklebt u. verfugt mit kunststoffmodifiz. mineral. Mörtel auf Kalksandsteinmauerwerk mit Zementputz	A	7,20	0,0402	
	345.06_IB_Fliesen, verklebt u. verfugt mit kunststoffmodifiz. mineral. Mörtel auf Kalksandsteinmauerwerk mit Gipsputz	A	9,60	0,0536	
	345.07_IB_Fliesen, verklebt u. verfugt mit kunststoffmodifiz. mineral. Mörtel auf Stahlbetonwand mit Zementputz	A	8,40	0,0469	
	345.08_IB_Fliesen, verklebt u. verfugt mit kunststoffmodifiz. mineral. Mörtel auf Stahlbetonwand mit Gipsputz	A	7,80	0,0436	
	345.09_IB_Rauhfasertapete, verklebt mit Tapetenkleber (auf allen Untergründen)	A	2,40	0,0134	
	345.10_IB_Holzverschalung inkl. Holzlattung auf Mauerwerk mit Zement- oder Gipsputz	A	2,40	0,0134	
	345.11_IB_Holzverschalung inkl. Holzlattung auf Stahlbetonwand mit Zementputz	A	3,60	0,0201	
352 Deckenbeläge	352.01_DE_Zementestrich, 6cm, inkl. Trittschalldämmung	B	5,04	0,0281	
	352.02_DE_Fliesen, verklebt und verfugt mit kunststoffmodifiz. mineral. Mörtel auf Zementestrich	A	22,50	0,1256	
	352.03_DE_Fliesen, verklebt und verfugt mit kunststoffmodifiz. mineral. Mörtel auf Anhydritestrich	A	30,00	0,1675	
	352.04_DE_Fliesen, verklebt und verfugt mit kunststoffmodifiz. mineral. Mörtel auf Gussasphalt	A	60,00	0,3350	
	352.05_DE_Fliesen, verklebt und verfugt mit kunststoffmodifiz. mineral. Mörtel auf Trockenestrich	A	15,00	0,0838	
	352.06_DE_Natursteinplatten, verklebt u. verfugt mit kunststoffmodifiz. Mörtel auf Zementestrich	A	12,00	0,0670	
	352.07_DE_Natursteinplatten, verklebt u. verfugt mit kunststoffmodifiz. Mörtel auf Anhydritestrich	A	10,50	0,0586	
	352.08_DE_Natursteinplatten, verklebt u. verfugt mit kunststoffmodifiz. Mörtel auf Gussasphalt	A	7,50	0,0419	
	352.10_DE_Natursteinplatten, verklebt u. verfugt mit kunststoffmodifiz. Mörtel auf Trockenestrich	A	15,00	0,0838	
	352.11_DE_Laminat, verklebt auf Zementestrich	A	11,25	0,0628	
	352.12_DE_Laminat, verklebt auf Anhydrit- oder Gussasphaltestrich	A	15,00	0,0838	
352.13_DE_Laminat, verklebt auf Trockenestrich	A	15,00	0,0838		
352.18_DE_Linoleum, mit reversiblen Kleber verklebt (nicht stuhllängeneeignet) auf Zementestr.	B	0,57	0,0032		
352.19_DE_Linoleum, verklebt (stuhllängeneeignet) auf Zementestrich	B	6,00	0,0335		

Maschine	Maschinenaufwand Rückbau				Arbeit (W)			1. Quintil	2. Quintil	3. Quintil	4. Quintil	Einordnung Demontageaufwand	ggf. Korrektur
	Leistung brutto	Kraftstoff- bedarf	Einsatzzeit	Kraftstoff Bedarf	Arbeit Maschinen	Heizwert	gesamt						
	[W]	[l/h]	[min/m²]	[l/m²]	[MJ/l]	[MJ/m²]	[MJ/m²]						
Elektrohammer, Energieaufwand nach Graubner et al.						0,47	0,568					sehr hoch	
Elektrohammer, Energieaufwand nach Graubner et al.						0,24	0,360					sehr hoch	
Elektrofuchs, Elektrohammer, Energieaufwand nach Graubner et al.						0,05	0,135					hoch	
Elektrofuchs + Elektrohammer, Energieaufwand nach Graubner et al.						0,21	0,293					sehr hoch	
Elektrofuchs + Elektrohammer, Energieaufwand nach Graubner et al.						0,26	0,338					sehr hoch	
Elektrofuchs, Energieaufwand nach Graubner et al.						0,06	0,104					hoch	
Elektrofuchs + Elektrohammer, Energieaufwand nach Graubner et al.						0,24	0,343					sehr hoch	
Elektrofuchs + Elektrohammer, Energieaufwand nach Graubner et al.						0,33	0,457					sehr hoch	
Elektrofuchs + Elektrohammer, Energieaufwand nach Graubner et al.						0,25	0,377					sehr hoch	
Akkuschrauber + Elektrofuchs, Energieaufwand nach Graubner et al.						0,22	0,301					sehr hoch	
Akkuschrauber, Elektrofuchs, Elektrohammer, Energieaufw. n. Graubner et al.						0,29	0,401					sehr hoch	
Akkuschrauber, Elektrofuchs, Elektrohammer, Energieaufw. n. Graubner et al.						0,33	0,454					sehr hoch	
Akkuschrauber, Elektrofuchs, Elektrohammer, Energieaufw. n. Graubner et al.						0,10	0,165					hoch	
-						-	0,004					sehr gering	
-						-	0,002					sehr gering	
Akkuschrauber	550		1,19	-		0,04	0,054					mittel	
Akkuschrauber	550		0,5	-		0,02	0,023					gering	
Akkuschrauber	550		2,78	-		0,09	0,13					hoch	
			[min/m²]	[l/m²]		[MJ/m²]	[MJ/m²]						
-						-	0,011					sehr gering	
-						-	0,002					sehr gering	
Elektrohammer						0,29	0,355					mittel	
Elektrohammer						0,58	0,643					mittel	
Elektrohammer						0,19	0,238					gering	
Elektrohammer						0,11	0,148					gering	
Elektrohammer + Elektroschaber						0,76	0,810					mittel	
Elektrohammer Elektrohammer + Elektroschaber						0,18	0,227					gering	
-						-	0,013					sehr gering	
-						-	0,013					sehr gering	
-						-	0,020					sehr gering	
Trennschleifer				0,017	31,7	0,53	0,561	0,02	0,24	0,83	1,14	mittel	
Elektrohammer						1,17	1,296					sehr hoch	
Elektrohammer						1,71	1,878					sehr hoch	
Elektrohammer						3,60	3,935					sehr hoch	
Elektrohammer						1,31	1,389					sehr hoch	
Elektrohammer						0,94	1,003					hoch	
Elektrohammer						0,81	0,869					hoch	
Elektrohammer						0,36	0,402					mittel	
Elektrohammer						1,31	1,389					sehr hoch	
Elektrostripper						0,90	0,963					hoch	
Elektrostripper						1,08	1,164					sehr hoch	
Elektrostripper						0,95	1,029					hoch	
-						-	0,025					gering	
Elektrostripper						0,90	0,963					hoch	
Elektrostripper						1,08	1,139					hoch	
-						-	0,025					gering	
-						-	0,003					sehr gering	
-						-	0,034					gering	

Bauteilgruppen nach Kostengruppen DIN 276	Bauteil-Nr.	Bauteil/Bauteilschicht	Datenquelle	Personenaufwand Rückbau	
				Arbeits- zeit	Bruttoarbeit Personen
E Nichttragende Bauteile, Dach				[Min./m ²]	[MJ/m ²]
363	Dachbeläge	363.01_DA_Dachdeckung, Tonpfannen, Rückbau unter Zerstörung	B	1,13	0,0063
		363.02_DA_Dachdeckung, Schiefer genagelt, Rückbau ohne Zerstörung	V	6,75	0,0377
		363.03_DA_Stehfalzdeckung Zink, inkl. Haften	V	4,15	0,0232
		363.04_DA_Unterdeckbahn, getackert	V	0,30	0,0017
		363.05_DA_Kiesauflage inkl. Trenn/Schutzvlies	V	3,10	0,0173
		363.06_DA_Abdichtung, PIB-Kunststoffbahn, lose verlegt auf Mineralwolle (mit Auflast befestigt)	A	1,20	0,0067
		363.07_DA_Dämmung, Mineralwolle lose verlegt auf Bitumendampfsperre (mit Auflast befestigt)	A	0,60	0,0034
		363.08_DA_Dampfsperre, Bitumenbahn punktweise verschweißt auf Beton	A	0,03	0,0002
		363.09_DA_Abdichtung, Bitumenbahnen 2-lagig, obere Lage aufgeschweißt, untere Lage kaltselbstklebend auf EPS-Dämmung verklebt	A	9,00	0,0503
		363.10_DA_Dämmung, EPS verklebt auf Bitumendampfsperre	A	3,60	0,0201
		363.11_DA_Dampfsperre, Bitumenbahn, vollflächig verschweißt auf Beton	A	6,60	0,0369
		363.12_DA_Abdichtung, Bitumenbahnen 2-lagig, obere Lage aufgeschweißt, untere Lage kaltselbstklebend auf Mineralwolle verklebt	A	3,60	0,0201
		363.13_DA_Abdichtung, Bitumenbahnen 2-lagig, vollflächig verschweißt auf Mineralwolle	A	4,20	0,0235
		363.14_DA_Dämmung, Mineralwolle verklebt mit PU-Kleber auf Bitumendampfsperre	A	1,50	0,0084
		363.15_DA_Dampfsperre, Bitumenbahn, kaltselbstklebend auf Beton	A	3,60	0,0201
		363.16_DA_Dampfsperre, Bitumenbahn, teilflächig verschweißt auf Beton	A	1,20	0,0067
		363.17_DA_Abdichtung, Bitumenbahnen 2-lagig, in Heißbitumen verklebt auf Schaumglasplatten	A	1,20	0,0067
		363.18_DA_Dämmung, Schaumglasplatten in Heißbitumen verlegt	A	10,80	0,0603
		363.19_DA_Dampfsperre, Heißbitumen auf Beton	A	3,00	0,0168
		363.20_DA_Dämmung, XPS lose verlegt auf Bitumendampfsperre (mit Auflast befestigt)	A	0,60	0,0034
		363.21_DA_Abdichtung, Bitumenbahnen 2-lagig, vollflächig verschweißt auf Beton (Umkehrdach)	A	1,20	0,0067
		363.22_DA_Abdichtung, Bitumenbahnen 2-lagig, vollflächig verschweißt auf Schaumglasplatten	A	0,60	0,0034
		363.23_DA_Dämmung, Schaumglasplatten auf Trapezblech verklebt	A	1,20	0,0067
		363.24_DA_Abdichtung, PIB-Kunststoffbahn mit Vliesrücken, verklebt mit PU-Kleber auf EPS oder Mineralwolle	A	0,60	0,0034
		363.25_DA_Abdichtung, PIB-Kunststoffbahn mit Klettstreifen und Schrauben auf EPS-Dämmung mechanisch befestigt	A	5,40	0,0302
		363.26_DA_Dämmung, EPS lose verlegt auf PE-Dampfsperre	A	0,60	0,0034
		363.27_DA_Dampfsperre, PE-Folie lose verlegt auf Trapezblech	A	0,60	0,0034
		363.28_DA_Abdichtung, Bitumenbahnen 2-lagig, lose verlegt (Nähte geschweißt, mit Auflast befestigt, Umkehrdach)	V	1,25	0,0070
		363.29_DA_Dämmung, Schaumglas auf Umkehrdach, 2 Lagen à 14cm lose verlegt	V	0,54	0,0030
		363.30_DA_Abdichtung, Dachbahn auf pflanzlicher Basis, 2-lagig, obere Lage verschweißt, untere Lage mechanisch befestigt auf Holzfaserdämmung	V	3,60	0,0201
		363.31_DA_Dämmung, Holzweichfaser, 2 Lagen à 16cm im Mittel, lose verlegt	V	0,60	0,0034
		363.32_DA_Dampfsperre, Bitumenbahn, lose verlegt auf Holzschalung (Nähte geschweißt)	V	1,14	0,0064

Maschine	Maschinenaufwand Rückbau				Arbeit (W)		1. Quintil	2. Quintil	3. Quintil	4. Quintil	Einordnung Demontageaufwand	ggf. Korrektur
	Leistung, brutto	Kraftstoffbedarf	Einsatzzeit	Kraftstoffbedarf	Arbeit Maschinen	gesamt						
	[W]	[l/h]	[min/m ²]	[l/m ²]	[MJ/m ²]	[MJ/m ²]						
-				-	-	0,0063					gering	
-				-	-	0,0377					sehr hoch	
-				-	-	0,0232					hoch	
-				-	-	0,0017					sehr gering	
-				-	-	0,0173					hoch	
-				-	-	0,0067					gering	
-				-	-	0,0034					sehr gering	
-				-	-	0,0002					sehr gering	
-				-	-	0,0503					sehr hoch	hoch ¹
Elektrohammer	Energieaufwand nach Graubner et al.				0,06	0,0849					sehr hoch	
Elektrohammer	Energieaufwand nach Graubner et al.				0,06	0,0981					sehr hoch	hoch ¹
-				-	-	0,0201					hoch	
-				-	-	0,0235					sehr hoch	
-				-	-	0,0084					mittel	
-				-	-	0,0201					hoch	
-				-	-	0,0067	0,0034	0,0067	0,0134	0,0234	gering	mittel ²
-				-	-	0,0603					sehr hoch	
-				-	-	0,0168					hoch	
-				-	-	0,0034					sehr gering	
-				-	-	0,0067					gering	hoch ³
-				-	-	0,0034					sehr gering	mittel ⁴
-				-	-	0,0067					gering	
-				-	-	0,0034					sehr gering	
Trennschleifer	Energieaufwand nach Graubner et al.				0,02	0,0492					sehr hoch	
-				-	-	0,0034					sehr gering	
-				-	-	0,0034					sehr gering	
-				-	-	0,0070					mittel	
-				-	-	0,0030					sehr gering	
-				-	-	0,0201					hoch	
-				-	-	0,0034					sehr gering	
-				-	-	0,0064					gering	

Bauteilkatalog [3, 148 ff.]

Arbeit [MJ/m ²]	Bewertung	Faktor (f _w)
≤ 1. Quintil	sehr gering	1,0
≤ 2. Quintil	gering	0,9
≤ 3. Quintil	mittel	0,8
≤ 4. Quintil	hoch	0,7
> 4. Quintil	sehr hoch	0,6

Skala zu Einordnung des Faktors Arbeit [3, S. 163]