

Diplomarbeit

# Analyse und Vergleich von Bewertungssystemen zur Beurteilung der Zirkularität im Bauwesen

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

Diploma Thesis

## Analysis and comparison of evaluation systems for the assessment of circularity in the construction industry

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

von

**Stefan Pichler**

Matr.Nr.: 01225908

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

Wien, im Februar 2025





TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

## Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters an Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, im Februar 2025

A solid black rectangular box used to redact the signature of the author.

Pichler Stefan BSc

---

# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen, die mich beim Erstellen der vorliegenden Diplomarbeit unterstützt und mich im Laufe des Studiums begleitet haben, bedanken.

Ein besonderer Dank gilt Univ.Prof.in Dipl.-Ing. Dr.in techn. Iva Kovacic, der Vorständin des Instituts für Hoch- und Industriebau und Leiterin des Forschungsbereichs Integrale Planung und Industriebau, für die Möglichkeit meine Diplomarbeit an diesem Institut zu verfassen. Weiters bedanke ich mich bei Dipl.-Ing. Dominik Breitfuß und Dipl.-Ing. Stefan Schützenhofer für die Betreuung meiner Diplomarbeit. Der Wandel der Bauindustrie in Richtung Nachhaltigkeit ist mir ein besonderes Anliegen und es freut mich, dass ich mit meiner Diplomarbeit einen Beitrag zu diesem Forschungsbereich leisten durfte.

Der größte Dank gilt meiner Familie, die während meiner gesamten Studienzeit immer hinter mir gestanden hat. Ohne ihren Rückhalt und Unterstützung wäre mein Studium nicht möglich gewesen.

Weiters möchte ich mich besonders bei meiner Partnerin Anna bedanken, welche mir während dieser herausfordernden Zeit immer eine seelische Stütze war und mich mit Rat & Tat unterstützt hat.

Schließlich möchte ich mich bei allen Freunden, Studienkollegen und Wegbegleitern bedanken, welche mich durch meine Studienzeit begleitet haben und diese unvergesslich gemacht haben.

## Kurzfassung

Die Europäische Union soll bis 2050 zum ersten klimaneutralen Kontinent der Welt werden. Das ist das erklärte Ziel, welches sich die Europäische Kommission in Form des EU Grünen Deals gesetzt hat (Europäische Kommission, 2019). Das setzt ein Umdenken und Handeln in vielen Bereichen unserer Gesellschaft und Wirtschaft voraus. Der Bausektor spielt hier als einer der größten CO<sub>2</sub> Produzenten eine entscheidende Rolle zu der Erreichung dieses Zieles. Damit bei künftigen Bauprojekten der Klimaschutz und somit die Vorgaben der EU mehr in den Fokus gestellt wird, wurde zusätzlich zu dem EU Grüner Deal durch die EU-Taxonomie eine Verordnung erlassen, die Bauträger durch neue Förderungsvoraussetzungen motivieren soll, verstärkt Investitionen in nachhaltige Bauprojekte zu tätigen. Die Kreislaufwirtschaft soll dabei eine wichtige Rolle zur Erreichung der europäischen Klimaziele durch die Fokussierung der Ressourcenschonung übernehmen. Ein eigener Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft durch die europäische Kommission folgte.

Für die Baubranche bedeutet dies einen Paradigmenwechsel im Umgang mit den zur Verfügung stehenden Ressourcen betrifft. Die Wahl der richtigen Baustoffe, die Art der Verbindung zwischen Bauelementen und die Überlegung der Rückbaufähigkeit sind nur ein Teilbereich an Themen, die durch die Kreislauffähigkeit in den Fokus rücken. Die Akteur:innen in der Baubranche sind durch das Umdenken in der Planung, als auch bei der Herstellung und Nutzung, gefordert zu handeln. Die Sichtbarmachung der Kreislauffähigkeit eines Gebäudes nimmt hier eine wichtige Funktion an. Die in dieser Arbeit zu beantwortenden Forschungsfragen ergeben sich daher wie folgt:

- Wie kann das Kreislaufpotenzial bestehender und künftiger Bauvorhaben ermittelt werden?
- Können die Ergebnisse unterschiedlicher Bewertungssysteme verglichen werden?

Der Fokus dieser Diplomarbeit liegt deswegen auf einer genauen Betrachtung von drei Bewertungssystemen zur Beurteilung der Zirkularität von Gebäuden. Dabei werden die Bewertungsart, Systemgrenzen und Betrachtungsebene, die Berechnungsparameter als auch die Berechnungsmethodik analysiert. Folgende drei Bewertungssysteme werden dabei untersucht:

Urban Mining Index nach Rosen

Madaster Zirkularitätsindikator MZI

DGNB Zirkularitätsindex

Diese drei Zirkularitätsbewertungssysteme werden anhand eines Fallbeispiels, der Bewertung des Rohbaus eines Einfamilienhauses, im zweiten Teil dieser Masterthesis bewertet. Die Ergebnisse dieser Systeme lauten dabei:

Urban Mining Index: 16%

Madaster Zirkularitätsindikator MZI: 38%

DGNB Zirkularitätsindex: 13%

Die Unterschiede in den Bewertungsergebnissen werden anschließend analysiert und Möglichkeiten zur Standardisierung der Ergebnisse geliefert.

## Abstract

The European Union is to become the world's first climate-neutral continent by 2050. This is the declared goal that the European Commission has set itself in the form of the EU Green Deal (Europäische Kommission, 2019). This requires a rethinking and actions in many areas of our society and economy. As one of the largest CO<sub>2</sub> producers, the construction sector plays a decisive role in achieving this goal. To ensure that future construction projects focus more on climate, in addition to the EU Green Deal, the EU Taxonomy has issued a regulation that is intended to motivate property developers to invest more in sustainable construction projects through new funding requirements. The circular economy is to play an important role in achieving European climate goals by focusing on resource conservation. A separate action plan for the circular economy by the European Commission followed.

For the construction industry, this means a paradigm shift in terms of how to deal with the available resources. The choice of the right building materials, the type of connection between building elements and the consideration of the destructibility are only a sub-area of topics that come into focus due to recyclability. The players in the construction industry are called upon to act due to the rethinking of planning as well as production and use. Making the recyclability of a building visible takes on an important function for funding requirements. The research questions to be answered in this thesis therefore read:

- How can the circular potential of existing and future construction projects be determined?
- Can the results of different rating systems be compared?

The focus of this diploma thesis is therefore on a close examination of three evaluation systems for assessing the circularity of buildings. The type of evaluation, system boundaries and level of consideration, the calculation parameters as well as the calculation methodology are analyzed. The following three evaluation systems are examined:

Urban Mining Index nach Rosen

Madaster Zirkularitätsindikator MZI

DGNB Zirkularitätsindex

In the second part of this diploma thesis, these three circularity evaluation systems are evaluated based on a case study, the evaluation of the shell of a single-family house. The results of these systems are:

Urban Mining Index: 16%

Madaster Zirkularitätsindikator MZI: 38%

DGNB Zirkularitätsindex: 13%

The differences in the evaluation results are then analysed and opportunities for standardisation of the results are provided.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	8
1.1	Problemstellung.....	9
1.2	Methodik.....	10
1.3	Ziel.....	11
2	Zirkularität – Kreislaufwirtschaft in der Baubranche.....	12
2.1	Definition Zirkularität.....	12
2.2	Entwicklung auf europäischer Ebene.....	13
2.2.1	EU Grüner Deal.....	13
2.2.2	EU-Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft.....	15
2.2.3	EU-Klimagesetz.....	17
2.2.4	EU-Taxonomie.....	18
2.2.5	EU-Verordnung 2023/2486.....	19
2.3	Umsetzung in Österreich.....	24
2.3.1	KreislaufBAUwirtschaft.....	24
2.3.2	Die österreichische Kreislaufstrategie.....	28
2.3.3	Die österreichische Kreislaufstrategie – 1. Fortschrittsbericht 2024.....	30
3	Zirkularitätsbewertung – Methodische Unterschiede.....	32
3.1	Zirkularität in der Gebäudezertifizierung.....	32
3.1.1	Grundlagen der Gebäudezertifizierung.....	32
3.1.2	Systemgrenzen.....	33
3.1.3	Funktionales Äquivalent.....	34
3.1.4	Der Betrachtungszeitraum.....	34
3.2	Zirkularitätsindizes – Messung des Kreislaufpotenzials von Gebäuden.....	36
3.2.1	Grundlagen der Zirkularitätsbewertung:.....	36
3.2.2	Systemgrenzen bei der Zirkularitätsbewertung.....	37
3.2.3	Indikatoren bei der Zirkularitätsbewertung.....	37
3.2.4	Material-Cycle-Status – Recyclingpotenzial Verwertung.....	39
3.2.5	End-of-Life-Szenarien für Wertstoffe.....	40
4	Urban Mining Index (UMI) nach Rosen.....	42
4.1	Bewertung der Zirkularität.....	43
4.2	Systemgrenzen und Betrachtungsebenen.....	44

4.2.1	Systemgrenzen des Urban Mining Index .....	44
4.2.2	Betrachtungsebenen des Urban Mining Indexes .....	45
4.3	Berechnungsparameter .....	47
4.3.1	Materielle Ebene .....	48
4.3.2	Konstruktive Ebene .....	51
4.3.3	Wirtschaftliche Ebene .....	51
4.4	Berechnungsmethodik .....	53
4.4.1	Berechnungsformeln – Closed-Loop-Potenzial .....	53
4.4.2	Berechnungsformeln – Loop-Potenzial .....	55
4.4.3	Berechnungsformeln – Urban Mining Indicator .....	56
5	Madaster Zirkularitätsindikator (MZI) .....	57
5.1	Bewertung der Zirkularität .....	57
5.2	Systemgrenzen und Betrachtungsebenen .....	59
5.2.1	Systemgrenzen des MZI .....	59
5.2.2	Betrachtungsebenen des MZI .....	60
5.3	Berechnungsparameter – Ellen MacArthur Foundation – MCI .....	61
5.3.1	Berechnungsmethodik MCI auf Produktebene - MCI <sub>P</sub> .....	61
5.3.2	Berechnungsmethodik MCI auf Unternehmensebene – MCI <sub>c</sub> .....	65
5.4	Berechnungsparameter – MZI für Gebäude .....	66
5.4.1	Anpassungen vom MCI auf MZI .....	66
5.4.2	ZI-Scores auf der Produktebene – Anteile nach Stoffströme .....	67
5.5	Berechnungsmethodik des MZI .....	68
5.5.1	MZI – ZI-Scores auf der Produktebene .....	68
5.5.2	MZI – ZI-Score auf Gebäudeebene .....	69
6	DGNB – Zirkularitätsindex (DGNB-ZI) .....	70
6.1	Bewertung der Zirkularität .....	70
6.2	Systemgrenzen und Betrachtungsebenen .....	72
6.2.1	Systemgrenzen des DGNB-ZI .....	72
6.2.2	Betrachtungsebenen des DGNB-ZI .....	74
6.3	Berechnungsparameter .....	75
6.3.1	Materialherkunft – Pre-Use .....	75
6.3.2	Bau- und Abbruchabfälle – Pre-Use .....	76

6.3.3	Schadstoffbelastung – Pre-Use .....	77
6.3.4	Materialverträglichkeit – Post-Use .....	78
6.3.5	Demontagefähigkeit – Post-Use .....	78
6.3.6	Werkstoffliche Trennbarkeit – Post-Use.....	79
6.3.7	Materialverwertung(-spotenzial) – Post-Use .....	80
6.4	Berechnungsmethodik.....	81
6.4.1	Berechnungsformeln – DGNB-Zirkularitätsindex ZI .....	81
6.5	Zirkularität in der DGNB-Gebäudezertifizierung .....	82
6.5.1	DGNB-Gebäuderessourcenpass .....	84
7	Fallstudie: Vergleichende Zirkularitätsbewertung eines Einfamilienhauses ....	86
7.1	Fallbeispiel: Neubau eines Einfamilienhauses (EFH).....	86
7.1.1	Funktionales Äquivalent.....	89
7.1.2	Räumliche Systemgrenze .....	89
7.1.3	Zeitliche Systemgrenze - Betrachtungszeitraum.....	89
7.1.4	Gebäudedaten .....	89
7.1.5	Massenermittlung inklusive zirkulärer Materialattribute.....	90
7.2	Zirkularitätsbewertung nach Urban Mining Index .....	97
7.2.1	Auswertung des Urban Mining Indicators .....	97
7.2.2	Berechnungsauszug – Trockenbauwand IW07 .....	101
7.2.3	Ergebnis - UMI .....	102
7.3	Zirkularitätsbewertung nach Madaster – Zirkularitätsindikator.....	104
7.3.1	Auswertung des Kreislaufpotenzial nach Madaster MZI .....	106
7.3.2	Berechnungsauszug – Trockenbauwand IW07 .....	109
7.3.3	Ergebnis – MZI.....	112
7.4	Zirkularitätsbewertung nach DGNB – Zirkularitätsindex .....	113
7.4.1	Auswertung des DGNB-Zirkularitätsindex.....	113
7.4.2	Berechnungsauszug – Trockenbauwand IW07 .....	117
7.4.3	Ergebnis – DGNB-ZI .....	119
8	Diskussion und Ausblick möglicher Standardisierung.....	120
8.1	Gegenüberstellung der Ergebnisse .....	120
8.1.1	Unterschiede in den Bewertungsergebnissen.....	121
8.2	Ausblick zur Standardisierung & Weiterentwicklung.....	122

---

8.2.1	Möglichkeiten zur Standardisierung der Zirkularitätsbewertung.....	122
8.2.2	Hürden bei der Zirkularitätsbewertung.....	124
8.3	Fazit.....	125
9	Anhang .....	127
9.1	Fallbeispiel – Massenermittlung nach Baustoffen .....	127
9.2	Fallbeispiel – Massenermittlung nach Bauteilschichten.....	131
9.3	Material-Cycle-Status von Baustoffen nach Atlas Recycling .....	138
10	Literaturverzeichnis.....	144
11	Abbildungsverzeichnis .....	149
12	Tabellenverzeichnis .....	153

# 1 Einleitung

Nachhaltige Bauwerke stellen einen wichtigen Grundstein zur Realisierung einer lebenswerteren, nachhaltigen Zukunft für weitere Generationen dar. Das bedeutet, dass der Mensch mit den zur Verfügung stehenden Ressourcen schonender umgehen muss. Im Jahr 2019 verbrauchte die gebaute Umwelt 1/3 der globalen Ressourcen und war damit einer der größten Verbraucher dieses Planeten (GlobalABC, 2020). Das Ressourcenproblem der Baubranche wird vor allem bei der Betrachtung der Bauabfälle merk- und spürbar, da auch hier der Bausektor zu den Hauptverursachern zählt. Die verbauten Ressourcen werden nach Nutzungsende eines Bauwerks meist als Abfall eingeordnet und verlieren damit sämtlichen Wert und damit die Chance wiederverwendet zu werden. Somit ist die Abfallvermeidung ein wichtiger Bestandteil in der Ressourcenschonung. Betrachtet man die im Bauwesen anfallenden Abfälle so spricht man von Bau- und Abbruchabfällen, welche sich in Österreich wie in Abb. 1.1 dargestellt gliedern lassen (BMK - Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2024).

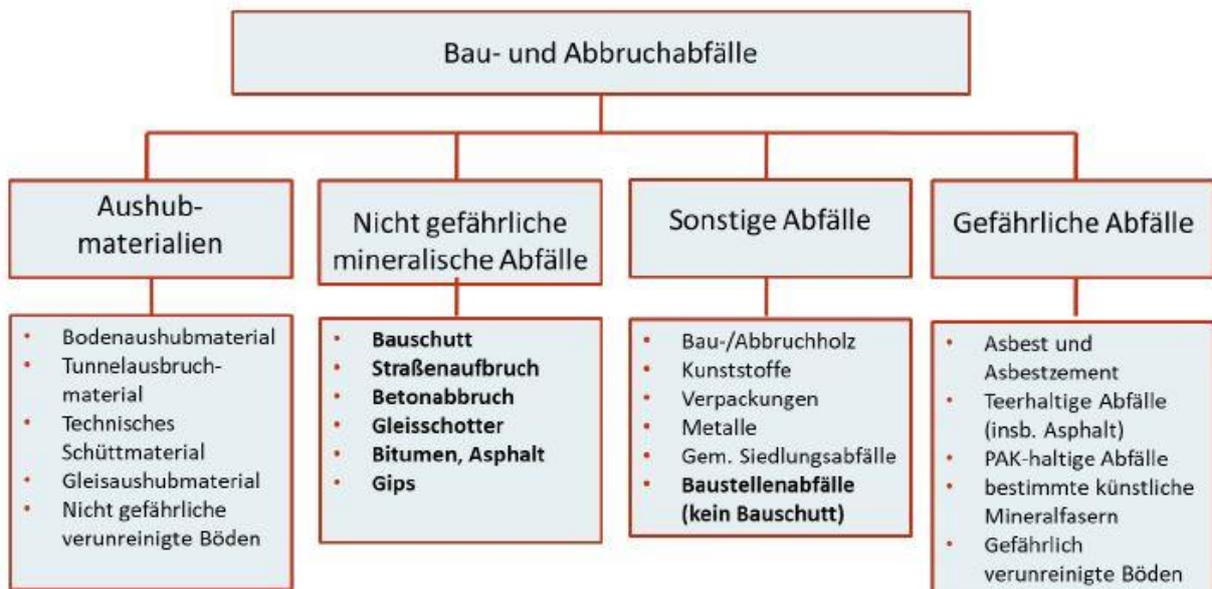


Abb. 1.1: Österreichs Zusammensetzung von Bau- und Abbruchabfällen (BMK - Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2024)

Zufolge der Daten aus der Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft Österreichs aus dem Jahr 2024 für das Referenzjahr 2022 des Bundesministeriums Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie gliedern sich die Mengen der Bau- und Abbruchabfälle laut Tabelle 1.1 wie folgt:

Abfallkategorien von Bau- und Abbruchabfällen	Masse [t]
1. Aushubmaterial	<b>43.839.000</b>
2. Mineralische Bau- und Abbruchabfälle	<b>11.509.000</b>
3. Gefährliche Abfälle	<b>252.000</b>
3.1. Asbest und Asbestzement	76.900
3.2. Gefährliche verunreinigte Böden	150.600
3.3. Asbest und Asbestzement	14.000
3.4. Mineralfaserabfälle mit gefahrenrelevanten Fasereigenschaften	10.700
4. Sonstige Abfälle	<b>540.559</b>
4.1. Bau- und Abbruchholz	514.000
4.2. Kunststoffe von Baustellenabfällen	14.559
4.3. Metallanteil von Baustellenabfälle	12.000
Summe exkl. Aushubmaterial	<b>12.301.559</b>
Summe inkl. Aushubmaterial	<b>56.140.559</b>

Tabelle 1.1: Abfallkategorien und -massen der Bau- und Abbruchabfälle Österreichs 2022 (BMK - Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2024) (eigene Darstellung)

Das Bau- und Abbruchabfallaufkommen für das Jahr 2022 exklusive Aushubmaterial betrug somit 12.302.759 Tonnen. Das Gesamtabfallaufkommen Österreichs lag bei 73.900.000 Tonnen. Somit machten die Bau- und Abbruchabfälle 16,6% des Gesamtabfalls Österreichs im Jahr 2022 aus. Mit Aushubmaterial lag der Abfallanteil der Baubranche sogar bei 75,9% (BMK - Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2024).

Dieser Trend zum Abfallaufkommen und Ressourcenverbrauchs spiegelt sich auch im Bericht des deutschen BBSR wider, welcher besagt, dass die Bauwirtschaft für circa 40% der klimaschädlichen Emissionen verantwortlich ist (BBSR – Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung, 2020). Sollte der Ausbau an Infrastruktur in Schwellen- und Entwicklungsländern mit einem ähnlichen Ressourcenverbrauch an Zement, Stahl und Aluminium stattfinden, so würde dies einen weltweiten CO<sub>2</sub>-Budgetaufbrauch von bis zu 75% bedeuten (Rosen, Urban Mining Index – Planungs- und Bewertungsinstrument für zirkuläres Bauen, 2021).

Damit ist klar – die Ressourcennutzung in der Baubranche und der Umgang mit Baustoffen nach Nutzungsende eines Bauwerks, müssen für eine nachhaltige Zukunft überdacht werden. Die Kreislaufwirtschaft ist hier einer der Schlüsselfaktoren zur Erreichung dieses Ziels. Es soll ein Wandel von einem linearen Wirtschaftssystem hin zu einem kreislaufgeführten Wirtschaftssystem stattfinden. Gebäude sollen als anthropogene Rohstofflager, sogenannte „urbane Minen“ angesehen und bewirtschaftet werden.

## 1.1 Problemstellung

Die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft in der Baubranche für eine nachhaltigere Zukunft ist bereits auf Europäischer Ebene durch den EU Grüner Deal und einen Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft geregelt. Gebäude müssen zirkulär geplant, gebaut und rückgebaut werden. Dazu sollen sämtliche Akteur:innen der Baubranche in die Verantwortung genommen werden. Um auch entsprechende Kontrollen für die Einhaltung der Zirkularität eines Gebäudes geltend zu machen, braucht es Möglichkeiten, das Kreislaufpotenzial eines Gebäudes messbar zu machen. Am freien Markt gibt es diverse Anbieter für die Zertifizierung nachhaltiger Gebäude, wobei bereits Zirkularität in den jeweiligen Zertifizierungsindikatoren

partiell einfließt und berücksichtigt wird. Der Einfluss dieser Indikatoren auf das Endergebnis ist je nach Zertifizierungsmethode unterschiedlich gewichtet, was einen Vergleich erschwert.

Seit der gesetzlich geregelten Änderung des linearen Wirtschaftswachstums Europas hin zu einer kreislauforientierten Wirtschaft, sind Bewertungsmethoden entwickelt worden, welche sich auf die Ausgabe des Kreislaufpotenzials eines Gebäudes spezialisiert haben. Ähnlich der Gebäudezertifizierung für nachhaltiges Bauen gibt es kein einheitliches Bewertungssystem. Die Bewertungsgrundlagen sind meist ähnlich, die Systemgrenzen, die berücksichtigten Berechnungsparameter und die Wertung des Kreislaufpotenzials sind jedoch von System zu System unterschiedlich. Diese Unterschiede können dazu führen, dass die Glaubwürdigkeit der Bewertungssysteme leidet und der Wandel der Baubranche in Richtung Kreislaufwirtschaft langsamer vollzogen wird. Diese Diplomarbeit widmet sich daher der Beantwortung folgender beiden Fragen:

- Wie kann das Kreislaufpotenzial bestehender und künftiger Bauvorhaben ermittelt werden?
- Können die Ergebnisse unterschiedlicher Bewertungssysteme verglichen werden?

Im folgenden Kapitel wird die Methodik zur Beantwortung dieser Fragestellungen beschrieben und grafisch dargestellt.

## 1.2 Methodik

Zu Beginn dieser Masterthesis wird der Begriff Kreislaufwirtschaft und die Problematik hinter dem linearen Wirtschaftssystem beleuchtet. Danach werden die politischen und rechtlichen Rahmenbedingungen auf europäischer und österreichischer Ebene in Bezug auf die Baubranche betrachtet. Im Anschluss daran wird der Unterschied zwischen einer Gebäudezertifizierung und der Zirkularitätsbewertung eines Gebäudes betrachtet. Danach werden drei Bewertungssysteme zur Messung der Zirkularität eines Gebäudes analysiert. Hier wird die Art der Zirkularitätsbewertung, die jeweiligen Systemgrenzen, die Berechnungsparameter und die Berechnungsmethodik genauer betrachtet. Die untersuchten Bewertungssysteme sind:

1. Urban Mining Index nach Rosen
2. Madaster Zirkularitätsindikator nach Madaster Foundation
3. DGNB Zirkularitätsindex nach DGNB

Nach der Analyse der drei Bewertungsmethoden, werden diese anhand eines Fallbeispiels untersucht. Dazu wird der Rohbau inklusive fertig gestellter Gebäudehülle, verputzten Innenwänden und Bodenbeläge eines Einfamilienhauses im Neubau herangezogen. Das Gebäudemodell wurde dabei vom Institut für Hoch- und Industriebau, Forschungsbereich Integrale Planung und Industriebau bereitgestellt. Zum Abschluss werden die Ergebnisse der Zirkularitätsbewertung gegenübergestellt und interpretiert. Die Unterschiede in den Systemen werden herausgearbeitet und mögliche Ansätze zu einer Vereinheitlichung gegeben.

Die beschriebene Methodik ist in der Abb. 1.2 dargestellt:

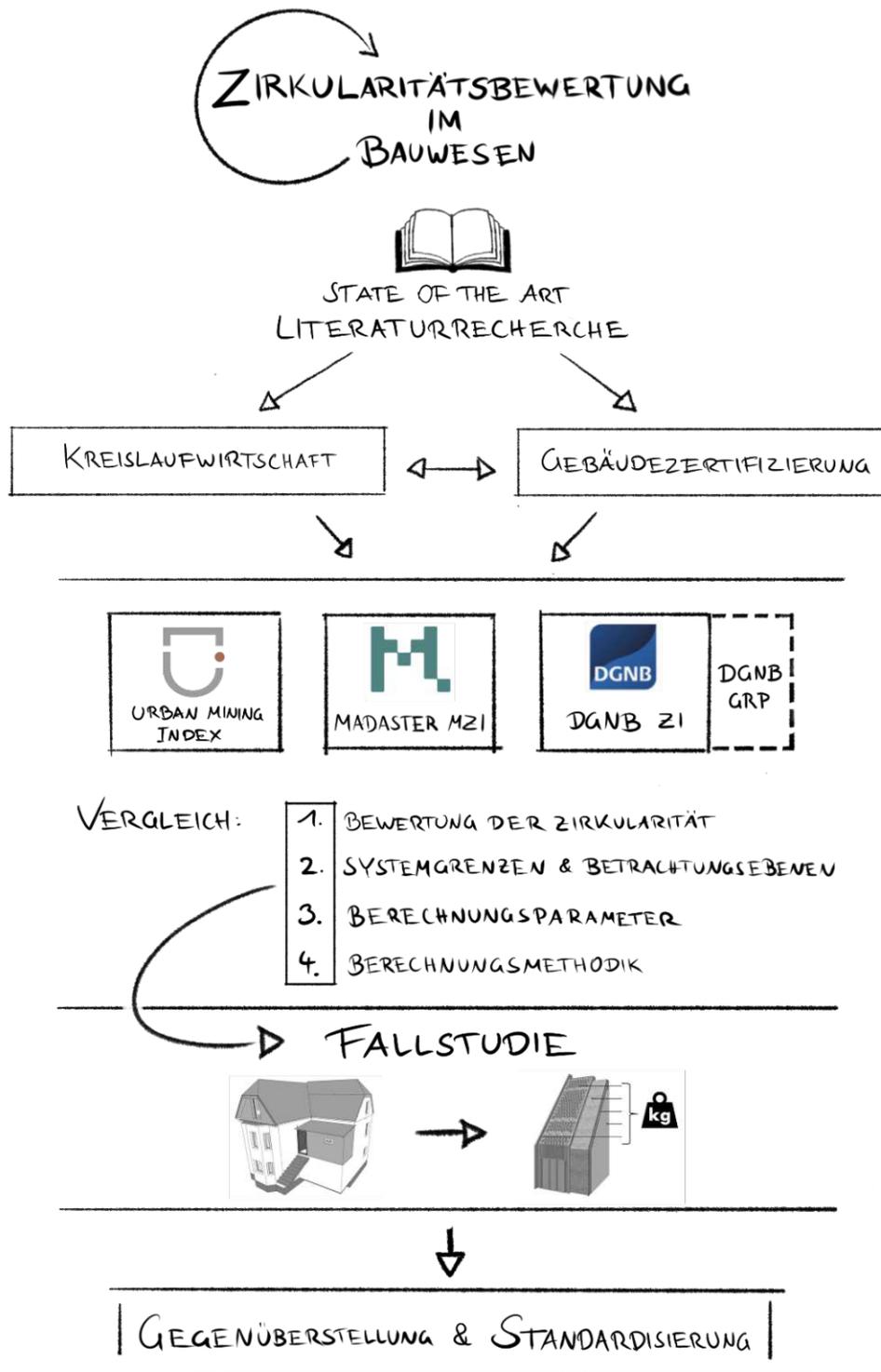


Abb. 1.2: Researchdesign – Zirkularitätsbewertung im Bauwesen (eigene Darstellung)

### 1.3 Ziel

Das Ziel dieser Masterthesis soll die Gegenüberstellung von drei Bewertungssystemen hinsichtlich Zirkularität anhand eines Fallbeispiels sein. Dabei wird ein genauer Blick auf die Berechnungsmethode geworfen, um Unterschiede in der Betrachtungsweise aufzuzeigen. Die Ergebnisse der Fallstudie werden verglichen und die Unterschiede werden analysiert. Damit soll der aktuelle Stand der Zirkularitätsbewertung von Gebäuden und deren Unterschiede, wie Hürden, herausgearbeitet werden.

## 2 Zirkularität – Kreislaufwirtschaft in der Baubranche

### 2.1 Definition Zirkularität

Das aktuell weltweit verbreitete lineare Wirtschaftssystem geht mit Ressourcen um, als stünden diese unlimitiert zur Verfügung. Ressourcen werden nach der Gewinnung zu einem Produkt verarbeitet, das nach dem Nutzungsende meist als Abfall endet und damit jeglichen Wert verliert. Dieser Umgang führt zunehmend zu einer Verknappung von Ressourcen, die durch das Bevölkerungswachstum und dem damit steigendem Konsum in Zukunft weiter ansteigen wird. Das bedeutet wiederum eine Verschärfung von Umweltproblemen, verbunden mit einer Zunahme der globalen Ungerechtigkeit. Vor allem die sinkende Verfügbarkeit und der immer komplexer werdende Abbau der noch vorhandenen Ressourcen führen zu einem Anstieg der Rohstoffkosten und einem zunehmenden Verteilungsungleichgewicht. Gleichzeitig tragen Rohstoffe, die nach Gebrauch deponiert oder verbrannt werden, zu massiven Umweltproblemen bei (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V, 2019). Es braucht daher einen Paradigmenwechsel – weg von einem linearen, hin zu einem kreislaufgeführten Wirtschaftssystem.

Kreislaufwirtschaft – ein Begriff, der mittlerweile in der Gesellschaft und Wirtschaft große Wellen geschlagen hat und bei vielen Akteur:innen im Bauwesen angekommen ist. Die „Cradle-to-Cradle“-Philosophie ist dabei die Grundlage für das Konzept der Kreislaufwirtschaft. Die Motivation hinter Kreislaufwirtschaft ist die Wiederverwendung und -verwertung von endlichen Ressourcen, um die Verfügbarkeit und Qualität eben dieser für zukünftige Generationen gewährleisten zu können. Das bedeutet, dass Ressourcen länger im Kreislauf geführt werden und damit der Bedarf an Primärrohstoffen reduziert wird. Das Recycling von Rohstoffen und die Verwendung dieser Rohstoffe als Grundlage für neue Materialien oder Produkte spielt hier ebenfalls eine entscheidende Rolle. Bei der Kreislaufbetrachtung wird zwischen zwei Hauptkategorien unterschieden (McDonough & Braungart, 2002):

1. Biologische Kreisläufe, in welchen Ressourcen gesundheitsverträglich und kompostierbar erneuert werden
2. Technische Kreisläufe, in denen Ressourcen durch menschliche Einflüsse repariert und wiederhergestellt werden

Die Ellen MacArthur Foundation, die zu den großen Antreibern der öffentlichen Kreislaufwirtschaftsdiskussion zählt, prägte mit dem Bericht „Growth Within“ aus dem Jahr 2015 die drei Prinzipien der Kreislaufwirtschaft (Ellen MacArthur Foundation, 2015):

- A. Endgültige Ressourcen müssen wertgeschätzt werden und ihre Bestände und Stoffströme sind zu kontrollieren
- B. Durch das Schließen von Kreisläufen werden Rohstoffträge erhöht, während die höchstmögliche Wertigkeit der Rohstoffe durch Reparieren, Wiederverwendung, Recycling und Aufbereitung erhalten bleibt.
- C. Die Effektivität des Systems wird durch die konsequente Berücksichtigung von Externalitäten gewährleistet. Das bedeutet, dass Auswirkungen sowohl für Menschen als auch für die Umwelt berücksichtigt werden müssen.

Das heißt für die Baubranche, dass kreislauforientierte Konstruktionen für eine Maximierung von nachwachsenden, sprich erneuerbaren Primärrohstoffen, oder Sekundärrohstoffen stehen. Das kreislauforientierte Denken muss bereits in der Entwurfsphase beginnen, da eine

Wiederverwendung, Recycling oder auch Downcycling von Baustoffen und Bauteilen stark von der Demontagefähigkeit und der sortenreinen Trennbarkeit abhängig sind.

Als zu überwindende Hürde zeigt sich, dass Bauwerke einen hohen Grad an technischen und funktionellen Qualitäten zu erfüllen haben. Dazu zählen unter anderem Dichtheit, Brand- und Schallschutz. Dazu wurden im Laufe der letzten Jahrzehnte Baustoffe und Verbundstoffe entwickelt, um diese Qualitätsstandards bestmöglich zu erfüllen. Die Recyclingfähigkeit stand dabei meist nicht im Vordergrund. Schwer lösbare Verbindungen wie Klebstoffe und Spachtelmasse sind aus Kostengründen eine gängige Verbindungsarten. Diese Verbindungen führen jedoch zu einer erschwerten Trennung an Abfällen, was wiederum höhere End-of-Life Szenarien für auf solche Art verbundene Baustoffe schwierig bis unmöglich macht. Bedeutet, dass Baustoffe eher dem Downcycling und somit Qualitätsverluste zugeführt werden, anstatt dem Recycling oder gar der Wiederverwendung zugeführt werden zu können.

Daraus ergeben sich für die Planung von kreislaforientierten Konstruktionen die beiden Parameter Trennbarkeit und Recyclingfähigkeit von Materialien. Gebäude müssen als Rohstofflager betrachtet werden. Die verwendeten Rohstoffe und Bauteile sollen nach dem Lebensende wiederverwendet, beziehungsweise -verwertet werden (Seggewies, Riegler-Floors, & Rosen, 2018).

## 2.2 Entwicklung auf europäischer Ebene

Wie bereits anfänglich in dieser Diplomarbeit angeführt, hat sich die Europäische Union die Entschleunigung, bis Stillstand, des Menschen gemachten Klimawandels zur Kernaufgabe gemacht. Europa soll bis zum Jahr 2050 der erste klimaneutrale Kontinent werden und dabei globaler Marktführer und Wissensträger bei den Themen Recycling und grünen Technologien werden. Als ein wichtiger Meilenstein zur Erreichung dieses Zieles sollen bis zum Jahr 2030 die Netto-Emissionen um 55% gegenüber dem Emissionsstandes 1990 gesenkt werden. Kreislaufwirtschaft soll dabei eine Schlüsselrolle spielen. Die Erreichung der europäischen Klimaziele setzt ein globales Umdenken voraus. Europa möchte als Vorreiter und Vorbild für andere Nationen und Kontinente agieren (European Commission, 2020). Die europäische Kommission hat dazu einige Verordnungen und auch Handlungsrahmenwerke geschaffen, die in diesem Kapitel genauer betrachtet werden. Der Fokus wird in dieser Diplomarbeit jedoch auf Auswirkungen auf die Baubranche gelegt.

### 2.2.1 EU Grüner Deal

Mit dem EU Grüner Deal erschien im Jahr 2019 eine neue Wachstumsstrategie für Schlüsselsektoren, welche das bereits anfänglich erwähnte Ziel hat, Europa bis 2050 zum ersten klimaneutralen Kontinent zu machen, adressiert. Als gedanklicher Vorläufer für den europäischen Grünen Deals gilt die Mitteilung „COM/2018/773 final“ der europäischen Kommission, in welcher die Vision Europas für einen sauberen Planeten und Schaffung von langfristigen Strategien zur Erreichung dieser Ziele festgehalten ist. In der Wachstumsstrategie des Grünen Deals wird auf aktuelle und zukünftige umwelt- und klimabedingte Hürden eingegangen. Ausgehend davon werden gerechte und inklusive Lösungsansätze zur Bewältigung dieser definiert. Die Verringerung des Ressourcenverbrauches ist dabei ein entscheidender Antreiber hinter dem Deal. Das Schürfen und Verarbeiten von Ressourcen ist laut dem europäischen Grünen Deals auf die Hälfte der Treibhausgasemissionen und für mehr als 90% der Biodiversitätsverluste in Europa zurückzuführen (Europäische Kommission, 2019).

Mit dem europäischen Grünen Deal ist ein einheitlicher Fahrplan für die Mitgliedsstaaten erarbeitet worden, welcher kurz gesagt das Wirtschaftswachstum Europas von dem Ressourcenverbrauch entkoppeln soll und klare Klimaziele für 2030 und 2050 definiert. In Abb. 2.1 ist der europäische Grüne Deal grafisch dargestellt (Europäische Kommission, 2019).



Abb. 2.1: EU Grüner Deal 2019

Wie in Abb. 2.1 dargestellt, sind die Punkte „Energie- und ressourcenschonendes Bauen und Renovieren“ und „Mobilisierung der Industrie für eine saubere und kreislauforientierte Wirtschaft“ entscheidende Schüsselfaktoren für die Erreichung der Klimaziele der europäischen Kommission. Der Grüne Deal versteht sich dabei als Richtungsweiser und weniger als tatsächlicher Maßnahmenplan zur Umsetzung. Eine EU-weite Industriestrategie zur Umsetzung der Kreislaufwirtschaft in ressourcenstarken Wirtschaftsgebieten wird von der Kommission mit einem Aktionsplan nachgereicht. Die Stahl- und Zementindustrie sind hier Kerngebiete, in welchen eine Dekarbonisierung stattfinden muss. Die Kommission will dabei bahnbrechende Technologien für zum Beispiel eine saubere Stahltechnologie entsprechend massiv fördern und schafft dafür einen eigenen Innovationsfond. Damit soll ein entsprechender Boden für Firmen geschaffen werden um als Vorreiter in Bereichen Klima und Ressourcen zu fungieren. Der EU-Binnenmarkt soll ebenfalls gestärkt werden, um einen Markt für Sekundärrohstoffe und Nebenprodukte sicherstellen zu können (Europäische Kommission, 2019).

Unter dem Punkt „Energie- und ressourcenschonendes Bauen und Renovieren“ wird die Baubranche direkt angesprochen. Neben dem enormen Ressourcenverbrauch fallen auch 40% des Energieverbrauchs auf bestehende Gebäude. Durch eine entsprechende Renovierungswelle öffentlicher wie privater Gebäude soll dieser Verbrauch reduziert werden. Die aktuelle Renovierungsrate von Gebäuden in EU-Mitgliedsstaaten liegt zwischen 0,4 bis 1,2%. Diese Rate ist zumindest zu verdoppeln. Dazu wurde die Richtlinie 2024/1275 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden von der EU-Kommission geschaffen. Eine der angesprochenen Maßnahmen ist die Schaffung einer Plattform für Akteur:innen in der Baubranche und Behörden, um Hürden bei Renovierungsprojekten auf raschem Wege zu beseitigen.

Aber auch das Null-Schadstoff-Ziel für eine schadstofffreie Umwelt wird Auswirkungen auf die Produktion und Wiederverwendbarkeit von Rohstoffen und Baumaterialien haben. Die Europäische Union verabschiedete dazu ebenfalls im Jahr 2020 die Chemikalienstrategie für Nachhaltigkeit, um dieses Ziel zu erreichen. Diese wird im Laufe der nächsten Jahre die Grenzwerte an Schadstoffen regulieren. Zusätzlich wurde im EU Grünen Deal auch eine Umorientierung der Bauprodukteverordnung hinsichtlich der Kreislaufwirtschaft angekündigt und befindet sich zum Zeitpunkt der Rechercharbeiten in Ausarbeitung (Europäische Union, o. D.).

Um die Ziele des Grünen Deals umsetzen zu können wird ein entsprechender Investitionsplan ausgearbeitet. Das EH-Haushaltsbudget und der InvestEU-Fond werden dabei Schlüsselfunktionen einnehmen. Für diesen Investitionsplan werden gerechte und soziale Mechanismen geschaffen. Die Klassifizierung ökologisch nachhaltiger Tätigkeiten ist dabei ein entscheidender Faktor.

## 2.2.2 EU-Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft

Die im März 2020 veröffentlichte Mitteilung „Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft“ beschreibt, wie bereits in Kapitel 2.2.1 angeführt, Strategien zur Umsetzung der im EU Grünen Deal geforderten Umorientierung der Wirtschaft hin zu einer Kreislaufwirtschaft. Als entscheidende Basis zur Umsetzung des Aktionsplanes wurde der europäische Binnenmarkt und das Potenzial digitaler Technologien identifiziert. Die EU hat global gesehen den größten Binnenmarkt des Planeten. Da davon auszugehen ist, dass der Wandel hin zu einer Kreislaufwirtschaft anfänglich nicht von allen globalen Wirtschaftsmächten mitgetragen werden wird, muss der europäische Binnenmarkt dies selbstständig bewältigen können (European Commission, 2020). Erst durch die Stärkung des Binnenmarktes können neue Standards für nachhaltigere Produkte, sprich Anpassungen von Produktdesigns und Wertschöpfungsketten vorgenommen werden.

Um dies in klaren Vorschriften festzuhalten, ist eine Rechtsetzungsinitiative in Arbeit, welche eine nachhaltige Produktpolitik definieren soll. Kernpunkte dabei sind (Europäische Kommission, 2020):

### 1. Design nachhaltiger Produkte

Da der Ursprung von bis zu 80% der Umweltauswirkungen von Produkten bereits in der Designphase liegt, werden Ökodesign-Bedingungen auf eine möglichst große Produktpalette vorgegeben. Dazu zählen Nachhaltigkeitsgrundsätze wie Verbesserung der Haltbarkeit, Wiederverwendbarkeit und Reparierbarkeit. Der Recyclinganteil bei der Produktion ist zu erhöhen, ohne dass die Sicherheitsgewährleistung darunter leidet. Die Zerstörung nicht verkaufter Produkte wird unter Verbot gestellt und verstärkte Nutzung von digitalisierten Produktinformationen zur Schaffung digitaler Produktpässe. Der Fokus liegt dabei verstärkt auf Produktgruppen wie Stahl und Zement, welche eine hohe Umweltauswirkung haben. Für die Kontrolle und Einhaltung dieser Nachhaltigkeitsforderungen nimmt die Kommission die Mitgliedsstaaten mit in die Verantwortung.

### 2. Stärkung der Position von Verbrauchern und öffentlichen Auftraggebern

Um den Wandel hin zur Kreislaufwirtschaft bewältigen zu können, müssen die Verbraucher mit ins Boot geholt werden. Ein Lösungsansatz ist hier, dem Verbraucher auch die notwendigen nachhaltigkeitsrelevanten Informationen zu den Produkten zur Verfügung zu stellen. Dazu zählen etwa die Lebensdauer, Reparaturanleitungen und Reparaturdienste. Die europäische Kommission wird dazu das EU-Verbraucherrecht überarbeiten und den Rahmen dafür schaffen. Auch das Recht auf Reparatur soll dafür neu geschaffen werden. Auch Unternehmen werden mehr in die Verantwortung genommen und sollen zu Auskünften über den eigenen Umweltfußabdruck, sprich die Produkte und Unternehmensorganisation, verpflichtet werden.

### 3. Kreislaufprinzip in Produktionsprozessen

Neben der Industriestrategie Europas, welche in der Mitteilung COM(2020) 102 final der europäischen Kommission definiert wurde, sind im Aktionsplan ebenfalls Maßnahmen zur Akzeptanz des Kreislaufprinzips angeführt. Die Einführung eines Berichterstattungs- und Zertifizierungssystems durch die Industrie für eine einfachere Industriesymbiose ist einer dieser Maßnahmen. Zusätzlich sollen digitale Technologien für die Verfolgung und

Inventarisierung von Ressourcen in Form von zum Beispiel Materialpässen gefördert werden. Wie bereits im Grünen Deal angeführt, sollen grüne Technologieentwicklungen erleichtert werden. Dazu will die Kommission ein eigenes EU-System für die Verifizierung von Umwelttechnologien schaffen und dies als EU-Gütesiegel eintragen lassen.

Im Aktionsplan wurden auch zentrale Wertschöpfungsketten identifiziert, welche hohe Umweltauswirkungen aufweisen und daher besonders in den Fokus gestellt werden müssen. Wie bereits in Kapitel 1 beschrieben fällt die Baubranche auf Grund des hohen Ressourcenverbrauchs und der Abfallmenge in diese Kategorie. Die Berücksichtigung der Kreislaufwirtschaft in jeder Lebenszyklusphase eines Gebäudes soll zu einer höheren Materialeffizienz führen, was wiederum bis zu 80% an Emissionen einsparen kann (Hertwich, et al., 2019). Die Umsetzung der Kreislaufbetrachtung während des gesamten Lebenszyklus soll mit folgenden Maßnahmen sichergestellt werden (Europäische Kommission, 2020):

- Überarbeitung der Bauprodukteverordnung zur Inkludierung von Nachhaltigkeitsleistungen und Rezyklatanteilen von Bauprodukten ohne Verluste der Funktionalität und Sicherheit
- Steigerung der Lebensdauer und Anpassbarkeit von Gebäuden an neue Nutzungsvoraussetzungen.
- Einführung digitaler Gebäude-Logbücher für zum Beispiel Materialpässe und Wartungsmaßnahmen
- Einführung der verpflichtenden Lebenszyklusanalyse von Level(s) in der öffentlichen Auftragsvergabe, wobei der Indikator 2.1 von Level(s) sich auf die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft bezieht (European Commission, Directorate-General for Environment, 2021)
- Schaffung eines EU-Rahmens für einfachere nachhaltige Investitionen
- Einführung von CO<sub>2</sub>-Reduktionszielen sowie CO<sub>2</sub>-Speicherungspotenziale
- Neuauflage der Zielvorgaben in EU-Rechtsvorschriften zur stofflichen Verwertung von Bau- und Abbruchabfällen
- Reduzierung der Bodenversiegelung sowie Optimierung der nachhaltigen und kreislauforientierten Verwendung ausgehobener Böden

Die Maßnahmen für die zentralen Wertschöpfungsketten des EU-Aktionsplanes fließen wiederum in die EU-Industriestrategie und die Initiative „Renovierungswelle“ ein (Europäische Kommission, 2020). Neben den Rahmenbedingungen für eine nachhaltige Produktpolitik und die Identifizierung von Maßnahmen für zentrale Wertschöpfungsketten, welche erheblich zur Abfallvermeidung beitragen, wird auch die Abfallpolitik selbst in den Fokus gerückt. Diese ist ebenfalls entscheidend um das Kreislaufprinzip zu fördern und Europas Restsiedlungsabfälle bis 2030 zu halbieren und bis 2050 das Wirtschaftswachstum vom Abfallaufkommen zu entkoppeln. Folgende Maßnahmen sollen dies ermöglichen (Europäische Kommission, 2020):

#### 1. Verbesserung der Abfallpolitik durch

- Stärkung des EU-Abfallrechts, welches seit 1970 die Abfallwirtschaft der EU deutlich verbessert hat
- Neuauflage der Richtlinie 2008/98/EG „Zielvorgaben für die Abfallreduzierung“ mit Fokus auf für zentrale Abfallströme
- Verbesserung der Durchsetzung der Extended Producer Responsibility (EPR, Deutsch: erweiterten Herstellerverantwortung). Die EPR hat zum Ziel, Herstellern von

- Produkten neben Herstellung und Verkauf auch die Verantwortung für Entsorgung, Sammlung und Verwertung zu geben. Damit ist der Hersteller für den gesamten
- Steigerung des Abfallrecyclinganteils durch Verbesserung des Informations- und Verfahrensaustausches
2. Stärkung des Kreislaufprinzips durch Vermeidung von schädlichen Sekundärrohstoffen durch
- Neue Innovationen zur Entfernung von Schadstoffen aus Abfällen
  - Entwicklung neuer Methoden zur Reduzierung von bestehenden gesundheits- und umweltschädlichen Stoffen in recycelten Materialien

Das Chemikalienrecht der EU wird hier eine entscheidende Rolle einnehmen

3. Aufbau eines EU-Marktes für Sekundärrohstoffe durch
- Einführung eines Mindestzyklanteils in Produkten soll Nachfrage erhöhen
  - Schaffung einer Überwachungsgrundlage für die Anwendung der überarbeiteten EU-Vorschriften
  - Einrichten einer Marktbeobachtungsstelle für wichtige Sekundärstoffe
4. Stoppen der Abfallausfuhr aus Europa in Nicht-EU-Länder

Eine weitere Säule des Aktionsplanes für ein krauslauffähiges Europa ist die Stärkung der Sozialwirtschaft und die damit verbundene Schaffung neuer Arbeitsplätze und Lehrstellen für den Knowhow Transport. Dazu wird ein eigener Aktionsplan für die Sozialwirtschaft ausgearbeitet und ein Kompetenzpakt mit einer weitreichenden Multi-Stakeholder-Partnerschaft. Entsprechende Gelder werden durch den Europäischen Sozialfond Plus bereitgestellt.

Die Schaffung von Messsystemen zur Beurteilung der Kreislaufpotenzials von Produkten und die Verringerung der Treibhausgasemissionen werden ebenfalls wichtige Schlüsselrollen einnehmen. Entsprechende Zielvorgaben für die Kreislaufwirtschaft, um eine unkompliziertere nachhaltige Investitionserleichterung zu erhalten, werden in der EU-Taxonomie Verordnung geregelt (Europäische Kommission, 2020).

### 2.2.3 EU-Klimagesetz

Der im Sommer 2021 veröffentlichte Vorschlag für das Europäische Klimagesetz (Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union, 2021) verankert die bereits angeführte neue Wachstumsstrategie der EU, der EU-Grüne-Deal, als auch den EU-Aktionsplan für Kreislaufwirtschaft im europäischen Recht. Es wird die Klimaneutralität und eine entsprechende Orientierung der Klimaziele daran gesetzlich festgehalten. Dafür wurden klare CO<sub>2</sub> Ziele für die Jahre 2030 und 2050 definiert.

Im Klimagesetz ist somit die Verbesserung der Umweltqualität durch eine nachhaltige Entwicklung der Politik sämtlicher Mitgliedsstaaten der europäischen Union festgehalten. Die Akteur:innen in Schlüsselsektoren wie etwa Gebäude und Industrie werden aufgefordert gemeinsam mit der Politik Strategien zur Umsetzung der Klimaziele einzubringen.

Als Stabstelle wurde der europäische wissenschaftliche Beirat für Klimawandel ins Leben gerufen, welcher als unabhängiges Organ die Union mit wissenschaftlichem und technischem Knowhow beraten soll. In das Aufgabengebietes dieses Beirats fallen somit die Beratung hinsichtlich der zu treffenden Maßnahmen, Definition von Klimazielen, die Festlegung des

indikativen Treibhausbudgets der Union als auch selbstständige Ermittlung von Maßnahmen zur Erreichung der Klimaziele.

Als eine der Säulen der europäischen Klimapolitik wird das EU-Emissionshandel System, kurz EU-EHS, genannt und soll die Mitgliedsstaaten zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen bewegen. Gleichzeitig soll die Verlagerung von CO<sub>2</sub>-Emissionen zu Nicht-EU-Ländern durch die Einführung eines CO<sub>2</sub>-Grenzausgleichssystems vermieden werden.

Die Europäische Kommission hat innerhalb der Plattform für Klimaanpassung „Climate-ADAPT“ eine Überwachungsstelle geschaffen, welche Gefahren für Europa durch den Klimawandel auf Gesundheit und Klima vorhersehen und reduzieren soll. Die Kommission wird den IST-Stand der Klimazielfortschritte der Mitgliedsstaaten bewerten und bei Nichteinhaltung notwendige Maßnahmen zufolge europäischer Verträge ergreifen. Eine sachkundige und unabhängige Bewertung des Fortschritts der Klimaziele ist daher unerlässlich.

## 2.2.4 EU-Taxonomie

Mit der EU-Taxonomie Verordnung 2020/852 ist im Sommer 2020 eine Verordnung erschienen, welche auf europäischer Ebene nachhaltige Investments definiert. Damit nimmt die EU-Taxonomie Verordnung eine Grundsäule für die Erreichung der Klimaziele bis 2050 ein und ist maßgeblich für die Orientierung hin zu nachhaltiger Kapitalinvestments verantwortlich. Die Verordnung ist dabei nicht als Nachhaltigkeits-Label, sondern ist als Klassifizierungssystem für die Nachhaltigkeit von Wirtschaftstätigkeiten zu verstehen. Um den europäischen Binnenmarkt für nachhaltige Investments fit zu machen, braucht es eine einheitliche Definition von nachhaltigen Tätigkeiten, da sonst grenzübergreifende nachhaltige Kapitalausgaben unterschiedliche Voraussetzungen erfüllen müssten. Laut der EU-Taxonomie spricht man von einer nachhaltigen Tätigkeit sobald folgende Punkte erfüllt sind (Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union, 2020):

- Die Tätigkeit erbringt einen wesentlichen materiellen Mehrwert zu mindestens einem Umweltziel
- Die Tätigkeit schadet keinem anderen Umweltziel in einem erheblichen Maße
- Die Tätigkeit erfüllt die Mindestschutzvorschriften hinsichtlich Menschenrechte und Arbeitsrechte
- Die Tätigkeit hält die Vorgaben der EU-Verordnung 2021/2139, die Festlegung von technischen Bewertungskriterien, beziehungsweise deren Nachfolgeverordnung 2023/2486 ein

Als Umweltziele wurden in der EU-Taxonomie folgende festgehalten (Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union, 2020):

- Klimaschutz
- Anpassung an den Klimawandel
- Nachhaltige Nutzung und Schutz der Wasser- und Meeresressourcen
- Übergang zur Kreislaufwirtschaft
- Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung
- Schutz und Wiederherstellung der biologischen Vielfalt und der Ökosysteme

Bei dem Umweltziel „Übergang zur Kreislaufwirtschaft“ wird unter anderem auf die Maßnahmen und Definitionen des geistigen Vorläufers, der EU-Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft siehe Kapitel 2.2.2, verwiesen. Indikatoren für den positiven Einfluss einer Wirtschaftstätigkeit auf das Umweltziel Kreislaufwirtschaft sind im Artikel 13 der EU-Taxonomie geregelt. Kurz gesagt fallen hier Wirtschaftsleistungen hinein, die zu einer

Verbesserung der Haltbarkeit, Reparaturfähigkeit, Nachrüstbarkeit oder Wiederverwendbarkeit von Produkten führen. Auch das Produktdesign, Wahl von Materialien als auch die Demontage und der Abbau von Gebäuden fallen hier hinein.

EU-Taxonomie führt ab einer gewissen Unternehmensgröße, ausgenommen Finanzunternehmen, eine Berichtsabgabe zu bestimmten klimarelevanten Leistungsindikatoren ein. Damit soll die Überprüfbarkeit der Einhaltung von nachhaltigen Wirtschaftstätigkeiten möglich gemacht werden. Wie bereits als Kriterium angeführt, braucht es technische Bewertungskriterien, um nachvollziehen zu können, ob eine Aktivität ökologisch nachhaltig ist. Diese Kriterien müssen am aktuellen Stand der Technik sein und in entsprechenden Zeitintervallen angepasst werden. Dazu wurde von der europäischen Kommission eine Plattform für ein nachhaltiges Finanzwesen als Beratungsorgan geschaffen. Diese soll sich aus Sachverständigen und einschlägigen Interessenvertretern mit nachweisbaren Kenntnissen in den betroffenen Bereichen zusammensetzen. Die EU-Verordnung 2021/2139, beziehungsweise die Nachfolgeverordnung 2023/2486, spiegelt genau diese entscheidenden qualitativen und quantitativen Kriterien und Grenzwerte wider.

### 2.2.5 EU-Verordnung 2023/2486

Wie bereits im Kapitel 2.2.4 angeführt, wurde im Jahre 2021 mit der EU-Verordnung 2021/2139 eine Ergänzung zur EU-Taxonomie Verordnung veröffentlicht, in welcher technische Bewertungskriterien definiert wurden. Diese sind als quantitative Schwellenwerte, Mindestanforderungen, als relative Verbesserung oder als Reihe von qualitativen Leistungsanforderungen zu verstehen, um einer Tätigkeit einen wesentlichen Mehrwert zu mindestens einem Klimaziel nachweisen zu können. Sollte eine Tätigkeit noch keine technisch und ökonomisch durchführbare CO<sub>2</sub>-arme Alternative besitzen, so spricht man von einer Übergangstätigkeit. Der Fokus bei der Definition der technischen Bewertungskriterien wird, wie beim Grünen Deal, auf Wirtschaftssektoren gelegt, bei welchen der größte Ausstoß an Treibhausgasemissionen erfolgt und das größte Einsparungspotenzial vorhanden ist. Da im Bausektor 40 Prozent des Energieverbrauchs und 36 Prozent der CO<sub>2</sub>-Emissionen der EU anfallen ist dieser mit entsprechenden Bewertungskriterien versehen worden.

Im Jahr 2023 wurden mit der EU-Verordnung 2023/2486 eine Änderung der Verordnung 2021/2139 veröffentlicht, in welcher unter anderem die Ziele der technischen Bewertungskriterien für den Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft konkretisiert wurden. Hersteller sollen für ihre Produkte bereits in der Entwicklungs- und Herstellungsphase die Werterhaltung, Abfallreduktion und die Recyclingfähigkeit berücksichtigen. Gefährliche Stoffe sind zu vermeiden und sind über den gesamten Lebenszyklus zu entfernen. Die Abfallbewirtschaftung wurde als eine der Schlüsselfunktionen für den Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft benannt. Eine entsprechende Abfallhierarchie wurde definiert, in welcher die Abfallvermeidung, die Wiederverwendung und das Recycling als bevorzugte Optionen genannt wurden. Eine anderweitige oder energetische Verwertung ist andernfalls anzustreben. Eine Verbrennung oder Deponierung soll immer die letzte Option darstellen. Die Baubranche ist einer der Hauptabfallproduzenten, was auch eine Anpassung der technischen Bewertungskriterien in der Verordnung 2023/2486 zur Folge hatte. Nachfolgend werden die für diese Diplomarbeit relevant Wirtschaftstätigkeiten inklusive deren technischen Bewertungskriterien für den Neubau, die Renovierung, der Abbruch von Gebäuden oder anderen Bauwerken, als auch die Verwendung von Beton im Hoch- und Tiefbau für das Ziel Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft beschrieben (Europäische Kommission, 2023):

## 1. Baugewerbe und Immobilien – Neubau

Unter diese Tätigkeit fallen Bauprojekte für Wohn- und Nichtwohngebäuden mit Berücksichtigung finanzieller, technischer und materieller Mittel für den Verkauf.

Technische Bewertungskriterien:

### a) Wesentlicher Beitrag zum Übergang zur Kreislaufwirtschaft:

- i) Entstandene Bau- und Abbruchabfälle werden nach dem Abfallrecht der Union und durch Festlegung von Sortierungssystemen behandelt. >90 Prozent der auf der Baustelle entstandenen Bau- und Abbruchabfälle sind einer Wiederverwendung oder Recycling zuzuführen. Die Einhaltung ist vom Betreiber über den Level(s)-Indikator 2.2 nachzuweisen
- ii) Für das errichtete Gebäude ist das Lebenszyklus-Treibhauspotenzial GWO für jede Lebenszyklusphase zu berechnen und auf Anfrage nachzuweisen
- iii) In der Planungs- und Ausführungsphase sind die Anpassbarkeit und Rückbaufähigkeit des Bauwerks gemäß Level(s) Indikator 2.3 und 2.4 zu berücksichtigen und auf Anfrage nachzuweisen
- iv) Der Einsatz von Primärrohstoffen ist durch die Verwendung von Sekundärrohstoffen zu begrenzen. Der Betreiber hat zu gewährleisten und mittels des Level(s)-Indikator 2.1 nachzuweisen, dass die drei schwersten verbauten Materialkategorien folgende max. Primärrohstoffanteil enthalten:
  - Beton, Naturwerkstein, Agglomeratstein ≤ 70% Primärrohstoffanteil
  - Ziegel, Fliesen, Keramik ≤ 70% Primärrohstoffanteil
  - Glas, Dämmstoffe aus Mineralwolle ≤ 70% Primärrohstoffanteil
  - Metalle ≤ 30% Primärrohstoffanteil
  - Gips ≤ 65% Primärrohstoffanteil
  - Biobasierter Kunststoff ≤ 80% Primärrohstoffanteil
  - Nicht biobasierte Kunststoffe ≤ 50% Primärrohstoffanteil

Ist der Rezyklatanteil eines Bauproduktes nicht bekannt, so ist anzunehmen, dass dieses aus 100% Primärrohstoffen besteht.
- v) Der Betreiber nutzt elektronische Werkzeuge zur Speicherung der verbauten Werkstoffe und Komponenten, sowie Informationen zur Wartung, Rückgewinnung und Wiedergewinnung über zum Beispiel Umweltproduktdeklarationen (EPDs)

### b) Vermeidung erheblicher Beeinträchtigungen

1) Klimaschutz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gebäude wird nicht zur Gewinnung, Lagerung, Beförderung oder Herstellung fossiler Brennstoffe genutzt</li> <li>• Der Primärenergiebedarf liegt unter dem Schwellenwert für Niedrigstenergiegebäude</li> </ul>
2) Anpassung an den Klimawandel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Tätigkeit erfüllt die Kriterien laut der Anlage A, Anhang II der EU-Verordnung 2023/2486</li> </ul>
3) Nachhaltige Nutzung und Schutz von Wasser- und Meeresressourcen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Für ausgewählte Sanitärgegenstände wie zum Beispiel Toiletten oder Duschen wird der Wasserverbrauch bestimmte Höchstwerte festgelegt und nachgewiesen</li> </ul>
5) Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baubestandteile und -stoffe erfüllen die Kriterien laut der Anlage C, Anhang II der EU-Verordnung 2023/2486</li> <li>• Neubauten auf potenziell schadstoffbelasteten Standorten müssen auf mögliche Schadstoffe untersucht werden</li> <li>• Lärm-, Staub-, und Schadstoffemissionen sind während der Errichtung und Wartung zu minimieren</li> </ul>
6) Schutz und Wiederherstellung der Biodiversität und der Ökosysteme	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Tätigkeit erfüllt die Kriterien laut der Anlage D, Anhang II der EU-Verordnung 2023/2486</li> </ul>

Tabelle 2.1: technisches Bewertungskriteriums „Baugewerbe und Immobilien – Neubau“ für das Ziel „Übergang zur Kreislaufwirtschaft“ nach Anhang II der EU-Verordnung 2023/2486 (Europäische Kommission, 2023), (eigene Darstellung)

## 2. Baugewerbe und Immobilien – Renovierung bestehender Gebäude

Unter diese Tätigkeit fallen alle Hoch- und Tiefbauarbeiten beziehungsweise -vorbereitungen.	
Technische Bewertungskriterien:	
<p><b>a) Wesentlicher Beitrag zum Übergang zur Kreislaufwirtschaft:</b></p> <p>i) Entstandene Bau- und Abbruchabfälle werden nach dem Abfallrecht der Union und durch Festlegung von Sortierungssystemen behandelt. &gt;90 Prozent der auf der Baustelle entstandenen Bau- und Abbruchabfälle sind einer Wiederverwendung oder Recycling zuzuführen. Die Einhaltung ist vom Betreiber über den Level(s)-Indikator 2.2 nachzuweisen</p> <p>ii) Für das errichtete Gebäude ist das Lebenszyklus-Treibhauspotenzial GWO für jede Lebenszyklusphase zu berechnen und auf Anfrage nachzuweisen</p> <p>iii) In der Planungs- und Ausführungsphase sind die Anpassbarkeit und Rückbaufähigkeit des Bauwerks gemäß Level(s) Indikator 2.3 und 2.4 zu berücksichtigen und auf Anfrage nachzuweisen</p> <p>iv) Von dem ursprünglichen Gebäude bleiben &gt; 50% erhalten.</p> <p>v) Der Einsatz von Primärrohstoffen ist durch die Verwendung von Sekundärrohstoffen zu begrenzen. Der Betreiber hat zu gewährleisten und mittels des Level(s)-Indikator 2.1 nachzuweisen, dass die drei schwersten verbauten Materialkategorien folgende max. Primärrohstoffanteil enthalten:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Beton, Naturwerkstein, Agglomeratstein ≤ 85% Primärrohstoffanteil</li> <li>• Ziegel, Fliesen, Keramik ≤ 85% Primärrohstoffanteil</li> <li>• Glas, Dämmstoffe aus Mineralwolle ≤ 85% Primärrohstoffanteil</li> <li>• Metalle ≤ 65% Primärrohstoffanteil</li> <li>• Gips ≤ 83% Primärrohstoffanteil</li> <li>• Biobasierter Kunststoff ≤ 90% Primärrohstoffanteil</li> <li>• Nicht biobasierte Kunststoffe ≤ 75% Primärrohstoffanteil</li> </ul> <p>Ist der Rezyklatanteil eines Bauproduktes nicht bekannt, so ist anzunehmen, dass dieses aus 100% Primärrohstoffen besteht.</p> <p>vi) Der Betreiber nutzt elektronische Werkzeuge zur Speicherung der verbauten Werkstoffe und Komponenten, sowie Informationen zur Wartung, Rückgewinnung und Wiedergewinnung über zum Beispiel Umweltproduktdeklarationen (EPDs)</p>	
<b>b) Vermeidung erheblicher Beeinträchtigungen</b>	
1) Klimaschutz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gebäude wird nicht zur Gewinnung, Lagerung, Beförderung oder Herstellung fossiler Brennstoffe genutzt</li> <li>• Der Primärenergiebedarf liegt unter dem Schwellenwert für Niedrigstenergiegebäude</li> </ul>
2) Anpassung an den Klimawandel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Tätigkeit erfüllt die Kriterien laut der Anlage A, Anhang II der EU-Verordnung 2023/2486</li> </ul>
3) Nachhaltige Nutzung und Schutz von Wasser- und Meeresressourcen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Für ausgewählte Sanitärgegenstände wie zum Beispiel Toiletten oder Duschen wird der Wasserverbrauch bestimmte Höchstwerte festgelegt und nachgewiesen</li> </ul>
5) Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baubestandteile und -stoffe erfüllen die Kriterien laut der Anlage C, Anhang II der EU-Verordnung 2023/2486</li> <li>• Neubauten auf potenziell schadstoffbelasteten Standorten müssen auf mögliche Schadstoffe untersucht werden</li> <li>• Lärm-, Staub-, und Schadstoffemissionen sind während der Errichtung und Wartung zu minimieren</li> </ul>
6) Schutz und Wiederherstellung der Biodiversität und der Ökosysteme	Keine Angaben

Tabelle 2.2: technisches Bewertungskriteriums „Baugewerbe und Immobilien – Renovierung“ für das Ziel „Übergang zur Kreislaufwirtschaft“ nach Anhang II der EU-Verordnung 2023/2486 (Europäische Kommission, 2023), (eigene Darstellung)

### 3. Baugewerbe und Immobilien – Abbruch von Gebäuden und anderen Bauwerken

Unter diese Tätigkeit fällt der Abriss von Gebäuden und anderen Bauwerken. Nicht enthalten sind Abrisse im Zuge der Tätigkeit „Sanierung schadstoffbelasteter Standorte und Gebiete.“

Technische Bewertungskriterien:

<b>a) Wesentlicher Beitrag zum Übergang zur Kreislaufwirtschaft:</b>	
i) Vor dem Abbruch sind aus dem Level(s)-Indikator 2.2 das Entwurfskonzept L1 mit dem Kunde abzustimmen.	
ii) Vor den Abbrucharbeiten hat der Betreiber ein vorgeschaltetes Audit durchzuführen.	
iii) Sämtliche Abbruchabfälle werden über die Bewirtschaftung von Bau- und Abbruchabfällen behandelt	
iv) Entstandene Bau- und Abbruchabfälle werden nach dem Abfallrecht der Union und durch Festlegung von Sortierungssystemen behandelt. >90 Prozent der auf der Baustelle entstandenen Bau- und Abbruchabfälle sind einer Wiederverwendung oder Recycling zuzuführen. Die Einhaltung ist vom Betreiber über den Level(s)-Indikator 2.2 nachzuweisen	
<b>b) Vermeidung erheblicher Beeinträchtigungen</b>	
1) Klimaschutz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Werden im Zuge der Renovierungs-, Umbau- oder Abrisstätigkeiten Schaumstoffplatten entfernt, so hat der Besitzer oder Auftragnehmer sicherzustellen, dass die Emissionen weitestgehend vermieden werden.</li> <li>• Ist eine Rückgewinnung der Schaumstoffe nicht möglich ist dies zu dokumentieren und 5 Jahre aufzubewahren</li> </ul>
2) Anpassung an den Klimawandel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Tätigkeit erfüllt die Kriterien laut der Anlage A, Anhang II der EU-Verordnung 2023/2486</li> </ul>
3) Nachhaltige Nutzung und Schutz von Wasser- und Meeresressourcen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Tätigkeit erfüllt die Kriterien laut der Anlage B, Anhang II der EU-Verordnung 2023/2486</li> </ul>
5) Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lärm-, Staub,- und Schadstoffemissionen sind während der Errichtung und Wartung zu minimieren</li> </ul>
6) Schutz und Wiederherstellung der Biodiversität und der Ökosysteme	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Tätigkeit erfüllt die Kriterien laut der Anlage D, Anhang II der EU-Verordnung 2023/2486</li> </ul>

Tabelle 2.3: technisches Bewertungskriteriums „Baugewerbe und Immobilien – Abbruch von Gebäuden und anderen Bauwerken“ für das Ziel „Übergang zur Kreislaufwirtschaft“ nach Anhang II der EU-Verordnung 2023/2486 (Europäische Kommission, 2023), (eigene Darstellung)

#### 4. Baugewerbe und Immobilien – Verwendung von Beton im Tiefbau

Unter diese Tätigkeit fällt der Einsatz von Beton in Neubauten, Wiederaufbau oder Wartung von Ingenieurbauwerken exklusive Betonbelägen aus Straßen, Autobahnen oder sonstigen Straßen, Brücken und Tunnel.

Technische Bewertungskriterien:

##### a) Wesentlicher Beitrag zum Übergang zur Kreislaufwirtschaft:

- i) Entstandene Bau- und Abbruchabfälle werden nach dem Abfallrecht der Union und durch Festlegung von Sortierungssystemen behandelt. >90 Prozent der auf der Baustelle entstandenen Bau- und Abbruchabfälle sind einer Wiederverwendung oder Recycling zuzuführen. Die Einhaltung ist vom Betreiber über den Level(s)-Indikator 2.2 nachzuweisen
- ii) In der Planungs- und Ausführungsphase sind die Anpassbarkeit und Rückbaufähigkeit des Bauwerks gemäß Level(s) Indikator 2.3 und 2.4 zu berücksichtigen und auf Anfrage nachzuweisen
- iii) Der Einsatz von Primärrohstoffen ist durch die Verwendung von Sekundärrohstoffen zu begrenzen. Der Betreiber hat zu gewährleisten und mittels des Level(s)-Indikator 2.1 nachzuweisen, dass der Primärrohstoffanteil des verbauten Betons höchstens 70% beträgt. Ist der Rezyklatanteil eines Bauproduktes nicht bekannt, so ist anzunehmen, dass dieses aus 100% Primärrohstoffen besteht.
- iv) Die Entfernung zwischen Baustelle und Sekundärrohstoffstätte muss geringer sein als die 2,5-fache Entfernung zur nächstgelegenen Primärrohstoffstätte
- v) Der Betreiber nutzt elektronische Werkzeuge zur Speicherung der verbauten Werkstoffe und Komponenten, sowie Informationen zur Wartung, Rückgewinnung und Wiedergewinnung über zum Beispiel Umweltproduktdeklarationen (EPDs)
- vi) Brücken, Tunnel, Deiche und Schleusen werden in regelmäßigen Intervallen von einem national zugelassenen Inspektor kontrolliert, um Instandhaltungsmaßnahmen zu planen.

##### b) Vermeidung erheblicher Beeinträchtigungen

1) Klimaschutz	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Anlage wird nicht zur Gewinnung, Lagerung, Beförderung oder Herstellung fossiler Brennstoffe genutzt</li> <li>• Der verwendete Beton überschreitet während der Produktion folgende Treibhausgasemissionen nicht:               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Grauzementklinker &lt; 0,816 t CO<sub>2</sub>-Aq/Tonne</li> <li>• Hydraulische Bindemittel &lt; 0,53 t CO<sub>2</sub>-Aq/Tonne</li> </ul> </li> </ul>
2) Anpassung an den Klimawandel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Tätigkeit erfüllt die Kriterien laut der Anlage A, Anhang II der EU-Verordnung 2023/2486</li> </ul>
3) Nachhaltige Nutzung und Schutz von Wasser- und Meeresressourcen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Tätigkeit erfüllt die Kriterien laut der Anlage B, Anhang II der EU-Verordnung 2023/2486</li> </ul>
5) Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Tätigkeit erfüllt die Kriterien laut der Anlage C, Anhang II der EU-Verordnung 2023/2486</li> <li>• Neubauten auf potenziell schadstoffbelasteten Standorten müssen auf mögliche Schadstoffe untersucht werden</li> <li>• Lärm-, Staub,- und Schadstoffemissionen sind während der Errichtung und Wartung zu minimieren</li> </ul>
6) Schutz und Wiederherstellung der Biodiversität und der Ökosysteme	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Die Tätigkeit erfüllt die Kriterien laut der Anlage D, Anhang II der EU-Verordnung 2023/2486</li> <li>• Die Tätigkeit hat keinen Einfluss auf Natura-2000-Gebiete in der EU</li> </ul>

Tabelle 2.4: technisches Bewertungskriteriums „Baugewerbe und Immobilien – Verwendung von Beton im Tiefbau“ für das Ziel „Übergang zur Kreislaufwirtschaft“ nach Anhang II der EU-Verordnung 2023/2486 (Europäische Kommission, 2023), (eigene Darstellung)

## 2.3 Umsetzung in Österreich

Österreich hat wie sämtliche Mitgliedsstaaten der Europäischen Union die Umorientierung der kritischen Sektoren hin zur Kreislaufwirtschaft für die Erreichung der europäischen Klimaziele mitzutragen. Auch hier wird in dieser Diplomarbeit der Fokus auf die Umsetzung der europäischen Vorgaben im Bausektor gelegt. Dazu wurden folgende Projekte und Leitdokumente herangezogen:

- KreislaufBAUwirtschaft (Achatz, Margelik, Romm, Kasper, & Jäger, 2021)
- Die österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie (BMK – Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2022)
- Die österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie – Fortschrittsbericht Juli 2024 (BMK – Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2024)

### 2.3.1 KreislaufBAUwirtschaft

Im Jahre 2021 wurde vom Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) der Endbericht zum Projekt KreislaufBAUwirtschaft veröffentlicht. Im Zuge dieses Projektes wurden Expertengespräche mit sieben unterschiedlichen Stakeholder-Gruppen aus der Branche geführt, um die entscheidenden Hürden als auch Hebel der Kreislaufwirtschaft im Bausektor für jede Lebenszyklusphase eines Gebäudes zu identifizieren. In der Abb. 2.2 sind die Schlüsselbereiche für die Umsetzung des Bauwesens in Österreich dargestellt (Achatz, Margelik, Romm, Kasper, & Jäger, 2021):



Abb. 2.2: Schlüsselbereiche für die Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft im österreichischen Bauwesen

Diese Schlüsselbereiche wurden zu Kernaussagen für jede Lebenszyklusphase eines Gebäudes eingearbeitet, um so die entscheidenden Hebel zur Umsetzung der Kreislaufwirtschaft als auch die Hürden zu identifizieren. Die Ergebnisse dieses Projektes sind in der Tabelle 2.5 bis Tabelle 2.6 gegliedert und nach den Lebenszyklusphasen laut ÖNORM EN 15643 dargestellt (Austrian Standards International, 2021) (Achatz, Margelik, Romm, Kasper, & Jäger, 2021):

LEBENSZYKLUSPHASE	HÜRDEN	ERKLÄRUNG
A0. Planung	Kosten & Wirtschaftlichkeit	Bauherr nicht zwingend Eigentümer, daher Errichtungskosten wichtiger eingestuft als Lebenszykluskosten Kreislauffähige Planung kostspieliger
	Vorbehalte gegenüber Recyclingprodukten	Wissenslücke, dass die Verantwortung der Sekundärrohstoffqualität bei Aufbereiter und nicht bei Bauherrn liegt
	Auflagen bei Wohnbauförderung	kompliziertere Anforderungen bei Wohnbauförderung und Mangel an Kontrollmöglichkeiten
A4-5. Errichtung	Rechtliche Definition Baustelle	erschwert gemeinschaftliche Nutzung von Baustelleneinrichtungen
	Bau- und Abbruchabfälle	Baustellenabfälle werden erst bei Sortieranlagen getrennt und kumulieren so Transportwege mit steigender Anzahl an Subunternehmern sinkt meist die Abfalltrennung
B1-3. Instandhaltung und Betrieb	Mangelnde Wartung und Wartungsmöglichkeiten	mangelnde Wartung verkürzt Nutzungsdauer fehlende Wartungsmöglichkeiten verkürzen Nutzungsdauer
	Mangelnde Instandhaltungs- und Wartungspläne	Bauherr meist nicht Endnutzer, daher fehlt es meist an einer Wartungs- und Instandhaltungsplanung
B4-5. Sanierung und Umnutzung	Informationslage Kosten	Meist die Annahme, dass ein Umbau beziehungsweise Sanierung teurer als Neubau ist, da schwieriger einzuschätzen
	Gesellschaftlicher Wandel mindert Umnutzung	ein gesellschaftlicher Wandel ändert die Anforderungen an den Wohnraum, was eine Umnutzung von Bestandsgebäuden erschwert
C. Rückbau	fehlende Dokumentationspflicht von Bauteilen	durch eine fehlende gesetzliche Verpflichtung zur Dokumentation von Bauteilen für eine Wiederverwendung meist niederes End-of-Life Szenario
	Aufwendige Aufbereitungsverfahren	aufwendige Aufbereitungsverfahren führen meist wirtschaftlich bedingt zu niedrigerem End-of-Life Szenario
	Erschwerte Rückgewinnung durch Informationsmangel	auf Grund fehlender Dokumentation verbauter Materialqualitäten und Mengen kommt es zu einer erschwerten Rückgewinnung
	Verbundstoffe	Verbundstoffe erschweren sortenreine Rückgewinnung und damit Recycling
	veraltete Standards	wiedergewonnene Bauteile entsprechen oft nicht aktuellen Standards was Re-Use gesetzlich unmöglich macht

Tabelle 2.5: Kernaussagen zu den Hürden der Kreislaufwirtschaft im Bausektor nach Lebenszyklusphasen (Achatz, Margelik, Romm, Kasper, & Jäger, 2021), (eigene Darstellung)

LEBENSZYKLUSPHASE	HEBEL	ERKLÄRUNG
<b>A0. Planung</b>	Integrale Planung und Gebäude-Materialpass	Festlegung eines Mindestanteils an Sekundärrohstoffen in öffentlichen Ausschreibungen
		Einführung einer Tonnenkilometerbeschränkungen zur Reduktion von Transportwegen
	Inklusion Ressourcenschonung, Rückbaubarkeit & Lebensdauererlängerung in der Planung	Fokus auf Langlebigkeit und Wiederverwendbarkeit bei der Materialwahl
		Einführung einer Re-Use-Potenzialanalyse bei Abbruch-/Sanierungsprojekten
		Trennbarkeit von Verbindungen praxisingerecht gestalten
		Abgabe eines Nachnutzungskonzeptes bei Baueinreichungen
	Digitale Unterstützung einer integralen Planung	Nutzung von BIM Programmen zur Optimierung des Materialeinsatzes, Transport von Umweltparametern von Bauprodukten und Schaffung einer Grundlage für einen Gebäude-Materialpasses
	Schaffung Rahmenbedingungen für Kreislaufwirtschaft	Schaffung neuer Richtlinien wie zum Beispiel einer OIB 7
		Aufnahme von kreislaufwirtschaftlichen Kriterien bei der Wohnbauförderung
		Sanierung gegenüber Neubau durch Förderungen attraktiver gestalten
		Umsetzung der EU-Taxonomie-Verordnung
Kreislaufwirtschaftliche Bilanzierung bei der Umweltverträglichkeitserklärung		
Definition eines Sekundärrohstoffanteils in Bauprodukten		
Rücknahmeverpflichtung des Herstellers von Verschnitt		
Bauherr ist Abfallbesitzer bis zur ordnungsgemäßen Verwertung beziehungsweise bis zum Abfallende		
Gesamtheitliche Lebenszyklusanalyse in der Planungsphase	Die Wirtschaftlichkeit sollte LCA basiert sein	
<b>A4-5. Errichtung</b>	Optimierung von Stoffströmen	Reduzierung von Transportwegen durch zum Beispiel vor Ort Verwertung von Aushub mittels mobilen Aufbereitungsanlagen

	Verschnitt-Rücknahme durch Hersteller	Restmaterial wieder in Produktion eingegliedert - Erhöhung des Sekundärrohstoffanteils
	Gesetzliche Definition von Zertifizierungsstandards	Erleichterung von Fördermittelbewilligungen durch Schaffung von Standards hinsichtlich Zertifizierungen
<b>B1-3. Instandhaltung und Betrieb</b>	Überarbeitung der normierten Instandhaltung	Aufnahme der materiellen Einflussfaktoren nach DIN ISO 15686 in der normierten Instandhaltung
	Wartbarkeit erhöhen	Wartbare Konstruktionen einsetzen
		Wartungszyklen von Bauteilen einführen, ähnlich Fenster
BIM	Building Information Modeling zur Planung der Instandhaltung nutzen	
<b>B4-5. Sanierung und Umnutzung</b>	Erhöhung der Nutzungsdauer	Anpassung der Tragwerksbemessung zur Verlängerung der Nutzungsdauer auf mehr als 50 Jahre
		Anpassung der Widmung hinsichtlich Raumhöhen, um Nutzungsdauer und -flexibilität zu erhöhen
	Beschaffenheit von Konstruktionen und Bauprodukten	diese sollen so beschaffen sein, dass sie einfach und wirtschaftlich saniert werden können
<b>C. Rückbau</b>	Urban Mining	Verknüpfung von Stoffströmen aus Rückbauten bei neuen Bauvorhaben
	Schad- und Störstofferkundungen	Einführung höherer Standards und Kontrollen bei Schad- und Störstofferkundungen
	Entschärfung der Gewährleistungsthematik	Einführung von einfachen Prüfverfahren zur Minimierung von Gewährleistungsthemen beim Re-Use
	Verpflichtender Materialpass	Schaffung eines Materialkatasters für Urban Mining
Sicherstellung entsprechender End-of-Life Szenarien von Materialien		

Tabelle 2.6: Kernaussagen zu den Hebeln der Kreislaufwirtschaft im Bausektor nach Lebenszyklusphasen (Achatz, Margelik, Romm, Kasper, & Jäger, 2021), (eigene Darstellung)

Wie im Projekt KreislaufBAUwirtschaft als Hürde angeführt, braucht es eine Aufnahme der Ressourcenschonung in entsprechenden Normenwerken. Hier würde sich das Österreichische Institut für Bautechnik, die OIB, anbieten. Dieses hat bereits die Grundanforderungen 1 bis 6 für Bauwerke der Europäischen Bauprodukte-Verordnung in entsprechende OIB-Richtlinien aufgenommen. Die OIB-Richtlinien wurden wiederum von den Bundesländern zum Großteil in die jeweiligen Bauordnungen aufgenommen. Die Grundanforderung 7 der Europäischen Bauprodukte-Verordnung beschreibt die nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen und verlangt, dass Gebäude so geplant, gebaut und abgebrochen werden müssen, um natürliche Ressourcen nachhaltig zu nutzen. Das OIB veröffentlichte dazu im Jahre 2023 ein Grundlagendokument zur Ausarbeitung dieser neuen OIB-Richtlinie 7 (OIB - Österreichisches Institut für Bautechnik, 2023). Dabei wird auf die sich

aktuell rasch veränderlichen Vorgaben zur Nachhaltigkeit hingewiesen. Die in Kapitel 2.2 beschriebenen Europäischen Rahmenbedingungen werden dabei in die OIB 7 mit einfließen. Der Umgang mit Bau- und Abbruchabfälle soll ebenfalls überdacht werden. Aktuell ist der Umgang mit Abfällen in diversen bundesrechtlichen Gesetzen und Verordnungen festgehalten. Dazu zählen etwa das Abfallwirtschaftsgesetz, die Recycling-Baustoffverordnung als auch der Bundes-Abfallwirtschaftsplan aus dem Jahr 2023. Jedoch braucht es für Bau- und Abbruchabfälle zusätzliche Regelungen, um Themen wie Wiederverwendung und hochwertiges Recycling voranzubringen. Es braucht zusätzliche Vorgaben zur Schad- und Störstoffbeseitigung und Trennbarkeit von Materialien (OIB - Österreichisches Institut für Bautechnik, 2023).

Als eines der Kernthemen der OIB-Richtlinie 7 wird die Berechnung des Treibhauspotenzials über den gesamten Lebenszyklus, kurz GWP genannt, eines Bauwerks angeführt. Als relevante Bezugsgröße und Zeiteinheit des GWPs wird [kg CO<sup>2</sup>-Äq pro m<sup>2</sup> und Jahr] angegeben. Eine Grundvoraussetzung für eine qualitative Bewertung des GWP werden die verbauten Ressourcen inklusive deren Materialmengen sowie produktspezifischen Daten hinsichtlich GWP sein (OIB - Österreichisches Institut für Bautechnik, 2023). Dadurch wird die Dokumentation von verbauten Materialien und Ressourcen inklusive deren Mengen in Form von Materialpässen an Bedeutung gewinnen.

### 2.3.2 Die österreichische Kreislaufstrategie

Im Jahr 2022 folgte vom Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) die österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie. In dieser werden die langfristigen Ziele der Bundesregierung zur Umsetzung einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft bis zum Jahr 2050 und Klimaneutralität bis 2040 gesetzt. Die Kreislaufwirtschaftsstrategie Österreichs versteht sich dabei als Orientierungspaket, welches Ansatzpunkte zum Wandel kritischer Industriezweige, unter anderem die Bauwirtschaft und Infrastruktur, hin zu einer kreislauforientierten Wirtschaft liefert. Die Grundsätze entsprechen dabei jenen der Europäischen Kommission, welche im Kapitel 2.2 beschrieben wurden.

Als Kontrollmechanismus zur Einhaltung dieser Grundsätze und Ziele soll ein geeignetes Monitoringsystem eingeführt werden. Entscheidende Monitoring-Prozesse sollen geschaffen werden. Aber zu den Kernaufgaben wird die Überwachung von konsumbasierten Stoffströmen und eine Neuevaluierung der Kreislaufwirtschaftsstrategie im 5 Jahresrhythmus gehören. Hemmende rechtliche Barrieren sollen in Zusammenarbeit von Politik, Behörden und Unternehmen identifiziert werden und zumindest entschärft werden. Die Kriterien betreffend des Abfallendes gehören festgelegt und in Richtung Sekundärrohstoffnutzung weiterentwickelt. Um Standards für kreislauforientierte Materialien, Prozesse, Methoden und Daten zu etablieren, gehören entsprechende Normen weiterentwickelt beziehungsweise neu geschaffen. Auch Marktbedingungen gehören mit neuen Marktanreizen in Richtung Kreislaufwirtschaft orientiert. Hier soll die CO<sub>2</sub>-Bepreisung und eine erweiterte Produzentenverantwortung eine Rolle spielen (BMK – Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2022).

Für die Branche „Bauwesen und Gebäude“ wurden folgende Ziele festgelegt (BMK – Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2022):

1. Planung kreislauforientierter Gebäude bezogen auf alle Lebenszyklusphasen mit dem Fokus auf:
  - Langlebigkeit & Nutzungsflexibilität
  - Reduktion der Wartungsaufwandes durch Nutzung von zum Beispiel Lowtech-Anwendungen
  - Trennbarkeit & modulare Bauweise

- Wiederverwendbarkeit von Bauteilen
  - Rezyklierbarkeit verwendeter Baustoffe
  - Erhöhung Sekundärrohstoffanteils und nachhaltiger Baustoffe
2. Verlängerung der Nutzungsdauer bestehender Gebäude durch Wartung und Sanierung. Bei der Sanierung sollen neben der Verbesserung der Energieeffizienz auch die Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen, die Trennbarkeit und Wiederverwendbarkeit von Bauteilen als auch die vermehrte Verwendung von Sekundärrohstoffen und nachhaltigen Baustoffen fokussiert werden.
3. Erhöhung der stofflichen Verwertung von Bodenaushubmaterial sowie Bau- und Abbruchabfälle unter Berücksichtigung ökologischer und ökonomischer Faktoren. Erreicht werden soll dies mittels:
- Materialtrennungsoptimierung bei Rückbau- und Abbruchprojekten
  - Verwertungsorientierter Rückbau
  - Eliminierung von Schadstoffen aus dem Kreislauf
  - Entwicklung neuer Verwertungstechnologien und Schaffung neuer Geschäftsmodelle

Zur Erreichung der gesteckten Ziele für die Baubranche wurden folgende Maßnahmen definiert (BMK – Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2022):

A. Förderung ressourcenschonender und zirkulärer Bauweisen durch:

- Erarbeitung einer OIB-Richtlinie oder ÖNORM, welche die Grundanforderung 7 der Europäischen Bauprodukteverordnung in Österreich standardisiert
- Steigerung der Materialeffizienz beziehungsweise Minimierung eingesetzter Baustoffmengen
- Gebäudeplanung mit Fokus auf Trennbarkeit und Demontage sowie hoher Nutzungsflexibilität in der Konstruktion
- Vermeidung von Verbundbaustoffen, außer sie haben eine nachgewiesene Kreislauffähigkeit

B. Nachhaltige Beschaffung im Hoch- und Tiefbau umsetzen durch:

- Anwendung des Nationalen Aktionsplans für eine nachhaltige öffentliche Beschaffung (naBe-Aktionsplan)
- Förderung der naBe-Kriterien durch Verankerung in der Vergabe von Wohnbauförderungen
- Verpflichtende Erstellung von Rückbaukonzepten bei Neubauten

C. Verlängerung der Nutzungsdauer von Gebäuden und Bauprodukten durch:

- Einführung einer Bewilligungspflicht von Rückbau- und Abbruchprojekten von Gebäuden
- Begünstigung einer Sanierung über Neubau
- Abgabe eines multifunktionalen (Nach-)Nutzungskonzeptes bei der Baubewilligungseinreichung

D. Unterstützung von Wiederverwendung, Recycling und stofflicher Verwertung durch:

- Erstellung eines Rechtsrahmens für die Wiederverwendung von Bauteilen – Voraussetzung dafür ist die Anpassung der EU-Bauprodukteverordnung hinsichtlich CE-Zertifizierung und Haftungsrecht
- Schließung stofflicher Verwertungskreisläufe durch Anpassung rechtlicher Maßnahmen insofern diese ökologisch und ökonomisch vertretbar sind
- Implementierung eines Mindestanteils an Recyclingbaustoffen und Sekundärrohstoffen in ausgewählten Produkten
- Nutzung von Building Information Modeling (BIM) zur Erfassung von Materialdaten über den gesamten Lebenszyklus
- Aufbau eines Marktplatzes für wiederverwendete Bauteile mit Inklusion von zukünftig zur Verfügung stehender Bauteile durch digitale Gebäudematerialpässe

### 2.3.3 Die österreichische Kreislaufstrategie – 1. Fortschrittsbericht 2024

Im Sommer des Jahr 2024 wurde der erste Fortschrittsbericht zur österreichischen Kreislaufwirtschaftsstrategie veröffentlicht. In diesem wurde der aktuelle Stand bei der Erreichung von den gesteckten Zielen in den Schlüsselsektoren aufgelistet.

Als neue Monitoring Maßnahme wurde im Juli 2024 die „Task Force Circular Economy“ geschaffen, welche die Politik bei der Umsetzung der Kreislaufwirtschaftsstrategie mit Handlungsempfehlungen und Prioritätssetzungen unterstützen soll. Der Zugang zu Sekundärrohstoffen wurde mit der Abfallwirtschaftsgesetz-Novelle Ende 2021 vereinfacht. Für einen erleichterten Informationsaustausch und -zugang zum Thema Kreislaufwirtschaft wurde das „Circularity im Climate Lab“ als Vernetzungsort eingerichtet (BMK – Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2024).

Als eines der quantitativen Ziele dieses Berichts wurde neben der Senkung des Materialfußabdrucks und der Steigerung der inländischen Ressourcenproduktivität, auch die Steigerung der zirkulären Nutzungsrate wiederverwendbarer Stoffe definiert. Diese Nutzungsrate soll gemessen am gesamten Materialeinsatz Österreichs im Jahr 2030 18 Prozent betragen. Entsprechende Daten zu den Stoffströmen liefert dabei Eurostat. Die Zirkulationsrate Österreichs nimmt laut der Statistik seit dem Jahr 2020 stetig zu und liegt im Jahr 2022 bei 13,8%, siehe Abb. 2.3 (BMK – Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2024).

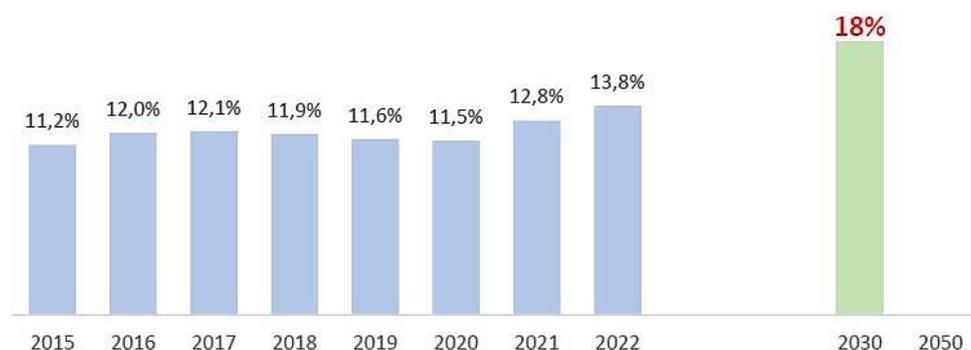


Abb. 2.3: Österreichs prozentuale zirkuläre Nutzungsrate wiederverwendeter Stoffe gemessen am gesamten Materialeinsatz laut Eurostat

Im Jahr 2022 lag Österreich damit im Vergleich zu anderen europäischen Mitgliedsstaaten auf Platz 7. Aus dem Fortschrittsbericht wird an dieser Stelle jedoch nicht zwischen den Schlüsselsektoren differenziert, daher kann der Anteil des Bausektors an der zirkulären Nutzungsrate für das Jahr 2022 nicht herausgefiltert werden.

Für den Bausektor wurden Umsetzungsaktivitäten und -projekte zu den vier Maßnahmen A-D laut Kapitel 2.3.2 angeführt. Dazu zählen unter anderem (BMK – Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2024):

- Aktionsplan & Kernkriterien für die Beschaffung nachhaltiger Produkte und Leistungen, kurz naBe, vom Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie
- die Studie KreislaufBAUwirtschaft, siehe Kapitel 2.3.1 (Achatz, Margelik, Romm, Kasper, & Jäger, 2021)
- Mustertexte für Leistungsverzeichnisse Social Urban Mining von der Plattform BauKarussell
- Projekt Kreislaufwirtschaft im Bauwesen Wien, siehe: <https://viecycle.wien.gv.at/hintergrund>
- u.v.m

## 3 Zirkularitätsbewertung – Methodische Unterschiede

### 3.1 Zirkularität in der Gebäudezertifizierung

Je nach Betrachtungsweise müssen nachhaltige Bauwerke unterschiedliche Bedürfnisse abdecken. So sind für die Eigennutzer:innen eines Gebäudes der Komfort, die Langlebigkeit der Materialien und der geringe Energiebedarf zentral. Für die Projektentwickler:innen ist jedoch die gesteigerte Nachfrage relevant, für den Rentenfond die langfristig nachhaltige Anlage des Fondsvermögens.

Die Gebäudezertifizierung setzt genau hier an und zielt auf einem ganzheitlichen Nachhaltigkeitsverständnis ab. Dabei werden neben den Umweltauswirkungen auch die Auswirkungen auf den Menschen und die Wirtschaftlichkeit berücksichtigt. Die Betrachtung erfolgt über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes. Das bedeutet, dass neben dem Bauprozess und der Nutzung des Gebäudes auch Planungsprozesse miteinfließen.

Das Ziel der Gebäudezertifizierung ist es, dem Planer, Bauherrn und Nutzer eines Projektes eine Möglichkeit zu bieten, fundierte Entscheidungen hinsichtlich der Nachhaltigkeit zu treffen.

Durch die Zertifizierung kann in jeder Projektphase eine Bewertung der umweltbezogenen, ökonomischen und sozialen Qualitäten erfolgen. Dabei werden die Funktionalität, technische Merkmale und Eigenschaften eines Bauwerks berücksichtigt (Austrian Standards International, 2021).

#### 3.1.1 Grundlagen der Gebäudezertifizierung

Die Nachhaltigkeit eines Bauwerks gliedert sich anhand dreier Grundsäulen, dem 3-Säulen-Modell (Austrian Standards International, 2021):

1. Ökologie
2. Ökonomie
3. Soziales

Diese Grundsäulen bilden die Basis der Gebäudezertifizierung und fließen in Form von Aspekten und Anforderung für genau diese drei Qualitäten ein. Es werden dabei jene Aspekte und Auswirkungen berücksichtigt, die mittels quantitativer Indikatoren angegeben werden können. Da jedoch auch technische und funktionale Eigenschaften im Zusammenhang mit den oben genannten Qualitäten stehen, sind diese ebenfalls eine Voraussetzung für die Bewertung der Nachhaltigkeit eines Bauwerks und fließen in Form des funktionalen Äquivalents in die Bewertung mit ein (Austrian Standards International, 2022).

Bei einer Gebäudezertifizierung müssen im Vorfeld klare Systemgrenzen definiert werden, um die Vergleichbarkeit eines nachhaltigen Bauwerks beziehungsweise Bauteils möglich zu machen. Abhängig vom Anwendungsbereich der Bewertung können somit diese drei Säulen auch getrennt bewertet werden. Um eine Zusammenführung der Ergebnisse jedoch gewährleisten zu können, müssen das funktionale Äquivalent und die Systemgrenzen der jeweiligen Qualitäten des bewerteten Systems übereinstimmen und sollten nicht geändert werden (Austrian Standards International, 2021).

In Abb. 3.1 ist dargestellt, wie der Ablauf des Bewertungsprozesses bei einer Gebäudezertifizierung aussieht (Austrian Standards International, 2022).

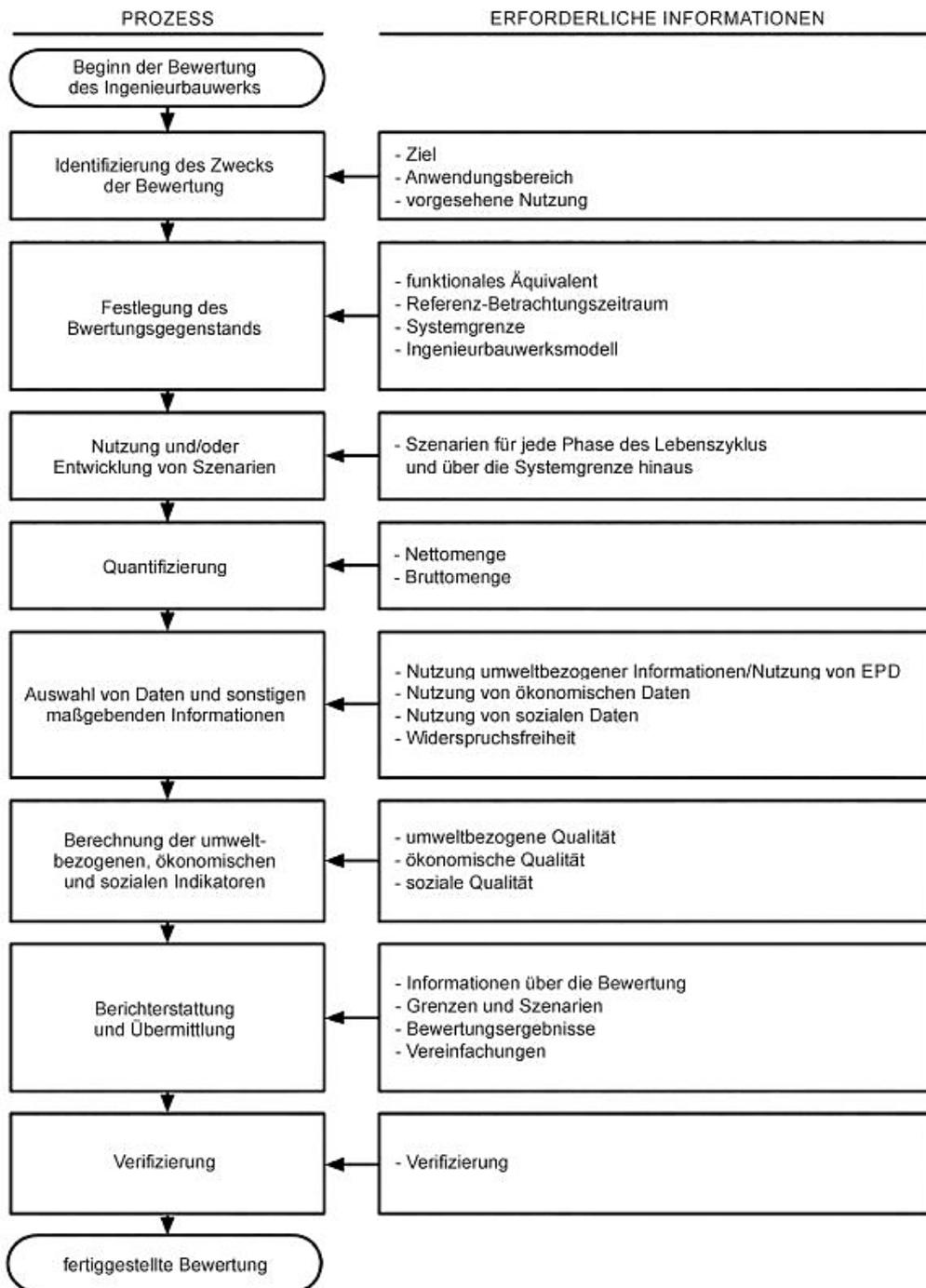


Abb. 3.1: Schritte des Bewertungsprozesses (Austrian Standards International, 2022)

### 3.1.2 Systemgrenzen

Die Systemgrenzen legen fest, welche Prozesse im Zertifizierungsgegenstand berücksichtigt werden müssen. Dies erfolgt in Abstimmung mit dem spezifischen Zweck der Bewertung, welcher wiederum klar definiert sein muss und hat zu beinhalten (Austrian Standards International, 2022):

- den Verwendungszweck (zum Beispiel als Hilfsmittel im Entscheidungsfindungsprozess, als Unterstützung bei der Strategieentwicklung etc.)
- den Anwendungsbereich (zum Beispiel nur Teile eines Gebäudes, einzelne Komponenten etc.)

Die Systemgrenze eines Gebäudes schließt dabei neben dem Gebäude auch den Standort und alle vor- sowie nachlaufenden Prozesse mit ein, welche zur Errichtung und Aufrechterhaltung der geplanten Nutzung des Gebäudes notwendig sind (Austrian Standards International, 2024). Bei Neuerrichtung eines Bauwerks muss die Systemgrenze alle Informationsmodule, siehe Abb. 3.2 des Lebenszyklus enthalten.

Um über das Potenzial einer Nachnutzung nach einer Gebäudemodernisierung zu entscheiden, ist bei der Bewertung eines Bestandsgebäudes die Tabelle 3.1 maßgebend. In dieser geht hervor, wie Bauteile oder Baustoffe in den jeweiligen Lebenszyklusphasen berücksichtigt werden müssen (Austrian Standards International, 2024).

Phase/Modul	Neu eingebaute Bauteile / Baustoffe in Bewertung aufzunehmen	Vor Ort erhaltene Bauteile / Baustoffe in Bewertung aufzunehmen
<b>A1-A5</b>	Ja	Nein
<b>B1-B7</b>	Ja	Ja
<b>C1-C4</b>	Ja	Sollte berücksichtigt werden – im Falle eines Ausschusses muss dieser begründet werden.
<b>D</b>	Ja	Ja

Tabelle 3.1: Bewertung von Bestandsgebäuden – Berücksichtigung von Bauteilen in Lebenszyklusphasen (Austrian Standards International, 2024), (eigene Darstellung)

### 3.1.3 Funktionales Äquivalent

Da die technischen Merkmale und Eigenschaften als auch die Funktionalität eines Bauwerks stark variieren können, was wiederum einen deutlichen Einfluss auf das Bewertungsergebnis und die Vergleichbarkeit der Gebäudezertifizierung hat, muss im Vorfeld einer jeden Bewertung das funktionale Äquivalent definiert werden. Dieses muss zumindest die Anforderungen aus dem Lastenheft der Auftraggeber:in umfassen und sollte lt. der ÖNORM EN 15643 zumindest folgende Informationen abdecken (Austrian Standards International, 2021):

- Art des Bauwerks (z. B. Gebäude, Damm, Straße, Flughafen usw.);
- Primärfunktion des Bauwerks (z. B. Wohnhaus, Bürogebäude, Bildungseinrichtung, Energieversorgung, Transport, Wasserversorgung, Verteidigung usw.);
- Relevante technische und funktionale Anforderungen (z.B. gesetzliche Rahmenbedingen und besondere Anforderungen des Auftraggebers
- Betrachtungszeitraum (Lebenszyklusphase, geforderte Nutzungsdauer)

### 3.1.4 Der Betrachtungszeitraum

Eine weitere Grundvoraussetzung zur Durchführung der Gebäudezertifizierung ist die Lebenszyklus-Betrachtung eines Bauwerks und die damit einhergehenden Auswirkungen auf die Aspekte und Anforderungen der unterschiedlichen Qualitäten. Diese können wiederum auf den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes betrachtet werden oder bei der Angabe der Systemgrenzen auf einen bestimmten Betrachtungszeitraum eingegrenzt werden. Der Lebenszyklus wird dabei in 4 unterschiedliche Phasen unterteilt und gliedert sich gemäß der ÖNORM EN 15643 in die Module A bis D, welche sich wiederum in unterschiedliche Abschnitte gliedern. Dargestellt ist dies in Abb. 3.2 (Austrian Standards International, 2021):

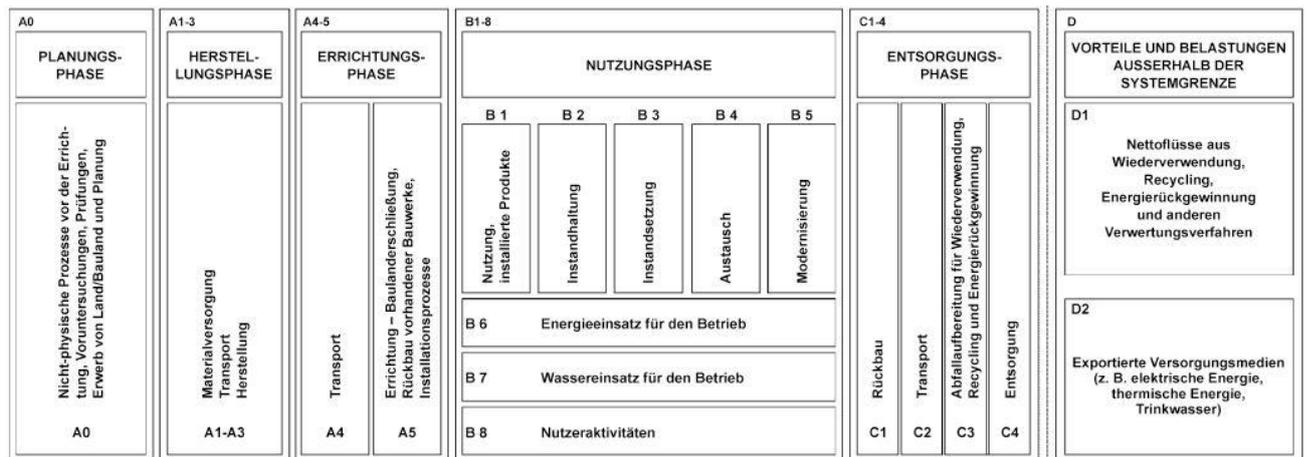


Abb. 3.2: Informationsmodule lt. ÖNORM EN 15643

Je nach Betrachtungszeitraum müssen die Werte der Indikatoren der ökologischen und sozialen Qualitäten für die Module B1-B8 der Nutzungsphase sowie die Module D1-D2 der ausgewiesenen Vorteile und Belastungen angepasst werden. Die Werte der Aspekte und Auswirkungen werden dabei mit dem Verhältnis aus Betrachtungszeitraum zur geforderten Nutzungsdauer multipliziert. In der Abb. 3.3 ist das Verhältnis zwischen Betrachtungszeitraum und geforderter Nutzungsdauer dargestellt (Austrian Standards International, 2022).

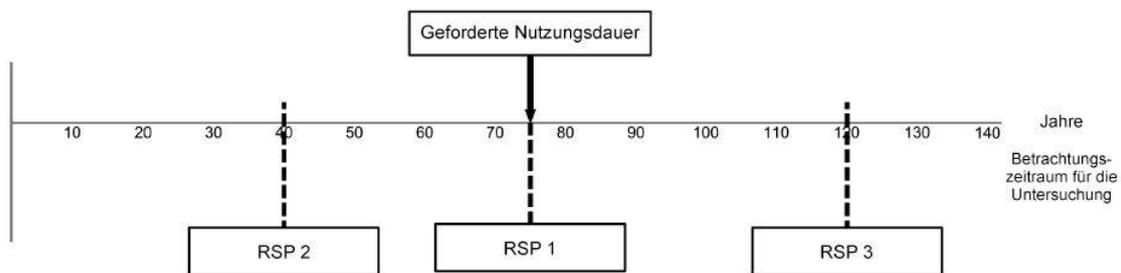


Abb. 3.3: Betrachtungszeitraum im Verhältnis zur geforderten Nutzungsdauer des Bewertungsgegenstandes (Austrian Standards International, 2022)

- Fall RSP 1 – der Betrachtungszeitraum entspricht der geforderten Nutzungsdauer
- Fall RSP 2 – der Betrachtungszeitraum ist kürzer als die geforderte Nutzungsdauer und die Aspekte und Auswirkungen von Model B und D sind zu reduzieren
- Fall RSP 3 – der Betrachtungszeitraum ist größer als die geforderte Nutzungsdauer und die Aspekte und Auswirkungen von Model B und D sind zu erhöhen

Falls weder die Auftraggeber:in noch der Gesetzgeber eine geforderte Nutzungsdauer festgelegt hat, kann die voraussichtliche Nutzungsdauer verwendet werden. Als Nutzungsdauer von Gebäuden versteht man eine geschätzte Zeitspanne, in welcher das jeweilige Gebäude für dessen vorgesehenen Zweck genutzt werden kann. Die Nutzungsdauer ist dabei von unterschiedlichen Faktoren abhängig, wie etwa der Bauart, der Qualität der zum Einsatz kommenden Materialien, dem Umgebungsklima und -bedingungen, als auch von der Art und Intensität der Nutzung. Als Ende des Betrachtungszeitraumes gilt im Allgemeinen die vollständige Beseitigung des Gebäudes (Austrian Standards International, 2022).

## 3.2 Zirkularitätsindizes – Messung des Kreislaufpotenzials von Gebäuden

Neben der Gebäudezertifizierung, welche sich auf die Nachhaltigkeit eines Bauwerks konzentriert und durch diverse Normen reguliert ist, wird die Messung des Kreislaufpotenzials eines Gebäudes in Zukunft eine wichtige Rolle in der Transformation der Baubranche hin zur Kreislaufwirtschaft spielen. Die zirkulären Eigenschaften eines Gebäudes finden in der Gebäudezertifizierung durch die Betrachtung der Rückbau- und Recyclingfähigkeit in qualitativer Form zwar Berücksichtigung, eine quantitative Messmethode des Kreislaufpotenzials ist aber nicht das Ziel. Daher wurden für die Nachhaltigkeitsbewertung eines Gebäudes mit Fokus Zirkularität Zirkularitätsbewertungssysteme geschaffen. In diesem Kapitel werden die Grundlagen der Zirkularitätsbewertung genauer betrachtet.

### 3.2.1 Grundlagen der Zirkularitätsbewertung:

Mit der im Mai 2024 veröffentlichten ISO-Norm 59020:2024 wurde ein Regelwerk zur Messung und Bewertung der Zirkularität von bestehenden Wirtschaftsleistungen herausgegeben. Diese soll gemeinsam mit den Normen ISO 59004 und ISO 59010 eine Sammlung an Regelwerken bilden, welche eine Transformation der bestehenden linearen Wirtschaft zu einer kreislaforientierten Wirtschaft bewirken (ISO - Internationale Organisation für Normung, 2024). Da für die Zirkularitätsbewertung die Norm ISO 59020 maßgebend ist, wird der Fokus in dieser Arbeit auf die Regulierungen dieser Norm gelegt und wo notwendig auf andere Normen verwiesen. Die Zirkularitätsbewertung hat zur Aufgabe, die Zirkularitätsrate beziehungsweise das Kreislaufpotenzial einer Wirtschaftsleistung zu messen. Dabei sind die Grundprinzipien der Kreislaufwirtschaft die Basis dieser Bewertungsmethode. Die Grundprinzipien sind laut der ISO 59004 wie folgt definiert (ISO - Internationale Organisation für Normung, 2024):

1. Systemdenken – Betrachtung von Wirtschaftsleistungen über den gesamten Lebenszyklus
2. Wertschöpfung – vorhandene Ressourcen müssen effektiv genutzt und erhalten werden
3. Informationsbereitstellung – Bereitstellung relevanter Informationen über die gesamte Wertschöpfungskette einer Wirtschaftsleistung
4. Ressourcenverwaltung – Stoffströme müssen aus nachhaltigen Quellen bezogen werden und durch das Schließen beziehungsweise Verengen von Stoffströmen für künftige Generationen erhalten werden
5. Ressourcenverfolgung – sämtliche Ressourcen einer Wertschöpfungskette sind zu dokumentieren und für den Informationsaustausch bereitzustellen
6. Schutz der Widerstandsfähigkeit des Ökosystems

Der Ablauf einer Zirkularitätsbewertung ist laut ISO 59020 wie folgt definiert:

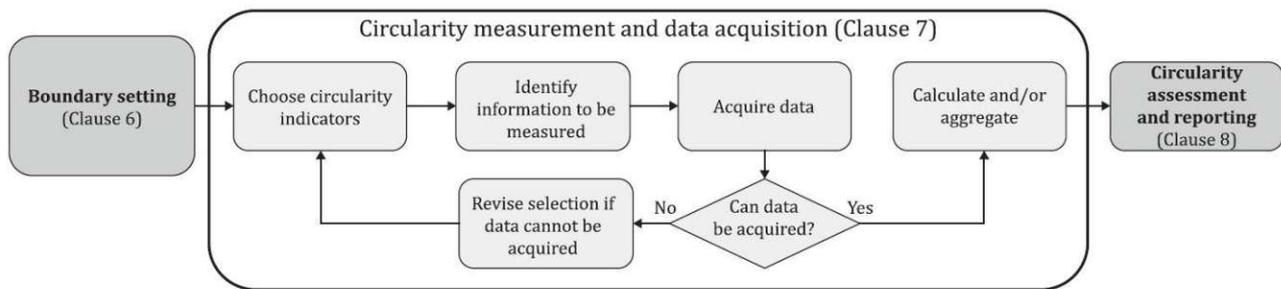


Abb. 3.4: Ablauf einer Zirkularitätsbewertung laut ISO 59020

### 3.2.2 Systemgrenzen bei der Zirkularitätsbewertung

Ähnlich wie bei der Gebäudezertifizierung braucht auch die Zirkularitätsbewertung definierte Systemgrenzen, um eine aussagekräftige Bewertung durchführen zu können. Die Definition der Bewertungsziele ist hier ein entscheidender Faktor bei der Festlegung der relevanten Datenströme, welche in die Bewertung mit einfließen müssen. Das entscheidet auch die relevanten Indikatoren für die Bewertung, welche in Kapitel 3.2.3 genauer beschrieben werden.

Neben der Definition des Bewertungsziels sind folgende Systemgrenzen relevant:

#### 1. Systemgrenze Raum:

Hier wird definiert auf welchem Betrachtungslevel die Bewertung stattfindet. Die Zirkularitätsbewertung kann auf der Ebene des einzelnen Produktes bis hin zur Bewertung des gesamten Unternehmens erfolgen. Bei der Zirkularitätsbewertung eines Gebäudes bedeutet dies zum Beispiel die Bewertung auf der Ebene der Bauteilschicht, des Bauteils oder des Gebäudes.

#### 2. Systemgrenze Zeit:

Als Betrachtungszeitraum für die Zirkularitätsbewertung wird immer der gesamte Lebenszyklus herangezogen. Bei der Bewertung von Gebäuden sind vor allem die Betrachtung von Materialkreisläufen bei folgenden Lebenszyklusphasen maßgebend:

- Pre-Use-Phase oder auch Herstellungsphase, in welcher die Errichtung und der Materialeinsatz einfließt
- Use-Phase oder auch Nutzungsphase, in welcher die Lebensdauer entscheidend ist
- Post-Use-Phase oder auch Rückbauphase, in welcher der Rückbau und das End-of-Life-Szenario von verbauten Materialien und Bauteilen einfließt.

### 3.2.3 Indikatoren bei der Zirkularitätsbewertung

Wie bei der Gebäudezertifizierung stehen die Zirkulationsindikatoren, in Abhängigkeit zu den Lebenszyklusphasen, für ein qualitatives oder quantitatives Maß eines Zirkularitätsaspektes. Die ISO 59020 gibt zu den Indikatorkategorien Ressourceneingang, Ressourcenausgang, Energie, Wasser und Wirtschaft entsprechende Kernindikatoren an. In der Tabelle 3.2 sind die Kernindikatoren für die Kategorien Ressourceneingang, Ressourcenausgang und Wirtschaftlichkeit aus der ISO 59020 in englischer Sprache dargestellt (ISO - Internationale Organisation für Normung, 2024):

Indicator category	Mandatory /optional	Circularity indicator	Summary description	Additional information
Resource Inflows	Mandatory	Average reused content of an inflow (X)	Fraction of input material resources that are reused components and products	Retaining resource value
	Mandatory	Average recycled content of an inflow (X)	Fraction of input material resources that is recycled material	Add resource value
	Mandatory	Average renewable content of an inflow (X)	Fraction of material resources inflow (X) that is sustainably produced renewable material	Add resource value
Resource outflows	optional	Average lifetime of product or material relative to industry average	Indicator of time that an output resource (e.g. product) will remain in use compared to an industry average for the resource	Retaining resource value
	Mandatory	Per cent actual reused products and components derived from outflow (X)	Fraction of outflow that is reused	Retaining resource value
	Mandatory	Per cent actual recycled material derived from outflow (X)	Fraction of outflow that becomes recycled material	Recovering resource value
	Mandatory	Per cent actual recirculation of outflow in the biological cycle	Fraction of outflow content that is recirculated at end of life for safe return to the biosphere and meets the qualifying conditions for recirculation	Recovers resource value
Economic	optional	Material productivity	Ratio of revenue generated by total mass of all linear resource inflows	Indicates resource reduction
	optional	Resource intensity index	Quantitative measure of economic growth versus total resource use	Indicates resource reduction

Tabelle 3.2: Auszug Kernindikatoren für Zirkularität zufolge ISO 59020:2024 (Sprache Englisch)

Bei der Zirkularitätsbewertung von Gebäuden sind zufolge der im Kapitel 2 ausgewerteten Unterlagen folgende Indikatoren von besonderer Bedeutung:

1. Materialherkunft – Masseanteil an Primärrohstoff, Sekundärrohstoff und erneuerbar/nicht erneuerbar Rohstoffen
2. Masse an Bau-/Abbruchabfälle
3. Demontagefähigkeit beim Rückbau
4. Werkstoff-Trennbarkeit
5. Materialverwertung – Zuordnung der Wertstoffe in entsprechende End-Of-Life-Szenarien

Mit der Wahl der Indikatoren wird auch das Ausmaß der erforderlichen Datenmenge zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials festgelegt. In der ISO 59020 ist die Systematik bei der Datenermittlung in folgender Abb. 3.5 dargestellt (ISO - Internationale Organisation für Normung, 2024):

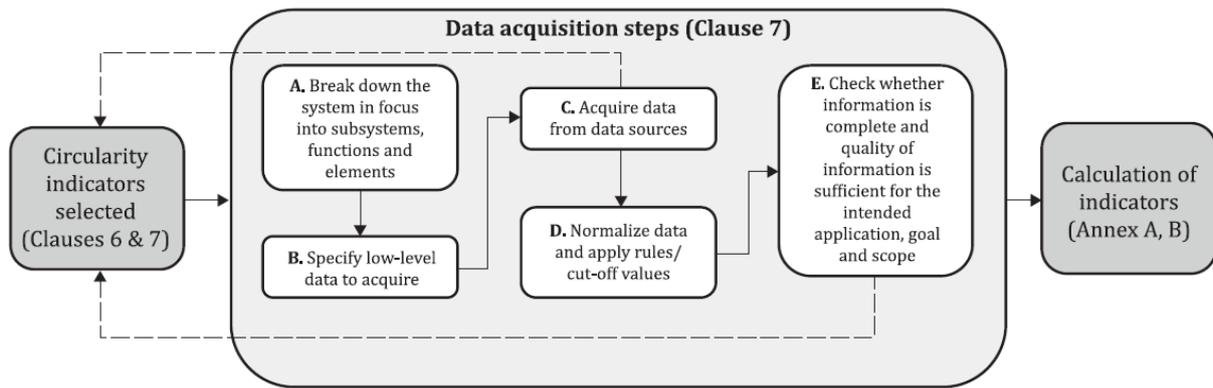


Abb. 3.5: Systematik des Dateneingangs bei der Zirkularitätsbewertung zufolge ISO 59020

Dabei wird von der ISO 59020 empfohlen, dass zu untersuchende System in Subsysteme zu unterteilen und die Eingangs- und Ausgangsstoffe mit entsprechenden Daten zu belegen. In der Zirkularitätsbewertung bedeutet dies die Massenanteile von Materialien über den gesamten Lebenszyklus in die Bewertung einfließen zu lassen. Da die Materialherkunft und Materialverwertung Kernindikatoren sind, ist auch die Datenermittlung dahingehend wichtig.

### 3.2.4 Material-Cycle-Status – Recyclingpotenzial Verwertung

Der Material-Cycle-Status wurde an der Bergischen Universität Wuppertal entwickelt und spiegelt die Wieder- und Weiterverwertungspotenziale von Materialien wider. Dies ist besonders bei den Indikatoren Materialherkunft und -verwertung wichtig, da somit die Massenanteile Zusammensetzung an recyceltem Material, Sekundärrohstoffen gegenüber Primärrohstoffen wiedergegeben werden können. Hillebrandt und Seggewies haben für unterschiedliche Baustoffe und Materialien einen Katalog ausgearbeitet, in welchem dieser Material-Cycle-Status abgebildet ist. In der Abb. 3.6 ist der Aufbau des Material-Cycle-Status dargestellt (Seggewies, Riegler-Floors, & Rosen, 2018):

- Wiederverwertung/ Recycling auf gleicher Qualitätsstufe
- Weiterverwertung, Qualitätsstufe hoch/Downcycling im Bauwesen
- Weiterverwertung, Qualitätsstufe niedrig/Downcycling außerhalb des Bauwesens
- keine klare Trennung zwischen Qualitätsstufe hoch und niedrig möglich
- Neumaterial auf Basis nachwachsender, als nachhaltig zertifizierter Rohstoffe
- Neumaterial auf Basis nachwachsender Rohstoffe
- Neumaterial bzw. Beseitigung oder Verlust

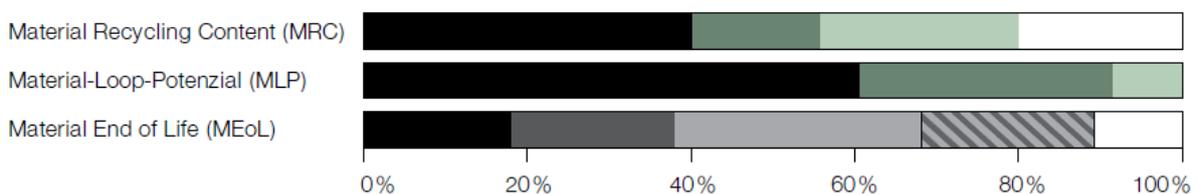


Abb. 3.6: Atlas Recycling – Material-Cycle-Status mit Masseanteilen für MRC, MLP und MEoL

Der Material Recycling Content, kurz MRC, beschreibt die Anteile an Recyclingstoffen und nachwachsender Rohstoffe, welche in einem Material enthalten sind. Somit ist der MRC ein wichtiger Parameter in der Pre-Use-Phase zur Quantifizierung des Kreislaufpotenzials. Dazu wird der Masseanteil des zirkulären Materials mit dem Gesamtmaterialanteil ins Verhältnis gesetzt. Als Datengrundlage dienen allgemeingültige Quellen als auch produktspezifische Angaben aus zum Beispiel Herstellerangaben und EPDs (Seggewies, Riegler-Floors, & Rosen, 2018).

Das Material-Loop-Potenzial, kurz MLP, beschreibt das Potenzial, den der Recyclingstoffanteil eines Materials idealerweise haben könnte, wenn die Produktion auf die Maximierung des Sekundärrohstoffanteils ausgelegt wäre. Damit beschreibt das MLP den Materialanteil, welcher mit dem aktuellen Stand der Forschung in einem geschlossenen Materialkreislauf geführt werden kann. Limitiert ist der MLP vor allem durch den derzeitigen Stand der Forschung hinsichtlich des Einsatzes von Sekundärrohstoffen in der Produktion eines Baustoffes. Die Differenz aus Gesamtmaterial und maximalen Sekundärrohstoffanteil (MLP) muss mittels Primärrohstoffen gefüllt werden. Als Datengrundlage dienen Versuche und Testreihen unterschiedlicher wissenschaftlicher Institute, Verbände oder Produktionsfirmen (Seggewies, Riegler-Floors, & Rosen, 2018).

Das Material End of Life, kurz MEoL, gibt wieder, was mit dem betrachteten Baustoff am Ende dessen Lebenszyklus passiert. Als Datengrundlage für den Atlas Recycling wurden allgemein gültige Quellen von zum Beispiel Abfallstatistiken aus Deutschland herangezogen. Im folgenden Kapitel 3.2.5 wird dies näher betrachtet.

Atlas Recycling gibt neben dem Material-Cycle-Status auch weitere Recyclingpotenziale als die bereits in Abb. 3.6 dargestellten Qualitätsstufen wieder. Zu den weiteren Recyclingpotenzialen zählt die zukünftige Kompostiermöglichkeit biotischer Baustoffe nach Schaffung entsprechender Reglementierungen und die Rücknahme von Produkten oder Baustoffen durch den Hersteller. Produkte mit einem hohen Wiederverwendungspotenzial werden ebenfalls gesondert gekennzeichnet, da der Grad der Wiederverwendungsrate von Faktoren wie Wertbeständigkeit, bei welcher die Nachfrage eine Rolle spielt, abhängt und dies aktuell das volle Potenzial der aktuellen Wiederverwendungsrate nicht ausnutzt. Die eben genannten weiteren Recyclingpotenziale laut Atlas Recycling sind in AA dargestellt (Seggewies, Riegler-Floors, & Rosen, 2018).

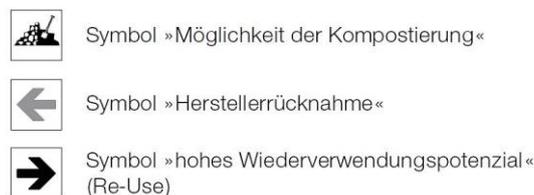


Abb. 3.7: Atlas Recycling – Material-Cycle-Status – weitere Recyclingpotenziale]

Im Anhang 9.3 sind die Material-Cycle-Status einzelner Materialien und Produkte gegliedert nach Bauteilgruppen laut Atlas Recycling inklusive deren weiteren Recyclingpotenziale und Lebensdauer abgebildet (Seggewies, Riegler-Floors, & Rosen, 2018).

### 3.2.5 End-of-Life-Szenarien für Wertstoffe

Nach dem Rückbau eines Gebäudes ist es wichtig die anfallenden Baustoffe zu verwerten. Dabei gibt es folgende Möglichkeiten, sprich End-of-Life-Szenarien (Seggewies, Riegler-Floors, & Rosen, 2018):

- Re-Use, Wiederverwendung
- Recycling, Wiederverwertung
- Downcycling, Weiterverwertung
- Energy Recovery, energetische Verwertung

Welches End-of-Life-Szenario ein Baustoff erreicht, ist von mehreren Faktoren abhängig. Die Hauptfaktoren sind dabei der Bedarf des Baustoffs am Markt, sprich die Wirtschaftlichkeit des End-of-Life Szenarios und die Art der Rückgewinnung des Baustoffes beziehungsweise

Bauteils. Hier gibt es vier unterschiedliche Rückgewinnungsarten (Seggewies, Riegler-Floors, & Rosen, 2018):

- **Demontage zur Wiederverwendung:**  
Wird dort eingesetzt, wo der Ressourcenschutz die höchste Priorität hat, um sämtliche bei der Herstellung verwendeten Rohstoffe zu erhalten. Dazu wird das Bauteil in umgekehrter Montagereihenfolge ausgebaut
- **Selektiver Rückbau:**  
Kommt zum Einsatz, wenn eine hochgradige Sortenreinheit unterschiedlicher Materialien erzielt werden möchte. Diese Art des Materialrückgewinnung liefert neben der Demontage die beste Voraussetzung für die weitere Verwertung
- **Selektiver Abbruch:**  
Ist die gängigste Form der Rückgewinnung. Hier werden die abgebrochenen Materialien entweder vor, während oder nach dem Abbruch sortiert.
- **Konventioneller Abbruch:**  
Beschreibt die gröbste Art der Bauwerksbeseitigung, bei welcher das Gebäude ohne Entkernung oder begleitender Sortierung von Abfällen abgebrochen wird. Bei dieser Form des Abbruchs kommt es zu einer hochgradigen Vermischung von Abbruchmaterialien, was meist zu einer Einordnung der Abbruchmasse als Baumischabfall führt.

Die Art der Rückgewinnung und der Bedarf am Markt entscheiden wiederum welches End-of-Life-Szenario ein Baustoff oder Bauteil erreicht und damit auch, welche Sortenreinheit erzielt werden kann (Seggewies, Riegler-Floors, & Rosen, 2018):

1. Hochwertigste End-of-Life-Szenario – Faktoren:

Abnehmermarkt muss gegeben sein beziehungsweise absehbar sein, Demontage als Gewinnungsart

2. Hochwertige End-of-Life-Szenario – Faktoren:

Selektiver Rückbau

3. Übliches End-of-Life-Szenario – Faktoren:

Selektiver Abbruch

Die oben beschriebenen End-of-Life-Szenarien inklusive der Voraussetzung zur Erreichung dieser für die größten Wertstofffraktionen sind in Abb. 3.8 dargestellt:

Wertstoff	End-of-Life-Szenarien			Energy Recovery	
	Re-Use	Recycling	Downcycling	renewable	fossil
Beton		■	□		
Ziegel	■	■	□		
Fliesen und Keramik			■□		
Naturstein	■		■□		
Lehmbaustoffe		■	□		
Holz A1 und A2 nach AltholzV	■		■	□	
biologische Faserstoffe (Kompost)		■		□	
Glas		■	□		
Kunststoff			■		□
Bitumengemische		■			□
Schrott, nach Metallart	■	■□			
Hersteller-/Verbandsrücknahme (z. B. Mineralwolle, Gipsbaustoffe)		■			

■ hochwertigstes End-of-Life-Szenario: nur Baustoffe, für die ein etablierter Gebrauchtmkt existiert oder absehbar ist (z. B. hochwertige Klinker, großformatige Natursteine, Eichenbalken), Demontage erforderlich

■ hochwertiges End-of-Life-Szenario, selektiver Rückbau erforderlich

□ übliches End-of-Life-Szenario (siehe MEoL, Abb. B 2.4, S. 64), selektiver Abbruch

Re-Use: wiederverwendbare Baustoffe  
 Recycling: stofflich wiederverwertbare Baustoffe  
 Downcycling: stofflich weiterverwertbare Baustoffe  
 Energy Recovery: energetisch verwertbare Baustoffe  
 - renewable: aus nachwachsenden Rohstoffen  
 - fossil: aus fossilen Rohstoffen

Abb. 3.8: Atlas Recycling – End-of-Life-Szenarien von Wertstoffen (Seggewies, Riegler-Floors, & Rosen, 2018)]

## 4 Urban Mining Index (UMI) nach Rosen

Der Urban Mining Index, kurz UMI, wurde von Frau Dr. Anja Rosen im Zuge ihrer Promotion an der Bergischen Universität Wuppertal entworfen und stellt ein Planungsinstrument für kreislaufforientiertes Bauen dar (Rosen, 2021). Mit dieser Bewertungsmethode der Zirkularität eines Bauwerks wird das Kreislaufpotenzial und der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck eines Gebäudes beziehungsweise je nach Betrachtungsebene auch einzelne Bauteile quantitativ messbar gemacht und bewertet. Dabei werden sämtliche Materialien, welche über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks verbaut werden, erfasst und deren Wert- und Abfallstoffe berechnet. Abschließend werden diese Materialien in Qualitätsstufen hinsichtlich ihrer Nachnutzbarkeit eingeteilt und bewertet, siehe dazu Abb. 4.1 (Rosen, 2021).

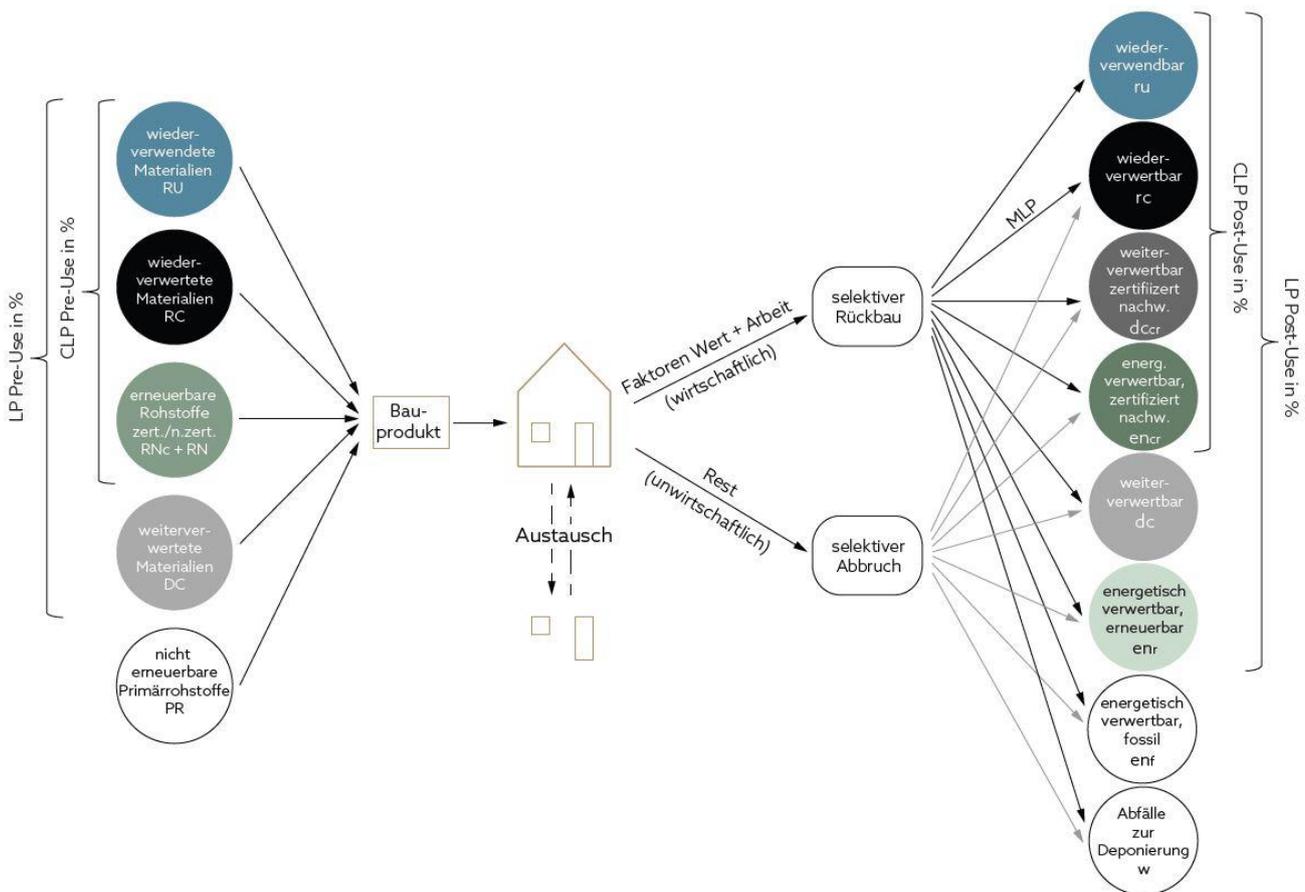


Abb. 4.1: Berechnungssystematik der Kreislaufpotenziale nach Qualitätsstufen (Rosen, 2021)

Im Gegensatz zu der Gebäudezertifizierung hat der UMI nicht die Ökobilanzierung des Gebäudes als Ziel, sondern die Quantifizierung der Zirkularität eines Gebäudes. Als Ergebnis dieser Bewertungsmethode wird der Urban Mining Indicator ausgegeben, welcher den Anteil der zirkulären Baustoffe an der Gesamtmasse aller im Lebenszyklus des Bauwerks verbauten Materialien wiedergibt. Zusätzlich Bestandteil der ist der Rückbauaufwand und die Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus. Der Urban Mining Index wird dabei in Prozent ausgegeben.

## 4.1 Bewertung der Zirkularität

Da sich die Kreislauffähigkeit mit der Schließung des Materialkreislaufes beschäftigt, spielt vor allem der Rückbaufähigkeit des Bauwerks und die darin verbauten Materialien eine entscheidende Rolle. Die Bewertung der Zirkularität im Zuge des UMI erfolgt daher über Zirkularitätsraten von Baumaterialien, welche durch den Anteil an sekundären oder erneuerbaren Rohstoffen und zukünftiges Recyclingfähigkeit geprägt sind.

Die Baustoffe werden dabei in Qualitätsstufen für Pre-Use, der Herstellungsphase, und Post-Use, der Rückbauphase, unterteilt. Die Einteilung in die jeweilige Qualitätsstufe ist dabei vom betrachteten Baumaterial, dessen verwendeten Primär- als auch Sekundärrohstoffanteile und dessen End-of-Life-Szenarios verbunden. Die entsprechenden End-of-Life-Szenarien sind im Kapitel 3.2.5 Abb. 3.8 dargestellt. Die Qualitätsstufen beinhalten (Rosen, 2021):

- Wiederverwendung
- Wiederverwertung
- Weiterverwendung
- Weiterverwertung
- energetische Verwertung

In Abhängigkeit der Qualitätsstufen werden die Materialien in einem geschlossenen Materialkreislauf, dem Closed-Loop, oder einem offenem Materialkreislauf, dem Loop eingeteilt. Aus diesen beiden Loops, welche jeweils für die Pre- und Post-Use-Phase ermittelt werden, ergibt sich das dazugehörige Kreislaufpotenzial. Materialien, welche in die „Closed-Loop-Potenzial“, kurz CLP, Gruppe fallen, kennzeichnen sich durch ein gleichbleibendes Qualitätsniveau aus und werden in geschlossenen Kreisläufen geführt. Das betrifft Baustoffe oder Bauteile, welche einer Wiederverwendung oder Recycling zugeführt werden können. Baustoffe welche wiederum in die Gruppe „Loop-Potenzial“, kurz LP, fallen, durchlaufen einen Qualitätsverlust und werden durch Downcycling in offenen Kreisläufen geführt (Rosen, 2021).

Wie in Abb. 4.1 dargestellt, spielt bei der wirtschaftlichen Kreislaufbetrachtung des selektiven Rückbaus der Restwert der Materialien und der mit der sortenreinen Rückgewinnung verbundenen Arbeitsaufwand eine entscheidende Rolle. Diese beiden Faktoren sind ausschlaggebend dafür, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Material ein hochwertiges oder ein nachrangiges End-of-Life-Szenario erhält (Rosen, 2021). Der Urban Mining Index liefert Richtwerte für den notwendigen Arbeitsaufwand von Personen und Maschinen für den selektiven Rückbau verschiedener Konstruktionen. Darüber hinaus liefert der UMI auch monetäre Materialwerte von Baustoffen nach durchgeführtem Rückbau. Basis dafür ist wie jedoch der deutsche Markt. In Österreich ist eine solche Erhebung noch nicht durchgeführt worden.

## 4.2 Systemgrenzen und Betrachtungsebenen

### 4.2.1 Systemgrenzen des Urban Mining Index

Die Systemgrenzen des UMI sind abhängig von den in Kapitel 3.2.2 definierten Lebenszyklusphasen für Zirkularitätsbewertungen und sehen wie folgt aus:

- In der Pre-Use-Phase, der Herstellungsphase, ist der Materialeinsatz des fertig eingebauten Produktes beziehungsweise Materials die Systemgrenze. Die Materialanteile, welche zur Herstellung eines Produktes oder Materials benötigt werden, werden nicht berücksichtigt. Dazu zählen Produktionsabfälle, Hilfsstoffe, nicht verwendete Entnahmen und Nebenprodukte. Ebenso gehen nur erneuerbare Primär- und Sekundärrohstoffe als auch nicht erneuerbare Sekundärrohstoffe in das Kreislaufpotenzial mit ein. Nicht erneuerbare Primärrohstoffe befinden sich außerhalb der Systemgrenzen, da sie nichts zum Schließen von Kreisläufen beitragen.
- Die Use-Phase, oder auch Nutzungsphase, bildet die Austauschbarkeit von Bauteilen und damit die technische Nutzungsdauer die Systemgrenze. Die Daten dazu entnimmt der Urban Mining Index aus der Tabelle „Nutzungsdauern von Bauteilen“ des deutschen Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR - Bundesinstitut für Bau-, Stadt-, und Raumforschung, 2017). Diese wird auch in der deutschen Gebäudezertifizierung eingesetzt. Anhand der Austauschfähigkeit wird der Materialeinsatz (Systemgrenze Pre-Use-Phase) als auch der Wertstoff- oder Abfallaufkommen (Systemgrenze Post-Use-Phase) ermittelt. Der Energiebedarf liegt trotz dessen Einflusses auf Ressourcenaufwand und Kohlenstoffkreislauf außerhalb der Systemgrenze, da Gebäudebetriebsoptimierung nicht zu den Aufgaben des UMI gehört.
- In der Post-Use-Phase, der Rückbauphase, bilden die Materialanteile, welche das Objekt verlassen und einem definierten End-of-Life-Szenario zugeführt werden, die Systemgrenze. Abfälle zufolge des jeweiligen End-of-Life-Szenarios werden nicht berücksichtigt.

Für die Systemgrenzen spielt auch die Materialdifferenzierung nach Ursprung und Verfügbarkeit eine wichtige Rolle. Angelehnt an Hillebrandt und Seggewies (Seggewies, Riegler-Floors, & Rosen, 2018) welche Baumaterialien in 4 Gruppen je nach Ursprung und jeweiliger Verfügbarkeit einteilt, unterteilt der Urban Mining Index Kreislaufpotenziale in erneuerbare und endliche Rohstoffe. Erneuerbare Rohstoffe werden wiederum nach zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen und nicht zertifiziert nachwachsenden Rohstoffen unterteilt (Rosen, 2021).

In den Systemgrenzen ist auch der Detailgrad bei der Erfassung der Materialaufstellung geregelt. So können Materialien vernachlässigt werden, welche eine geringfügige Masse aufweisen. Darunter verstehen sich Materialien die 1% der Gesamtmasse eines Bauteils ausmachen. Dazu zählen Befestigungsmittel oder Fugenmaterialien. Die Befestigungsart ist jedoch zu erfassen, da diese zur Ermittlung der Trennbarkeit der Materialien und somit zur sortenreinen Rückgewinnung beiträgt. Der Materialwert zur Erfassung der Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus und der damit einhergehenden Kreislaufpotenziale wird durch Annahmepreise und nicht dem Verkaufspreis der Verwerter beziehungsweise Entsorger erfasst. Der Arbeitsaufwand, welcher ebenfalls zur Erfassung der Wirtschaftlichkeit benötigt wird, berücksichtigt den direkten Personalaufwand und Betrieb von Maschinen. Aufwände zur Herstellung, Wartung und Entsorgung der Maschinen geht nicht in die Rechnung mit ein.

Neben der Ermittlung der Kreislaufpotenziale wird auch das Treibhausgaspotenzial, der umgangssprachlich oft als „CO<sub>2</sub>-Fußabdruck“ bezeichnet wird, im UMI ermittelt. Die Systemgrenzen zur Ermittlung des Treibhausgaspotenzials gleichen den Modulen A-D nach ÖNORM EN 15643 (Austrian Standards International, 2021), welche im Kapitel 3.1.4, Abb. 3.2 dargestellt sind.

Die oben beschriebenen Systemgrenzen des Urban Mining Indexes sind in Abb. 4.2 dargestellt (Rosen, 2021):

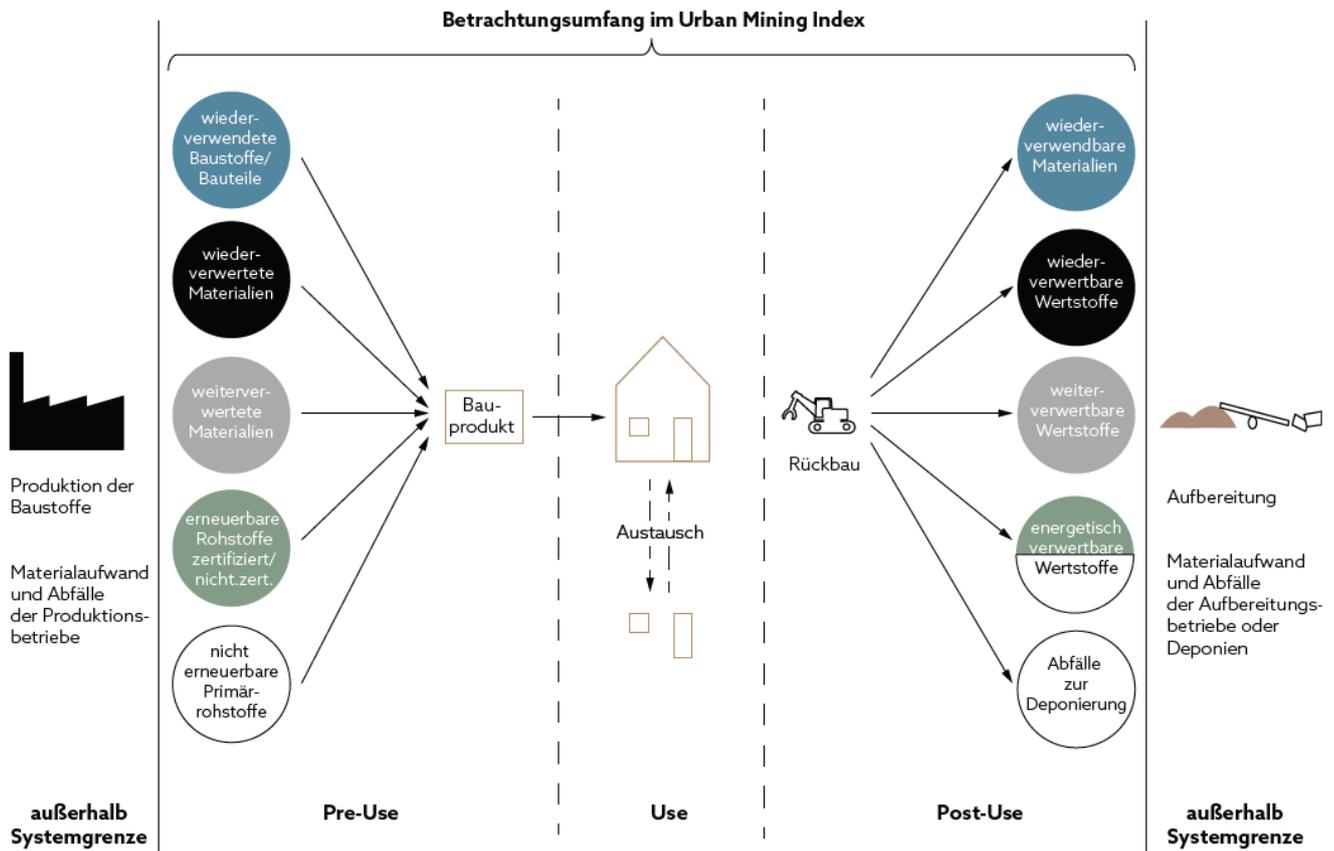


Abb. 4.2: Systemgrenzen des Urban Mining Index (Rosen, 2021)

## 4.2.2 Betrachtungsebenen des Urban Mining Indexes

Die Berechnung des Urban Mining Indikatoren erfolgt über die Betrachtung unterschiedlicher Gebäudeebenen, welche in Abb. 4.3 dargestellt sind, der jeweiligen Masse der eingesetzten Materialien und die dazugehörigen, anfallenden Abfallmassen.

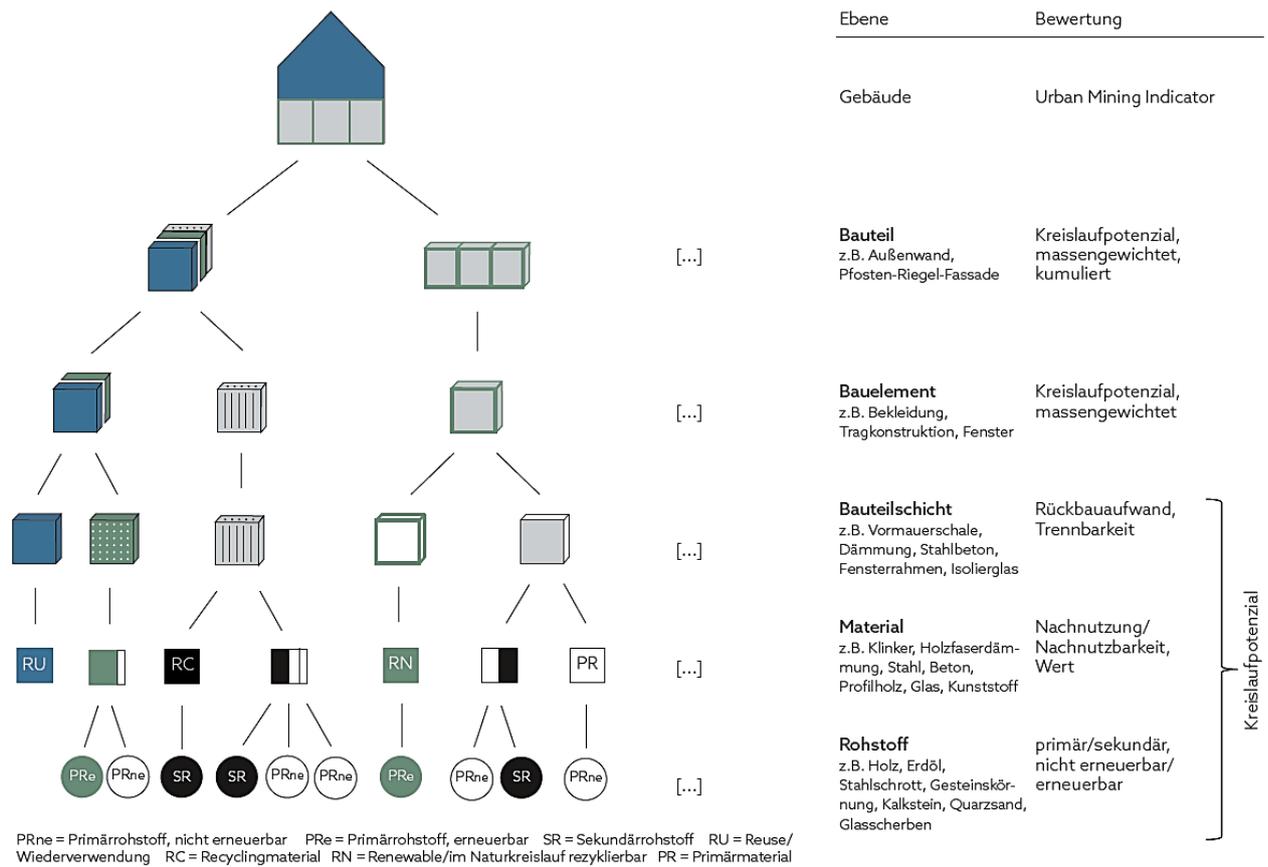


Abb. 4.3: Berechnungsebenen UMI (Rosen, 2021)

In die unterste Ebene, die Rohstoff Ebene, fließen die Informationen zu Primär- und Sekundärrohstoffen aus erneuerbaren oder nicht erneuerbaren Quellen ein. Es gelten die Systemgrenzen aus Kapitel 4.2.1.

Eine Ebene höher betrachtet man die Baumaterialien des untersuchten Gebäudes. Hier gehen die Massen und Anteile erneuerbarer oder sekundärer Rohstoffe in die Berechnung ein. Damit ist dies die wichtigste Ebene in Hinblick auf Ressourcenschonung und Kreislaufführung. Folgende Parameter laut Abb. 4.4 sind dabei maßgebend (Rosen, 2021):

Lebenszyklusphase	Parameter	Maßstab/Einheit	Eigenschaft
Pre-Use	Wiederverwendung	Masseanteil in %	Variable
	Material-Recycling Content (MRC) nach Qualitätsstufen	Masseanteil in %	Variable
Post-Use	EoL-Qualitätsstufen	Masseanteile in %	Variable
	Schadstofffreiheit	Grenzwert in %	Ausschlusskriterium
	Sortenreinheit	Störstoffe in %	Ausschlusskriterium
	zerstörungsfreie Lösbarkeit	-	qualifizierendes Kriterium (für Wiederverwendbarkeit)
	Material-Loop Potenzial (MLP)	Masseanteil in %	Koeffizient
	Arbeit	Megajoule [MJ]	Koeffizient
	Wert	Euro [€]	Koeffizient

Abb. 4.4: UMI-Bewertungsparameter mit Einheiten und Eigenschaften

Auf der Ebene der Bauteilschichten fließen die Rückbauaufwände und Trennbarkeit der einzelnen Schichten in die Berechnung über den Faktor Arbeit  $f_v$  mit ein.

Die Bauelement-Ebene gliedert sich nach Baukonstruktionen gemäß der DIN 276 Kostengruppe 300 „Bauwerk – Baukonstruktionen“ (DIN - Deutsches Institut für Normung, 2018) und dienen dem massegewichteten Vergleich der Kreislaufpotenziale des Closed-Loop-Potenzials und Loop-Potenzial einzelner Bauelemente wie zum Beispiel Fenster oder Tragkonstruktionen. Auf dieser Ebene lassen sich Kreislaufpotenziale unterschiedlicher Konstruktionsarten vergleichen.

Eine Ebene höher betrachtet man die Ebene der Bauteile, unter welche alle flächige Bauteile inklusive aller dazugehörigen Schichten fallen. Dazu zählen unter anderem Außenwände, Decken und dergleichen. Bauteile mit unterschiedlichem Aufbau aber gleicher Funktion lassen sich zu Bauteilgruppen zusammenfassen. Auf dieser Ebene kann das Kreislaufpotenzial einzelner Bauteile verglichen werden. Das Kreislaufpotenzial wird dazu aufaddiert und über die Masse gewichtet.

Auf der obersten Ebene, der Gebäude-Ebene, wird das Ergebnis dieses Bewertungssystems ausgegeben – der Urban Mining Indicator. Dazu werden das Closed-Loop-Potenzial und Loop-Potenzial der Pre- und Post-Use-Phase gewichtet. Als Ergebnis erhält man das Kreislaufpotenzial des Gebäudes in Prozent.

### 4.3 Berechnungsparameter

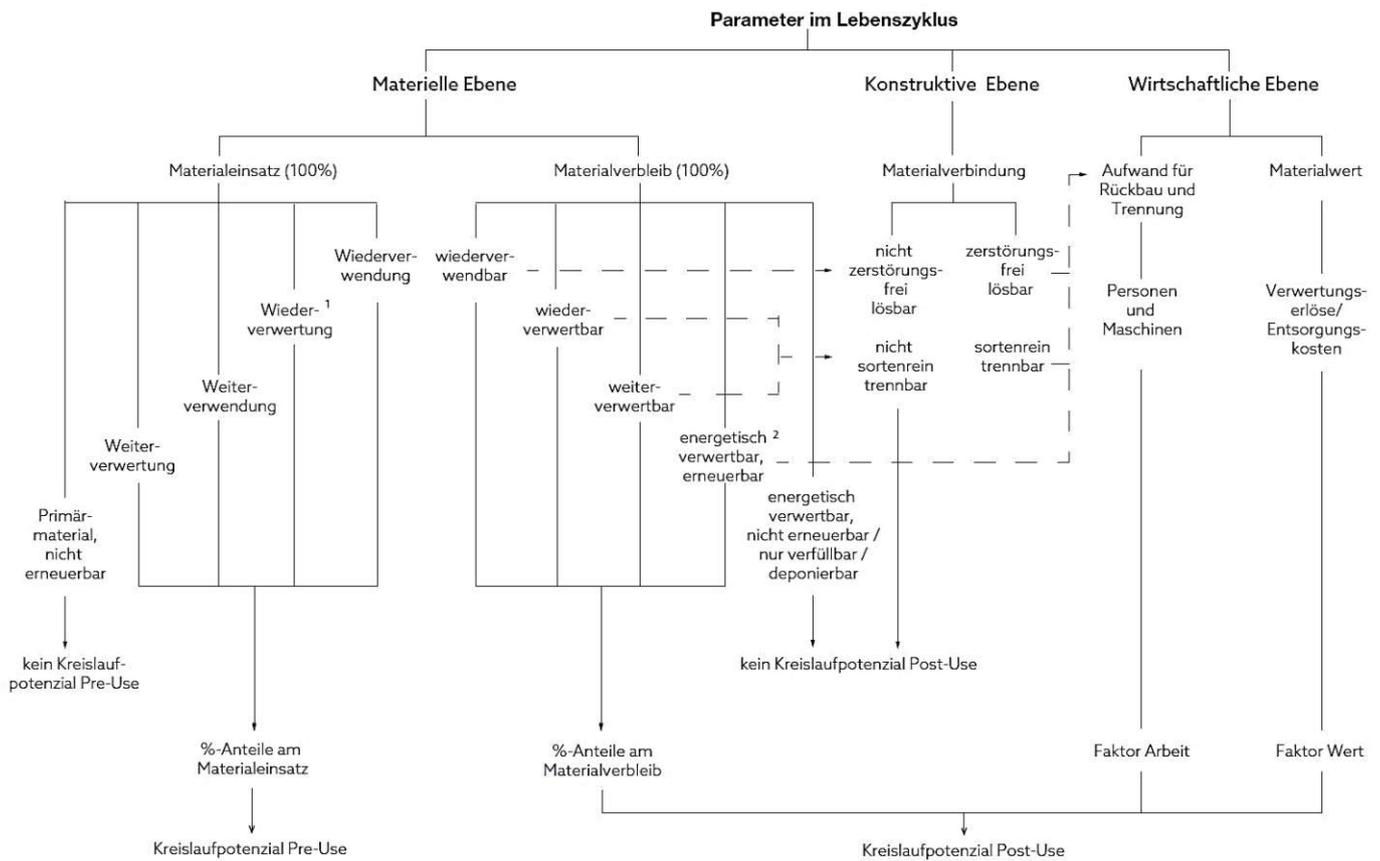
Nach der Definition der Systemgrenzen und der Betrachtungsebenen eines Gebäudes in Hinblick auf Kreislaufpotenzial, sind die Massen der eingehenden Materialien und die resultierenden Abfälle nach dem selektiven Rückbau beziehungsweise Abbruch die Basis für die Berechnung des Urban Mining Indicators.

Die Massen der Materialien in der Pre-Use-Phase werden in der Betrachtungsebene der Bauteilschichten über die flächenbezogene Masse angegeben. Jene Schichtbestandteile, welche nicht flächig sind, müssen entsprechend umgerechnet werden. Darunter fallen zum Beispiel Unterkonstruktionen aus Holz oder Metall.

In der Use-Phase wird durch die technische Nutzungsdauer die Masse mit der Austauschhäufigkeit multipliziert.

Die anfallenden Abfälle in der Post-Use-Phase werden bereits bei der Massenermittlung in der Pre-Use-Phase bestimmt. Hier werden bereits die eingehenden Materialien einer Wertstoffkategorie nach Abb. 3.8 und somit einem End-of-Life-Szenario zugeordnet. Durch Berücksichtigung der Trennbarkeit der Materialien ergibt sich somit eine Abfallmenge.

Neben den eingehenden Massen sind auch die Parameter laut Abb. 4.5 von entscheidender Bedeutung, um den Urban Mining Indicator eines Bauwerks zu bestimmen:



1 inklusive im Naturkreislauf wiederverwertete Materialien (nachgewachsene Rohstoffe)

2 die Weiterverwertbarkeit und energetische Verwertbarkeit erneuerbarer Materialien wird im Closed-Loop- und Loop-Potenzial weiter differenziert (s. Kapitel 7)

Abb. 4.5: Berechnungsparameter der Kreislaufpotenziale für Pre-Use und Post-Use (Rosen, 2021)

Die Berechnungsparameter lassen sich in drei Ebenen unterteilen – die materielle, die konstruktive und die wirtschaftliche Ebene.

### 4.3.1 Materielle Ebene

Auf der materiellen Ebene sind folgende Parameter für die Bewertung der Kreislauffähigkeit ausschlaggebend (Rosen, 2021):

- die Schadstofffreiheit
- Qualitätsstufen
- Material Recycling Content (MCR) der Pre-Use-Phase
- Material-Loop-Potenzial (MLP) der Post-Use-Phase

#### 1. Schadstofffreiheit

Sollten Schadstoffe während des Rückbaus bei Materialien nachgewiesen werden, so stellt dies im Urban Mining Index ein Ausschlusskriterium dar und der untersuchte Baustoff hat somit kein Kreislaufpotenzial. Dazu zählen Stoffe die für Menschen und Umwelt als gefährlich gelten und die Grenzwerte laut Abb. 4.6 überschreiten (Rosen, 2021).

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)

Abb. 4.6: Grenzwerte für Schadstoffen laut UMI

Die oben angeführten Grenzwerte wurden aus der Dissertation von Dr. Rosen entnommen. Es sei an dieser Stelle darauf verwiesen, dass die EU-Chemikalienstrategie, welche wie bereits in Kapitel 2.2.1 angeführt ein wichtiger Bestandteil zur Erreichung der europäischen Klimaziele ist, aktuell an Grundsätzen zur Beschränkung schädlicher Chemikalien arbeitet und dies zu neuen Grenzwerten führen wird (Europäische Union, o. D.).

## 2. Qualitätsstufen

Die Qualitätsstufen stellen Nachnutzungsmöglichkeiten der eingesetzten Materialien dar. Sie ermöglichen somit eine Beurteilung hinsichtlich Materialeinsatz und möglichem Materialverbleib. Sie unterscheiden sich zu der in der Abfallrahmenrichtlinie definierten Abfallhierarchie und sind je nach betrachteter Lebenszyklusphase unterschiedlich. Die Qualitätsstufen vernachlässigen die Abfallvermeidung, da diese nicht messbar ist. Außerdem wird zusätzlich zur Abfallverwertung laut der Abfallrahmenrichtlinie zwischen Wiederverwertung, dem Recycling, und Weiterverwertung, dem Downcycling, unterschieden.

Die Qualitätsstufen sind in der Abb. 4.5 für den Materialeinsatz, der Pre-Use-Phase, sowie dem Materialverbleib, der Post-Use-Phase, abgebildet. Die Qualitätsstufen wurden bereits in den Systemgrenzen definiert und entsprechen den End-of-Life-Szenarien des Atlas Recyclings von Hillebrandt und Seggewies, siehe Abb. 3.8 (Seggewies, Riegler-Floors, & Rosen, 2018).

Die Einordnung der Qualitätsstufen als Variablen für die Pre- und Post-Use-Phase sind in Abb. 4.7 dargestellt.

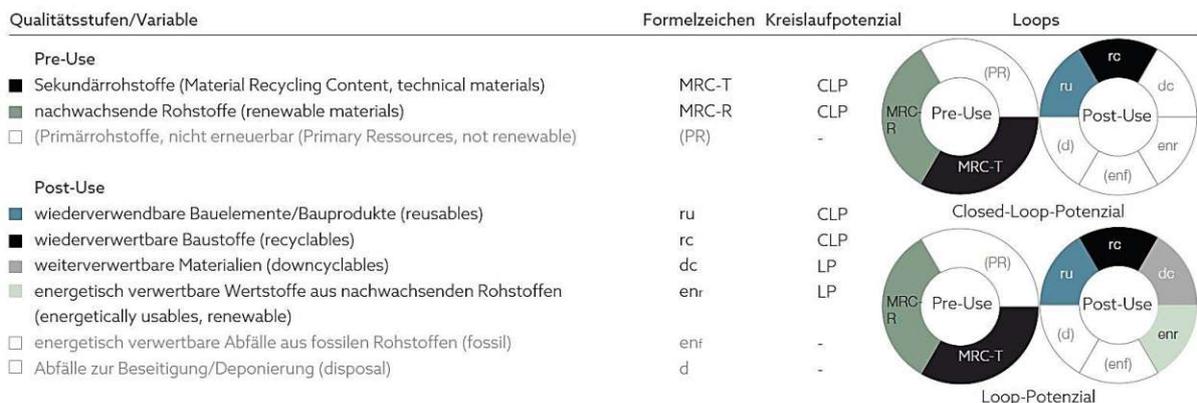


Abb. 4.7: Qualitätsstufen als Variablen in den jeweiligen Kreisläufen (Rosen, 2021)

### 3. Material Recycling Content (MRC)

Der MRC wurde von Hillebrandt und Seggewies definiert und für den UMI übernommen (Seggewies, Riegler-Floors, & Rosen, 2018). Als Datengrundlage dient der Atlas Recycling, wobei der UMI zusätzlich bei der Wieder- und Weiterverwertung von Sekundärrohstoffen unterscheidet. Dadurch werden Qualitätsminderungen eines Rohstoffes durch den Recyclingprozess berücksichtigt. Neben dem Atlas Recycling, können auch geprüfte Herstellerdaten, wie etwa Umweltdeklarationen des Typs I und III, EPDs und Produktinformationen in dem MCR einfließen. In Abb. 4.8 ist der MCR einer Spannplatte dargestellt (Rosen, 2021).

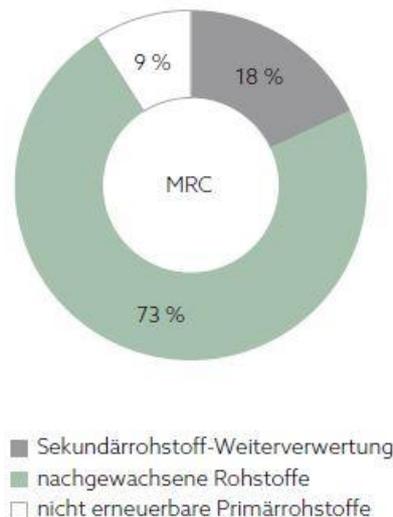


Abb. 4.8: MCR einer Spannplatte (Rosen, 2021)

Der MRC für Material aus nachwachsenden, nachhaltig zertifizierten Rohstoffen findet sich auch in der Berechnung des Closed-Loop-Potenzials der Post-Use-Phase wieder. Dadurch schließt man deren Kreisläufe, da durch die Zertifizierung als nachhaltig nachwachsender Rohstoff gewährleistet ist, dass die entnommenen Ressourcen entsprechend erhalten bleiben. Damit wird gewährleistet, dass zum Beispiel für massive Hölzer ein Closed-Loop-Potenzial für die Post-Use Phase erstellt werden kann, da allein durch den MLP nicht die Materialherkunft berücksichtigen würde. Damit fließen weiterverwertbar und energetisch verwertbare Baustoffe in der Post-Use-Phase in das Closed-Loop-Potenzial, wenn die eben genannten Voraussetzungen erfüllt sind. In der Pre-Use-Phase werden jedoch auch Materialien aus nicht zertifiziert nachwachsenden Quellen im Closed-Loop-Potenzial berücksichtigt.

### 4. Material-Loop-Potenzial (MLP)

Das MLP wurde ebenfalls von Hillebrandt und Seggewies übernommen und ist ein wichtiger Parameter in der Post-Use-Phase, da vor allem im Rückbau beziehungsweise Abbruch Sekundärrohstoffe anfallen.

Übersteigen die im Abbruch anfallenden Sekundärrohstoffe den im MLP begrenzten Bedarf, so werden diese Anteile einer nachrangigen Verwertung oder Deponierung zugeführt. Dadurch ist der MLP nur für das End-of-Life-Szenario Wiederverwertung, sprich Recycling, eine relevante Kerngröße und ein wichtiger Koeffizient zur Bestimmung des Closed-Loop-Potenzials. In Abb. 4.9 ist der MLP einer Spannplatte dargestellt (Rosen, 2021).

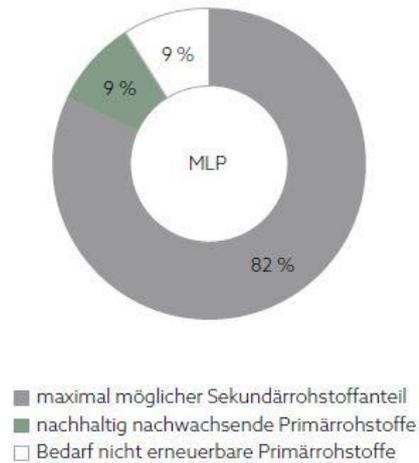


Abb. 4.9: MLP einer Spannplatte (Rosen, 2021)

An dem Beispiel der Spannplatte kann man erkennen, dass der Sekundärrohstoffanteil 82% betragen könnte. Die äußere Lage an Holz, welche ca. 9% Masseanteil trägt, müsste aus nachhaltig nachwachsenden Primärrohstoffen bestehen. Die restlichen 9% wäre der Bindemittelanteil aus nicht erneuerbaren Primärrohstoffen. Tatsächlich besteht eine herkömmliche Spannplatte jedoch aus nur 18% Sekundärrohstoffen, siehe Abb. 4.8. Dies lässt sich durch die Grenzen im aktuellen Stand der Forschung hinsichtlich Recyclings erklären (Rosen, 2021).

### 4.3.2 Konstruktive Ebene

Auf der konstruktiven Ebene fließt einerseits die zerstörungsfreie Lösbarkeit von Verbindungen und andererseits der Grad der Sortenreinheit von Baustoffen ein (Rosen, 2021).

#### 1. Zerstörungsfreie Lösbarkeit

Die zerstörungsfreie Lösbarkeit ist dabei für die Qualitätsstufe der Wiederverwendbarkeit entscheidend, da ohne eine zerstörungsfreie Demontage ein Re-Use nicht möglich ist. Die Lösbarkeit von Baustoffen beziehungsweise Bauteilen entscheidet daher, ob diese für die Wiederverwendung herangezogen werden können.

#### 2. Sortenreinheit

Der Grad der Sortenreinheit ist für das Recycling maßgebend. Ein zu hoher Grad an Verunreinigungen macht ein Recycling unmöglich. Daher ist der Grad der Sortenreinheit für die Qualitätsstufe der stofflichen Verwertung, siehe Abb. 4.5, ein Ausscheidungskriterium.

### 4.3.3 Wirtschaftliche Ebene

Betrachtet man die wirtschaftliche Ebene des UMI, fließen die beiden Faktoren Arbeit  $f_w$  und Wert  $f_v$ , in die Berechnung der Post-Use-Phase mit ein. Dieser Berechnungsschritt definiert die Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus. Sollte dieser nicht gegeben sein, so ist ein selektiver Abbruch durchzuführen. Damit wird auch festgelegt, ob Baustoffe in der Post-Use-Phase in ein hochwertiges End-of-Life-Szenario oder ein übliches End-Of-Life-Szenario eingeteilt werden. Die EoL-Szenarien sind in Abb. 3.8 abgebildet (Seggewies, Riegler-Floors, & Rosen, 2018).

Der Arbeitsaufwand des Rückbaus wird dabei in Megajoule pro untersuchter Bauteilfläche [ $\text{MJ}/\text{m}^2$ ] und der Wert des rückgebauten Materials wird in Euro pro Tonne [ $\text{€}/\text{t.}$ ] gemessen. Als Basis wurden umfassende quantitative Daten aus der Literatur zu Rückbauaufwänden nach

Schultmann et al. und Graubner et al., sowie Werte aus der Praxis von Rückbaustellen in Deutschland genommen. Als Ergebnis dieser Literatur- und Praxiswerten entstand im Zuge der Dissertation von Dr. Rosen ein aussagekräftiger Bauteilkatalog mit Bauteilen und Baustoffen mit den dazugehörigen Richtwerten für Arbeitsaufwand und Wert im selektiven Rückbau darstellt. Die Einstufung dieser beiden Faktoren lautet wie folgt (Rosen, Urban Mining Index : Entwicklung einer Systematik zur quantitativen Bewertung der Kreislaufkonsistenz von Baukonstruktionen in der Neubauplanung, 2021):

### 1. Faktor Arbeit $f_w$

Die Unterteilung des Rückbauaufwand von flächigen Bauteilen erfolgt von sehr gering bis sehr hoch pro untersuchter Bauteilschicht. Je nach Einstufung wird ein Faktor  $f_w$  vergeben, welcher die Wahrscheinlichkeit der Demontage und sortenreinen Rückgewinnung des Materials widerspiegelt. Wie in Abb. 4.10 ersichtlich, je niedriger der Arbeitsaufwand ist, desto größer wird der dazugehörige Faktor und damit die Wahrscheinlichkeit zur Zirkularität des untersuchten Materials (Rosen, 2021).

Arbeit [MJ/m <sup>2</sup> ]	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

Abb. 4.10: Faktor  $f_w$  des Eingangsparameter Arbeitsaufwand (Rosen, 2021)

### 2. Faktor Wert $f_v$

Der Faktor  $f_w$  spiegelt die Wahrscheinlichkeit wider, mit der das rückgebaute Material wieder dem Kreislauf zugeführt werden kann. Um den Faktor  $f_v$  zu ermitteln, ist es notwendig, das Material je nach den zu erzielenden Erlösen oder Kosten einzuteilen. Material, welches mit einem Nullwert und leicht positiven Wert zurückfließt, wird mit Faktor  $f_v$  1,0 versehen. Material, welches höhere Erlöse erzielt kann mit einem Faktor von bis zu 1,3 erhöht werden. Andererseits werden Materialien die Kosten verursachen mit einem Faktor von bis zu 0,6 reduziert. Die Bewertung des Materials erfolgt wie in Abb. 4.11 dargestellt somit je nach Preis pro Tonne und liefert einen dazugehörigen Faktor  $f_v$ . Eine Interpolation zwischen den Werten kann zwar theoretisch durchgeführt werden, dies würde aber eine Genauigkeit vortäuschen, die nicht vorhanden ist. Der Faktor soll eine Prognose der Wahrscheinlichkeit hinsichtlich der Kreislauffähigkeit des betrachteten Materials liefern.

Preis	Bewertung	Faktor ( $f_v$ )
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
Kosten	leicht negativ	0,9
-23 €/t.	hoch negativ	0,8
-54 €/t.	sehr hoch negativ	0,7
-146 €/t.	äußerst negativ	0,6

Abb. 4.11: Faktor  $f_v$  des Eingangsparameters Wert (Rosen, 2021)

Das Produkt aus den beiden Parametern Rückbauaufwand und Wert liefert als Ergebnis die Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus. Dieses kann dabei nicht einen höheren Wert als 1,0 erreichen, da nicht mehr als 100% rückgewonnen werden kann. Sollte ein selektiver Rückbau sich als nicht wirtschaftlich erweisen, so ist ein selektiver Abbruch anzustreben. Die Faktoren Arbeit und Wert definieren somit das End-of-Life-Szenario der Baustoffe in der Post-Use-Phase (Rosen, 2021).

## 4.4 Berechnungsmethodik

Wie in Kapitel 4.2, Abb. 4.5 dargestellt, ergibt sich durch Zuordnung der eingesetzten beziehungsweise rückgewonnen Materialien in Qualitätsstufen zufolge deren EoL-Szenarien und der Berücksichtigung des UMI Bauteilkataloges, basierend auf den Faktoren Arbeit und Wert, das Kreislaufpotenzial für Pre-Use- und Post-Use-Phase. Bei der Ermittlung des Kreislaufpotenzials wird wie bereits in Kapitel 4.1 beschrieben zwischen geschlossenen Kreisläufen, dem Closed-Loop-Potenzial, und offenen Kreisläufen, Loop-Potenzial, unterschieden. Die schematische Darstellung der prozentuellen Anteile auf der Bauteilebene für die jeweiligen Qualitätsstufen pro Phase und zugeordneten Potenzialgruppe CLP oder LP ist in Abb. 4.7 dargestellt.

Die Ermittlung der Kreislaufpotenziale CLP und LP für Pre- und Post-Use-Phase erfolgt wie in Kapitel 4.2.2 dargestellt auf der Bauteil- beziehungsweise Bauelementebene. Auf der Gebäudeebene wird der Urban Mining Indicator, dem UMI, durch Wichtung der Kreislaufpotenziale ausgegeben. Als Ergebnis wird das Kreislaufpotenzial des Gebäudes als quantitative Zirkulationsrate in Prozent wiedergegeben. Die einzelnen Kreisläufe fließen jedoch nicht zu gleichen Teilen in das Ergebnis ein. Materialien, welche in einem offenen Kreislauf geführt werden, erfahren durch die Weiterverwertung Qualitätsverluste. Um diese Qualitätsverluste im UMI zu berücksichtigen, wird der Anteil des LP nur zur Hälfte eingerechnet. Die Summe der Kreislaufpotenziale für Pre- und Post-Use fließen in der Gesamtbewertung jeweils zu 50 Prozent ein. Die oben angeführte Gewichtung der Gesamtbewertung ist beispielhaft in Abb. 4.12 dargestellt.

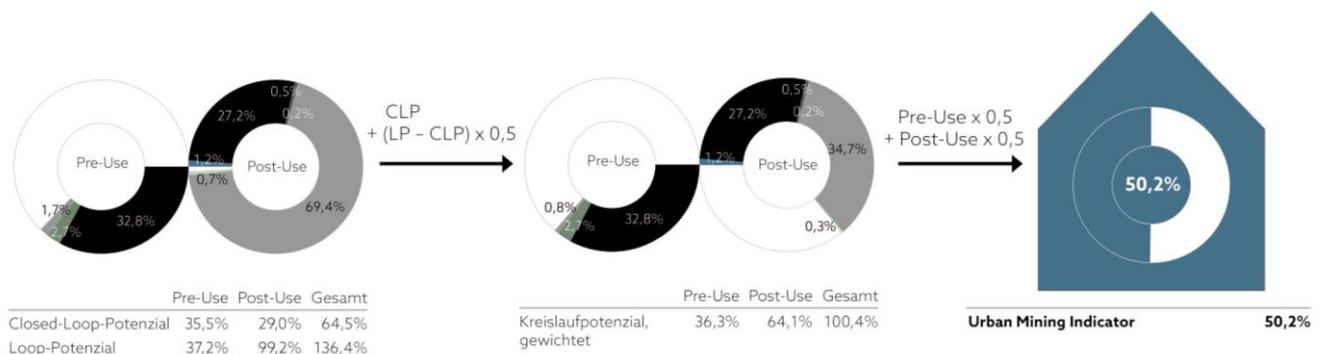


Abb. 4.12: Wichtung der Loops und Lebenszyklusphasen im UMI auf Gebäudeebene (Rosen, 2021)

In den folgenden Kapiteln werden die Formeln zur Ermittlung der Kreislaufpotenziale CLP und LP mit den oben definierten Berechnungsparametern angeführt. Im Kapitel 7.2 wird das Berechnungsschema des UMI anhand eines Fallbeispiels berechnet.

### 4.4.1 Berechnungsformeln – Closed-Loop-Potenzial

Die folgenden Formeln 4.2 und 4.3 geben das Closed-Loop-Potenzial für die Pre- und Post-Use-Phase wieder. Die Summe beider CLP ergibt das Closed-Loop-Potenzial über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes. Dieser kann theoretisch maximal 200% betragen, da sowohl in der Pre-Use-Phase als auch in der Post-Use-Phase zu 100% geschlossene Kreisläufe vorliegen könnten (Rosen, 2021).

$$\text{CLP} = \text{CLP}_{\text{pre-use}} + \text{CLP}_{\text{post-use}} \quad \text{Formel 4.1}$$

$\text{CLP}_{\text{pre-use}}$  ... Closed-Loop-Potential der Pre-Use-Phase

$\text{CLP}_{\text{post-use}}$  ... Closed-Loop-Potential der Post-Use-Phase

$$\text{CLP}_{\text{pre-use}} = \text{RU} + \text{RC} + \text{RN} \quad \text{Formel 4.2}$$

RU ... Massenanteil der wiederverwendeten Bauteile, Bauelemente, Bauprodukte

RC ... Massenanteil der wiederverwerteten Materialien

RN ... Massenanteil der erneuerbaren Rohstoffe

$$CLP_{\text{post-use}} = ru + rc + dc_{cr} + en_{cr} \quad \text{Formel 4.3}$$

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

rc ... Massenanteil der wiederverwertbaren Wertstoffe nach Rückbau, inkl. Kompost

dc<sub>cr</sub> ... Massenanteil der weiterverwertbaren Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen nach Rückbau

en<sub>cr</sub> ... Massenanteil der energetisch verwertbaren Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen nach Rückbau

Wie in Abb. 3.8 beschrieben, können Materialien bei der Wieder- und Weiterverwertung, sprich Recycling, ein hochwertiges oder übliches End-of-Life-Szenario erreichen. Das hochwertige Szenario entspricht einem selektiven Rückbau und das übliche Szenario einem selektiven Abbruch. Die jeweiligen Masseanteile für Wiederverwertung  $rc$  und Weiterverwertung  $dc_{cr}$  mit den dazugehörigen Anteilen aus Rückbau und Abbruch sind in den Formeln 4.4 bis 4.5 dargestellt.

$$rc = rc_{sd} + rc_{ud} \quad \text{Formel 4.4}$$

rc<sub>sd</sub> ... Massenanteil der wiederverwertbaren Wertstoffe im EoL-Szenario selektiver Rückbau

rc<sub>ud</sub> ... Massenanteil der wiederverwertbaren Wertstoffe im EoL-Szenario selektiver Abbruch

$$dc_{cr} = dccr_{sd} + dccr_{ud} \quad \text{Formel 4.5}$$

dccr<sub>sd</sub> ... Massenanteil der weiterverwertbaren Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen im EoL-Szenario selektiver Rückbau

dccr<sub>ud</sub> ... Massenanteil der weiterverwertbaren Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen im EoL-Szenario selektiver Abbruch

Bei der Masseermittlung von wiederverwendeten Materialien  $ru$  wird nur der Anteil aus dem selektiven Rückbau berücksichtigt, da zur Wiederverwendung eine entsprechende Demontage benötigt wird und damit immer das hochwertige EoL-Szenario betrachtet wird. Die Formel 4.6 beschreibt dabei eine Prognose mit welcher Wahrscheinlichkeit der Masseanteil tatsächlich der Wiederverwendung zugeführt wird. Dies ist stark von den Faktoren Arbeit und Wert abhängig. Die restlichen Prozent werden dem üblichen EoL-Szenario zugeführt, siehe dazu Abb. 3.8.

$$ru = ru_{sd} = \frac{M_{ru} * f_w * f_v}{M} * 100 \quad \text{Formel 4.6}$$

M ... Masse des eingesetzten Materials

M<sub>ru</sub> ... Masse der wiederverwendbaren Baustoffe (Re-Use)

f<sub>w</sub> ... Faktor Arbeit

f<sub>v</sub> ... Faktor Wert

Ähnlich wie in Formel 4.6 beschrieben, erfolgt dieselbe Prognose auch für die Masseanteile der hochwertigen EoL-Szenarien für die Wieder- und Weiterverwertung.

$$rc_{sd} = \frac{M_{rc} * f_w * f_v * MLP}{M} * 100 \quad \text{Formel 4.7}$$

M ... Masse des eingesetzten Materials

$M_{rc}$  ... Masse der wiederverwertbaren Wertstoffe (Recycling)

MLP ... Material-Loop-Potenzial

$$d_{ccr_{sd}} = \frac{M_{d_{ccr}} * f_w * f_v}{M} * 100 \quad \text{Formel 4.8}$$

$M_{d_{ccr}}$  ... Masse der weiterverwertbaren Wertstoffe aus zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen (Downcycling)

#### 4.4.2 Berechnungsformeln – Loop-Potenzial

Wie in Abb. 4.1 dargestellt, gibt das Loop-Potenzial zusätzlich zum Closed-Loop-Potenzial auch Materialien wieder, die in einem offenen Kreislauf gehalten werden können. Ähnlich dem CLP kann auch hier das maximale LP theoretisch 200 Prozent betragen.

$$LP = LP_{pre-use} + LP_{post-use} \quad \text{Formel 4.9}$$

$LP_{pre-use}$  ... Loop-Potential der Pre-Use-Phase

$LP_{post-use}$  ... Loop-Potential der Post-Use-Phase

In der Formel 4.10 und Formel 4.11 wird das CLP der Pre- und Post-Use-Phase um die Qualitätsstufe der Weiterverwertung von nicht zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen ergänzt.

$$LP_{pre-use} = CLP_{pre-use} + DC \quad \text{Formel 4.10}$$

$CLP_{pre-use}$  ... Closed-Loop-Potential der Pre-Use-Phase, siehe Formel 4.2

DC ... Masseanteil der weiterverwerteten Materialien

$$LP_{post-use} = CLP_{post-use} + dc + en_r \quad \text{Formel 4.11}$$

$CLP_{post-use}$  ... Closed-Loop-Potential der Post-Use-Phase, siehe Formel 4.3

dc ... Masseanteil der weiterverwertbaren Rohstoffe nach dem Rückbau

$en_r$  ... Masseanteil energetisch verwertbarer

Da die Weiterverwertung noch nicht üblich ist, erfordert auch diese zum Teil einen entsprechenden Arbeitsaufwand und eine entsprechende Wertzuordnung. Dadurch besteht auch die Weiterverwertung, sprich das Downcycling, aus einem Masseanteil zufolge Rückbau und Abbruch.

$$dc = dc_{sd} + dc_{ud} \quad \text{Formel 4.12}$$

$dc_{sd}$  ... Massenanteil der weiterverwertbaren Wertstoffe im EoL-Szenario selektiver Rückbau

$dc_{ud}$  ... Massenanteil der weiterverwertbaren Wertstoffe im EoL-Szenario selektiver Abbruch

Ähnlich wie bei den Masseanteilen der hochwertigen EoL-Szenarien des CLP wird auch der Masseanteil der Weiterverwertung zufolge Rückbau als Prognose in Abhängigkeit von Arbeit und Wert angegeben.

$$dc_{sd} = \frac{M_{dc} * f_w * f_v}{M} * 100 \quad \text{Formel 4.13}$$

$M_{dc}$  ... Masse der weiterverwertbaren Wertstoffe (Downcycling)

### 4.4.3 Berechnungsformeln – Urban Mining Indicator

Wie anfänglich in Kapitel 4.4 beschrieben und in der Abb. 4.12 dargestellt, fließt das LP durch die Qualitätsverluste nur zur Hälfte in die Bewertung mit ein. Die Anteile des Closed-Loop-Potenzials sind dabei vom Loop-Potenzial zu subtrahieren, da ansonsten das CLP doppelt in die Berechnung eingeht. Wendet man nun die Formeln 4.1 bis 4.13 auf sämtliche Bauteile an, erhält man auf Gebäudeebene kumuliert das Bewertungsergebnis den Urban Mining Indicator für die Pre- und Post-Use-Phase.

$$UMI_{pre-use} = CLP_{pre-use} + \frac{(LP_{pre-use} - CLP_{pre-use})}{2} \quad \text{Formel 4.14}$$

$CLP_{pre-use}$  ... Closed-Loop-Potential der Pre-Use-Phase, siehe Formel 4.2

$LP_{pre-use}$  ... Loop-Potential der Pre-Use-Phase, siehe Formel 4.10

$$UMI_{post-use} = CLP_{post-use} + \frac{(LP_{post-use} - CLP_{post-use})}{2} \quad \text{Formel 4.15}$$

$CLP_{post-use}$  ... Closed-Loop-Potential der Pre-Use-Phase, siehe Formel 4.3

$LP_{post-use}$  ... Loop-Potential der Pre-Use-Phase, siehe Formel 4.11

Der Urban Mining Indicator setzt sich aus einem gleichen Anteil aus der Pre- und Post-Use-Phase zusammen, siehe Formel 4.16

$$UMI = (UMI_{pre-use} + UMI_{post-use}) * 0,5 \quad \text{Formel 4.16}$$

## 5 Madaster Zirkularitätsindikator (MZI)

Die Madaster Foundation ist eine Not-For-Profit-Organisation, welche sich als entscheidendes Bindeglied für den Übergang in eine funktionierende Kreislaufwirtschaft sieht. Die Foundation wurde von dem niederländischen Architekten Thomas Rau gegründet. Das Ziel dieser Foundation ist es Materialkreisläufe zu schließen, um so Abfall zu vermeiden (Madaster Foundation GmbH, o. D.).

Um Material in allen Wirtschaftskreisläufen verfügbar zu halten, entstand die Idee ein Kataster für die verbauten Materialien und Produkte eines Bauwerks zu erstellen. Damit wird ein Gebäude zu einem Materiallager, welches nach dem End-OF-Use die Materialien wieder dem Markt zur Verfügung freigibt. Dadurch wird die Planung zukünftiger zirkulärer Bauvorhaben deutlich vereinfacht, da beim Rückbau bestehender zertifizierter Gebäude deren Materialbestand weiterverplant werden kann. Um diese Idee Wirklichkeit werden zu lassen, wurde die digitale Plattform Madaster ins Leben gerufen. Auf der Madaster Plattform kann ein Materialpass für ein Gebäude erstellt werden, welcher sich als Grundbruch der Materialien sieht (Madaster Germany GmbH, 2024). Um auch die Zirkularität des Gebäudes messbar zu machen, hat die Madaster Foundation einen eigenen Zirkularitätsindikator entwickelt, welcher den Material Circularity Indicator, MCI abgekürzt, der von der Ellen MacArthur Foundation als Basis nutzt.

Zusammenfassend bietet die Madaster Plattform eine Erfassung der Gebäude-, Material- und Produktdaten an, aus deren Ergebnissen wiederum mit dem Madaster Zirkularitätsindikator Tool das Kreislaufmanagement eines Gebäudes möglich gemacht wird. Darüber hinaus kann die Plattform als Marktplatz genutzt werden, um zukünftig verfügbare Materialien weiterverplanen zu können (Madaster Germany GmbH, 2021).

Die Ellen MacArthur Foundation ist wiederum ebenfalls eine gemeinnützige Organisation, welche sich neben der Lösungsfindung zu Themen wie Klimawandel und Biodiversität auch dem Vorantrieb der Kreislaufwirtschaft verschrieben hat. Dabei wird der Fokus auf verschiedene Interessensgruppen und Sektoren gelegt, um hier Branchenübergreifend die Weichen zu einer kreislaforientierten Gesellschaft zu stellen. Neben der Abhaltung von Vorträgen werden auch Ressourcen für Lehrende betreffend Kreislaufwirtschaft zur Verfügung gestellt. Die Ellen MacArthur Foundation versucht dabei auch die Mediatorrolle bei der Implementierung von Kreislaufwirtschaft in Wirtschaft, Regierung, Wissenschaft, Designern und anderen NGOs einzunehmen (Ellen MacArthur Foundation, o. D.). Um den Wandel von einer linearen zu einer zirkulären Wirtschaft sichtbar zu machen, wurde von der Ellen MacArthur Foundation in Kooperation mit ANSYS Granta der Material Circularity Indicator, kurz MCI, erarbeitet. Im Kapitel 5.3 wird dieser genauer betrachtet und analysiert.

### 5.1 Bewertung der Zirkularität

Wie beim Urban Mining Index wird beim Madaster Zirkularitätsindikator eine Prozentangabe hinsichtlich der Zirkularität eines Gebäudes ausgegeben. Die Berechnung der Zirkularitätsrate eines Gebäudes anhand des ZI kann in 3 Stoffströme, beziehungsweise Phasen, unterteilt werden (Madaster Germany GmbH, 2021).

In der ersten Phase, der Materialherkunftsphase, wird das Verhältnis zwischen Primärrohstoffvolumen und dem Volumen an recycelten, wiederverwendeten oder erneuerbaren Materialien betrachtet. Die Verwendung von recycelten Materialien wird auf Grund der anfallenden Recyclingabfälle als weniger attraktiv eingestuft.

Die zweite Phase, die Nutzungsphase, betrachtet die erwartete Funktionslebensdauer der verwendeten Produkte gegenüber der durchschnittlichen Funktionslebensdauer ähnlicher

Produkte. Sprich der funktionale Lebenszyklus eines Produktes sollte im Idealfall den Branchendurchschnitt übertreffen

Die letzte Phase, die Materialverwertungsphase, gibt das Verhältnis zwischen Abfallmenge und Menge an wiederverwendbaren und/oder recycelten Materialien und Produkten wieder (Madaster Germany GmbH, 2021).

In Abb. 5.1 sind die drei Phasen zur Ermittlung des MZI farblich dargestellt:

- Materialherkunft (blau)
- Lebensdauer (Grün)
- Materialverwertung (Orange) nach dem End-of-Life

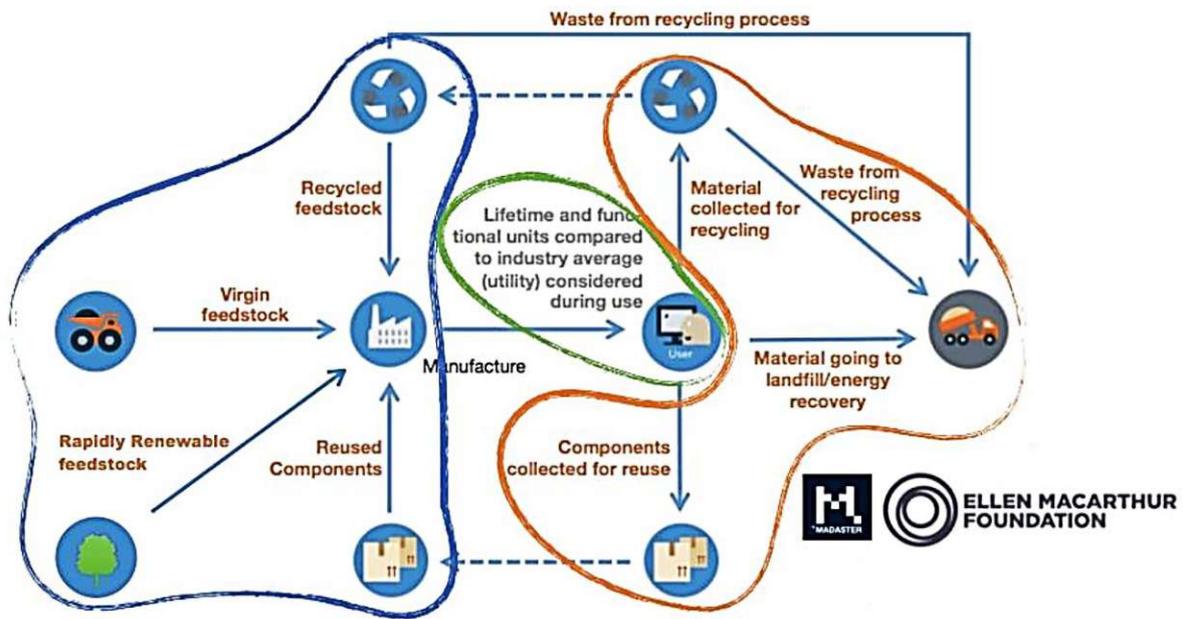


Abb. 5.1: Schematische Darstellung der Stoffströme (Madaster Germany GmbH, 2021)

Damit folgt Madaster denselben Grundprinzipien die die Ellen MacArthur Foundation:

- Erhöhung des Anteils an recycelten und/oder wiederverwendeter Materialien
- Erhöhung der funktionalen Lebensdauer von Produkten
- Reduktion von Abfall durch Verbesserung der Sammelrate der Materialien und Produkte

Wie in Abb. 5.1 ersichtlich ist, implizieren die gestrichelten Verbindungen, dass kein Closed Loop erforderlich ist. So ermöglicht der MZI, dass unter anderem recycelte Rohstoffe nicht aus demselben Produkt zurückgewonnen werden müssen, sondern auch zum Beispiel am freien Markt eingekauft werden können.

Damit wird in der Berechnung des MZI keine Unterscheidung zwischen offenen und geschlossenen Kreisläufen gemacht.

## 5.2 Systemgrenzen und Betrachtungsebenen

### 5.2.1 Systemgrenzen des MZI

Der MZI gibt Auskunft über die Zirkularitätsrate eines Gebäudes und damit die Kreislauffähigkeit von Materialien und Produkten. Andere Nachhaltigkeitsindikatoren werden dabei jedoch nicht in der Berechnung berücksichtigt. Zu den nicht betrachteten Indikatoren zählen neben dem Energieverbrauch während der Nutzungsdauer eines Gebäudes und der eingebetteten Energie verwendeter Materialien auch der Wasserverbrauch während der Herstellungs-, Bau- und Nutzungsphase. Auch der Ökologische und Kohlenstoff-Fußabdruck fließt nicht in die Zirkularitätsrate mit ein.

Damit ein Produkt und/oder Bauteil im MZI einer Wiederverwendung zugeführt werden kann, müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

- Etwaige Montagepunkte sind leicht zugänglich und das Produkt/Bauteil kann so entfernt werden, dass keine anderen Gebäudeteile beschädigt werden
- Die für die Installation eines Produktes erforderlichen Montagepunkte und -methoden sind standardisiert und vorgefertigt
- Für die Demontage kann Standardwerkzeug verwendet werden ohne Beschädigungen an angrenzenden Bauteilen/Objekten zu verursachen.

Der MZI hat wie bereits erwähnt den Material Circularity Indicator als Basis. Dieser hat zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit folgende Einschränkungen beziehungsweise Systemgrenzen (Ellen MacArthur Foundation, 2019):

- Die Methodik hinter dem MCI berücksichtigt bis zu diesem Zeitpunkt ausschließlich die im Endprodukt verwendeten Materialien. Damit werden die Materialverluste entlang der Lieferkette der einzelnen Produkte, welche für die Herstellung des Endproduktes notwendig sind, nicht berücksichtigt. Ein Mangel an notwendigen Daten von den Produktherstellern verhindert zum derzeitigen Zeitpunkt die Berücksichtigung dieser Materialverluste. Die Ellen MacArthur Foundation hat jedoch eine Zusatzmethodik entwickelt, welche diesen Ansatz verfolgt.
- Eine weitere Einschränkung besteht darin, dass die MCI-Methodik geschlossene Kreisläufe nicht explizit begünstigt.
- Das zurückgewonnene Material, welches am Ende der Nutzungsdauer dem Recycling zugeführt wird, wird zu einer ähnlichen Qualität wie das ursprüngliche Neumaterial verarbeitet.
- Etwaige Materialverluste während der Aufbereitung eines Materials zur Wiederverwendung werden nicht berücksichtigt
- Die Masse des Produktes ändert sich nicht im Laufe der Nutzungsdauer
- Die Variablen E, welche die Effizienz eines Recyclingprozesses beschreiben und in Formel 5.7 bis Formel 5.9 beschrieben werden, hängen stark vom Material, Menge an Materialien pro Produkt und dem Recyclingvorbereitungsprozess ab. Genaue Effizienzkennwerte setzen ein umfangreiches Verständnis vom Rückgewinnungs- und Recyclingprozesses des betrachteten Produktes voraus. Sollten Daten dazu fehlen, kann auf generische Werte zurückgegriffen werden, diese sind aber als solches zu kennzeichnen.

### 5.2.2 Betrachtungsebenen des MZI

Die Ermittlung des Madaster ZI-Score nutzt die Messmethode des gewichteten Durchschnitts und folgt damit der MCI-Betrachtung auf Unternehmensebene, siehe Kapitel 5.3.2. Das Gebäude mit den unterschiedlichen Schichten und Materialien wird dabei wie ein Unternehmen betrachtet. Auf Produktebene stehen hier ebenfalls die einzelnen verbauten Materialien, welche zu Bauteilschichten und in einem weiteren Schritt zu dem betrachteten Gebäude aufsummiert werden. Die beschriebene Messmethode ist in Abb. 5.2 dargestellt (Madaster Germany GmbH, 2021).

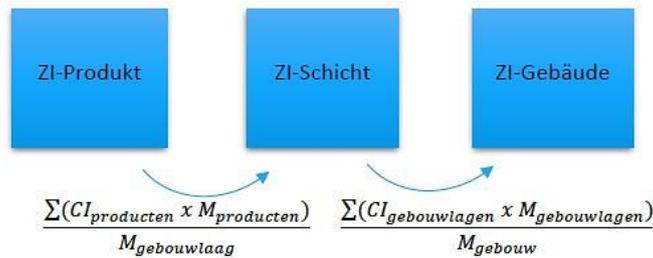


Abb. 5.2: Messmethode des gewichteten Durchschnitts (Madaster Germany GmbH, 2021)

Damit lassen sich die Betrachtungsebenen des MZI auf folgende drei Ebenen zusammenfassen:

1. Produktebene
2. Gebäudeschicht, laut DIN 276 Kostengruppe 300 „Bauwerk – Baukonstruktionen“ (DIN - Deutsches Institut für Normung, 2018)
3. Gebäudeebene

Die Genauigkeit des MZI-Grades ist dabei wesentlich von den eingespielten Gebäudedaten abhängig. Da es meistens Materialien und Produkte als auch Gebäudeschichten gibt, die bei der Dateneinspielung Unbekannt sind, wird der errechnete Madaster-ZI-Score des Gebäudes noch mit zwei Korrekturfaktoren bereinigt:

- Korrekturfaktor für unbekannte Materialien
- Korrekturfaktor für unbekannte Gebäudeschichten

Diese ergeben sich durch das Erfassen der verbauten Materialien unter Nutzung der Madaster Plattform. Diese Materialien werden im Hintergrund mit den auf der Madaster Plattform zugrunde liegenden Materialdatenbanken abgeglichen. Jene Materialien, die nicht identifiziert werden können, beziehungsweise fehlende Massenangaben werden von der Plattform erkannt und ergeben einen gebäudeabhängigen Korrekturfaktor. In Abb. 5.3 sind diese beiden Korrekturfaktoren für ein Gebäude dargestellt (Madaster Germany GmbH, 2021).



Abb. 5.3: Korrekturfaktoren für den Madaster ZI-Score (Madaster Germany GmbH, 2021)

## 5.3 Berechnungsparameter – Ellen MacArthur Foundation – MCI

Im folgenden Kapitel wird zuerst der Material Circularity Indicator MCI betrachtet, welcher als Grundbaustein des Madaster Zirkularitätsindikators fungiert. Der MCI ermöglicht Unternehmen den zirkulären Wert ihrer Produkte und Materialien zu ermitteln und gibt Möglichkeiten an, die betriebswirtschaftlichen Risiken zu reduzieren. Der MCI misst und bewertet dabei die Stoffströme eines Produktes, genauer gesagt inwieweit die linearen Stoffströme minimiert und zirkuläre Ströme maximiert wurden. Dabei fließt auch die Nutzungsdauer eines Produktes in die Berechnung ein, da eine längere Lebensdauer zu einer Verringerung des Neumaterialbedarfs führt, was wiederum den linearen Stoffstromanteil reduziert. Die in Abbildung Abb. 5.1 dargestellten Stoffströme decken sich mit den eingehenden Stoffströmen des MCI (Ellen MacArthur Foundation, 2019).

Die Betrachtung der Zirkularität kann beim MCI auf der Ebene des Produktes oder des Unternehmens erfolgen. Auf Produktebene betrachtet man wie bereits oben angeführt die einzelnen Stoffströme die als Input in die Herstellung eines Produktes einfließen, als auch Output, welcher nach dem End-of-Life eines Produktes hinausfließen. Die Betrachtung des MCI auf der Unternehmensebene basiert auf der Hypothese, dass die materielle Zirkularität eines Unternehmens aus der materiellen Kreislauffähigkeit der Unternehmensprodukte aufgebaut werden kann. Damit folgt der MCI auf Unternehmensebene denselben Ansätzen wie jener für die Produktebene und wird als gewichteter Durchschnitt der MCIs der Produktebene ermittelt.

Der MCI hat die Wiederherstellung von Stoffströmen auf Produkt- und Unternehmensebene im Fokus und baut auf folgenden sechs Prinzipien auf (Ellen MacArthur Foundation, 2019):

1. Biologische Materialien sollen aus nachhaltigen Quellen gewonnen werden
2. Eingesetzte Rohstoffe sollen aus recycelten oder wiederverwendeten Quellen stammen
3. Die funktionale Lebensdauer eines Produktes ist zu erhöhen
4. Am End-Of-Life eines Produktes sind dessen Komponenten einer Wiederverwendung beziehungsweise einem Recycling zuzuführen
5. Intensivierung der Produktnutzung durch zum Beispiel Service- und Sharing-Modelle
6. Gewährleistung, dass biologische Materialien nicht kontaminiert werden und einer weiteren biologischen Nutzung erhalten bleiben

### 5.3.1 Berechnungsmethodik MCI auf Produktebene - $MCI_P$

In diesem Kapitel wird der MCI auf der Produktebene genauer betrachtet. In der folgenden Abb. 5.4 sind die Stoffströme aus der Abb. 5.1 mit entsprechenden MCI-Indikatoren hinterlegt (Ellen MacArthur Foundation, 2019).

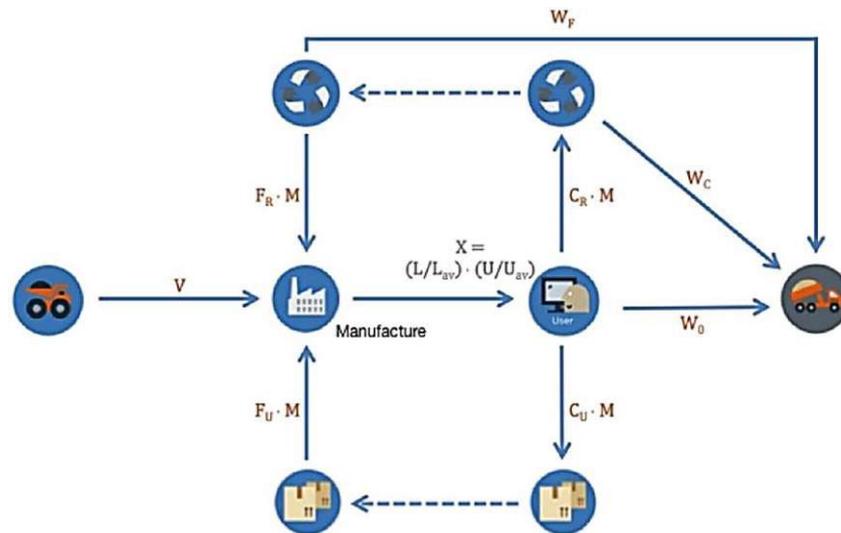


Abb. 5.4: Schematische Darstellung der Stoffströme inklusive MCI-Indikatoren (Ellen MacArthur Foundation, 2019)

Der MCI auf der Produktebene errechnet sich wie in Formel 5.1 dargestellt:

$$MCI_p = 1 - LFI * F(X) \tag{Formel 5.1}$$

MCI<sub>p</sub> ... Material Circularity Indicator [%]

LFI ... Linear Flow Index [%]

F(X) ... Nutzwertfaktor [-]

Der Linear Flow Index misst jenen Materialanteil, welcher einem linearen Materialfluss entspricht. Somit misst der LFI den Neumaterialanteil der als Abfall endet und somit nicht zur Zirkularität beiträgt. Der LFI deckt somit die beiden Phasen Materialherkunft und Materialverwertung ab. In Formel 5.2 wird die Formel zur Berechnung des LFI angegeben.

$$LFI = \frac{V + W}{2M + \frac{W_F - W_C}{2}} \tag{Formel 5.2}$$

V ... Masse Neurohstoffe eines Produktes [kg]

W ... Masse des Abfalls [kg]

M ... Masse des fertigen Produktes [kg]

W<sub>c</sub> ... Abfallmenge bei Recycling des Produktes [kg]

W<sub>f</sub> ... Abfallmenge bei Herstellung eines neuen Produktes [kg]

Der LFI nimmt dabei einen Wert zwischen 1 und 0 an, wobei ein Ergebnis von 1 für einen komplett linearen Materialfluss steht und 0 für einen zirkulären Fluss.

Die Masse an Neurohstoffen eines Produktes ergibt sich wie folgt:

$$V = M(1 - F_R - F_U - F_S) \tag{Formel 5.3}$$

V ... Masse Neumaterial eines Produktes [kg]

M ... Produktmasse [kg]

F<sub>R</sub> ... Prozentanteil recycelter Rohstoffe [%]

F<sub>U</sub> ... Prozentanteil wiederverwendete Rohstoffe [%]

F<sub>S</sub> ... Prozentanteil biologisches Material aus nachhaltiger Produktion [%]

Die Abfallmasse setzt sich wiederum aus einer Abfallmasse zufolge Materialherstellung und einer Abfallmasse zufolge Recycling zusammen.

$$W = W_0 + \frac{W_F + W_C}{2} \quad \text{Formel 5.4}$$

$W_0$  ... Abfallmenge [kg], der nach der Nutzungsdauer eines Produkts auf einer Deponie oder in einer Verbrennungsanlage landet

$W_C$  ... Abfallmenge [kg], der durch den Recyclingprozess nach der Nutzungsdauer des Produkts entsteht.

$W_F$  ... Masse des Abfalls [kg], der durch den Recyclingprozess entsteht, der die Materialien für die Herstellung eines Produkts liefert.

Die Berechnung der einzelnen Abfallmengen, welche in Formel 5.4 abgebildet sind, werden in den Formel 5.5 bis Formel 5.9 dargestellt.

$$W_0 = M(1 - C_R - C_U - C_C - C_E) \quad \text{Formel 5.5}$$

$M$  ... Produktmasse [kg]

$C_R$  ... Masseanteil, welcher nach Nutzungsphase recycelt wird [%]

$C_U$  ... Masseanteil wiederverwendeter Komponenten [%]

$C_C$  ... Masseanteil nicht kontaminiertes biologisches Material [%]

$C_E$  ... Masseanteil biologisches Material aus nachhaltiger Produktion – Energierückgewinnung [%]

Die Berücksichtigung von Energierückgewinnung als Teil der Kreislaufwirtschaft gilt ausschließlich für biologischem Material unter Einhaltung aller folgender Bedingungen (Ellen MacArthur Foundation, 2019):

- Alle anderen Optionen als Deponierung für das Ende der Lebensdauer des Materials müssen nachweislich erschöpft sein
- Das Material muss aus einer biologischen Quelle mit stammen
- Das biologische Material muss aus einer nachweislichen nachhaltigen Produktion stammen
- Das biologische Material darf keine technischen Stoffe enthalten
- Die Energierückgewinnung muss optimiert sein
- Nebenprodukte bei der Energierückgewinnung müssen selbst biologisch nützlich sein (z.B: als Bodenverbesserung)

Ist eine dieser Bedingungen nicht erfüllt, darf der Masseanteil  $C_E$  nicht berücksichtigt werden, was den Masseanteil an nichtverwertbarem Abfall erhöht und die Zirkularitätsrate senkt.

Sind die oben angeführten Bedingungen erfüllt, kann der Masseanteil  $C_E$  über die Effizienz der Energierückgewinnung  $E_E$  und dem Kohlenstoffgehalt des biologischen Materials  $B_C$  ermittelt werden:

$$C_E = (E_E * B_C) \quad \text{Formel 5.6}$$

$E_E$  ... Effizienz der Energierückgewinnung [%]

$B_C$ ... Kohlenstoffgehalt des biologischen Materials, welche die oben angeführten Bedingungen erfüllt

Die Effizienz der Energierückgewinnung ermittelt sich dabei wie folgt:

$$E_E = \left( \frac{E_R}{HHV * M_B} \right) \quad \text{Formel 5.7}$$

$E_R$  ... zurückgewonnene Energie [MJ]

HHV... obere Heizwert [MJ]

$M_B$  ... Masse des biologischen Materials, welche ebenfalls die oben angeführten Bedingungen erfüllt

Sollten für den Kohlenstoffgehalt des Materials keine Datenvorliegen, kann ein Standardwert von 45% der Masse angenommen werden, da der Kohlenstoffgehalt der meisten Baustoffe zwischen 40-50% liegt (Ellen MacArthur Foundation, 2019).

Neben der Abfallmenge  $W_0$ , welche nach dem End-Of-Life eines Produktes auf einer Deponie beziehungsweise Verbrennungsanlage enden, werden im Linear Flow Index auch Abfallmengen berücksichtigt, die zufolge des Recyclingprozesses eines Produktes für die Herstellung neuer Produkte anfallen.

$$W_C = M(1 - E_C) * C_R \quad \text{Formel 5.8}$$

$W_C$  ... Abfallmenge [kg], der durch den Recyclingprozess nach der Nutzungsdauer des Produkts entsteht.

$E_C$  ... Effizienz des Recyclingprozesses [%]

$C_R$  ... Masseanteil [%], welcher nach Nutzungsphase recycelt wird

$M * C_R$  stellt dabei den Masseanteil eines Materials dar, der als Input in den Recyclingprozess eines Produktes eintritt.

$$W_F = M \frac{(1 - E_F) * F_R}{E_F} \quad \text{Formel 5.9}$$

$W_F$  ... Masse des Abfalls [kg], der durch den Recyclingprozess entsteht, der die Materialien für die Herstellung eines neuen Produktes liefert.

$E_F$  ... Effizienz des Recyclingprozesses zur Herstellung recycelter Rohstoffe [%]

$F_R$  ... Prozentanteil recycelter Rohstoffe eines Materials

$M * F_R$  stellt dabei den Masseanteil eines Materials dar, der als Output aus dem Recyclingprozess hervorgeht.

In einem Closed-Loop wären  $E_F$  und  $E_C$  ident. Der MCI setzt jedoch einen Closed-Loop nicht voraus und verfolgt den Ansatz, dass ein Zukauf von recycelten Rohstoffen bei der Produktherstellung möglich ist. Dadurch kann es bei der Addition von Abfallmengen  $W_C$  und  $W_F$  zu einer Verdopplung der Abfallmassen kommen. Um dies zu verhindern, wird für die gesamte Abfallmasse  $W$  der Abfall  $W_C$  und  $W_F$  gemittelt.

Der Nutzwertfaktor laut Formel 5.10 gibt wiederum die Auswirkungen zufolge der Nutzungsdauer eines Produktes wieder und spiegelt somit die Phase der Lebensdauer wider.

$$F(X) = \frac{0,9}{X} = \frac{0,9}{\left(\frac{L}{L_{av}}\right) * \left(\frac{U}{U_{av}}\right)} \quad \text{Formel 5.10}$$

$L$  ... Potenzieller funktionaler Lebenszyklus [Jahre]

$L_{av}$  ... Branchendurchschnittlicher Lebenszyklus [Jahre]

$U$  ... Grad der Nutzungsintensivität [%]

$U_{av}$  ... Branchendurchschnittlicher Grad der Nutzungsintensivität [%]

Der Nutzwertfaktor wurde eingeführt, damit eine längere Nutzungsdauer eines Produktes einen positiven Einfluss auf die Zirkularität hat, da es dadurch zu einem geringeren Neumaterialeinsatz kommt.

### 5.3.2 Berechnungsmethodik MCI auf Unternehmensebene – MCI<sub>C</sub>

Der MCI der Ellen MacArthur Foundation kann neben der Zirkularitätsbewertung eines Produktes auch die materielle Zirkularität eines Unternehmens ermitteln. Dieser MCI<sub>C</sub> ergibt sich aus der materiellen Zirkularität der Einzelprodukte MCI<sub>P</sub> des Unternehmens. Damit folgt der MCI<sub>C</sub> demselben Ansatz wie auf der Produktebene und ergibt sich als gewichteter Durchschnitt des MCI<sub>P</sub>.

Der Beurteilungszeitraum des MCI<sub>C</sub> beträgt im Regelfall 1 Jahr, kann aber frei gewählt werden.

Da im Regelfall nicht alle Produkte eines Unternehmens eine eigene Material Circularity Indicator Bewertung erhalten, wird das Prinzip der Referenzprodukte verwendet. Hier werden Produkte einer Produktreihe durch ein Referenzprodukt repräsentiert. Voraussetzung dafür ist:

- ähnliche Materialzusammensetzung und Masse,
- ähnliche Anteile an recyceltem und wiederverwendeten Materialanteilen im Ausgangsmaterial
- ähnliche Anteile an recyceltem und wiederverwendeten Materialanteilen nach Gebrauch
- ähnlicher Verwendungszweck

Der MCI eines Referenzproduktes wird wie in Kapitel 5.3.1 beschrieben ermittelt.

Um nun die MCIs mehrerer Produktreihen zusammenzufassen, wird ein Normalisierungsfaktor N eingeführt. Mit diesem Normalisierungsfaktor kann ein gewichteter Durchschnitt der betrachteten MCI<sub>P</sub> ermittelt werden.

Die Ellen MacArthur Foundation unterscheidet beim MCI<sub>C</sub> zwischen einzelnen Abteilungen  $D_{\alpha}$  (departments) eines Unternehmens, wobei  $\alpha$  für die das jeweilige Department steht. Dazu wird zuerst ein MCI<sub>D</sub> für die jeweilige Abteilung ermittelt. Die Produktreihen einer Abteilung werden mittels  $R(\alpha,\beta)$  gekennzeichnet. Referenzprodukte werden mittels  $P(\alpha,\beta)$  dargestellt. Dieser Aufbau ist in Abb. 5.5 ersichtlich (Ellen MacArthur Foundation, 2019).

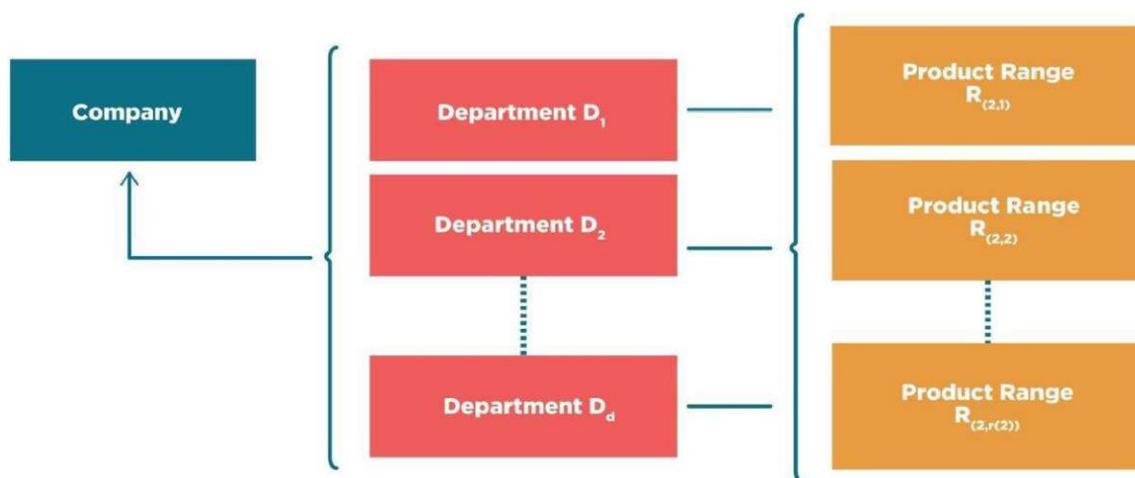


Abb. 5.5: Aufbau des MCI auf Unternehmensebene (Ellen MacArthur Foundation, 2019)

Diesem Ansatz folgend ergibt sich der Normalisierungsfaktor  $N_{D(\alpha)}$  für eine Abteilung nach Formel 5.11

$$N_{D(\alpha)} = \sum_{\beta} N_{R(\alpha,\beta)} \quad \text{Formel 5.11}$$

$N_{R(\alpha,\beta)}$  ... Normalisierungsfaktor für die Produktreihe  $R_{(\alpha,\beta)}$

Daraus ergibt sich der  $MCI_{D(\alpha)}$  für eine Abteilung eines Unternehmens wie folgt

$$MCI_{D(\alpha)} = \frac{1}{N_{D(\alpha)}} \sum_{\beta} (N_{R(\alpha,\beta)} * MCI_{P(\alpha,\beta)}) \quad \text{Formel 5.12}$$

$MCI_{P(\alpha,\beta)}$  ... Material Circularity Indicator für das Referenzprodukt  $P_{(\alpha,\beta)}$

Mit dem  $MCI_D$  einer jeden Abteilung lässt sich nun der gewichtete Durchschnitt des Material Circularity Indicators für das gesamte Unternehmen bilden

$$MCI_C = \frac{1}{N_C} \sum_{\alpha} (N_{D(\alpha)} * MCI_{D(\alpha)}) \quad \text{Formel 5.13}$$

mit

$$N_C = \sum_{\alpha} N_{D(\alpha)} \quad \text{Formel 5.14}$$

Da diese Bewertungsmethode auf kein Gewerbe beziehungsweise keinen speziellen Anwendungsfall festgelegt ist, wird nun im folgenden Kapitel diese Methodologie der Ellen MacArthur Foundation durch die Madaster Foundation aufs Baugewerbe umgelegt.

## 5.4 Berechnungsparameter – MZI für Gebäude

### 5.4.1 Anpassungen vom MCI auf MZI

Da sich der MCI auf Produkte jeder Art konzentriert, wurden für die Anwendung des MZI auf Bauprodukte an folgenden Stellen Vereinfachungen beziehungsweise Anpassungen vorgenommen:

1. Die Betrachtungsebenen des  $MCI_P$  und  $MCI_C$  sind übernommen worden, aber auf die Baubranche folgendermaßen angepasst worden:

**a.  $MCI_P = ZI_{\text{Produkt}}$**

Der Material Circularity Indicator für ein einzelnes Produkt bleibt gleich, wird aber bei der Bewertungsmethode nach Madaster als ZI-Produkt bezeichnet. Der Normalisierungsfaktor  $N_{R(\alpha,\beta)}$  wird zur Masse des Produktes

**b.  $MCI_D = ZI_{\text{Gebäudeschicht}}$**

Der Material Circularity Indicator für eine Abteilung eines Unternehmens wird zum Zirkularität-Indikator für eine Gebäudeschicht laut DIN 276. Der Normalisierungsfaktor  $N_{D(\alpha)}$  wird zur jeweiligen Masse der Schicht

**c. MCI<sub>c</sub> wird zum ZI<sub>Objekt</sub>**

Der Material Circularity Indicator für eine Abteilung eines Unternehmens wird zum Zirkularitäts-Indikator für eine Bauteilschicht. Der Normalisierungsfaktor  $N_{D(\alpha)}$  wird zur jeweiligen Masse der Schicht

Die Betrachtungsebenen sind bereits in Kapitel 5.2.2 beschrieben worden und in Abb. 5.2 dargestellt.

2. *Es wurden zwei Korrekturfaktoren zur Bereinigung fehlender Datensätze hinsichtlich eingesetzter Materialien und/oder Gebäudeschichten eingeführt. Dies kann vor allem beim Erstellen eines ZIs für ein Bestandsgebäude oder bei fehlenden Materialdaten eingesetzter Produkte notwendig sein.*
3. *Bei der Massenermittlung des Neurohstoffanteils eines Produktes wurde der Masseanteil  $F_S$  an biologischem Material mit dem Masseanteil  $F_{RR}$  an schnell erneuerbaren Materialien ersetzt*
4. *Bei der Massenermittlung der Abfallmenge  $W_0$  entfallen die biologischen Masseanteile  $C_C$  und  $C_E$*
5. *Die Betrachtung der Nutzungsintensivität  $\frac{U}{U_{av}}$  bei der Ermittlung des Nutzungsfaktors  $F(X)$  wird ebenfalls nicht berücksichtigt.*

Aus den oben beschriebenen Anpassungen ergeben sich entsprechende Änderungen in der Berechnung des MZI. Diese sind in Kapitel 5.4.2 bis 5.5 dargestellt

**5.4.2 ZI-Scores auf der Produktebene – Anteile nach Stoffströme**

Auf der Produktebene ergibt sich der ZI-Score durch Betrachtung der drei Stoffströme Materialherkunft, Lebensdauer und Materialverwertung. Diese drei Aspekte sind in Abb. 5.1 dargestellt und ergeben sich wie folgt (Madaster Germany GmbH, 2021):

**1. Materialherkunftphase: ZI<sub>Materialherkunft</sub>**

$$ZI_{Materialherkunft} = F_R + F_{RR} + F_U \quad \text{Formel 5.15}$$

$F_R$  ... Prozentanteil recycelter Materialien [%]

$F_{RR}$  ... Prozentanteil schnell erneuerbarer Materialien [%]

$F_U$  ... Prozentanteil wiederverwendeter Produkte [%]

Im Gebäude-ZI-Score werden die Produktmasse, der Wirkungsgrad des Recyclingprozesses vor Materialherstellung ( $E_F$  laut MCI) und der Masseanteil des Abfalles zufolge des Recyclingprozesses ( $W_F$  laut MCI) als Kennwerte aus der Materialherkunft berücksichtigt.

**2. Nutzungsphase: ZI<sub>Lebensdauer</sub>**

$$ZI_{Lebensdauer} = \frac{L}{L_{av}} \quad \text{Formel 5.16}$$

$L$  ... Potenzieller funktionaler Lebenszyklus [Jahre]

$L_{av}$  ... Branchendurchschnittlicher Lebenszyklus [Jahre]

Wie bereits in Kapitel 5.4.1 beschrieben ist der Anteil der Nutzungsintensivität aus dem MCI für den MZI nicht relevant.

**3. Materialverwertungphase: ZI<sub>Materialverwertung</sub>**

$$ZI_{Materialverwertung} = C_R * E_C + C_U \quad \text{Formel 5.17}$$

$C_R$  ... Potenzieller Materialanteil, welcher nach der Nutzung recycelt werden kann [%-Produktmasse]

$E_C$  ... Effizienz des Recyclingprozesses in der Materialverwertung [%]

$C_U$  ... Potenzieller Materialanteil, welcher nach der Nutzung wiederverwendet werden kann [%-Produktmasse]

## 5.5 Berechnungsmethodik des MZI

### 5.5.1 MZI – ZI-Scores auf der Produktebene

In diesem Kapitel wird nun das Berechnungsmethodik des MZI unter Berücksichtigung der Anpassungen zufolge Kapitel 5.4.1 beschrieben (Madaster Germany GmbH, 2021). Die Ermittlung des MZI folgt hierbei dem Ansatz, die linearen Materialflüsse zu ermitteln und diese von einer möglichen 100% Zirkularitätsrate zu subtrahieren. Im Kapitel 7.3 wird diese Bewertungsmethode anhand eines Fallbeispiels betrachtet.

$$ZI_{Produkt} = 1 - LFI * F(X) \quad \text{Formel 5.18}$$

$ZI_{Produkt}$  ... Zirkularitätsindikator eines Produktes [%]

$LFI$  ... Linear Durchflussindex [%]

$F(X)$  ... Nutzwertfaktor [-]

$$LFI = \frac{V + W}{2M + \frac{W_F - W_C}{2}} \quad \text{Formel 5.19}$$

$V$  ... Masse Neurohstoffe eines Produktes für die Produktherstellung [kg]

$W$  ... Abfallmasse [kg]

$M$  ... Produktmasse [kg]

$W_C$  ... Abfallmasse, die durch den Recyclingprozess nach der Nutzungsdauer des Produkts entsteht [kg]

$W_F$  ... Abfallmasse, die durch den Recyclingprozess entsteht, der die Materialien für die Herstellung eines Produkts liefert [kg]

$$V = M(1 - F_R - F_{RR} - F_U) \quad \text{Formel 5.20}$$

$F_R$  ... Prozentanteil recycelter Rohstoffe [%]

$F_U$  ... Prozentanteil wiederverwendete Rohstoffe [%]

$F_{RR}$  ... Prozentanteil schnell erneuerbaren Materialien [%]

$$W = W_0 + \frac{W_F + W_C}{2} \quad \text{Formel 5.21}$$

$W_0$  ... Abfallmasse, die nach der Nutzungsdauer eines Produkts auf einer Deponie oder in einer Verbrennungsanlage landet [kg]

$$W_0 = M(1 - C_R - C_U) \quad \text{Formel 5.22}$$

$C_R$  ... Masseanteil, welcher nach Nutzungsphase recycelt wird [%]

$C_U$  ... Masseanteil wiederverwendeter Komponenten [%]

$$W_C = M(1 - E_C) * C_R \quad \text{Formel 5.23}$$

$E_C$  ... Effizienz des Recyclingprozesses [%]

$$W_F = M \frac{(1 - E_F) * F_R}{E_F} \quad \text{Formel 5.24}$$

$E_F$  ... Effizienz des Recyclingprozesses zur Herstellung recycelter Rohstoffe [%]

$$F(X) = \frac{0,9}{X} = \frac{0,9}{\left(\frac{L}{L_{av}}\right)} \quad \text{Formel 5.25}$$

## 5.5.2 MZI – ZI-Score auf Gebäudeebene

Die Ermittlung des MZI auf Gebäudeebene ergibt durch Bestimmung der ZI-Scores pro Gebäudeschicht (Madaster Germany GmbH, 2021). Die Gebäudeschichten entsprechen dabei jenen der DIN 276.

$$ZI_{Gebäudeschicht,i} = \frac{1}{M_{Gebäudeschicht,i}} \sum_n (ZI_{Produkt,n} * M_{Produkt,n}) \quad \text{Formel 5.26}$$

$ZI_{Gebäudeschicht,i}$  ... Zirkularitätsindikator der Gebäudeschicht i [%]

$M_{Gebäudeschicht,i}$  ... Masse der Gebäudeschicht i [kg]

$M_{Produkt,n}$  ... Masse des Produktes n [kg]

n ... Anzahl an Produkten mit dazugehörigen Produktmasse pro Gebäudeschicht i

Der ZI-Objekt-Score des ergibt sich aus der Summe der Gebäudeschichten.

$$ZI_{Objekt} = \frac{1}{M_{Gebäude}} \sum_i (ZI_{Gebäudeschicht,i} * M_{Gebäudeschicht,i}) \quad \text{Formel 5.27}$$

$ZI_{Objekt}$  ... Zirkularitätsindikator des untersuchten Gebäudes [%]

$M_{Gebäude}$  ... Masse des Gebäudes [kg]

i ... Anzahl Gebäudeschichten nach DIN 276

Der finale MZI des untersuchten Gebäudes ergibt sich durch Beaufschlagung des  $ZI_{Objekt}$  mit den beiden Korrekturfaktoren  $K_{Material}$  und  $K_{Schicht}$ .

$$MZI = ZI_{Objekt} * K_{Material} * K_{Schicht} \quad \text{Formel 5.28}$$

$K_{Material}$  ... Korrekturfaktor für unbekanntes Material [%]

$K_{Schicht}$  ... Korrekturfaktor für unbekannte Gebäudeschichten [%]

Da bei der Recherche zu den Parametern der Korrekturfaktoren von Madaster in der Formel 5.28 keine Angaben gemacht wurden, sind die Parameterbezeichnungen vom Ersteller dieser Diplomarbeit gewählt worden. Von Madaster wird nicht deklariert, wie die Korrekturfaktoren berechnet werden können.

## 6 DGNB – Zirkularitätsindex (DGNB-ZI)

Die Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen, kurz DGNB, entwickelt seit dem Jahr 2007 als unabhängiger Non-Profit-Verein ein Netzwerk für nachhaltiges Bauen. Neben der Vernetzung diverser Akteur:innen im Bausektor hat DGNB auch diverse Tools geschaffen, welche die Nachhaltigkeit eines Gebäudes messbar und zertifizierbar machen (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V., o. D.). Dazu zählt seit dem Jahr 2008 unter anderem das DGNB-Gebäudezertifizierungssystem, welches für unterschiedliche Anforderungen eigene Kriterienkataloge anbietet und die ganzheitliche Nachhaltigkeitsbeurteilung über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes als Ziel hat. Die Wahl des Zertifizierungssystems ist dabei vor allem von der Lebenszyklusphase des Projektes und des Gebäude- beziehungsweise Quartiernutzungstyps abhängig. Die Zirkularität wird hier ebenfalls als Kriterium bewertet und wurde bei der DGNB-Version 2023 stärker in den Fokus gestellt. Da die Gebäudezertifizierung eine untergeordnete Rolle in dieser Diplomarbeit darstellt, wird hier im Kapitel 6.5 nur ein Einblick zur Abbildung der Zirkularität in der DGNB-Gebäudezertifizierung gegeben.

Neben der Gebäudezertifizierung bietet DGNB noch weitere unabhängige, aber untereinander verknüpfbare Tools zur Messung und Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden an. Für die Zirkularitätsbewertung wurde dafür im Jahr 2024 von DGNB ein hauseigener DGNB Zirkularitätsindex geschaffen. Dieser hat den DGNB-Gebäuderessourcenpass als Grundlage, welcher im Jahr 2022 veröffentlicht wurde und im Kapitel 6.5.1 beschrieben wird. Im Zuge dieser Diplomarbeit wird der DGNB Zirkularitätsindex mit der Variante 1.0 Stand Mai 2024 betrachtet (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e. V., 2024).

DGNB liefert mit dem DGNB-Zirkularitätsindex einen Beitrag, um Zirkularitätsbeziehungsweise Umwelteigenschaften offen zu legen und damit eine Basis für ressourcenbewusstes und damit nachhaltigeres Planen schaffen. Dabei wird auch ersichtlich, welche Material- und Produkteigenschaften für die Nachhaltig wichtig sind und sichtbar gemacht werden müssen. Die Zirkularitätsbewertung ermöglicht es auch, eine digitale Objektdokumentation durchzuführen, da für die Bewertung die Materialherkunft und die verbauten Massen benötigt werden. Das ist wiederum eine Grundlage für Urbane Minen, welche es zukünftigen Bauvorhaben leichter machen, Wiederverwendung und -verwertung wirtschaftlicher und planbarer zu machen.

### 6.1 Bewertung der Zirkularität

DGNB möchte mit dem hauseigenen Zirkularitätsindex DGNB-ZI einen Qualitätsstandard für Zirkularitätsquoten definieren, um so für die Zirkularitätsbewertung einen Mehrwert Richtung Transparenz und Glaubwürdigkeit zu schaffen.

DGNB hat hier die Basis-Methode geschaffen, welche die Flexibilität bei der Anwendung des Zirkularitätsindex als primäres Ziel verfolgt. Ähnlich der beiden Bewertungssystemen von Frau Dr. Rosen und Madaster, verfolgt DGNB den Ansatz, dass die Zirkularitätsbewertung mit Unterscheidung nach Lebenszyklusphasen erfolgt: (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e. V., 2024):

- Kreislaufführung – Kreislaufwirtschaftsbeitrag während der Planungs- und Bauphase, der Pre-Use-Phase
- Kreislauffähigkeit – Potenzieller Kreislaufwirtschaftsbeitrag nach dem Rückbau, der Post-Use-Phase

Bei DGNB kann bei der Zirkularitätsbewertung der Gesamtbeitrag zur Kreislaufwirtschaft durch Berücksichtigung beider Lebenszyklusphasen bewertet werden oder auch eine getrennte

Berechnung in Form von Teil-Zirkularitätsraten erfolgen. Die Basis-Methode von DGNB erlaubt auch eine Adaption der jeweiligen Wertigkeiten der Teilindikatoren umso flexibler auf Rahmenbedingungsänderungen bei der Umsetzung der Kreislaufwirtschaft reagieren zu können. Für die Ermittlung der Teil-Zirkularitätsrate der Pre-Use-Phase, der Kreislaufführung, sind folgende Teilindikatoren von Bedeutung:

- Materialherkunft
- Bau- und Abbruchabfälle
- Schadstoffbelastung

Bei der Betrachtung der Teil-Zirkularitätsrate der Post-Use-Phase, der Kreislauffähigkeit, werden folgende Teilindikatoren herangezogen:

- Materialverträglichkeit
- Demontagefähigkeit
- Werkstoffliche Trennbarkeit
- Materialverwertung(-spotenzial)

Ein Gebäuderessourcenpass beziehungsweise Materialpass eines Gebäudes stellt laut DGNB die Basis der Zirkularitätsbewertung dar. Daher dient der DGNB-Gebäuderessourcenpass beim DGNB-ZI als Informationsgrundlage für die Teilindikatoren, siehe Abb. 6.1. In den Gebäuderessourcenpass fließen um Zirkularitätsattribute ergänzte Kosten-Massenermittlungen auf Basis der Kostengruppenstruktur der DIN 276 ein (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e. V., 2024).

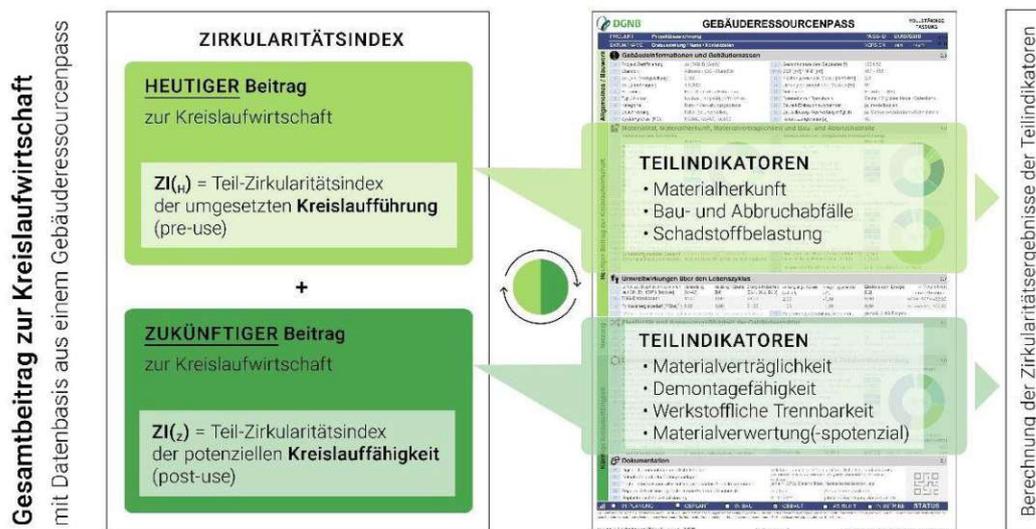


Abb. 6.1: DGNB-ZI – der Gebäuderessourcenpass als Datenbasis für den Zirkularitätsindikatoren

Die Teil-Zirkularitätsraten für Pre- und Post-Use-Phase ergeben sich für jeden Teilindikator aus dem Produkt des definierten Gewichtungsfaktoren mit dem Zirkularitätsergebnis des Teilindikators. Über die Gewichtungsfaktoren können die Wertigkeiten des Teilindikators für die Bewertung einfließen. Die Zirkularitätsergebnisse der Teilindikatoren ergeben sich wiederum aus der Summe der Produkte aus massebezogenen „Quoten“ nach Zirkularitätsklassen mit den jeweiligen Bewertungsfaktoren. Die massebezogenen Quoten und Zirkularitätsklassen sind abhängig von dem betrachteten Teilindikator und wird in Kapitel 6.3 genauer betrachtet. Der DGNB-Zirkularitätsindex ergibt sich aus der Summe der beiden Teil-Zirkularitätsraten und wird in Prozent ausgegeben (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e. V., 2024).

## 6.2 Systemgrenzen und Betrachtungsebenen

### 6.2.1 Systemgrenzen des DGNB-ZI

DGNB stellt für die Nutzung des Zirkularitätsindex formelle und inhaltliche Mindestanforderungen, anhand derer Systemgrenzen abgeleitet werden können (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e. V., 2024):

1. Formelle Mindestanforderungen:

- Die Kostengruppe 300 „Bauwerk – Baukonstruktionen“ laut DIN 276 muss für das zu untersuchende Gebäude vollständig erfasst sein
- Die Kostengruppe 400 „Bauwerk – Technische Anlagen“ laut DIN 276 wird nach massebezogener Relevanz berücksichtigt. Sollte die Kostengruppe nicht erfasst werden, so ist diese Tatsache entsprechend zu deklarieren.
- Eine objektive Bewertungsmethode als auch eine transparente und für alle zugängliche Methodenbeschreibung

2. Inhaltliche Mindestanforderungen:

- Festlegung von quantitativer Teilindikatoren für die Pre- und Post-Use-Phase
- Angabe eines Zeitrahmens für die Darstellung der heutigen Transformationsbedarfe

Der DGNB-ZI gibt keine Auskunft über die Treibhausgasbilanz, auch CO<sub>2</sub>-Fußabdruck genannt, da DGNB hier einen eigenen CO<sub>2</sub>-Bilanzierungsrechner anbietet. Die Tools können jedoch untereinander ergänzt werden.

Als weitere Systemgrenze seien die berücksichtigten Lebenszyklusphasen genannt. Der DGNB-ZI berücksichtigt die Pre- und Post-Use-Phase. Die Use-Phase, sprich Nutzungsphase, wird in der Zirkularitätsbewertung nach DGNB in der Version 1.0 nicht berücksichtigt, siehe Abb. 6.2. Laut DGNB wird über den Teilindikator Flexibilität für die Use-Phase aktuell diskutiert und in späteren Versionen des DGNB-ZI berücksichtigt werden. Das bedeutet, dass unter anderem der Austausch von Materialien über die Lebensdauer des Gebäudes nicht berücksichtigt wird.

Die Basis-Methode des DGNB-ZI ermöglicht je nach Anwendungsfall unterschiedliche Gewichtungsfaktoren den jeweiligen Teilindikatoren zuzuordnen. In der Version 1.0 ist dies nur für die beiden Anwendungsfälle Neubau kurzlebig und Neubau langlebig möglich. Die Anwendungsfälle für den Bestand und Sanierung sind zum Zeitpunkt der Diplomarbeit in Arbeit und werden in späteren Versionen nachgereicht. Die im DGNB berücksichtigten Teilindikatoren der jeweiligen Teil-Zirkularitätsraten samt Gewichtungsfaktoren pro Anwendungsfall sind in Abb. 6.2 dargestellt (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e. V., 2024).

H = Heute Z = Zukunft	TEILINDIKATOREN	ANWENDUNGSFÄLLE g <sub>TI</sub> (Gewichtungsfaktor je Teilindikator)					Qualitätsstandard ± Toleranzbereich ***
		Neubau kurzlebig (< 20a)	Neubau langlebig (> 20a)	Bestand	Sanierung kurzlebig (< 20a)	Sanierung langlebig (> 20a)	
HEUTIGER BEITRAG (H)	MATERIALHERKUNFT	45	60	wichtig*	wichtig*	wichtig*	5
	BAU-/ABBRUCHABFÄLLE	5	5	-	wichtig	wichtig	5
	SCHADSTOFFBELASTUNG <sup>1</sup>	-	-	wichtig	wichtig	wichtig	5
NUTZUNGS-PHASE	FLEXIBILITÄT	relevant	wichtig	wichtig**	relevant**	wichtig**	
ZUKÜNFTIGER BEITRAG (Z)	MATERIALVERTRÄGLICHKEIT <sup>2</sup>	10	10	-	relevant	relevant	5
	DEMONTAGEFÄHIGKEIT	10	5	wichtig	relevant	relevant	5
	WERKST. TRENNBARKEIT	10	5	wichtig	relevant	relevant	5
	MATERIALVERWERTUNG	20	15	wichtig	wichtig	wichtig	5
Diese Anwendungsfälle sind noch in Diskussion							15

- <sup>1</sup> für die Analyse der Bestandssubstanz (qualitativ)
- <sup>2</sup> für Neubaumaßnahmen / Neueingebrachtes
- \* für Bestand(-serhalt): Materialherkunft = 100% Wiederverwendet
- \*\* für Bestand(-serhalt): nutzungsbedingter Schadstoffeintrag ist zu berücksichtigen
- \*\*\* nicht anwendbar für DGNB ZI, Toleranzbereiche gelten nur für Qualitätsstandard!

Abb. 6.2: DGNB-ZI – vorhandene Anwendungsfälle inklusive Gewichtungsfaktor pro Teilindikator

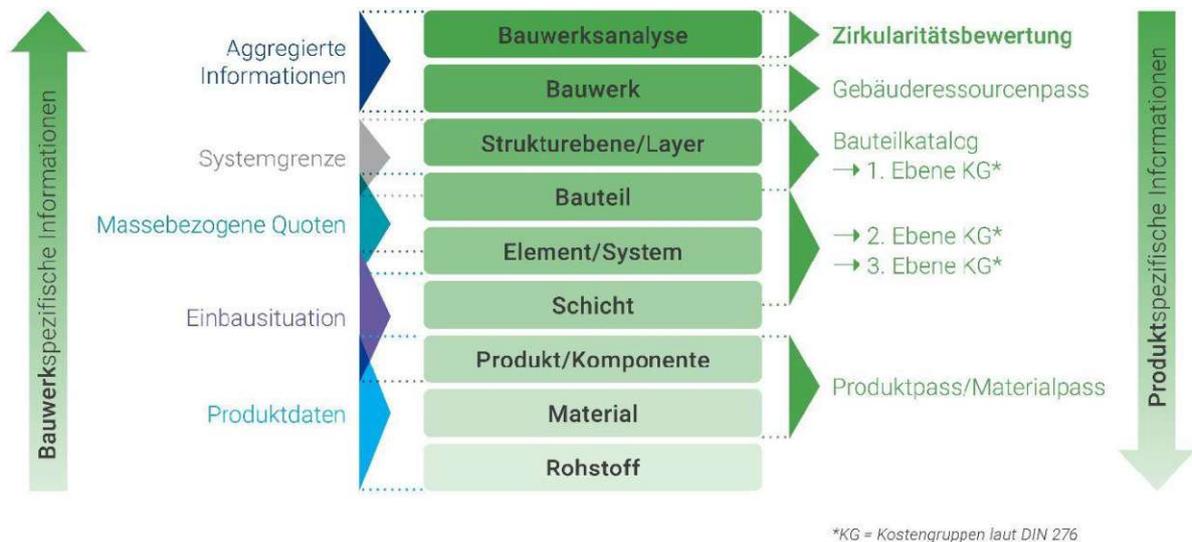
Auf Grund der Tatsache, dass DGNB auch andere Zirkularitätsindizes in deren DGNB-Tools wie Gebäuderessourcenpass oder Gebäudezertifizierung integriert, ist eine transparente und objektive Bewertungsmethode eine Mindestanforderung die DGNB stellt. Sollten andere Zirkularitätsindizes bei den DGNB-Tools verwendet werden, so werden hier Toleranzbereiche berücksichtigt. Die Spannweite dieser Toleranzbereiche sind abhängig vom jeweiligen Teilindikator und berücksichtigen Abweichungen hinsichtlich der Qualitätsanforderungen von DGNB an die Zirkularitätsbewertung. Im Kapitel 6.3 werden die Teilindikatoren mit den jeweiligen Toleranzbereichen genauer betrachtet. Bei der Verwendung des DGNB Zirkularitätsindex bei DGNB-Tools wie dem Gebäuderessourcenpass oder der Gebäudezertifizierung müssen keine Toleranzen berücksichtigt werden. Für die Toleranzbereiche gilt im Allgemeinen (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e. V., 2024):

- ± 0.15 auf die Bewertungsfaktoren der Zirkularitätsklassen je Teilindikator
- ± 5% auf die Gewichtung des jeweiligen Teilindikators
- ± 15% auf den jeweiligen Teil-Zirkularitätsindex der Pre- und Post-Use-Phase

Bei der Berücksichtigung der Teilindikatoren können auch Vereinfachungen stattfinden. So können die Teilindikatoren Schadstoffbelastung aus der Pre-Use-Phase und die Materialverträglichkeit aus der Post-Use-Phase im Post-Use-Indikator Materialverwertung durch Bekanntgabe der Störstoffe zusammengefasst werden. Auch die beiden Post-Use-Indikatoren Demontagefähigkeit und werkstoffliche Trennbarkeit können in einem Indikator zusammengefasst werden.

## 6.2.2 Betrachtungsebenen des DGNB-ZI

Die Ermittlung des DGNB-ZI erfolgt wie beim UMI und MZI ebenfalls über die Betrachtung unterschiedlicher Gebäudeebenen. Wie in Abb. 6.3 dargestellt, fließen je nach betrachteter Gebäudeebene unterschiedliche Informationsgrundlagen in die Bewertung ein.



\*KG = Kostengruppen laut DIN 276

Abb. 6.3: DGNB-ZI – Betrachtungsebenen und Informationsgrundlagen (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e. V., 2024)

Bei der Betrachtung der eingehenden Rohstoffe, verplanten oder verbauten Materialien und Komponenten sind die jeweiligen Produktangaben mit entsprechenden Massenwerten notwendig. Für diese Betrachtungsebene sind Daten aus Produkt- beziehungsweise Materialpässe von Vorteil.

Bei der Betrachtungsebene der Komponenten und Bauteilschichten spielt die Einbausituation für die Demontagefähigkeit und Trennbarkeit eine wichtige Rolle. Hier wird auf der Bauelement-Ebene die Gliederung nach Baukonstruktionen gemäß der Kostengruppen laut DIN 276 vorausgesetzt (DIN - Deutsches Institut für Normung, 2018). Die erste Ebene gliedert sich in acht Kostengruppen, kurz KG, wobei hier die Kostengruppe 300 „Bauwerk – Baukonstruktionen“ und 400 „Bauwerk – Technische Anlagen“ für die Zirkularitätsbewertung relevant sind. Ebene zwei und drei sind Untergliederungen der jeweiligen ersten Ebene. Dies lässt sich am Beispiel des Elements Fenster darstellen:

Erste Ebene: KG 300: Bauwerk – Baukonstruktion

Zweite Ebene: KG 330: Außenwände/Vertikale Baukonstruktionen, außen

Dritte Ebene: KG 334: Außenwandöffnungen

Damit lassen sich die Bauteilschichten zu einer Strukturebene von Bauteilgruppen zufolge DIN 276 gliedern.

### 6.3 Berechnungsparameter

In diesem Kapitel werden die Parameter, hier Teilindikatoren genannt, der Teilzirkularitätsraten der Pre- und Post-Use betrachtet, da diese Einblicke in die Zirkularitätsattribute der zu bewertenden Materialien und Produkte liefern. Dabei werden die relevanten Quoten, Zirkularitätsklassen und Bewertungsfaktoren je Teilindikator definiert. Die Gewichtungsfaktoren bei den Anwendungsfällen sind bereits in Kapitel 6.1, Abb. 6.2 dargestellt.

#### 6.3.1 Materialherkunft – Pre-Use

Die Materialherkunft leistet einen entscheidenden Beitrag zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials in der Herstellungsphase und wurde auch bei den Bewertungssystemen nach Dr. Rosen und der Madaster Foundation berücksichtigt. Mit diesem Parameter berücksichtigt der DGNB-ZI den Materialmix aus Primär- und Sekundärrohstoffen. Die beiden Stoffanteilen der Sekundär- und Primärrohstoffe werden auch als relevante massebezogenen Quoten für diesen Teilindikator herangezogen. In Tabelle 6.1 sind die Zirkularitätsklassen samt deren dazugehöriger Bewertungsfaktor dargestellt (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e. V., 2024).

KREISLAUFFÜHRUNG (PRE-USE, „H“...heutiger Beitrag)			
TEILINDIKATOR:		MATERIALHERKUNFT (H)	
Zirkularitätsklassen (ZK)	Definition	Bewertungsfaktor [f <sub>ZK(H)</sub> ]	
<b>A. Sekundärrohstoffanteil</b>			
Wiederverwendet	Reuse, Beibehaltung Bestandssubstanz - selbe Verwendung	1,00	↑ + Beitrag
Weiterverwendet	Repurpose, weitgehender Beibehaltung Bestandssubstanz - andere Verwendung	1,00	
Wiederverwertet	Recycling mit selbem Qualitätsniveau - geschlossene Kreisläufe	0,75	
(Weiter-)Verwertet	Recycling mit Qualitätsverlusten - offene Kreisläufe	0,50	
<b>B. Primärrohstoffanteil</b>			
Primärrohstoff, erneuerbar	Renewable, aus zertifiziert nachhaltigen oder vergleichbaren Quellen	0,75	↑
	Renewable, aus nachhaltigen Quellen	0,50	↓ - Beitrag
Primärrohstoff, nicht erneuerbar	not renewable, aus nicht nachhaltigen Quellen	0,00	

positiver Beitrag zur Kreislaufführung  
 negativer Beitrag zur Kreislaufführung

Tabelle 6.1: Kreislaufführung – Teilindikator Materialherkunft mit Zirkularitätsklassen und Bewertungsfaktor (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e. V., 2024), (eigene Darstellung)

Ist die Datenmenge zur Einordnung des betrachteten Stoffanteils in die jeweilige Zirkularitätsklasse nicht ausreichend bekannt, so ist das dieser in die qualitativ niedrigere Stufe einzuordnen.

### 6.3.2 Bau- und Abbruchabfälle – Pre-Use

Mit Berücksichtigung dieses Teilindikators unterscheidet sich DGNB von den Zirkularitätsbewertungen nach Dr. Rosen und Madaster. DGNB inkludiert die Bau- und Abbruchabfälle zufolge Abriss- und Baumaßnahmen, da diese einen relevanten Beitrag zur Ressourcenschonung beisteuern. Da zufolge der EU-Taxonomie von den Unternehmen gefordert wird, einen Nachweis der Wiederverwendungs- und Weiterverwertungsquoten ungefährlicher Bau- und Abbruchabfälle zu liefern, müssen die entstehenden Abfälle bereits durch diese Forderung in entsprechende Zirkularitätsklassen eingeteilt werden. Eine diesbezügliche Datenbasis für diesen Parameter sollte also vorhanden sein. In Tabelle 6.2 sind die Zirkularitätsklassen samt deren dazugehöriger Bewertungsfaktor dargestellt (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e. V., 2024).

KREISLAUFFÜHRUNG (PRE-USE, „H“...heutiger Beitrag)				
TEILINDIKATOR: BAU- & ABRUCHABFÄLLE (H)				
Zirkularitätsklassen (ZK)	Definition	Bewertungsfaktor [f <sub>ZK</sub> (H)]		
		Bau	Abbruch	+ / -
Wiederverwendung	Wiederverwendung inkl. Vorbereitungsaufwand	1,00	1,00	↑ positiver Beitrag
Werkstoffl. Qualität Wiederverwertung	hochwertiges Closed-Loop-Recycling, inkl. Aufwertung	0,80	0,80	
Stoffliche Verwertung	Recycling ohne Aufwand / Closed-Loop-Recycling mit Aufwand	0,70	0,70	
	Recycling mit Aufbereitungsaufwand / Open-Loop-Recycling	0,60	0,60	
	Recycling mit minderer Qualität / sonstige stoffliche Verwertung	0,40	0,40	
Thermische Verwertung	erneuerbar/biogen zertifiziert und nachweislich schadstoffarm	0,40	0,40	↓ negativer Beitrag
	nicht erneuerbar/biogen, erneuerbar/biogen nicht zertifiziert	0,20	0,20	
	energetische Beseitigung	0,00	0,00	
Verfüllung	von nicht gefährlichem Material	0,20	0,20	
Deponierung	nicht gefährlicher Abfall inkl. Deponierung von Inertabfällen	0,20	0,20	
Entsorgung	gefährlicher Abfall / Deponierung nach Aufbereitung	0,00	0,00	

Tabelle 6.2: Kreislaufführung – Teilindikator Bau- & Abbruchabfälle mit Zirkularitätsklassen und Bewertungsfaktor (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e. V., 2024), (eigene Darstellung)

Die massebezogenen Quoten der ungefährlichen Bau- und Abbruchabfälle werden zum Beispiel nach Hillebrandt und Seggewies Recycling Atlas (Seggewies, Riegler-Floors, & Rosen, 2018) in entsprechende Zirkularitätsklassen eingeordnet. Gefährliche Bau- und Abbruchabfälle werden nicht zirkulär geführt, werden in die Zirkularitätsklasse Entsorgung eingestuft und sind nach entsprechenden Gesetzen und Vorschriften zu entsorgen. Bei der Neubaubewertung ohne vorhergehender Rückbaumaßnahmen sind nur Bauabfälle zu bewerten. Bei der Bestandsbewertung ohne bauliche Maßnahmen kann dieser Parameter entfallen (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e. V., 2024).

### 6.3.3 Schadstoffbelastung – Pre-Use

Der Teilindikator Schadstoffbelastung in der Pre-Use-Phase ist wichtig für die Nachnutzung und Festlegung der End-of-Life-Szenarien von Materialien und Produkten und wird in den meisten Zirkularitätsbewertungsmethoden berücksichtigt. DGNB trennt hier die Bewertung der Stör- und Schadstoffe für bestehende und neueingebrachte Ressourcen. Im Parameter Schadstoffbelastung werden die bereits bestehenden Ressourcen qualitativ bewertet. In Tabelle 6.3 sind die Zirkularitätsklassen samt deren dazugehöriger Bewertungsfaktor dargestellt (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e. V., 2024).

KREISLAUFFÜHRUNG (PRE-USE, „H“...heutiger Beitrag)			
TEILINDIKATOR: SCHADSTOFFBELASTUNG (H)			
Zirkularitätsklassen (ZK)	Definition	Bewertungsfaktor	
		[f <sub>ZK</sub> (H)]	+ / -
Zielvorstellung	keine Schadstoffe nach durchgeführter Analyse	1,00	↑ positiver Beitrag
Optimierung	Analyse durchgeführt, Schadstoffsanierung inkl. Risiko- / Störstoffen hat stattgefunden, Rest-Schadstoffkataster dokumentiert	1,00	
Gehobener Standard	Analyse durchgeführt, Schadstoffsanierung hat stattgefunden, Rest-Schadstoffkataster dokumentiert	0,75	
Standard	Analyse durchgeführt, Schadstoffkataster vorhanden	0,50	
Kritisch	Keine Analyse, Verdacht liegt vor	0,00	↓
nicht bewertbar	Keine Analyse, kein Verdacht	0,00	

	positiver Beitrag zur Kreislaufführung
	negativer Beitrag zur Kreislaufführung

Tabelle 6.3: Kreislaufführung – Teilindikator Schadstoffbelastung mit Zirkularitätsklassen und Bewertungsfaktor (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e. V., 2024), (eigene Darstellung)

Als Eingangsgrößen für die Bewertung der Schadstoffbelastung werden keine massebezogenen Quoten herangezogen, sondern gesamtheitlich das Gesamt-Bauwerk. Bedeutet konkret, dass bei dem untersuchten Bauwerk ein Gefahr-/Schadstoffgutachten mit einem entsprechenden Gefahr-/Schadstoffkataster durchgeführt wurde. Aus Mangel an standardisierten Methoden zur Einstufung der Ergebnisse dieser Begutachtung der Gesamt-Bestandsmasse des untersuchten Bauwerks, verweist DGNB auf das eigene Gebäudezertifizierungssystem (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e. V., 2023). Hier kann das Kriterium für Neubauten „ENV1.2 Risiken für die lokale Umwelt“, welches im DGNB-System zu den ökologischen Qualitäten zählt, herangezogen werden. Alternativ kann die Bewertung auch auf Produktebene durchgeführt werden. Sollte diese Bewertungsmethode gewählt werden, verweist DGNB zur Einstufung der Analyseergebnisse auf das Kriterium „TEC1.6 Zirkuläres Bauen“, welches im DGNB-Gebäudezertifizierungssystem unter technische Qualitäten gelistet wird. Neben den eben genannten beiden DGNB-Bewertungsmethoden können auch andere Verfahren anerkannter Zertifizierungssysteme im DGNB Zirkularitätsindex angeführt werden.

### 6.3.4 Materialverträglichkeit – Post-Use

Der Teilindikator Materialverträglichkeit in der Post-Use-Phase bewertet die Stör- und Schadstoffe von den neueingebrachten Ressourcen quantitativ und führt die Auswirkungen der Schadstoffbelastung für den zukünftigen Beitrag laut DGNB fort. In Tabelle 6.4 sind die Zirkularitätsklassen samt deren dazugehöriger Bewertungsfaktor dargestellt (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e. V., 2024).

KREISLAUFFÄHIGKEIT (POST-USE, „Z“...zukünftiger Beitrag)			
TEILINDIKATOR: MATERIALVERTRÄGLICHKEIT (Z)			
Zirkularitätsklassen (ZK)	Definition	Bewertungsfaktor	
		[f <sub>ZK</sub> (Z)]	+ / -
Zielvorstellung	schadstofffrei	1,00	↑ positiver Beitrag
Optimierung	weitgehend schadstofffrei, mit Materialprüfung, nicht gesundheitsgefährdend, die Kreislauffähigkeit nicht verhindernd <sup>1</sup>	1,00	
Gehobener Standard	mit Materialprüfung, nicht gesundheitsgefährdend, die Kreislauf-fähigkeit nicht verhindernd <sup>1</sup>	0,75	
Standard	nicht gesundheitsgefährdend, die Kreislauffähigkeit nicht verhindernd <sup>1</sup>	0,50	
Kritisch	die Kreislaufführung verhindernd	0,00	↓
nicht bewertbar	keine ausreichende Datengrundlage	0,00	

1 ...siehe relevante Zeilen für EoL laut Kriterienmatrix in DGNB Gebäudezertifizierungssystem Neubauten Version 2023, Kriterium ENV1.2

positiver Beitrag zur Kreislaufführung  
 negativer Beitrag zur Kreislaufführung

Tabelle 6.4: Kreislauffähigkeit – Teilindikator Materialverträglichkeit mit Zirkularitätsklassen und Bewertungsfaktor (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e. V., 2024), (eigene Darstellung)

Die Einteilung der Gesamt-Bestandsmasse in die entsprechende Zirkularitätsklasse ist ähnlich der bereits im Teilindikator Schadstoffbelastung angeführten Methoden, siehe Kriterium ENV1.2 und TEC1.6 des DGNB-Gebäudezertifizierungssystems (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e. V., 2023). Für die Bewertung von Störstoffen wird von DGNB für diesen Teilindikator auch auf die Störstoffklassen laut BBSR Zirkularitätsindex Materialverträglichkeit verwiesen (BBSR - Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung, 2024).

### 6.3.5 Demontagefähigkeit – Post-Use

Die Demontagefähigkeit bewertet nicht nur die Rückbaubarkeit und die Wirtschaftlichkeit eines selektiven Rückbaus durch Definition des Rückbauaufwandes, sondern gibt auch Auskunft darüber, welcher Materialanteil aufgrund zerstörungsfreier Wiedergewinnung wiederverwendet werden kann. Die Bewertung findet dabei auf der Bauteil- beziehungsweise Produktebene statt. Für die Definition der Bewertungsfaktoren wurden gängige Zirkularitätsbewertungsmethoden verglichen und entsprechende Mittelwerte daraus gebildet. In Tabelle 6.4 sind die Zirkularitätsklassen samt deren dazugehöriger Bewertungsfaktor dargestellt (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e. V., 2024). In die Bewertung fließen neben der Verbindungsart und des damit einhergehenden Rückbauaufwands auch die daraus resultierende Schädigung des Materials ein. Für die Einordnung in die Zirkularitätsklassen kann das Kriterium TEC1.6 aus dem DGNB-Gebäudezertifizierungssystem für den Neubau Version 2023 herangezogen werden.

KREISLAUFFÄHIGKEIT (POST-USE, „Z“ ...zukünftiger Beitrag)					
TEILINDIKATOR:		DEMONTAGEFÄHIGKEIT (Z)			
Zirkularitätsklassen (ZK)	Definition			Bewertungsfaktor	
	Verbindungsart	Rückbauaufwand	Schadensart	[f <sub>ZK</sub> (Z)]	+ / -
optimiert	lose / Klick- verbindung	sehr geringer Aufwand	Zerstörungsfrei lösbar	1,00	Pos. Beitrag ↑
verbessert	gesteckt / geschraubt	geringer Aufwand	Zerstörungsfrei lösbar	0,75	
Standard	festverbaut	mittlerer Aufwand	überwiegend zerstörungsfrei lösbar	0,50	
eingeschränkt	festverbaut	hoher Aufwand	reparable Schäden	0,25	neg. Beitrag ↓
problematisch	festverbaut	extrem aufwändig	irreparable Schäden	0,00	
nicht bewertbar	bzw. nicht demontagefähig			0,00	

Tabelle 6.5: Kreislauffähigkeit – Teilindikator Demontagefähigkeit mit Zirkularitätsklassen und Bewertungsfaktor (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e. V., 2024), (eigene Darstellung)

### 6.3.6 Werkstoffliche Trennbarkeit – Post-Use

Der Teilindikator der werkstofflichen Trennbarkeit bewertet ähnlich wie der Teilindikator der Demontagefähigkeit die Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus und den Materialanteil, welcher im Kreislauf geführt werden kann. DGNB unterscheidet die beiden Teilindikatoren, da die werkstoffliche Trennbarkeit sich auf die sortenreine Trennung von Baustoffen und Baumaterialien konzentriert und dies auf Materialebene durchgeführt wird. In Tabelle 6.6 sind die Zirkularitätsklassen samt deren dazugehöriger Bewertungsfaktor dargestellt (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e. V., 2024).

KREISLAUFFÄHIGKEIT (POST-USE, „Z“ ...zukünftiger Beitrag)					
TEILINDIKATOR:		WERKSTOFFLICHE TRENNBARKEIT (Z)			
Zirkularitätsklassen (ZK)	Definition			Bewertungsfaktor	
	Prozess	Aufwand	Kreislauffähigkeit	[f <sub>ZK</sub> (Z)]	+ / -
optimiert	nicht maschinell	einfach zugänglich	ohne Anhaftungen, monomateriell, vollständig kreislauffähig	1,00	pos. Beitrag ↑
verbessert	maschinell		vollständig kreislauffähig	0,75	
Standard	maschinell, chemisch		fast vollständig kreislauffähig	0,50	
eingeschränkt		aufwändig	nicht vollständig kreislauffähig	0,25	neg. Beitrag ↓
problematisch		extrem aufwändig	nicht vollständig kreislauffähig	0,00	
nicht bewertbar	bzw. nicht sortenrein trennbar			0,00	

Tabelle 6.6: Kreislauffähigkeit – Teilindikator werkstoffliche Trennbarkeit mit Zirkularitätsklassen und f<sub>ZK</sub>(Z) (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e. V., 2024), (eigene Darstellung)

Bei der zirkulären Planung eines Bauwerks und auch in dessen Zirkularitätsbewertung sind die unterschiedlichen Nutzungsdauern der Gebäudeschichten in Form von Demontagefähigkeit und werkstofflicher Trennbarkeit zu berücksichtigen. In Abb. 1.1 sind die regulären Nutzungsdauern dargestellt (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e. V., 2024):

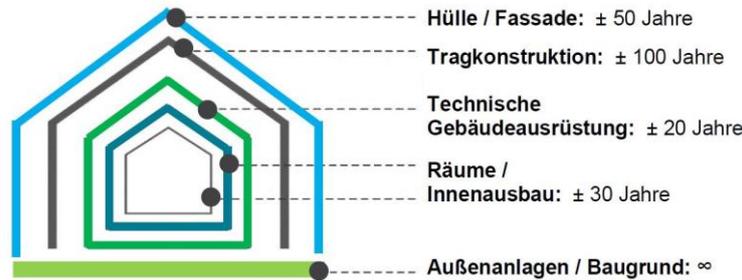


Abb. 6.4: DGNB-Zirkularitätsindex – Nutzungsdauer der Gebäudeschichten

### 6.3.7 Materialverwertung(-spotenzial) – Post-Use

Die Materialverwertung findet sich in allen gängigen Zirkularitätsbewertungen von Bauwerken wieder und gibt wieder, welche Nachnutzungsmöglichkeiten nach dem derzeitigen Stand der Technik für die verbauten Materialien und Produkte vorhanden sind. In Tabelle 6.7 Tabelle 6.4 sind die Zirkularitätsklassen samt deren dazugehöriger Bewertungsfaktor dargestellt (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e. V., 2024).

KREISLAUFFÄHIGKEIT (POST-USE, „Z“ ...zukünftiger Beitrag)			
TEILINDIKATOR: <i>Materialverwertung(-spotenzial) (Z)</i>			
Zirkularitätsklassen (ZK)	Definition	Bewertungsfaktor	
		[f <sub>ZK</sub> (H)]	+ / -
Wiederverwendung	Wiederverwendung inkl. Vorbereitungsaufwand	1,00	↑ positiver Beitrag
Werkstoffl. Qualität Wiederverwertung	hochwertiges Closed-Loop-Recycling, inkl. Aufwertung	0,80	
Stoffliche Verwertung	Recycling ohne Aufwand / Closed-Loop-Recycling mit Aufwand	0,70	
	Recycling mit Aufbereitungsaufwand / Open-Loop-Recycling	0,60	
	Recycling mit minderer Qualität / sonstige stoffliche Verwertung	0,40	
Thermische Verwertung	erneuerbar/biogen zertifiziert und nachweislich schadstoffarm	0,40	↓ negativer Beitrag
	nicht erneuerbar/biogen, erneuerbar/biogen nicht zertifiziert	0,20	
	energetische Beseitigung	0,00	
Verfüllung	von nicht gefährlichem Material	0,20	
Deponierung	nicht gefährlicher Abfall inkl. Deponierung von Inertabfällen	0,20	
Entsorgung	gefährlicher Abfall / Deponierung nach Aufbereitung	0,00	

Tabelle 6.7: Kreislauffähigkeit – Teilindikator Materialverwertung mit Zirkularitätsklassen und Bewertungsfaktor (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e. V., 2024), (eigene Darstellung)

Zur Einteilung der Materialien und Produkte in deren typischen bis hochwertigen Nachnutzungswege und somit in entsprechende Zirkularitätsklassen, verweist DGNB auf geltende Ökobilanzierungsregeln für das End-of-Life, zum Beispiel das DGNB Kriterium ENV1.1 aus dem DGNB-Gebäudezertifizierungssystem, und auf Umweltproduktdeklarationen der jeweiligen Produkte. Auf Bauteilebene kann auch aus dem DGNB-System das Kriterium TEC1.6 zur Einteilung herangezogen werden.

## 6.4 Berechnungsmethodik

In diesem Kapitel wird die Berechnungsmethodik hinter dem DGNB-ZI genauer betrachtet. Die eingehenden Berechnungsparameter wurden bereits im Kapitel 6.3 erläutert und nun mit entsprechenden Formeln für die Berechnung der einzelnen Teilindikatoren hinterlegt.

### 6.4.1 Berechnungsformeln – DGNB-Zirkularitätsindex ZI

Die Berechnung der Zirkularitätsergebnisse je Teilindikator folgt demselben Schema. Die zirkulären Quoten, meist massebezogen und somit in der Berechnung in Masseprozent berücksichtigt, werden nach Zirkularitätsklassen unterteilt und mit dem dazugehörigen Bewertungsfaktor multipliziert und für alle Zirkularitätsklassen aufsummiert. Die Summe aller Zirkularitätsklassen je Teilindikator wird anschließend mit dem Gewichtungsfaktor dieses Teilindikators multipliziert (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e. V., 2024). In Formel 6.1 bis Formel 6.2 ist das Berechnungsschema für die Teilindikatoren der Pre- und Post-Use-Phase dargestellt.

$$TI_{i,(H)} = g_{TI,i,(H)} * \left( \sum_{n(H)} m_{ZK,i,n} * f_{ZK,i,n} \right) \quad \text{Formel 6.1}$$

$TI_{i,(H)}$  ... Teilindikator i in der Pre-Use-Phase Kreislaufführung (H) [0-1]

$g_{TI,i,(H)}$  ... Gewichtungsfaktor [0-1], siehe Abb. 6.2 in Abhängigkeit zum Anwendungsfall

$m_{ZK,i,n}$  ... Masseanteil [Masse-%; kg/t] je Zirkularitätsklasse (ZK) des Teilindikators i

$f_{ZK,i,n}$  ... Bewertungsfaktor [0-1] je Zirkularitätsklasse (ZK) des Teilindikators i

$n(H)$  ... Anzahl der Zirkularitätsklassen des Teilindikators i der Kreislaufführung (H)

$$TI_{i,(Z)} = g_{TI,i,(Z)} * \left( \sum_{n(Z)} m_{ZK,i,n} * f_{ZK,i,n} \right) \quad \text{Formel 6.2}$$

$TI_{i,(Z)}$  ... Teilindikator i in der Post-Use-Phase Kreislauffähigkeit (Z) [0-1]

$g_{TI,i,(Z)}$  ... Gewichtungsfaktor [0-1], siehe Abb. 6.2 in Abhängigkeit zum Anwendungsfall

$m_{ZK,i,n}$  ... Masseanteil [Masse-%; kg/t] je Zirkularitätsklasse (ZK) des Teilindikators i

$f_{ZK,i,n}$  ... Bewertungsfaktor [0-1] je Zirkularitätsklasse (ZK) des Teilindikators i

$n(Z)$  ... Anzahl der Zirkularitätsklassen des Teilindikators i der Kreislauffähigkeit (Z)

Der Bewertungsfaktor  $f_{ZK,i,n}$  ist bei der Verwendung anderer Zirkularitätsbewertungsmethoden zur Definition der Teilindikatoren als die unter Kapitel 6.3 von DGNB angeführten Methoden mit einer entsprechenden Toleranz von +0.15 zu erhöhen, siehe dazu auch Kapitel 6.2.1.

Nach Berechnung der einzelnen Teilindikatoren der Kreislaufführung (H) und -fähigkeit (Z) werden diese je nach Phase aufsummiert (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e. V., 2024). Die Formeln lauten wie folgt:

$$ZI_{(H)} = \sum_i TI_{i(H)} \tag{Formel 6.3}$$

$ZI_{(H)}$  ... Teil-Zirkularitätsindex der Kreislaufführung (H) [0-1]

$$ZI_{(Z)} = \sum_i TI_{i(Z)} \tag{Formel 6.4}$$

$ZI_{(Z)}$  ... Teil-Zirkularitätsindex der Kreislauffähigkeit (Z) [0-1]

Die Summe aus den beiden Teil-Zirkularitätsindizes ergibt den DGNB-Zirkularitätsindex ZI, siehe

$$ZI = ZI_{(H)} + ZI_{(Z)} \tag{Formel 6.5}$$

ZI ... DGNB Zirkularitätsindex [0-1]

Ab einem Zirkularitätsindex größer 50% trägt das bewertete Bauwerk positiv zur Zirkularität bei.

## 6.5 Zirkularität in der DGNB-Gebäudezertifizierung

Neben der Bewertung mit Hilfe von Zirkularitätsindizes wird auch das Gebäudezertifizierungssystem von DGNB betrachtet, um den Einfluss der Zirkularität darin zu analysieren. Dabei wurde das Gebäudezertifizierungssystem von DGNB in der Version 2023 betrachtet. Das DGNB-Gebäudezertifizierungssystem erweitert das 3-Säulen-Modell Nachhaltigkeitskonzept von Ökologie, Wirtschaft und Soziales um funktionale, technische Qualitäten als auch Prozess- und Standortqualitäten. Die Wichtung dieser sechs Themenblöcke im Zertifizierungssystem ist in Abb. 6.5 dargestellt (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V., 2023):



Abb. 6.5: DGNB-Gebäudezertifizierung – Grundstruktur und Wichtung der eingehenden Qualitäten

DGNB kennzeichnet den Grad der Nachhaltigkeit eines Bauwerks mit unterschiedlichen Auszeichnungsstufen. Diese werden bei DGNB je nach Gesamterfüllungsgrad der Kriterien in vier Stufen eingeteilt. Ab einem Erfüllungsgrad von 35% erhält ein Projekt ein Bronze-Zertifikat, ab 50% ein Silber-Zertifikat, ab 65% ein Gold-Zertifikat und ab 80% ein Platin-Zertifikat (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V., 2023).

DGNB bietet auch die Möglichkeit an zwischen mehreren Zertifizierungsstufen zu wählen. Die Zertifizierungsstufen sind dabei vom Projektfortschritt und Detailierungsgrad der für die Bewertung erforderlichen Projektinformationen abhängig. Neben der „klassischen Zertifizierung“, wo sämtliche Informationen des Projektes bekannt sind, wird das Vorzertifikat bereits in einem frühen Stadium des Planungsprozesses durchgeführt. Dadurch haben Planer:innen und Auftraggeber:innen möglichst zu Beginn des Projektes Einsicht auf den Grad der Nachhaltigkeit des Bauwerks. DGNB empfiehlt diese Zertifizierungsstufe in der Vorplanungs- bis Genehmigungsphase des Projektes durchzuführen. Wie in Abb. 6.6 dargestellt, steigt der Aufwand für Änderungen nach diesen Projektphasen exponentiell an.

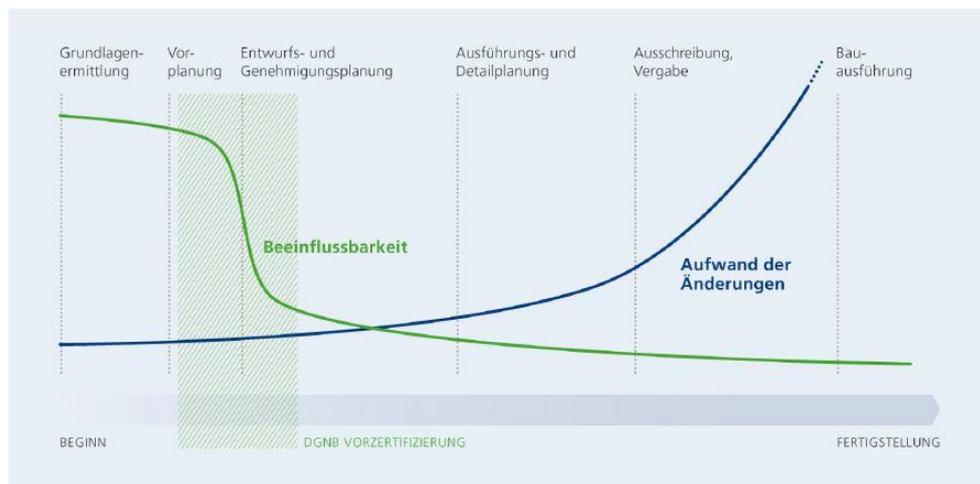


Abb. 6.6: DGNB-Gebäudezertifizierung – Beeinflussbarkeit der Projektparameter in der Vorzertifizierung (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V., 2023)

Neben der Vorzertifizierung gibt es auch die Möglichkeit der Zertifizierung eines Bauwerks im ausbaufertigen Zustand zu erwirken. Bei dieser Zertifizierungsstufe wird ein Gebäude bewertet, bei dem der mieterabhängige Innenausbau nicht oder nur teilweise feststeht. Um hier ein Bewertungsergebnis erhalten zu können, müssen die Gemeinschaftsflächen neben den bereits ausgebauten Mietflächen ebenfalls fertiggestellt sein umso in die Bewertung einfließen zu können (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V., 2023).

DGNB legt mit der Gebäudezertifizierung Version 2023 im Vergleich zur Version 2018 den Fokus mehr auf Kreislaufwirtschaft. Die neue Version 2023 für den Gebäude Neubau umfasst 29 Kriterien, welche die sechs Grundpfeiler des DGNB-Systems laut Abb. 6.5 abdecken. Die Zirkularität wird dabei in den folgenden Kriterien berücksichtigt (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V., o. D.):

1. Klimaschutz und Energie (ENV1.1)
2. Risiken für die lokale Umwelt (ENV1.2)
3. Verantwortungsbewusste Ressourcengewinnung (ENV1.3)
4. Flächeninanspruchnahme (ENV2.3)
5. Wertstabilität (ECO2.4)
6. Dokumentation (ECO2.7)
7. Zirkuläres Bauen (TEC1.6)
8. Sicherung der Nachhaltigkeitsaspekte in Ausschreibung und Vergabe (PRO1.4)

### 6.5.1 DGNB-Gebäuderessourcenpass

Der DGNB-Gebäuderessourcenpass, GRP abgekürzt, wurde im Jahr 2022 von DGNB veröffentlicht und legt den Fokus auf den Materialeinsatz für alle Phasen im Lebenszyklus eines Gebäudes. Von dem Konzept des Energieausweises abgeleitet, soll der GRP für ein Gebäude die wesentlichen Informationen zur Ressourcennutzung, Klimawirkung und Zirkularität erfassen und bewerten. Damit soll ersichtlich werden, welche Materialien verbaut wurden, welche Treibhausgasemissionen entstehen und wie die Kreislauffähigkeit des Gebäudes ausfällt. Dafür werden die Nutzungsdauer, Anpassbarkeit, Demontierbarkeit beziehungsweise Trennbarkeit als auch die Verwertbarkeit des Bauwerks untersucht. Durch den Informationsgewinn des Gebäuderessourcenpasses können Urbane Minen und kreislaufgerechter Abbruch unterstützt werden, da eine entsprechende Datenbasis geschaffen wird. Der DGNB-Gebäuderessourcenpass ist als Dokumentationsvorlage zu betrachten, welcher eine fundierte Informationsgrundlage für die Bewertung von zirkulärem Bauen schaffen soll und in bestehende DGNB-Tools integrierbar ist. Da der Gebäuderessourcenpass nicht allgemeingültig anerkannt wird, ist dieser in der DGNB-Gebäudezertifizierung nicht erforderlich. Die Anwendung vereinfacht den Prüfprozess jedoch und ist laut DGNB für die Zertifizierung von Neubauten erwünscht (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V., o. D.). In Zukunft soll der GRP auch für die Ressourcenerfassung von Bestandsgebäuden anwendbar sein. Zum Zeitpunkt der Rechercharbeiten dieser Diplomarbeit war dies jedoch noch nicht möglich.

Als Datengrundlage dienen der Bauteilkatalog Ökobaudat, Exporte aus BIM-Modellen und die Katalogisierung des Bauwerks in entsprechenden Tools. Der GRP gibt die Informationen über verbaute Materialien auf oberster Gebäudeebene wieder. Somit ist im GRP keine detaillierte Wiedergabe von Informationen von etwa Schicht- oder Produktebene zu finden. Diese sind zwar erforderlich um den GRP zu erstellen, werden aber in diesem nicht ausgegeben. Im Allgemeinen bündelt der GRP-Informationen auf Gebäudeebene ausfolgenden DGNB-Neubau-Zertifizierungskriterien (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V., o. D.):

- ENV1.1 Klima und Energie
- ENV1.2 Risiken für die lokale Umwelt
- ECO2.4 Wertstabilität
- ECO2.7 Dokumentation
- TEC1.6 Zirkuläres Bauen

Im Zuge der DGNB-Gebäudezertifizierung für den Neubau in der Version 2023 bringt die Anwendung des GRP für die Kriterien TEC1.6 Zirkuläres Bauen und ECO2.7 Dokumentation zusätzliche Punkte, um somit eine bessere Bewertung zu erhalten. Für das Kriterium Zirkuläres Bauen, kann die Anwendung des Gebäuderessourcenpasses bis zu 50 Punkte bei dem Indikator 3.1 einbringen. Sollten die zirkulären Quoten im GRP eingehalten werden, so bringt das beim Indikator 3.2 zusätzlich 15 Punkte. Durch die Anwendung des DGNB-Gebäuderessourcenpasses können bei den beiden oben angeführten Kriterien der Version 2023 bereits 2,4% der Gesamtpunkte in der Zertifizierung erreicht werden (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V., o. D.). Wird der Fokus bei der Gebäudeplanung auf Zirkularität gelegt, kann in etwa 40% des Gesamterfüllungsgrades bei der Zertifizierung System Neubau in der Version 2023 erreicht werden (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V., o. D.).

Der GRP gibt die Zirkularität eines Gebäudes in Form eines Zirkularitätsindex aus. Hier kann unter anderem der hauseigene DGNB Zirkularitätsindex verwendet werden. Der GRP bietet jedoch ebenfalls die Möglichkeit an, andere bekannte Zirkularitätsindizes wie etwa den Urban Mining Index UMI oder auch den Madaster Zirkularitätsindikator MZI anzugeben.

Der GRP kann, unabhängig des betrachteten Gebäudetyps, in zwei Versionen ausgewertet werden – der vollständigen oder der reduzierten Version. Die Unterscheidung findet hier bei der Erfassung der Gebäudemassen nach den Kostengruppen gemäß der DIN 276 statt. Im Zuge einer Ökobilanzierung LCA müssen zumindest die Kostengruppen KG300 + KG400 im GRP erfasst werden. Sollte daher die Kostengruppe KG400 nicht erfasst werden, so kann lediglich die reduzierte Version des GRP ausgegeben werden. Die Mindestanforderungen für die Ausgabe des DGNB-ZI über den DGNB-GRP sind bereits im Kapitel 6.2 angeführt.

## 7 Fallstudie: Vergleichende Zirkularitätsbewertung eines Einfamilienhauses

In diesem Kapitel wird anhand eines Fallbeispiels das Kreislaufpotenzial gemäß der in Kapitel 4 bis 6. angeführten Bewertungssysteme errechnet. Das zu untersuchende Gebäudemodell wurde vom Institut für Hoch- und Industriebau, Forschungsbereich Integrale Planung, zur Verfügung gestellt.

Damit die Ergebnisse der Bewertungssysteme in Kontext zueinander gestellt werden können, werden im folgenden Kapitel 7.1. die Projektrahmenbedingungen, sprich das funktionale Äquivalent und Systemgrenzen definiert. Die allgemeinen Eingangsparameter des Gebäudes für die Berechnungen werden ebenfalls gelistet.

### 7.1 Fallbeispiel: Neubau eines Einfamilienhauses (EFH)

Das zugrunde liegende Gebäude ist ein Einfamilienhaus und befindet sich in der Planungsphase mit bereits geplantem Rohbau inklusive fertig gestellter Gebäudehülle, verputzten Innenwänden und Bodenbelägen. Die technische Gebäudeausrüstung sowie Außenanlagen werden in dieser Arbeit nicht weiter behandelt und sind somit nicht Bestandteil der Bewertung. Zur Bewertung gelangen daher die für die Herstellung des Rohbaus inklusive Gebäudehülle erforderlichen Baustoffe und Bauteile. Das Gebäude besteht aus einem Kellergeschoß, einem Erdgeschoss und einem ausgebauten Dachgeschoß. Die Dachform entspricht einem Krüppelwalmdach. In der Abb. 7.1 ist ein 3D-Modell des zu bewertenden Gebäudes abgebildet. Als Zeichenprogramm wurde Archicad 26 genutzt.



Abb. 7.1: Fallbeispiel - 3D-Gebäudemodell des untersuchten Bauwerks, Software Archicad 26 (eigene Darstellung)

Die folgenden Abb. 7.2 bis Abb. 7.4 sind die drei Geschößgrundrisse inkl. Bemaßung dargestellt.

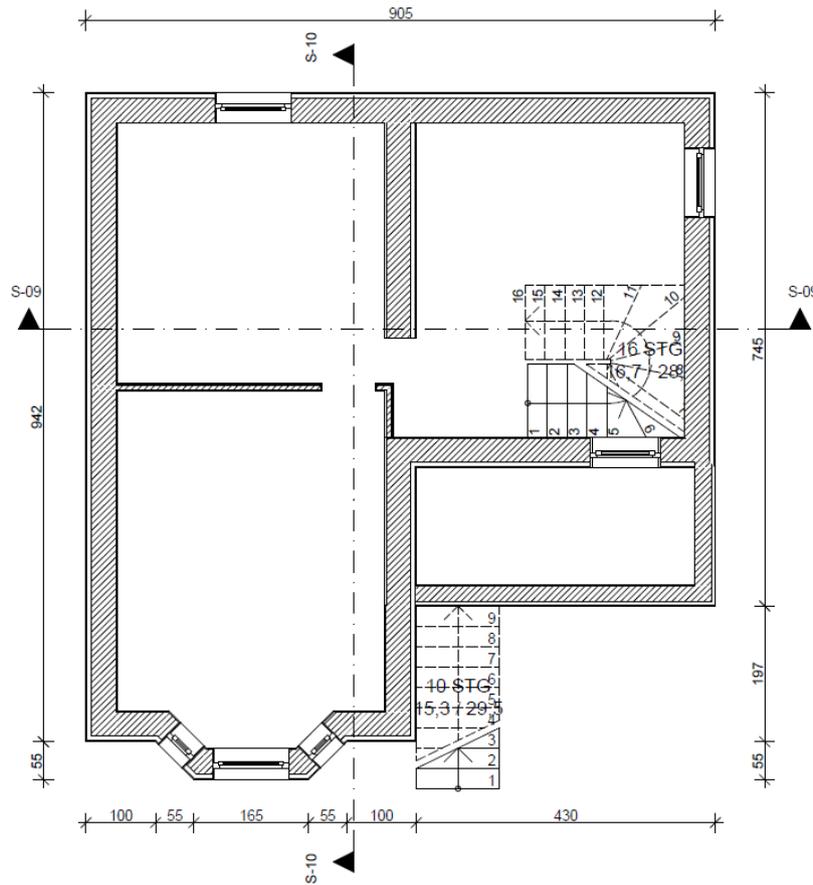


Abb. 7.2: Fallbeispiel - Grundriss 1. Kellergeschoß, Software Archicad 26, (eigene Darstellung)

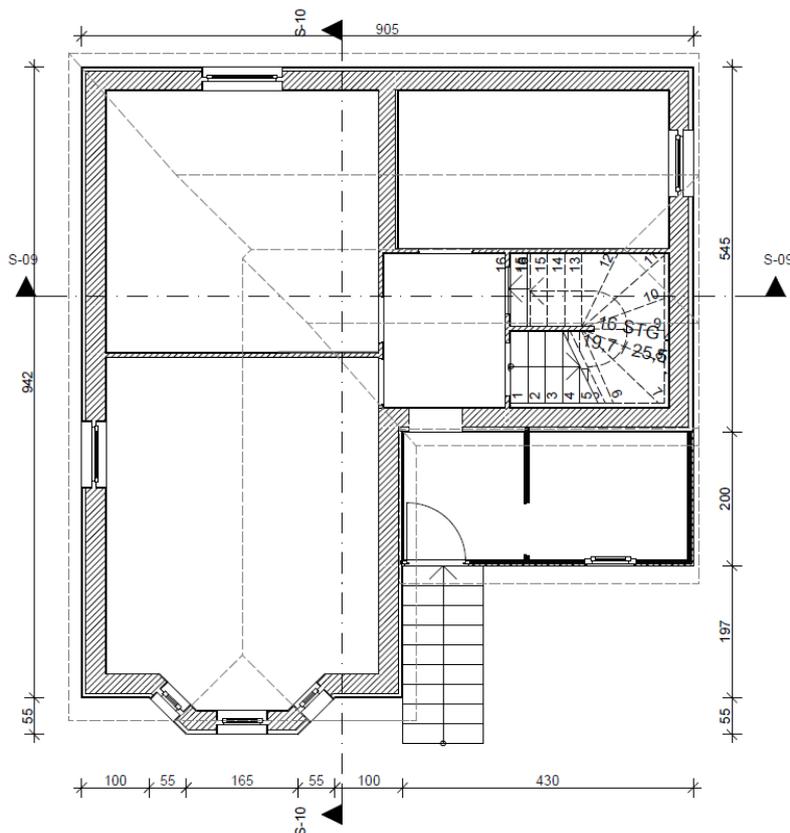


Abb. 7.3: Fallbeispiel - Grundriss Erdgeschoss, Software Archicad 26, (eigene Darstellung)

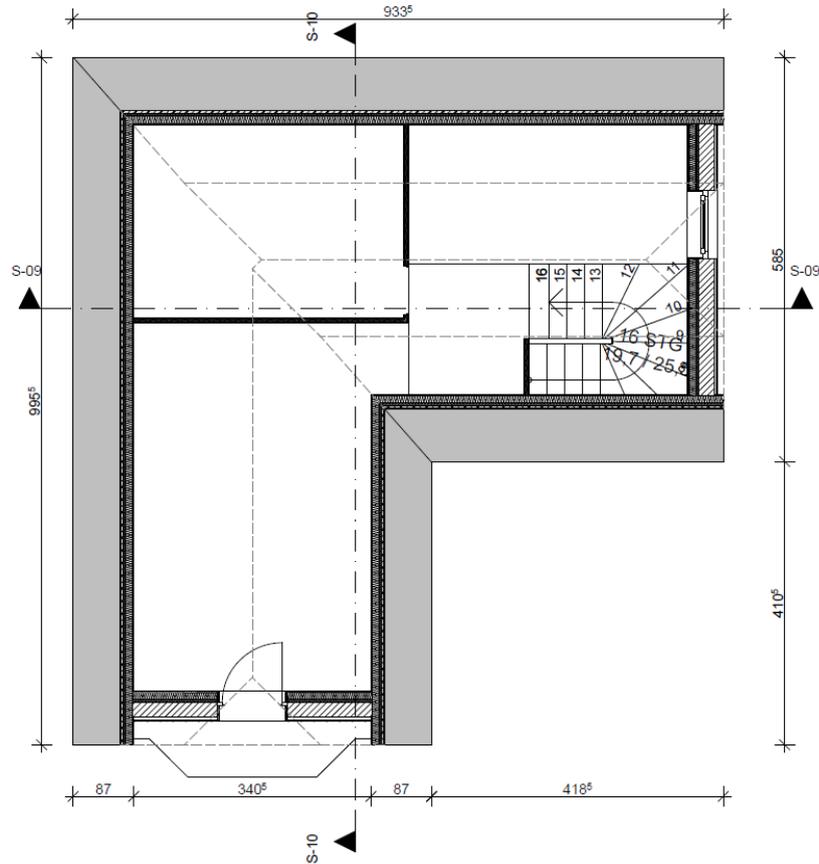


Abb. 7.4: Fallbeispiel - Grundriss 1. Dachgeschoss, Software Archicad 26, (eigene Darstellung)

In der Abb. 7.5 ist der Schnitt S10-10 dargestellt, aus welchem die jeweiligen Geschosshöhen entnommen werden können.

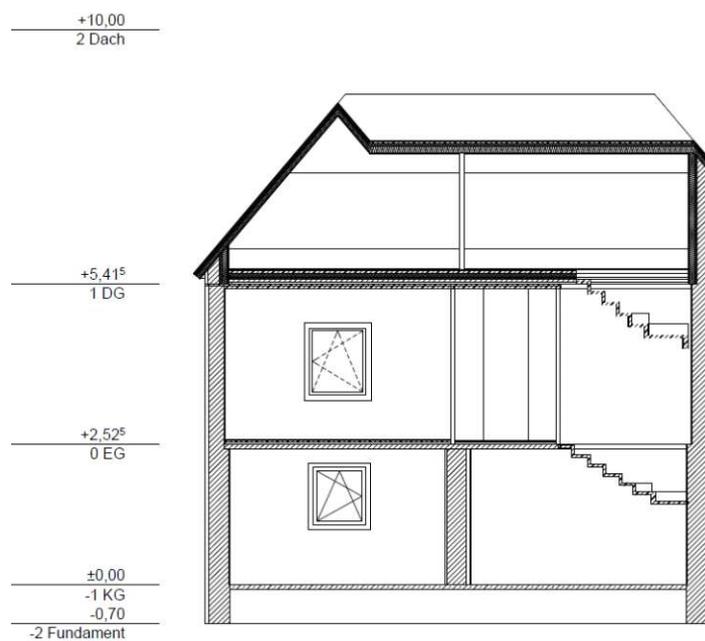


Abb. 7.5: Fallbeispiel - Gebäudeschnitt S10-S10, Software Archicad 26, (eigene Darstellung)

Bei dem zur Verfügung gestellten Gebäudemodell wurden Fenster mit einem Kunststoffrahmen und 2-fach Verglasung verplant.

### 7.1.1 Funktionales Äquivalent

Im Zuge dieser Masterthesis ist folgendes funktionales Äquivalent definiert worden:

1. Art des Bauwerks = Gebäude Neubau
2. Primärfunktion des Bauwerks =Wohnhaus
3. Betrachtungszeitraum – siehe Kapitel 3.1.4

Da es sich um ein fiktives Gebäude handelt, liegt kein Lastenheft beziehungsweise sonstige technische und funktionale Anforderungen auf. Daher wurde im Zuge der Fallstudie dieser Aspekt des funktionalen Äquivalents nicht berücksichtigt und ist daher auch nicht Bestandteil der Bewertung.

### 7.1.2 Räumliche Systemgrenze

Die räumliche Grenze der Bewertung stellt das gesamte Gebäude exklusive Außenanlagen und technische Gebäudeausrüstung dar. In die Bewertung fließen daher ausschließlich die konstruktiven Elemente inklusive fertiggestellter Gebäudehülle, Innenputz und Bodenbelag in die Bewertung ein. Bedeutet, dass nach der DIN 276 ausschließlich die dritte Ebene der Kostengruppe 300 in die Bewertung einfließen (DIN - Deutsches Institut für Normung, 2018).

### 7.1.3 Zeitliche Systemgrenze - Betrachtungszeitraum

Der Betrachtungszeitraum entspricht dem gesamten Lebenszyklus, sprich die Module A-D, der für die Bewertung relevanten konstruktiven Elemente. Da es sich um ein fiktives Bauvorhaben handelt, gibt es keine geforderte Nutzungsdauer. Daher wird eine voraussichtliche Nutzungsdauer von 80 Jahren definiert. Das entspricht dem Richtwert aus den Anlagenblatt Anlage 7 für Massivbauten des BGBl II aus dem Jahre 2015 Nr. 313 (BMF - Bundesministerium für Finanzen, 2015). Die voraussichtliche Nutzungsdauer und der Betrachtungszeitraum sind ident, wodurch der Verhältnisfall RSP1 angewandt wird und daher keine Abminderung/Erhöhung der Indikatoren für die Module B und D notwendig ist.

Für die Nutzungsdauer der verbauten Materialien werden die vom BBSR definierten Nutzungsdauer von Bauteilen nach Unterkostengruppen der DIN 276 herangezogen (BBSR - Bundesinstitut für Bau-, Stadt-, und Raumforschung, 2017). Damit kann abgeschätzt werden, wie oft ein entsprechendes Material im Laufe der Nutzungsdauer des Gebäudes ausgetauscht werden muss. Die Austauschhäufigkeit der verbauten Materialien für einen Zeitraum von 80 Jahren ist im Anhang 9.2 gelistet. Zum Zeitpunkt der Bewertungsdurchführung befindet sich das Projekt in der Leistungsphase der Vorplanung.

### 7.1.4 Gebäudedaten

Die folgenden Daten wurden aus dem zur Verfügung gestellten Gebäudemodell entnommen. Werte, welche nicht aus dem Modell entnommen werden konnten bzw. nicht bekannt waren, sind im niedrigen Richtwertbereich eingeschätzt worden und mit dem Symbol „\*“ gekennzeichnet. Da nur ein Teil des Kellergeschosses beheizt wird, ist die Netto-Raumfläche der Energiebezugsfläche geringer als die NRF. Die Nutzungsfläche beschreibt jenen Anteil der Netto-Raumfläche, welcher nach Abzug von Verkehrsflächen und Technikfläche – Annahme eines Technikraumes im Kellergeschoß – überbleibt. Da die genaue Raumnutzung nicht genauer definiert war, würde bei der Nutzungsfläche Büroarbeit (NUF-2) ein Raum im DG zugeordnet. Die Ermittlung der Flächen und Volumina erfolgte auf Basis der DIN 277. Die Bruttogeschossfläche ist als Synonym in Österreich für die in der DIN 277 definierte Brutto-

Grundfläche zu verstehen (DIN - Deutsches Institut für Normung, 2021). Folgende Gebäudedaten sind in die Berechnungen eingegangen:

- Überbaute Fläche = 77,99 m<sup>2</sup>
- Flächen nach DIN 277 (DIN - Deutsches Institut für Normung, 2021):
  - Bruttogeschossfläche BGF (R) = 77,99 + 77,99 + 75,77 = 231,75 m<sup>2</sup>
  - Netto-Raumfläche NRF (R) = 57,66 + 62,73 + 45,29 = 165,68 m<sup>2</sup>
  - Netto-Raumfläche: NRF-EnEV (Energiebezugsfläche) = 50,86 + 62,73 + 45,29 = 158,88 m<sup>2</sup>
  - Nutzungsfläche: NUF(R) = 42,36 + 49,61 + 37,17 = 129,14 m<sup>2</sup>
  - Nutzungsfläche Büroarbeit: NUF-2\* = 10,86m<sup>2</sup>
- Volumen nach DIN 277 (DIN - Deutsches Institut für Normung, 2021):
  - Brutto-Rauminhalt BRI = (77,99x2,61) + (77,99x3,0811) + (75,77x2,755) = 652,595 m<sup>3</sup>

### 7.1.5 Massenermittlung inklusive zirkulärer Materialattribute

Für die Durchführung einer Zirkularitätsbewertung eines Gebäudes ist eine Auswertung der verbauten Materialien mit entsprechender Mengenermittlung samt deren Zirkularitätsattribute wie der Material-Recycling-Content MRC, das Material-End-of-Life-Szenario MEoL inklusive Einordnung, ob ein hochwertiges EoL-Szenario erreicht werden kann. Aber auch die Demontagefähigkeit und Trennbarkeit spielen eine entscheidende Rolle. Für das untersuchte Fallbeispiel wurden eben diese Attribute untersucht und wie folgt bestimmt.

Da die Bauteile, für die in dieser Diplomarbeit untersuchten Zirkularitätsbewertungssysteme, nach der DIN 276 gegliedert werden, wurden die Baustoffe und Bauteilschichten entsprechend des zur Verfügung gestellten Gebäudemodells ausgewertet. In Abb. 7.6 ist die Auswertung der Massenermittlung nach Baustoffen beziehungsweise Baustoffgruppen grafisch dargestellt. Die genaue Auflistung der Massen nach Baustoffen und -materialien ist im Anhang 9.1 beigelegt.

MATERIALBEZEICHNUNG	MASSE [kg] ohne Austausch
Brettschichtholz	3080,79 kg
EPS	140,56 kg
Fliesen weiß	382,98 kg
Fliesenkleber	405,08 kg
PE-Folie	13,19 kg
Gipskarton	2130,46 kg
Metallständerwand (C-Profil)	32,34 kg
Gipsputz	9658,96 kg
Hochlochziegel	135649,08 kg
Mineralputz	4259,90 kg
Mineralwolle weich	550,83 kg
Mörtel dunkel	28425,93 kg
Estrich	13222,32 kg
Bitumen	286,02 kg
Blähbeton 1100 kg/m³	2621,85 kg
Einlageziegel (Hourdis)	2674,25 kg
Stahl(I-Träger)	1104,46 kg
Stroh (zw. KVH)	41,15 kg
Holz Schalung (Sparschalung)	885,93 kg
Vollholz (KVH)	682,95 kg
Teppich beige	59,59 kg
Laminat	278,88 kg
Parkett	117,90 kg
PVC default	68,55 kg
Schüttung	5456,88 kg
Terrazzo	477,00 kg
Blech	8,12 kg
Dachpappe	277,12 kg
Dachziegel grau	1324,11 kg
Fenster (Kunststoff)	405,05 kg
Türen (Kunststoff)	80,88 kg

MATERIALGRUPPE	EINZELBAUSTOFF-GRUPPEN	MATERIALBEZEICHNUNG	MASSE [kg]	Σ- MASSE [kg]	[M-%]	
Holz und Holzwerkstoffe	Sonstige Holzwerkstoffe	Holz Schalung (Sparschalung)	885,93 kg	5085,83 kg	2,37%	
		Parkett	117,90 kg			
		Stroh (zw. KVH)	41,15 kg			
	Bau-/Konstruktionsholz	Dachpappe	277,12 kg			
		Brettschichtholz	3080,79 kg			
Kunststoffe	Sonstige Kunststoffe	Vollholz (KVH)	682,95 kg	1046,71 kg	0,49%	
		Laminat	278,88 kg			
		Teppich beige	59,59 kg			
	Kunststoff-Dämmstoffe	PVC default	68,55 kg			
		EPS	140,56 kg			
Kunststoff-Fenster/-Türen	Fenster (Kunststoff)	405,05 kg				
	Türen (Kunststoff)	80,88 kg				
Kunststoff-Dachbahn	PE-Folie	13,19 kg				
	Bituminöse Mischungen	Bitumen	286,02 kg	286,02 kg	0,13%	
Metalle	Sonstige Metalle	Blech	8,12 kg	1136,80 kg	0,53%	
		Aluminium	Metallständerwand (C-Profil)			32,34 kg
		Stahl	Stahl(I-Träger)			1104,46 kg
Gips	Sonstige Gipsbaustoffe	Gipsputz	9658,96 kg	11789,42 kg	5,49%	
		Gipskarton	2130,46 kg			
Mineralische Baustoffe	Mineralische Dämmstoffe	Mineralwolle weich	550,83 kg	195045,12 kg	90,81%	
		sonst. Mineralisches, Mix	Mörtel dunkel			28425,93 kg
			Mineralputz			4259,90 kg
			Estrich			13222,32 kg
			Schüttung			5456,88 kg
	Beton	Blähbeton 1100 kg/m³	2621,85 kg			
		Hochlochziegel	135649,08 kg			
	Ziegel	Einlageziegel (Hourdis)	2674,25 kg			
		Dachziegel grau	1324,11 kg			
		Fliesen weiß	382,98 kg			
Ton, Lehm, Keramik	Terrazzo	477,00 kg				
	Bauchemische Produkte	Kleber	405,08 kg	405,08 kg	0,19%	
			<b>Gesamtmasse</b>	<b>214794,98 kg</b>	<b>100,00%</b>	

	[Masse-%]
Holz und Holzwerkstoffe	2
Kunststoffe	0
Bituminöse Mischungen	0
Materialmix	0
Elektrik und Elektronik	0
Metalle	1
Gips	5
Glas	0
Mineralische Baustoffe	91



Abb. 7.6: Fallbeispiel Einfamilienhaus – grafische Darstellung der Masseanteile der verbauten Baustoffgruppen, (eigene Darstellung)

Eine Auflistung der unterschiedlichen Bauteilschichten für die fünf Kostengruppen Fundament, Außenwände, Innenwände, Decken und Fenster/Türen ist im Anhang 9.2 dargestellt. Inhomogene Schichten wie zum Beispiel die Metallständerwand mit Dämmung zwischen Profilen sind anteilmäßig durch Prozentschätzungen berücksichtigt. Verbindungsmittel wie zum Beispiel Schrauben, Klebstoffe und Dichtstoffe wurden auf Grund der vernachlässigbaren Massen in der Auswertung nicht berücksichtigt. Bei der Ermittlung der Trennbarkeit und Demontagefähigkeit als auch bei der Bestimmung von Störstoffen ist die Art der Verbindung jedoch anzugeben. Bauteilschichten wie Silikatputze & Anstriche haben auf Grund ihrer geringen Schichtdicke keinen Signifikanten Einfluss auf die Massengewichtung, sind jedoch als Störstoffe relevant. Für die Auswertung der Baumaterialien wurde die massebezogene Mengengewichtung [kg/m<sup>2</sup>] herangezogen, da diese Ausgangsgröße für die untersuchten Bewertungssysteme als Eingangsgröße verlangt wird.

Für die Bestimmung des zirkulären Attributes der Demontagefähigkeit wurde neben der Definition der unterschiedlichen Zirkularitätsklassen nach DGNB-ZI Tabelle 6.5 auch die Abb. 7.7 aus dem DGNB-ZI zur Hilfe genommen (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e. V., 2024). In der Abb. 7.7 sind von gängigen Zirkularitätsbewertungsmethoden die unterschiedlichen Methoden zur Einordnung der Demontagefähigkeit aufgelistet. Für die Fallstudie wurde als Einstufungsmethode das Bewertungssystem Urban Mining Index gewählt. Dieser gibt einen Bauteilkatalog mit entsprechenden Rückbauaufwänden an. Dadurch wird eine möglichst gleiche Ausgangsbasis bei der Einstufung der Baustoffe und -materialien für die Durchführung der unterschiedlichen Bewertungssysteme geschaffen. Sprich die beiden Bewertungssysteme UMI und DGNB-ZI gehen von derselben Demontagefähigkeit der verbauten Materialien aus, auch wenn die Wichtung der diversen Demontagefähigkeitsklassen von System zu System abweichend ist. Der Madaster MZI nutzt eigene Materialdatenbanken zur Einstufung der Demontagefähigkeit, was neben einer unterschiedlichen Wichtung der Demontagefähigkeitsklassen zu einer weiteren Abweichung der Ergebnisse führt. Eine genaue Analyse der Ergebnisse wird im Kapitel 9 durchgeführt.

Gebäude - Ebene	Zirkularitäts -klasse	Concular Circularity Performance Index (CPX)		EPEA Circularity Passport® – Buildings (CP)		Madaster (MCI)**/ DGBC (DPC) <sup>42</sup>	Urban Mining Index (UMI)		Qualitätsstandard		
									DGNB V23 TEC1.6 (Ind. 3.2.2)	DGNB ZI	
demontagefähig	optimiert	Lose	1,00	gesamtes Element kann entfernt und wiederverwendet werden	1,00	1,00	Zerstörungsfrei lösbar	sehr geringer Aufwand	1,00	ZE06): mit Hilfe von reversiblen Anschlüssen installierbar und wieder zerstörungsfrei demontierbar	1,00
	verbessert	Gesteckt, geschraubt (1 Person, nicht maschinell)	0,75	Funktionseinheiten sind alle trennbar	0,75	0,80		Geringer Aufwand	0,90		
nicht demontagefähig	Standard	festverbaut, mittelschwer (> 1 Person benötigt, Maschineneinsatz)	0,50	-	0,50	0,60		Zerstörungsfrei lösbar	Mittlerer Aufwand		
	eingeschränkt	Festverbaut, schwer (Einsatz Baubehelfe/ Transportmittel)	0,25	Funktionseinheiten sind teilweise trennbar	0,25	0,30	nicht zerstörungsfrei lösbar		Hoher Aufwand	0,70	0,25
	problematisch	Extrem aufwändig, Schäden verursachend	0,00	Funktionseinheiten können nicht getrennt werden	0,00	0,10		nicht zerstörungsfrei lösbar	Sehr hoher Aufwand	0,60	
	nicht bewertbar	-	0,00	für eine Beurteilung liegen nicht genügend Informationen vor	0,00	0,00					0,00

Abb. 7.7: Fallbeispiel Einfamilienhaus – Bestimmung des Zirkularitätsattributs „Demontagefähigkeit“ (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e. V., 2024)

Die Einstufung der verbauten Baumaterialien für das Zirkularitätsattributs Demotagefähigkeit wurde auf der Ebene der Bauteilschichten durchgeführt und ist im Anhang 9.2 beigelegt.

Als weiteres zirkuläres Materialattribut wurde die Trennbarkeit der einzelnen Materialien auf Bauteilschichtebene betrachtet. Diese geht ebenso wie die Demontagefähigkeit in die Bewertungssysteme ein und ist ein wichtiges Kriterium für die Bestimmung, ob ein Rückbau wirtschaftlich ist und welches End-of-Life-Szenario ein Material zugeordnet werden kann. Ausschlaggebend für die Trennbarkeit ist die Art der Verbindung der einzelnen Bauteilschichten. Wie bereits bei dem Zirkularitätsattribut der Demontagefähigkeit wurde der Ansatz verfolgt, eine möglichst einheitliche Ausgangsbasis für die unterschiedlichen Bewertungssysteme zu schaffen. Dazu wurde wie bei der Demontagefähigkeit eine Gegenüberstellung der Trennbarkeitsbewertung unterschiedlicher Bewertungssysteme aus dem DGNB-ZI zu Hilfe genommen und die Einstufung nach dem UMI herangezogen (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e. V., 2024). Dies ist in Abb. 7.8 dargestellt.

Gebäude-Ebene	Zirkularitäts-klasse	Concular Circularity Performance Index (CPX)		EPEA Circularity Passport® – Buildings (CP)		Madaster (MCI)** / DGBC (DPc) <sup>42</sup>	Urban Mining Index (UMI)			Qualitätsstandard	
										DGNB V23 TEC1.6 (Ind. 3.2.2)	DGNB ZI
trennbar	optimiert	Nicht maschinelles Werkzeug	1,00	Optimiert, leicht zugänglich und sortenrein trennbar	1,00	-	sortenrein trennbar	Vollständig in den Kreislauf überführbar, keine Entsorgungskosten bzw. positiver Wert Erlöse/Kosten	~ 1,00	(ZE07): (01) über reversible Verbindungen kontaminationsfrei entfernbar (02)Materialien sortenrein und kontaminationsfrei lösbar	1,00
	verbessert	Maschinelle Trennung	0,65	-	-	0,75					
	Standard	Chemische Trennung	0,20	-	-	0,50					
nicht trennbar	eingeschränkt	-	-	grundsätzlich trennbar, nur mit erhöhtem Aufwand	0,50	-	nicht sortenrein trennbar	Nicht vollständig in den Kreislauf überführbar, Entsorgungskosten überlagern den Materialwert	~ 0,75		0,25
	problematisch	Extrem aufw-ändig, Schäden verursachend	0,00	Die Verbindungen sind nicht oder nur mit erheblichem Aufwand trennbar	0,00	-					0,00
	nicht bewertbar	-	0,00	für eine Beurteilung liegen nicht genügend Informationen vor	0,00	-					0,00

Abb. 7.8: Fallbeispiel Einfamilienhaus – Bestimmung des Zirkularitätsattributs „Trennbarkeit“ (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e. V., 2024)

Da für das untersuchte Gebäude in der betrachteten Projektphase kein Rückbaukonzept vorliegt, wird von einem Abbruch ausgegangen. In Kombination mit den End-of-Life Szenarien für den selektiven Abbruch aus Tabelle 7.1 und den für jedes Material definierten möglichen Qualitätsstufen für das Material-End-of-Life laut Tabelle 7.4 wurden entsprechende Trennbarkeiten abgeleitet. Baustoffanteile, welche laut Tabelle 7.4 im Closed-Loop geführt werden können, werden je nach der Trennungsart den Zirkularitätsklassen „optimiert“, „verbessert“ oder „Standard“ zugeordnet. Materialanteile, welche im Loop geführt werden können, werden über den Rückbauaufwandes den Zirkularitätsklassen „eingeschränkt“ oder „problematisch“ zugeordnet. Die restlichen Materialanteile, welche als MEoL eine andere Form der Verwertung oder Deponierung erhalten, werden in die Zirkularitätsklasse nicht bewertbar eingestuft. Wie bei dem Zirkularitätsattribut Demontagefähigkeit ist die Basis für den Madaster MZI abweichend. Die Trennbarkeit fließt hier nicht gesondert als Parameter in die Berechnung mit ein, was ebenfalls zu Abweichungen in den Ergebnissen führt. Eine genaue Analyse der Ergebnisse wird im Kapitel 9 durchgeführt. Die Einstufung der verbauten Baumaterialien für das Zirkularitätsattribut Trennbarkeit wurde für jene Materialanteile, welche im Closed-Loop beziehungsweise Loop geführt werden können, auf der Ebene der Bauteilschichten durchgeführt und ist im Anhang 9.2 beigelegt. Ergänzend sei zu der Trennbarkeit von Holzbaustoffen erwähnt, dass das übliche EoL-Szenario die energetische Verwertung darstellt. Um das Material im Loop führen zu könne, durch Downcycling, müssen Verbindungsmittel wie Nägel, Montagekleber oder sonstige Beschichtungen entfernt werden. Dadurch ergibt sich die Einstufung als „nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig“.

Die Angaben zu den End-of-Life Szenarien „Hochwertig“ und „Standard“ wurden ebenfalls aus dem Atlas Recycling entnommen und sind in Abb. 3.8, auf Seite 41 dargestellt. Diese Szenarien wurden mit dem Urban Mining Index von Dr. Rosen abgeglichen und für die im Fallbeispiel verbauten Materialien in Tabelle 7.1 ausgewertet. Da zu dem untersuchten Gebäude kein Rückbaukonzept vorliegt, womit für das End-of-Life-Szenario des Gebäudes von keinem hochwertigen EoL ausgegangen wird.

Materialbezeichnung	End-of-Life-Szenario	
	EoL-Szenario „Hochwertig“ (selektiver Rückbau)	EoL-Szenario „Standard“ (selektiver Abbruch)
<b>Brettschichtholz (konventionell)</b>	Downcycling	energetische Verwertung
<b>EPS (Fassade)</b>	Downcycling	energetische Verwertung
<b>EPS (Trittschalldämmung, 30mm)</b>	Downcycling	energetische Verwertung
<b>Fliesen, keramisch</b>	Downcycling	Entsorgung/Deponierung
<b>Fliesenkleber</b>	Entsorgung/Deponierung	Entsorgung/Deponierung
<b>Dampfbremse</b>	Downcycling	energetische Verwertung
<b>Gipskarton 12,5mm</b>	Recycling	Entsorgung/Deponierung
<b>Metallständerwand (Aluminiumblech)</b>	Recycling	Recycling
<b>Gipsputz 10mm</b>	Entsorgung/Deponierung	Entsorgung/Deponierung
<b>Hochlochziegel</b>	Downcycling	Entsorgung/Deponierung
<b>Mineralputz</b>	Entsorgung/Deponierung	Entsorgung/Deponierung
<b>Mineralwolle (Glaswolle) - Wand</b>	Entsorgung/Deponierung	Entsorgung/Deponierung
<b>Mineralwolle (Glaswolle) - Trittschalldämmung</b>	Entsorgung/Deponierung	Entsorgung/Deponierung
<b>Mörtel, dunkel</b>	Entsorgung/Deponierung	Entsorgung/Deponierung
<b>Zementestrich 65mm</b>	Recycling	Downcycling
<b>bituminöse Trennschicht</b>	Downcycling	Entsorgung/Deponierung
<b>Blähton (1100 kg/m<sup>3</sup>)</b>	Downcycling	Entsorgung/Deponierung
<b>Einlegeziegel (Hourdis)</b>	Downcycling	Entsorgung/Deponierung
<b>Stahlträger IPE 120</b>	Recycling	Recycling
<b>Stroh</b>	Wiederverwendung	energetische Verwertung
<b>Lattung, Fichte/Tanne (konventionell)</b>	Downcycling	Downcycling
<b>Sparschalung/Spanplatte (konventionell)</b>	Downcycling	Downcycling
<b>Vollholzplatte (konventionell)</b>	Downcycling	Downcycling
<b>Nylon-Teppichfliese</b>	Recycling	Recycling
<b>Laminat 8mm</b>	Entsorgung/Deponierung	Entsorgung/Deponierung
<b>Parkett</b>	Downcycling	Downcycling
<b>PVC-Folie</b>	Entsorgung/Deponierung	Entsorgung/Deponierung
<b>Schüttung (Sand/Kies)</b>	Wiederverwendung	Downcycling
<b>Terrazzo (Bodenbelag)</b>	Downcycling	Downcycling
<b>Stehfalz-Zinkdeckung (Stahlblech)</b>	Recycling	Entsorgung/Deponierung
<b>Dachpappe</b>	Downcycling	energetische Verwertung
<b>Dachziegel</b>	Downcycling	Entsorgung/Deponierung
<b>PVC-Fenster</b>	Recycling	Energetische Verwertung
<b>PVC-Türen</b>	Recycling	Energetische Verwertung

Tabelle 7.1: Fallbeispiel Einfamilienhaus – End-of-Life-Szenarien „hochwertig“ und „standard“ (Rosen, 2021), (eigene Darstellung)

In Tabelle 7.2 bis Tabelle 7.3 sind die berücksichtigten Qualitätsstufen des MRC und MEoL samt Abkürzungen angeführt. Die Qualitätsstufen basieren auf dem Material-Cycle-Status des Atlas Recycling (Seggewies, Riegler-Floors, & Rosen, 2018), wobei für das MEoL zusätzlichen Qualitätsstufen nach Urban Mining Index ergänzt wurden (Rosen, 2021). Konkret wurden die beiden Qualitätsstufen „*dccr*“, „*enr*“ und „*enr*“ ergänzt, um eine möglichst vergleichbare Basis hinsichtlich der Materialherkunft und Materialverwertung für die unterschiedlichen Bewertungssysteme zu schaffen. Für Materialien, wo keine klare Trennung zwischen der hohen und niedrigen Qualitätsstufe der Weiterverwertung möglich ist, wird vom Worstcase des Downcyclings für die weitere Verwendung außerhalb der Baubranche ausgegangen.

<b>Material recycling content (Pre-Use)</b>	<b>Quelle</b>	<b>MRC</b>
Wiederverwertung (Recycling)	Atlas Recycling	RC
nachwachsender Primärrohstoffe (zertifiziert nachhaltig)	Atlas Recycling	RNc
nachwachsender Primärrohstoffe	Atlas Recycling	RN
weiterverwertete Material (Downcycling)	Atlas Recycling	DC
Primärrohstoffe nicht erneuerbar	Atlas Recycling	PR

Tabelle 7.2: MRC nach Qualitätsstufen inklusive Abkürzungen nach Atlas Recycling und UMI (Seggewies, Riegler-Floors, & Rosen, 2018) (Rosen, 2021), (eigene Darstellung)

<b>Qualitätsstufen Material-End-of-Life (Post-Use)</b>	<b>Quelle</b>	<b>MEoL</b>
wiederverwendbar	Atlas Recycling	ru
wiederverwertbar (Recycling)	Atlas Recycling	rc
weiterverwertbar, zert. Nachhaltig nachwachsend	UMI	dccr
energ. verwertbar, zert. Nachhaltig nachwachsend	UMI	enr
weiterverwertbar (Downcycling hochwertig)	Atlas Recycling	dc <sub>h</sub>
weiterverwertbar (Downcycling niedrig)	Atlas Recycling	dc
energ. verwertbar, nachwachsend	UMI	enr
energetisch verwertbar fossil/Deponierung	Atlas Recycling	enf/d

Tabelle 7.3: MEoL nach Qualitätsstufen inklusive Abkürzungen nach Atlas Recycling und UMI (Seggewies, Riegler-Floors, & Rosen, 2018) (Rosen, 2021), (eigene Darstellung)

In Tabelle 7.4 sind die im Gebäude verwendeten Materialien mit dem jeweiligen Material-Recycling-Content-Werten (MRC) und Material-End-of-Life-Werten (MEoL) zufolge dem Atlas Recycling dargestellt (Seggewies, Riegler-Floors, & Rosen, 2018). Die Werte wurden falls notwendig mit Werten aus dem Urban Mining Index ergänzt (Rosen, Urban Mining Index : Entwicklung einer Systematik zur quantitativen Bewertung der Kreislaufkonsistenz von Baukonstruktionen in der Neubauplanung, 2021). Materialien, bei welchen keine Werte vorhanden sind, wird davon ausgegangen, dass diese aus Primärrohstoffen hergestellt werden, beziehungsweise nach dem EoL beseitigt werden und somit nichts zu dem Kreislaufpotenzial beitragen. Da von dem untersuchten Gebäude kein Rückbaukonzept vorliegt, wird von einem Abbruch ausgegangen. Dies hat zur Folge, dass die Trennung der Materialien nicht Sortenrein erfolgen wird. Dadurch wird auch das Erreichen von hochwertigen Verwertungsmöglichkeiten wegen Verunreinigungen reduziert beziehungsweise nicht möglich. Vor allem bei mineralischen Bestandteilen wie dem masseintensivsten Baustoff Hochlochziegel resultiert dies darin, dass ein Recycling nicht möglich wird und der Ziegelabbruch downgecycelt werden muss. Im Anhang 9.3 sind die Material-Cycle-Status-Werte gängiger Baumaterialien zufolge Atlas Recycling dargestellt.

Materialbezeichnung	Material-Cycle-Status												
	Material-Recycling-Content (MRC) [%]					Material-End-of-Life (MEoL) [%]							
	Closed-Loop			Loop	PR	Closed-Loop				Loop			enf/d
	RC	RNc	RN	DC		ru	rc	dccr	encl	dCh	dc	enr	
Brettschichtholz (konventionell)		95%			5%					20%	80%		
EPS (Fassade)					100%					25%	70%		5%
EPS (Trittschalldämmung, 30mm)					100%					25%	70%		5%
Fliesen, keramisch					100%						65%		35%
Fliesenkleber					100%								100%
Dampfbremse					100%					25%	70%		5%
Gipskarton 12,5mm	2%		2%		95%		5%				35%		60%
Metallständerwand (Aluminiumblech)	50%				50%		95%						5%
Gipsputz 10mm					100%								100%
Hochlochziegel					100%						90%		10%
Kalkzement-Putzmörtel (Mineralputz)					100%								100%
Mineralwolle (Glaswolle) - Wand	80%				20%								100%
Mineralwolle (Glaswolle) - Trittschalldämmung	80%				20%								100%
Zementmörtel (Mörtel, dunkel)					100%								100%
Zementestrich 65mm					100%						16%		84%
bituminöse Trennschicht					100%						80%		20%
Blähbeton (1100 kg/m³)					100%						90%		10%
Einlegeziegel (Hourdis)					100%						90%		10%
Stahlträger IPE 120	30%				70%		90%						10%
Stroh			100%			70%							30%
Lattung, Fichte/Tanne (konventionell)			100%							20%	80%		
Sparschalung/Spanplatte (konventionell)	18%		72%		10%					20%	80%		
Vollholzplatte (konventionell)			100%							20%	80%		
Nylon-Teppichfliese	65%				35%		100%						
Laminat 8mm			70%		30%								100%
Parkett		100%								20%	80%		
PVC-Folie					100%								100%
Schüttung (Sand/Kies)					100%	60%					40%		
Terrazzo (Bodenbelag)					100%						95%		5%
Stehfalz-Zinkdeckung (Stahlblech)	30%				70%		90%						10%
8Dachpappe		60%			40%						100%		
Dachziegel					100%						95%		5%
PVC-Fenster (50% Glas + 50% PVC-Profil)	5%				95%								
PVC-Türen (100% PVC)					100%								

Tabelle 7.4: Fallbeispiel Einfamilienhaus – MRC- und MEoL-Werte verbauter Materialien und Produkten (Seggewies, Riegler-Floors, & Rosen, 2018) (Rosen, 2021), (eigene Darstellung)

## 7.2 Zirkularitätsbewertung nach Urban Mining Index

Für die Bewertung des Kreislaufpotenzials und des CO<sub>2</sub>-Footprints auf Bauteil- und Gebäudeebene wurde das eigens für den Urban Mining Index entwickelte Excel Tool von Dr. Anja Rosen herangezogen. Dabei handelt es sich um ein visual basic programmierte Excel-Tool, welches dankenderweise kostenfrei von Dr. Rosen zur Verfügung gestellt. Das Bewertungssystem, welches als Basis der angewandten Software fungiert, wurde bereits im Kapitel 4 erläutert. In naher Zukunft soll dieses Excel Tool zufolge Dr. Rosen durch eine professionellere Software ersetzt werden. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit war diese Software jedoch nicht verfügbar.

### 7.2.1 Auswertung des Urban Mining Indicators

Für die Anwendung des Excel-Tools ist es erforderlich, die konstruktiven Elemente des Bauwerks in sechs Bauteilgruppen einzuteilen und den Aufbau der konstruktiven Elemente mit jeweiligen Massen pro 1m<sup>2</sup> Bauteilfläche zu erfassen. Die sechs Bauteilgruppen laut DIN 267 gliedern sich dabei in (DIN - Deutsches Institut für Normung, 2018):

1. Gründung, Kostengruppe 320
2. Außenwände, Kostengruppe 330
3. Fenster und Türen, Kostengruppe 334
4. Innenwände, Kostengruppe 340
5. Decken, Kostengruppe 350
6. Dach, Kostengruppe 360

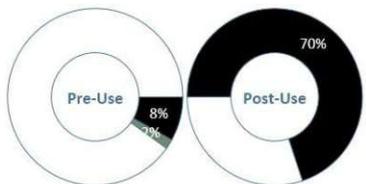
Die notwendigen Daten der konstruktiven Elemente wurden aus dem Gebäudemodell entnommen, die Massenermittlung nach Baumaterialien und Bauteilschichten ist im Anhang 9.1 bis 9.2 beigelegt. Pro Bauteilgruppe können wiederum sechs konstruktive Elemente angelegt werden. Für jedes konstruktives Element wird der Aufbau mit der dazugehörigen Bauteilfläche erfasst. In Abb. 7.9 ist dies für einen Innenwandaufbau exemplarisch dargestellt.

Das angegebene Closed-Loop-Potenzial und Loop-Potenzial ergibt sich durch die angelegten Bauteilschichten. Neben einem Bauteilnamen ist auch die Bauteilfläche einzugeben. Wie in Abb. 7.9 ersichtlich, besteht der Aufbau der IW07 aus vier Bauteilschichten. Um ein konstruktives Element zu erstellen ist es daher notwendig, die Bauteilschichten mit den jeweiligen Masseanteilen pro m<sup>2</sup> oder pro m<sup>3</sup> zu kennen. Die Eingabe im Excel-Tool erfolgt über den „Start“ Button und kann nachträglich über den „bearbeiten“ Button angepasst werden. In Abb. 7.10 ist beispielhaft die Materialerfassung für die Bauteilschicht Gipskartonplatte dargestellt.

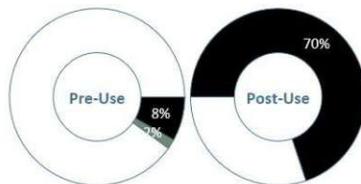
## INNENWÄNDE\_6



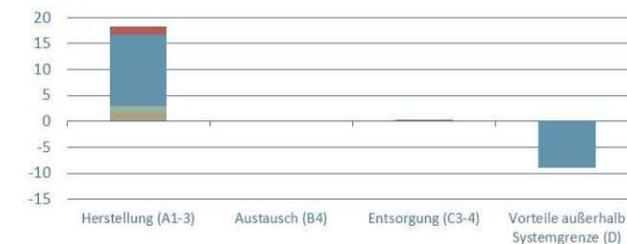
CLOSED-LOOP POTENTIAL 79,77%



LOOP POTENTIAL 79,77%



kg CO<sub>2</sub>Eq./m<sup>2</sup> Treibhauspotenzial



starten



bearbeiten



kopieren



einfügen



entfernen

BAUTEILNAME IW Aufbau 7  
BAUTEILFLÄCHE 17,45 m<sup>2</sup>



neu hinzufügen



Blatt kopieren



Blatt einfügen



zurück

BEZEICHNUNG (Eigene)	KOSTENGRUPPE Quelle: DIN 276	BAUTEIL Quelle: Nutzungsdauern	RÜCKBAUAUFWAND Quelle: Bauteilkatalog	MATERIAL	ABFALLFRAKTION	MASSE IM LEBENSZYKLUS [kg/m <sup>2</sup> ]	FAKTOR WIRTSCHAFTLICHKEIT	CLP [%]	LP [%]	GWP [kg CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> ]
Gipskarton	Nichttragende Innenwände	Ständersysteme	Gipskartonwand, Metalständerswerk mit Gipskartonplatten und Mineralfaserdämmung	Gipskartonplatte	170802_Gips und Gipskarton	12,75	0,7	73,30%	73,30%	1,691345
Mineralfolle weich	Nichttragende Innenwände	Ständersysteme	Gipskartonwand, Metalständerswerk mit Gipskartonplatten und Mineralfaserdämmung	Glaswolle mit formaldehydfreiem Bindemittel (KMF) *	170604_Dämmstoff, Mineralfolle	1,52	0,6	128,00%	128,00%	1,47
C-Profil (Metalständerswand)	Außenwandbekleidungen, innen	Bekleidungen (Systeme): Gipskartonplatten, Gipskartonverbundplatten, Lehmbauplatten	Unterkonstruktion für Vorsatzschale, verschraubt	Stahlblechprofile, verzinkt	170405_Stahl, Scherenschrott	1,6	1	137,00%	137,00%	4,81
Gipskarton	Nichttragende Innenwände	Ständersysteme	Gipskartonwand, Metalständerswerk mit Gipskartonplatten und Mineralfaserdämmung	Gipskartonplatte	170802_Gips und Gipskarton	12,75	0,7	73,30%	73,30%	1,69

Abb. 7.9: Fallbeispiel UMI – Aufbau der Innenwand IW07 (Software: Excel-Tool UMI, Bergische Universität Wuppertal)

Gipskartonplatte (Feuerschutz)(Dicke 0,0125 m)

**Materialerfassung**

BEZEICHNUNG (Eigene)

Gliederung nach DIN 276

Material

Einordnung Rückbauaufwand

Bauteil

**Material recycling content**

**Massenermittlung pro 1m<sup>2</sup> Bauteilfläche**

Option A (nach Volumen und Rohdichte):

Dicke [m]

Länge [m] Menge [n/m<sup>2</sup>]

Breite [m] Rohdichte [kg/m<sup>3</sup>]

Option B (nach Flächengewicht):

Masse [kg/m<sup>2</sup>]

Option C (nach Stückzahl und Gewicht):

Masse [kg/St.]

Menge [n/m<sup>2</sup>]

**Wiederverwendbarkeit**

Absatzmarkt vorhanden

Rückbaubar ohne Zerstörung

**Wiederverwertbarkeit**

End-of-Life Szenario (selektiver Rückbau)

End-of-Life Szenario (selektiver Abbruch)

Material-Loop-Potenzial (gem. Atlas Recycling) [%]

**Ermittlung des Treibhauspotenzials (GWP)**

Quelle/Bezeichnung  A1-3  B4

Datensatz suchen (Quelle: Ökobaudat) Einheit  C3-4  D

Abb. 7.10: Fallbeispiel UMI – Materialerfassung des konstruktiven Elements Gipskartonplatte (Software: Excel-Tool UMI, Bergische Universität Wuppertal)

Folgende Informationen werden hier für das jeweilige Material erfasst beziehungsweise sind anzugeben:

- Gliederung nach DIN 276
- Bauteilart
- Material
- MRC
- Rückbauaufwand
- Abfallfraktion
- Massenermittlung – Masseanteil nach Rohdichte und Volumen oder Flächenmasse
- Wiederverwendbarkeit
- Ermittlung des Treibhauspotenzials

Bei der Materialerfassung wird zuerst der erstellten Bauteilschicht eine Bezeichnung gegeben. Anschließend wählt man in Abhängigkeit des zu erstellenden konstruktiven Elements eine Gliederung nach der DIN 276. In dem in Abb. 7.10 angeführten Beispiel entspricht das einer nichttragenden Innenwand. Da die Gipskartonplatte im Innenwandaufbau IW07 in Form einer Gipskartonständerwand zum Einsatz kommt, wird diese dem Bauteil „Ständersystem“ zugeordnet. Durch die Einordnung des Materials in eine entsprechende Kostengruppe und Auswahl der Bauteilart wird durch das Excel-Tool eine Austauschhäufigkeit definiert. Der Urban Mining Index nutzt für die Berechnung der Austauschhäufigkeit einerseits die vom BBSR definierten Nutzungsdauer von Bauteilen, welche wie im Kapitel 4.2.1 Systemgrenzen des Urban Mining Index auf Seite 44 die Grundlage für die Use-Phase bildet und andererseits die Angabe der geplanten Nutzungsdauer, welche in der durchgeführten Fallstudie 80 Jahre beträgt (BBSR - Bundesinstitut für Bau-, Stadt-, und Raumforschung, 2017).

Unter dem Drop-Down-Menü bei dem Material kann nun ausgewählt werden, um welches Material es sich bei dem Bauteil Ständersystem handelt. Der Urban Mining Index gibt hier eine vorgegebene Auswahl an Materialien für Standardaufbauten vor.

Der Material-Recycling-Content MRC für Gipskarton ist bereits vordefiniert und basiert auf den MRC-Werten, welche im Atlas Recycling von Hillebrandt und Seggewies definiert wurden und im Anhang 9.3 angeführt sind. (Seggewies, Riegler-Floors, & Rosen, 2018). In Abb. 7.11 ist der MRC von einer Gipskartonplatte dargestellt.

The screenshot shows a software interface titled "Qualitätsstufen Pre-Use". It contains several input fields with percentage values and a button labeled "zurück".

Material Category	Value	Unit
Wiederverwendete Materialien	0,0%	[%]
wiederverwertete Materialien	2,0%	[%]
weiterverwertete Materialien (DC)	0,0%	[%]
Erneuerbare Primärrohstoffe (zertifiziert nachhaltig) (Rnc)	0,0%	[%]
Erneuerbare Primärrohstoffe	2,0%	[%]
Austauschhäufigkeit	0	

A button labeled "zurück" with a left-pointing arrow is located in the center of the interface.

Abb. 7.11: Fallbeispiel UMI – IW07 – Material-Recycling-Content MRC einer Gipskartonplatte (Software: Excel-Tool UMI, Bergische Universität Wuppertal)

Im Drop-Down-Menü unter dem Reiter „Einordnung Rückbauaufwände“ kann nun in Abhängigkeit der bereits getroffenen Einstellungen, ein Wandaufbau beziehungsweise Bauart ausgewählt werden. Diese greift auf einen Bauteilkatalog zurück, siehe Kapitel 4.3.3 Seite 51, in welchem entsprechende Rückbauaufwände zu gängigen Bauteilschichten durch Dr. Rosen definiert wurden (Rosen, 2021).

Über das Drop-Down-Menü „Einordnung Abfallfraktion“ wird für jedes Material ausgewählt, in welche Untergruppe an Bau- und Abbruchabfällen dieses eingestuft wird. Hier spielen Überlegungen zur Demontagefähigkeit und sortenreinen Trennung und damit auch, ob das Material ein hochwertiges oder übliches End-of-Life-Szenario erfährt, eine Rolle. Als Basis für die Abfallfraktionen nutzt Dr. Rosen die in Deutschland gültige Gewerbeabfallverordnung und die Altholzverordnung. Im Drop-Down-Menü werden auf Grund der Wahl des Bauteils, Materials und des Rückbauaufwandes entsprechende Auswahlmöglichkeiten zur Abfallfraktion vorgegeben. Im Beispiel der Gipskartonplatte kann zwischen „Gips und Gipskarton“ und „Baumischabfällen“ ausgewählt werden. Da in diesem Fall die Platten nicht verputzt sind und somit eine sortenreine Trennung zwischen Gipskartonplatte, Dämmung und Metallständerwand möglich ist, wurde die Abfallfraktion „Gips und Gipskarton“ gewählt.

In Abhängigkeit der eben beschriebenen Angaben zu Bauteil, Material, Rückbauaufwand und Abfallfraktion wird ein entsprechendes End-of-Life-Szenario für jedes Material ermittelt. Dies ist in Abb. 7.10 rechts unter „Wiederverwendbarkeit“ und „Wiederverwertbarkeit“ dargestellt. Im Fall der Gipskartonplatte ist die Wiederverwendbarkeit nicht relevant und für die End-of-Life-Szenarien selektiver Rückbau und selektiver Abbruch wurden entsprechende Qualitätsstufen gewählt. Die EoL-Szenarien basieren auf dem Atlas Recycling und sind für die unterschiedlichen Materialfraktionen in Abb. 3.8 auf Seite 41 dargestellt und für die in diesem Fallbeispiel verbauten Materialien in Tabelle 7.1 gelistet. Als Massenermittlungsart pro m<sup>2</sup> Bauteilfläche wurde die Option A nach Rohdichte und Volumen gewählt. Über die bereits definierte Bauteilfläche, siehe Abb. 7.9, ergibt sich dadurch eine Masse pro Material. Alternativ kann die Massenermittlung auch über die Flächenmasse kg/m<sup>2</sup>, siehe Option B, oder nach Stückanzahl und Gewicht, Option C, erfolgen. Option C ist vor allem bei Einbauten wie Fenster und Türen relevant. Zur Ermittlung des Treibhausgaspotenzials werden Daten aus der deutschen Ökobaudat oder herstellereigene Umweltproduktdeklarationen verwendet und mit der Masse des Baumaterials ausgewertet. Im Fall der Gipskartonplatte konnte zwischen einer Gipskartonplatte mit Feuerschutz oder Imprägnation ausgewählt werden. Wie in Abb. 7.10 dargestellt, wurde für die Gipskartonplatte die Gipskartonplatte mit Feuerschutz zur Ermittlung des Treibhausgaspotenzials gewählt. Für den Excel-Tool Anwender ist nicht ersichtlich, auf welche Version der Ökobaudat das Tool zurückgreift.

### 7.2.2 Berechnungsauszug – Trockenbauwand IW07

Als Rechenbeispiel zur Erklärung der einzelnen Berechnungsschritte wird in diesem Unterkapitel die Trockenbauwand des Innenwandaufbaus IW07, siehe Abb. 7.9, berechnet. In Abbildung Abb. 7.12 ist der Wandaufbau mit den Massen und zirkulären Attributen lt. 9.2, Tabelle 9.5 abgebildet.

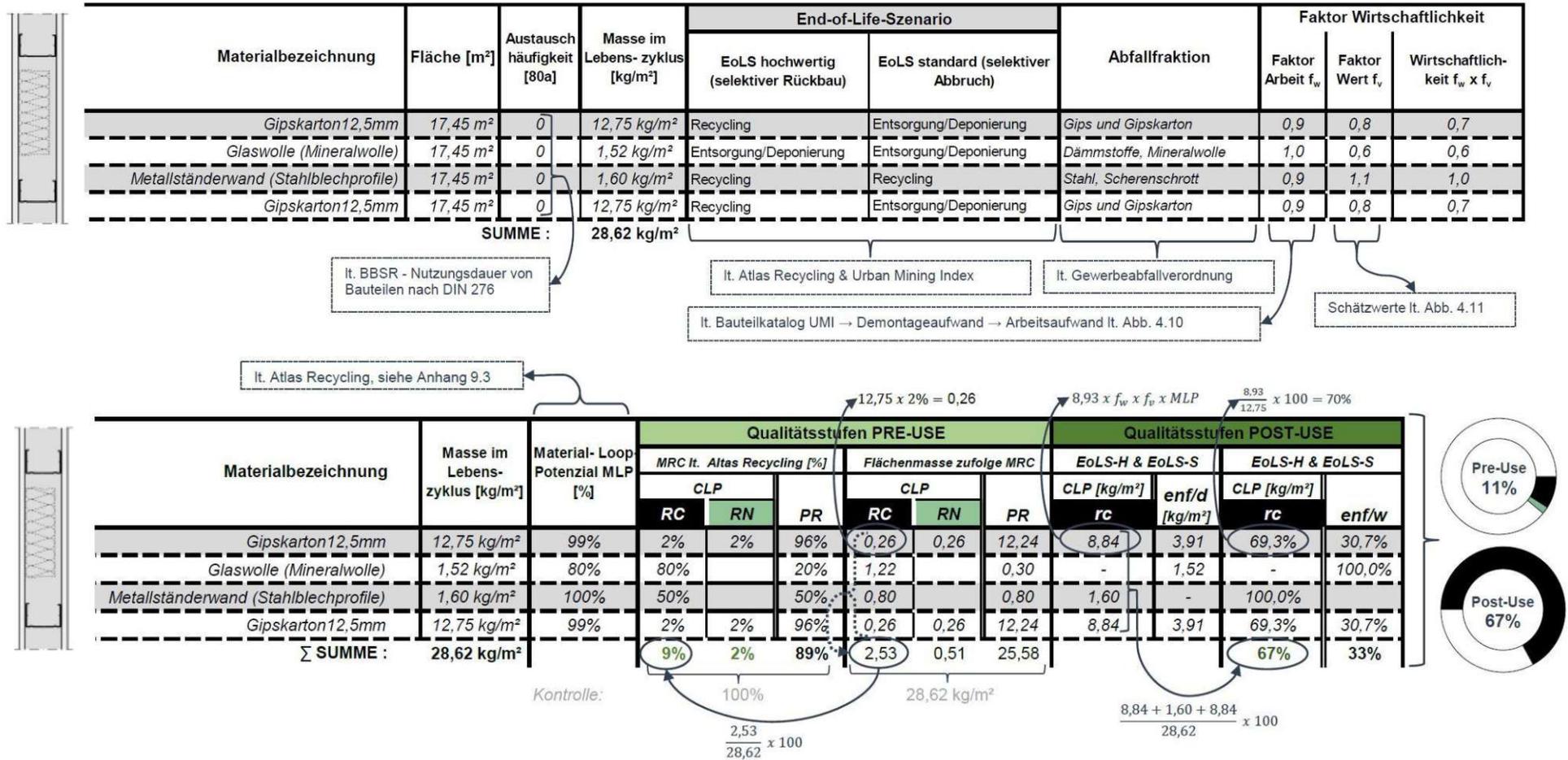


Abb. 7.12: Fallbeispiel UMI – Rechenbeispiel Trockenbauwand IW07, (eigene Darstellung)

Wie aus Tabelle 7.4 ersichtlich ist, sind für die vier Bauteilschichten der IW07 für den MRC und MEoL nur Materialanteile relevant, welche im Closed-Loop geführt werden können. Materialanteile für ein Downcycling oder eine energetische Verwertung von nachwachsenden Primärrohstoffen, welche für das Loop-Potenzial relevant wären, sind nicht vorhanden. Damit entspricht das Loop-Potenzial jenem des Closed-Loop-Potenzials. Die Werte des Material-Loop-Potenzials entsprechen jenen des Material-Cycle-Status des Atlas Recycling und sind im Anhang 9.3 dargestellt. Die Berechnung der einzelnen Potenziale für jedes Material folgt dabei der Berechnungsmethodik laut Kapitel 4.4.

Für den Innenwandaufbau IW07 ergibt sich laut den Berechnungen aus Abb. 7.12 daher ein Closed-Loop und Loop Kreislaufpotenzial wie folgt:

$$CLP_{pre-use} = RU + RC + RN = 9\% + 2\% = \mathbf{11\%} \quad \text{Formel 7.1}$$

$$CLP_{post-use} = ru + rc + dc_{cr} + en_{cr} = \mathbf{67\%} \quad \text{Formel 7.2}$$

$$CLP = CLP_{pre-use} + CLP_{post-use} = 11\% + 67\% = 78\% \quad \text{Formel 7.3}$$

$$LP = LP_{pre-use} + LP_{post-use} = 11\% + 67\% = 78\% \quad \text{Formel 7.4}$$

$$UMI_{pre-use} = CLP_{pre-use} + \frac{(LP_{pre-use} - CLP_{pre-use})}{2} = \mathbf{11\%} \quad \text{Formel 7.5}$$

$$UMI_{post-use} = CLP_{post-use} + \frac{(LP_{post-use} - CLP_{post-use})}{2} = \mathbf{67\%} \quad \text{Formel 7.6}$$

$$\mathbf{UMI} = (UMI_{pre-use} + UMI_{post-use}) \times 0,5 = (11\% + 67\%) \times 0,5 = \mathbf{39\%} \quad \text{Formel 7.7}$$

Wie in Formel 7.7 dargestellt ergibt sich für die Trockenbauwand des Innenwandaufbaus IW07 ein Urban Mining Index von 39%. Die Abweichung des CLP- und LP-Potenzials von 78% zu den CLP- und LP-Potenzialen 79,77% zufolge Abb. 7.9 ergibt sich durch die Betrachtung der Post-Use-Phase. Die Glaswolle wird laut dem Urban Mining Index zu 45% recycelt, wohingegen in Österreich diese keinem Recycling zugeführt wird. Dies wurde im Rechenbeispiel berücksichtigt, im Excel-Tool war dies durch die Vorgabe der Abfallfraktionen in Zusammenhang mit den gewählten Material Glaswolle nicht möglich.

Dieses Schema ist für jeden Schichtaufbau zu wiederholen. Das Gesamtergebnis des Urban Mining Index ist im folgenden Kapitel 7.2.3 dargestellt.

### 7.2.3 Ergebnis - UMI

Nach der Ermittlung sämtlicher konstruktiven Elemente für die sechs Bauteilgruppen nach DIN 267 erhält man Kreislaufpotenziale CLP und LP für die Lebenszyklusphasen Pre- und Post-Use. Der Ablauf folgt dabei dem Berechnungsauszug aus Kapitel 7.2.2 und wird für jede der sechs Bauteilgruppen aufsummiert und an der Masse der einzelnen Bauteilgruppe gewichtet. Die Ergebnisse der einzelnen Bauteilgruppen sind für das untersuchte Fallbeispiel in Abb. 7.14 grafisch dargestellt. In Abb. 7.13 sind die auf die Gebäudemasse gewichteten UMI-Anteile der Pre- und Post- Use-Phase und der finale Urban Mining Index dargestellt.

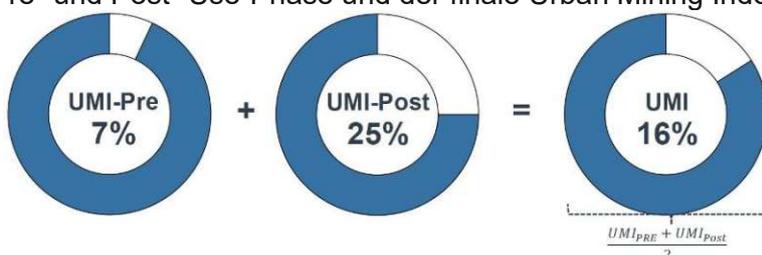


Abb. 7.13: Fallbeispiel – Ergebnis UMI (eigene Darstellung)

Das Bewertungsergebnis, der Urban Mining Indicator, wird wie in Kapitel 4.4.3 beschrieben, ermittelt. Für das untersuchte Gebäude UC9 ergibt sich ein Urban Mining Indicator und somit ein Kreislaufpotenzial von 16,0%, siehe Abb. 7.13. Da ein Gebäude erst ab einem Kreislaufpotenzial von >50% als zirkulär anzusehen ist, ist das untersuchte Gebäude als nicht zirkulär einzustufen.



Abb. 7.14: Fallbeispiel UMI - Ergebnis Kreislaufpotenziale nach DIN 276 (Software: Excel-Tool UMI, Bergische Universität Wuppertal)

## 7.3 Zirkularitätsbewertung nach Madaster – Zirkularitätsindikator

Die Berechnungsart und Methodik hinter dem MZI wurden bereits in Kapitel 5 erläutert. Für die Durchführung der Fallstudie und die Ermittlung des Kreislaufpotenzials nach dem MZI wurde die eigene digitale Madaster Plattform genutzt (Madaster Foundation GmbH, o.D.). Für die Benutzung der Madaster Plattform bietet Madaster mit Stand Juni 2024 unterschiedliche Abonnement Möglichkeiten an. Für die Durchführung der Fallstudie und Ermittlung des Kreislaufpotenzials wurde das Abonnement Madaster PUR privat genutzt. In diesem Abo-Paket kann ein Benutzer ein Objekt anlegen. Es sind keine Support-Leistungen durch Madaster inkludiert und es sind EUR 20,- inklusive Umsatzsteuer pro Jahr zu bezahlen. Für Produzenten von Bauprodukten gibt es die Möglichkeit eigene Datenbanken mit Ihren Produkten anzulegen, um sie somit leichter zugänglich für Bauherren und Planer auf der Madaster Plattform zu gestalten.

Durch die Eingabe sämtlicher Materialien und Produkte eines Gebäudes mit den dazugehörigen Mengenangaben kann ein sogenannter Material Passport, englisch für Materialpass, erstellt werden. Die angeführten Materialien werden dabei auf Basis der in der DIN 276-1 2008-12 oder DIN 276:2018-12 angeführten Kostengruppen gegliedert.

Basierend auf den Gebäudedaten zur Erlangung des Material Passports von Madaster, kann anhand eines zusätzlichen Moduls die Kreislauffähigkeit des Gebäudes betrachtet werden (Madaster Germany GmbH, 2024).

Für die Registrierung eines Gebäudes in Madaster und somit die Übertragung der Gebäudedaten aus einem Gebäudemodell in die digitale Plattform bietet Madaster zwei Möglichkeiten an (Madaster Germany GmbH, 2024).

### 1. Import IFC-Dateien

Das IFC-Dateiformat, Industry Foundation Classes-Datei, bietet sich bei einer 3D-CAD-Anwendung an. Um diese Möglichkeit der Quelldatenübertragung auf die Madaster Plattform nutzen zu können, muss in der verwendeten 3D-CAD-Anwendung die DIN 276 zur Klassifizierung der Baustoffe und Elemente hinterlegt sein.

### 2. Madaster-Excel-Vorlage

Für den Fall, dass ein Gebäude nicht mit einer 3D-CAD-Anwendung gezeichnet wurde, kann auch eine von Madaster erarbeitete Excel-Vorlage verwendet werden.

Bei den beiden Varianten zum Import der Quelldateien aus dem Gebäudemodell auf die Madaster Plattform werden die geometrischen Daten, Materialien und Klassifizierungscodes nach DIN 276 auf Vollständigkeit geprüft. Sollten Materialien oder Bauteilschichten nicht erkannt werden, so wird dies auf der Plattform angezeigt. Somit hat der/die Nutzer:innen die Möglichkeit diese richtig zu stellen oder über die Korrekturfaktoren bei der Ermittlung der Zirkularität eine Reduktion des Kreislaufpotenzials, dem MZI-Score, hinzunehmen.

Für diese Masterthesis wurden die Quelldaten aus dem Fallbeispiel UC9 mittels der Madaster-Excel-Vorlage transferiert. Die Excel-Vorlage hatte zu dem Zeitpunkt der Bearbeitung den Stand Oktober 2023. Die Verwendung dieser Methode hatte zum einen den Hintergrund, dass eine Einspielung der DIN 276 zur Klassifizierung der einzelnen Baustoffe und Elemente in Archicad 26 sich als schwierig herausgestellt hat. Andererseits wurden die Gebäudedaten bereits für andere Bewertungssysteme in Excel-Format unter Berücksichtigung der Kostengruppen laut DIN 276 ausgewertet, siehe Anhang 9.1 bis 9.2.

In der Excel-Vorlage nach DIN 276:2018-12 hat man die Möglichkeit, einzelne Materialien und Produkte für folgende Excel-Sheets zu erfassen:

1. Rückbau
2. Verbleibend
3. Einbau

Im Reiter Rückbau können jene Materialien angeführt werden, welche während dem Rückbau aus dem Gebäude entfernt werden. Jene Materialien die in der aktuellen Situation im Gebäude verbleiben werden unter Verbleibend angeführt. Im Tab Einbau werden jene Materialien erfasst, welche dem Objekt neu zugeführt werden. Da das Projekt sich zum Betrachtungszeitraumes gerade im Neubau in der Vorplanungsphase befindet, wurden die Materialien im Reiter Einbau eingepflegt.

Für die Eingabe der Quelldaten mittels Madaster-Excel-sind folgende Angaben laut Tabelle 7.5 anzuführen. Je detaillierter die Erfassung der Daten durch die Anwender:innen erfolgt, desto aussagekräftiger ist das ermittelte Kreislaufpotenzial.

<b>GTIN (EAN)</b>	Für das Matching des Produktes mit Datenbanken (Optional)
<b>Artikelnummer</b>	Für das Matching des Produktes, Artikelnummer des Herstellers (Optional)
<b>Madaster ID</b>	Für das Matching, ID des Produktes in einer Madaster Datenbank (Optional)
<b>Externe Datenbank-ID</b>	Für das Matching, Kennung des Produktes in einer externen Datenbank, welche von Madaster unterstützt wird (Optional)
<b>Beschreibung</b>	Beschreibung des Elementes (Optional)
<b>Material/Produkt</b>	Material- oder Produktname
<b>Klassifizierungscode</b>	Klassifizierungscode laut DIN 276, je nach Einsatzzweck des Produktes/Materials
<b>Klassifikation</b>	Name des Klassifizierungscodes
<b>Etage</b>	Etage im Gebäude in welchem das Produkt/Material verbaut ist
<b>Volumen [m<sup>3</sup>]</b>	Volumen des Produktes/Materials in m <sup>3</sup> , ODER
<b>Fläche [m<sup>2</sup>]</b>	Fläche des Produktes/Materials in m <sup>2</sup> , ODER
<b>Länge [m]</b>	Länge des Produktes/Materials in m
<b>Anzahl</b>	Menge des Produktes
<b>Gewicht [kg]</b>	Gewicht des Produktes/Materials in kg
<b>Demontierbarkeit: Verbindungstyp</b>	Bei Produkten: Eingabe der Verbindungsart
<b>Demontierbarkeit: Zugänglichkeit der Verbindung</b>	Bei Produkten: Werteingabe für die Zugänglichkeit der Verbindung
<b>Demontierbarkeit: Überschneidungen</b>	Bei Produkten: Werteingabe für die Produktüberscheidungen
<b>Demontierbarkeit - Einschluss von Produktkanten</b>	Bei Produkten: Möglichkeit zur Erfassung eines Randeinschlussfaktors, welcher beschreibt, wie Produkte in einer Komposition platziert sind.

Tabelle 7.5: Fallbeispiel Madaster – MZI-Eingabefelder für Quelldatenerfassung mittels Excel-Vorlage (Madaster Excel-Vorlage), (eigene Darstellung)

Da bei dem zugrunde liegenden Planungsstand des Einfamilienhauses UC9 überwiegend nur Baustoffe gelistet sind, wurden die Spalten zur Erfassung der Demontierbarkeit nur für die Produkte „Fenster“ und „Türen“ erfasst.

Um eine Zuordnung der Produkte zu vereinfachen, wurden für jedes Material und Produkt eine Madaster-ID und EPEA-ID vergeben. Für diese Masterthesis wurde die EPEA-ID als externe Datenbank genutzt, da Madaster auf der eigenen Plattform eine EPEA Material-/Produktliste zur Verfügung stellt, in welcher zum Zeitpunkt der Ausarbeitung zu den verwendeten

Materialien entsprechende IDs vermerkt waren. Neben EPEA unterstützt Madaster auch folgende verifizierte Datenbanken:

- EPEA Generic
- IBU DATA
- Madaster C2C (keine Umweltinformationen)
- ÖKOBAUDAT

In Summe stehen neben den oben angeführten verifizierten Datenbanken 59 weitere Datenbanken von unterschiedlichen Produzenten für den Material- und Produktabgleich auf der Plattform zur Verfügung (Madaster Foundation GmbH, o.D.).

### 7.3.1 Auswertung des Kreislaufpotenzial nach Madaster MZI

Nachdem die Quelldaten aus dem Gebäudemodell, sowie die Gebäudedaten nach Kapitel 7.1.4 auf der digitalen Plattform erfasst sind, kann eine Analyse des Gebäudes beginnen. Neben dem Madaster Zirkularitätsindikator und somit dem Kreislaufpotenzial des Gebäudes kann auch eine Massenanalyse der eingesetzten Materialien erstellt werden. Auf der digitalen Madaster Plattform können nach einer Berechnung und somit Verarbeitung der zur Verfügung gestellten Daten die Ergebnisse direkt auf der Homepage eingesehen werden. Die Gebäudemasse laut Madaster unterscheiden sich dabei von den vom Autor ermittelten Gebäudemassen, welche im Anhang 9.1 beziehungsweise 9.2 gelistet sind. In Abb. 7.15 ist die Ergebnisdarstellung der Materialströme nach Zirkularität für die Gebäudeschichten angeführt (Madaster Foundation GmbH, o.D.).

Wie zu erkennen ist, ist ein Großteil des eingesetzten Materials aus nicht nachwachsenden Rohstoffquellen, da in diese Kategorie der überwiegende Anteil der verbauten Mauerziegel und Zementestrich fallen. Beim Materialstrom Fassade werden ebenfalls ausschließlich Materialien aus nicht nachwachsenden Rohstoffen verwendet. In diese Kategorie fallen die Materialien Zementmörtel und Außenputz. Beides kann bei der Materialverwertung nur deponiert werden und endet somit als Abfall.

In Abb. 7.16 sind die eingesetzten Materialien absteigend nach der Höhe des Madaster-Zirkularitätsindikators MZI sortiert. Die Materialherkunft beziehungsweise das End-of-Life-Szenario bei der Materialverwertung ist ebenfalls dargestellt (Madaster Foundation GmbH, o.D.). Wie in Abb. 7.16 zu erkennen ist, wird das End-of-Life-Szenario der Wiederverwendung nicht erreicht. Als häufigstes End-of-Life-Szenario wird das Downcycling bei der Materialverwertung vergeben. Die Materialherkunft und die Wahl des End-of-Life-Szenarios seitens Madaster ist für den/die End-User:in nicht einsehbar und daher nicht beeinflussbar.

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

Materialströme

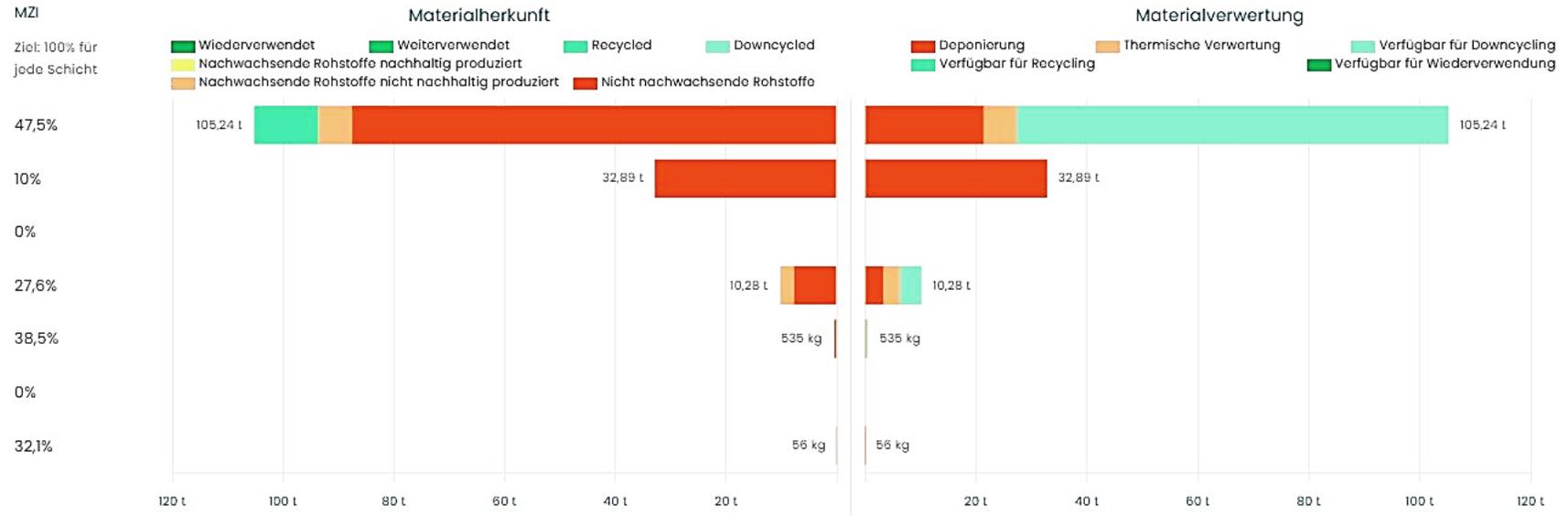


Abb. 7.15: Fallbeispiel Madaster MZI - Ergebnisdarstellung Materialströme auf der Ebene der Gebäudeschichten (Madaster Foundation GmbH, o.D.)

Materialströme



Abb. 7.16: Fallbeispiel Madaster MZI – Materialstrom eingesetzter Materialien/Produkte (Madaster Foundation GmbH, o.D.)

Bei der Erfassung der Gebäudedaten und der Zuordnung der verwendeten Baustoffe und Produkte des untersuchten Gebäudes UC9 konnte ein Produkt nicht mit einer Gebäudeschicht verknüpft werden. Dies hat folgenden Baustoff betroffen:

- Konstruktionsvollholz, Masse = 30 kg

Das Bauteil Stahlträger HEA 160 konnte in der Datenbank trotz richtiger Erfassung in der Quelldaten-Excel-Vorlage ebenfalls nicht mit den richtigen geometrischen Daten verknüpft werden. Dadurch waren in Summe 1,6 Prozent der Quelldaten nicht für die Berechnung verwendbar. Dieser Fehler wird bei Madaster im Endergebnis über einen Korrekturfaktor berücksichtigt. Im durchgeführten Fallbeispiel führten diese 1,6% an unvollständigem Quellmaterial zu einem Korrekturfaktor von 99 % und somit einer Reduktion des Madaster Zirkularitätsindikators von 1%.

### 7.3.2 Berechnungsauszug – Trockenbauwand IW07

Als Rechenbeispiel zur Erklärung der einzelnen Berechnungsschritte wird in diesem Unterkapitel die Trockenbauwand des Innenwandaufbaus IW07, siehe Anhang 9.2 Tabelle 9.5, berechnet. Da für die Anwender:innen der Madaster Plattform nicht ersichtlich ist, woher Madaster die Materialinformationen für die Materialherkunft beziehungsweise das Material-End-of-Life-Szenario bezieht, werden für das Rechenbeispiel eigene Annahmen getroffen. Für die Materialherkunft wird der MRC und die Materialverwertung das MEoL und MLP des Atlas Recycling herangezogen. Die Werte dazu sind in Tabelle 7.4 angeführt. Daher wird für die Abfallmasse  $W_F$  das Material-Loop-Potenzial der betrachteten Materialien verwendet.

Da nicht ersichtlich ist, wie Madaster die Effizienz des Recyclingprozesses zur Bestimmung der Abfallmasse  $W_C$  definiert, wurden eigene Annahmen getroffen. Dazu wurden drei Datenquellen ausgewertet:

- Recycling-Baustoffverordnung (BMLFUW - Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2015)
- Statusbericht 2024 der österreichischen Abfallwirtschaft (BMK - Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2024)
- IBO-Webseite zu Recycling-Bauprodukten, aufgerufen am 11.02.2025 (IBO - Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH, o.D.)

Die in Österreich geltende Recycling-Baustoffverordnung, welche im Jahr 2015 in Kraft getretenen ist, regelt zwar Beton-, Ziegel-, Asphalt- und Keramikabbruch als auch Bodenaushub, aber leider nicht sämtliche Bau- und Abbruchabfälle. Gipsrecycling wird in der Verordnung vom Recycling mineralischer Bau- und Abbruchabfälle ausgenommen, Metallschrott und Dämmmaterial wird ebenfalls nicht berücksichtigt (BMLFUW - Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2015) (IBO - Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH, o.D.).

Um eine Aussage zu den Abfallwerten  $W_C$  der im Rechenbeispiel verwendeten Materialien treffen zu können, wurden für die Gipskartonplatten die Stoffströme für die mineralischen Bau- und Abbruchabfälle aus dem Statusbericht 2024 der österreichischen Abfallwirtschaft betrachtet und in Abb. 7.17 abgebildet (BMK - Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, 2024).

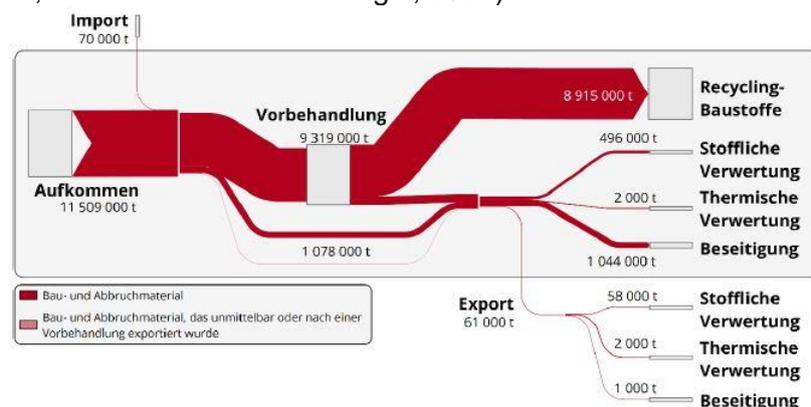


Abb. 7.17: Fallbeispiel Madaster MZI – Recyclingpotenziale mineralischer Bau- und Abbruchabfälle lt. Statusbericht 2024 zur österreichischen Abfallwirtschaft

Da Gipskartonplatten zu nicht gefährlichen mineralischen Abfällen zählen, wird laut der Abb. 7.17 für dieses Material eine Recyclingquote von durchschnittlich circa 80% angenommen. Damit beträgt der Masseanteil des Abfalls  $W_C$  für Gipskartonplatten 20% der Eingangsmasse.

Mineralisches Dämmmaterial wie Glaswolle wird laut der Recycling-Baustoffverordnung und dem Statusbericht der österreichischen Abfallwirtschaft nicht recycelt. Daher wird der

Masseanteil des Glaswollabfalls  $W_C$  mit 100% angesetzt. Für die Metallständerwände, welche zu Metallabfällen zählen, wird davon ausgegangen, dass diese zu 100% recycelt werden können. Daher beträgt der Metallabfall  $W_C$  0%. Für den Nutzungsfaktor  $F(X)$  werden die potenzielle Nutzungsdauer der Materialien mit der branchenüblichen Nutzungsdauer dividiert. Wie in Abb. 7.18 in der Spalte Austauschrate ersichtlich ist, werden die Materialien über die Lebensdauer von 80 Jahren nicht gewechselt. Daher wird angenommen, dass die potenzielle Nutzungsdauer mit der branchenüblichen Nutzungsdauer gleichzusetzen ist.

Die Berechnung folgt dabei der Berechnungsmethodik laut Kapitel 5.5 und wird bis zur Berechnung des Zirkularitätsindex-Scores auf Ebene der Gebäudeschicht, siehe Formel 5.26 beziehungsweise Formel 7.16, durchgeführt. Für die Materialien Gipskartonplatte, Glaswolle und Metallständerwand sind folgende Berechnungen anzustellen. Die Ergebnisse sind in Abb. 7.18 dargestellt und basieren auf folgenden Berechnungsschema, dargestellt am Material Gipskartonplatte:

$$V = M(1 - F_R - F_{RR} - F_U) = M \times PR = 222,49 \times 96\% = 213,59 \text{ kg} \quad \text{Formel 7.8}$$

$$W_0 = M(1 - C_R - C_U) = M \times \left(\frac{ent}{d}\right) = 222,49 \times 60\% = 133,49 \text{ kg} \quad \text{Formel 7.9}$$

$$W_C = M(1 - E_C) \times C_R = 222,49 \times (1 - 0,8) \times 0,05 = 2,22 \text{ kg} \quad \text{Formel 7.10}$$

$$W_F = M \frac{(1 - E_F) \times F_R}{E_F} = M \times MLP = 222,49 \times 99\% = 220,26 \text{ kg} \quad \text{Formel 7.11}$$

$$W = W_0 + \frac{W_F + W_C}{2} = 133,49 + \frac{220,26 + 2,22}{2} = 244,7 \text{ kg} \quad \text{Formel 7.12}$$

$$F(X) = \frac{0,9}{X} = \frac{0,9}{\left(\frac{L}{L_{av}}\right)} = \frac{0,9}{1/1} = 0,9 \quad \text{Formel 7.13}$$

$$LFI = \frac{V + W}{2M + \frac{W_F - W_C}{2}} = \frac{213,59 + 244,7}{2 \times 222,49 + \frac{220,26 - 2,22}{2}} = 0,83 \quad \text{Formel 7.14}$$

$$ZI_{Produkt} = 1 - LFI \times F(X) = 1 - 0,83 \times 0,9 = 0,26 \quad \text{Formel 7.15}$$

Die Einzelergebnisse der  $ZI_{Produkte}$  sind entsprechend der Gebäudeschichtmasse zu Wichten und aufzusummieren.

$$ZI_{Schicht,i} = \frac{\sum_n (ZI_{Produkt,n} \times M_{Produkt,n})}{M_{Gebäudeschicht,i}} = \quad \text{Formel 7.16}$$

$$= \frac{2 \times (0,26 \times 222,49) + 0,4 \times 18,77 + 0,62 \times 8,10}{222,49 + 18,77 + 8,10 + 222,49} = 0,267 = \mathbf{26,7\%}$$

Damit weist die untersuchte Trockenbauwand IW07 laut dem Madaster MZI ohne Berücksichtigung der Korrekturfaktoren eine Zirkularität von 26,7% auf. Wie bereits erörtert, wurden um den Rechenablauf des MZI eigene Annahmen zu zirkulären Materialattributen getroffen. Der tatsächliche MZI der Innenwand IW07 zufolge den Berechnungen von Madaster, kann auf Grund der fehlenden Angaben zu den von Madaster verwendeten Materialdatenbanken, nicht nachverfolgt beziehungsweise mit dem Ergebnis laut Formel 7.16 verglichen werden.

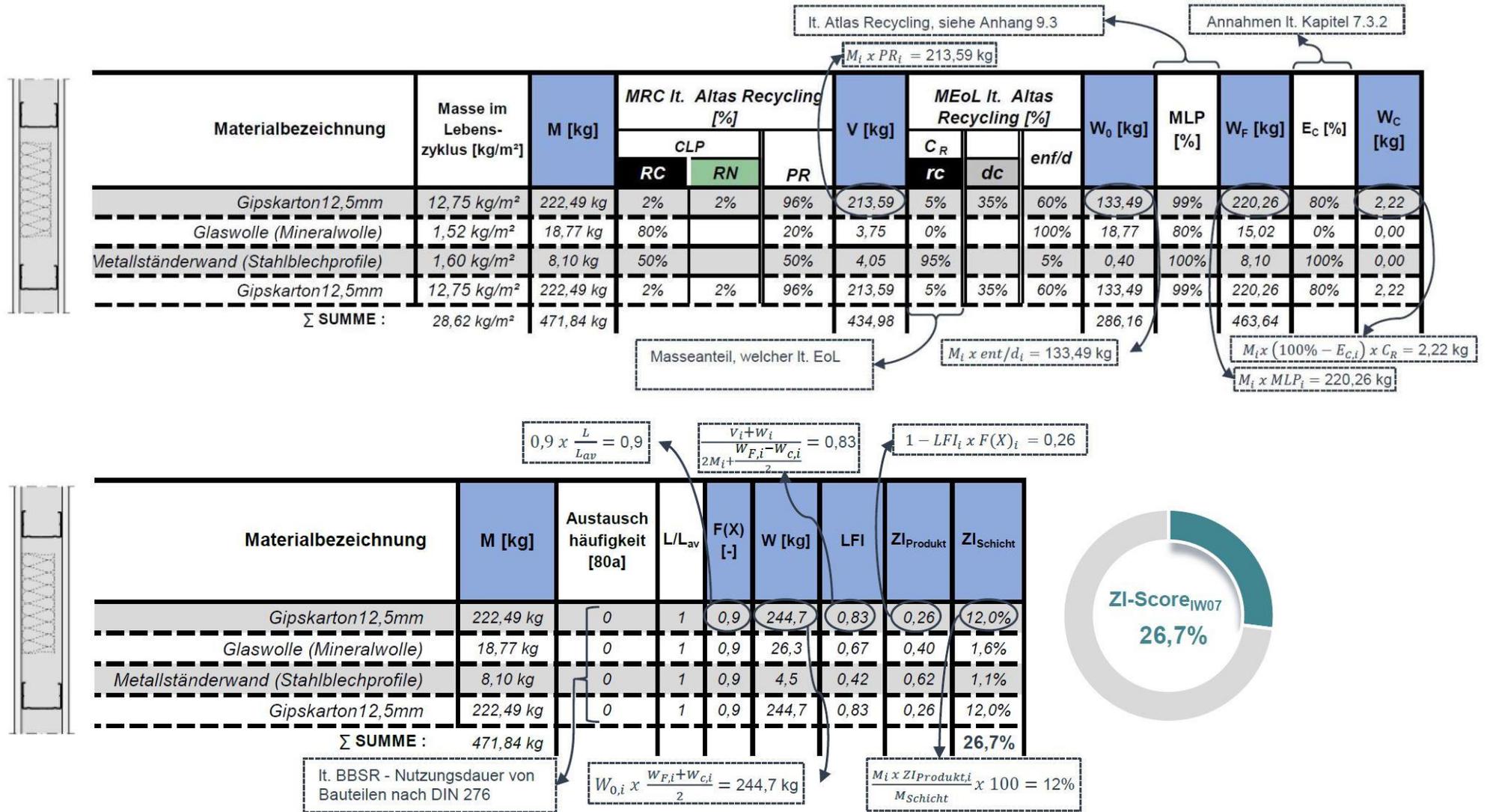


Abb. 7.18: Fallbeispiel Madaster MZI – Rechenbeispiel Trockenbauwand IW07 (eigene Darstellung)

### 7.3.3 Ergebnis – MZI

Das Bewertungsergebnis, der Madaster Zirkularitätsindikator MZI, wird wie in Kapitel 5.5 bis 5.5.2 beschrieben, ermittelt. Dazu wird zuerst der MZI von den beiden Lebenszyklusphasen Pre-Use und Post-Use beziehungsweise Materialherkunft und Materialverwertung betrachtet (Madaster Foundation GmbH, o.D.).



Abb. 7.19: Fallbeispiel Madaster MZI – MZI-Score exklusive Korrekturfaktor (Madaster Foundation GmbH, o.D.)

Mit Berücksichtigung des Korrekturfaktors, welcher fehlende Daten des Gebäudemodells beim MZI einfließen lässt, ergibt sich der finale Score. Für das untersuchte Gebäude UC9 ergibt sich ein MZI und somit ein Kreislaufpotenzial von 38% (Madaster Foundation GmbH, o.D.).



Abb. 7.20: Fallbeispiel Madaster MZI – MZI-Score inklusive Korrekturfaktor (Madaster Foundation GmbH, o.D.)

Wie bereits im Kapitel 7.3.2 beschrieben, kann nicht nachvollzogen werden, auf welcher Materialdatenbasis die Berechnungen erfolgen und welches Kreislaufpotenzial einzelne Bauteilschichten aufweisen. Der Madaster-Zirkularitäts-Indikator befindet sich noch in der Entwicklung, weshalb die Zuverlässigkeit des Ergebnisses laut Madaster mit Stand November 23 noch nicht garantiert werden kann.

## 7.4 Zirkularitätsbewertung nach DGNB – Zirkularitätsindex

Die Ermittlung des Kreislaufpotenzials zufolge der Berechnungssystems DGNB-ZI folgt den Erklärungen des Kapitels 6 und berücksichtigt die in Kapitel 7.1.5 definierten zirkulären Materialattribute. Für die Berechnung des DGNB-ZI wurde der DGNB-Gebäuderessourcenpass in der Version 1.2 verwendet, welcher von der DGNB-Gebäuderessourcenpass Homepage heruntergeladen wurde (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V., o.D.). Durch diesen kann der DGNB Zirkularitätsindex gemäß den von DGNB definierten Qualitätsstandards für Zirkularitätsindizes für Bauwerke ermittelt werden (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e. V., 2024). Für die Anwendung des DGNB-GRP wurde eine von DGNB zur Verfügung gestelltes Begleitdokument verwendet (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V., o. D.).

Bei der Ausarbeitung des DGNB-GRP werden für die Einstordnung der Materialien in Störstoffgruppen oder andere zirkuläre Teilindikatoren Zusatzdokumente von DGNB benötigt. Diese sind bereits im Kapitel 6.3 beschrieben worden und sind aus dem für das zu untersuchende Gebäude passenden Kriterienkatalog des DGNB-Zertifizierungssystems zu entnehmen. DGNB nutzt bei der Erstellung ihrer unterschiedlichen Zertifizierungstools, unter anderem der DGNB-GRP, die hauseigene Materialdatenbank DGNB-Navigator. Da für diese ein Abonnement benötigt wird und neben den Auditoren von DGNB in erster Linie für Produkthersteller gedacht ist, wurden für die Einstufung der Materialien die in Kapitel 7.1.5 definierten und im Anhang 9.2 dargestellten Auswertungen übernommen. Die vom DGNB-Navigator unabhängige Erfassung der Materialparameter wird von DGNB unterstützt, die Datenquellen sind aber entsprechend zu deklarieren und mittels des Datenqualitätsindex DQI einzustufen. Der DQI gibt dabei den Detailgrad und Glaubwürdigkeit der erfassten Daten wieder. Dies reicht von einem DQI-Wert von 0 für „keine verlässlichen Daten“ bis zu einem DQI-Wert von 3 für „digitales Gebäudemodell mit konkreten Massen“. Für diese Fallstudie wurde weitestgehend ein DQI-Wert von 2 für „Werte aus Berechnungen vom Gebäude“ vergeben, insofern die entsprechenden Daten aus dem Gebäudemodell entnommen werden konnten (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V., o. D.).

### 7.4.1 Auswertung des DGNB-Zirkularitätsindex

Im ersten Schritt müssen im Reiter „Eingangswerte“ die Systemgrenzen des zu bewertenden Gebäudes definiert werden. Hier wurden die im Kapitel 7.1.1 bis 7.1.4 angegebenen Gebäudedaten wie die BGF erfasst. Auch die Festlegung, welche Kostengruppen gemäß der DIN 276 berücksichtigt werden soll, wird in diesem Eingabeschritt getroffen. Wie in Kapitel 7.1.2 angeführt, wird für das Fallbeispiel lediglich die Kostengruppe KG300 betrachtet. Aus den ausgewerteten Unterlagen geht leider nicht hervor, welchen prozentualen Anteil die Kostengruppe KG400 auf das Endergebnis des DGNB-ZI hat.

Wie bereits bei den beiden zuvor durchgeführten Bewertungssystemen ist die Massenermittlung der verbauten Baumaterialien und -produkte die Basis für die Berechnung des DGNB-ZI. Die Materialien werden dabei als massebezogene Quoten, bezogen auf die Gesamtbauwerksmasse, erfasst. Daher ist die anzuwendende Betrachtungsebene in erster Linie auf Produktdatenebene. Da die zu erfassenden Materialien entsprechenden Unterkostengruppen gemäß der DIN276 zugeordnet werden müssen, ist auch eine entsprechende Verknüpfung zu der entsprechenden Bauteilschicht wichtig. Durch dieses Vorgehen sollten im DGNB-GRP massebezogene Quoten erfasst werden. Dieser Ablauf ist grafisch in Abb. 6.3 dargestellt. Für die Eingabe der massebezogenen Quoten bietet der GRP unterschiedliche Möglichkeiten mit entsprechenden Formatvorlagen an:

- Bauteilkatalogvorlage

- Level(s) Reporting Template Level 2 – Indicator L2.1 “Bill of Quantities, materials and lifespans”

Für die Durchführung dieser Fallstudie wurde die Bauteilkatalogvorlage herangezogen. Mit dieser Variante können die bereits im Anhang 9.2 angeführten Materialien nach Bauteilschichten mit entsprechenden Kostengruppen und Massen erfasst werden. Die Ergebnisse der Massenermittlung entsprechen dabei jenen der Abb. 7.6. Nachdem die Masseanteile entsprechenden Materialgruppen zugeteilt wurden, werden die entsprechenden Zirkularitäts-Teilindikatoren im Bauteilkatalog für jedes Material in Form von Masseprozent bezogen auf die Gesamtgebäudemasse ermittelt. Für den Teilindikator Materialherkunft wird für jedes Material der Material-Recycling-Content des Atlas Recycling herangezogen. Ähnlich wird bei den Teilindikatoren Bau- und Abbruchabfälle sowie der Materialverwertung vorgegangen. Hier wird das Material-End-of-Life-Szenario für jedes Material verwendet. Die entsprechenden Werte sind in Tabelle 7.4 dargestellt. Da zu dem untersuchten Einfamilienhaus in der Vorplanungsphase keine Schadstoffanalyse oder ein Schadstoffkataster vorliegen wird dieser Teilindikator der Kreislaufführung nicht bewertet. Die Ergebnisse der Teilindikatoren der Kreislaufführung sowie das Kreislaufführungspotenzial sind in Abb. 7.21 dargestellt.

Für den Teilindikator der Materialverträglichkeit wurde das Kriterium ENV1.2 „Risiken für die lokale Umwelt“ des DGNB Kriterienkatalogs Gebäude Neubau in der Version 2023 zur Einordnung der Materialien herangezogen. Dadurch können risikoreiche Material- und Stoffgruppen identifiziert werden, welche eine Gefahr für den Mensch, Faune und/oder Flora darstellen. In dem Kriterium ENV1.2 sind besonders besorgniserregende Chemikalien beziehungsweise Stoffe gelistet und mit Höchstkonzentrationswerten nach der europäischen Chemikalienverordnung REACH hinterlegt. Für die verbauten Materialien wurde anhand des Anhang 1 des Kriteriums ENV1.2 mögliche besorgniserregende Beschichtungen zufolge des Einsatzes des jeweiligen Materials abgeglichen und eine entsprechende Einordnung in eine Qualitätsstufe getroffen. Das Kriterium ENV1.2 führt eine qualitative Bewertung der Risiken anhand vier Qualitätsstufen durch. Diese sind abhängig vom Detailgrad, mit welchem die Nachweisführung des materialökologischen Bauteilkataloges erfolgt, und von den maximalen Höchstwerten der vorhandenen Schad- und Störstoffe. Für die niedrigsten Qualitätsstufen 1 bis 2 ist eine vereinfachte Dokumentation ausreichend, wobei bereits bei der Qualitätsstufe 2 eine Nachweisführung des materialökologischen Bauteilkataloges oder ähnliches vorzuweisen ist. Für die Qualitätsstufen 3 und 4 sind zusätzlich zu der Nachweisführung Protokolle der Materialüberwachung vorzulegen. Da für das Fallbeispiel keine Nachweisführung des materialökologischen Bauteilkataloges vorliegt, werden jene Baumaterialien, welche laut dem Anhang 1 des Kriteriums ENV1.2 gefährliche Stoffe oder Beschichtungen enthalten können, in die Qualitätsstufe 1 verortet. Es wird davon ausgegangen, dass diese realistischerweise eingehalten werden können und es eine entsprechend große Auswahl am Markt verfügbare Produkte mit entsprechenden Umweltproduktdeklarationen gibt. Laut der Tabelle 6.4 der Materialverträglichkeit sind somit alle Baustoffe, welche in die Qualitätsstufe 1 fallen in der Zirkularitätsstufe "standard" einzustufen. Die verplanten Fenster mit Kunststoffprofilen und die Kunststofftüren werden laut ENV1.2 in die Qualitätsstufe 4 eingeordnet und fallen somit in die Zirkularitätsklasse "optimiert". Baumaterialien oder -produkte, welche als nachwachsend deklariert sind und von denen ausgegangen wird, dass diese keine Stoffe oder Beschichtungen laut ENV1.2 enthalten, werden in die Zirkularitätsklasse "Zielvorstellung" geschoben. Alle anderen Produkte werden in der Zirkularitätsklasse "nicht bewertet" zugeordnet, da für diese Produkte in der derzeitigen Planungsphase zu wenig Informationen oder Vergleichswerte fehlen. Für die Teilindikatoren der Demontagefähigkeit und werkstoffliche Trennbarkeiten sind bereits in Kapitel 7.1.5 entsprechende Überlegungen angestellt worden. Entsprechende Werte dazu sind im Anhang 9.2 gelistet. Die Masseanteile der Materialien werden in den entsprechenden Qualitätsstufen gemäß Tabelle 6.5 und Tabelle 6.6 eingeordnet. Die Ergebnisse der Teilindikatoren der Kreislauffähigkeit sowie das Kreislauffähigkeitspotenzial sind in Abb. 7.22 dargestellt.

Heutiger Beitrag zur Kreislaufwirtschaft



**UMGESETZTE KREISLAUFFUHRUNG (pre-use) - inflow**

		ZIRKULARITÄTSERGEBNIS			GEWICHTUNG				
		[M-%]	[0-1]	[0-1]					
		$m_{ZK}$	$\times f_{ZK}$	=	$\times g_{\pi(H)}$				
221	Materialherkunft [Masse-%]	Sekundärmaterial	Wiederverwendet	0,00	1,00	0,00	60 %	X	
			Weiterverwendet	0,00	1,00	0,00			
		Wiederverwert	Wiederverwert	0,50	0,75	0,00			
			Weiterverwert	0,00	0,50	0,00			
		Primärrohstoffe, erneuerbar	(zertifiziert)	1,50	0,75	0,01			
			(nicht zertifiziert)	0,75	0,50	0,00			
Primärrohstoffe, nicht erneuerbar		97,26	0,00	0,00					
241	Bau- und Abbruchabfälle (ungefährliche Abfälle der betrachteten Baumaßnahme) [Masse-%]	Wiederverwendung		1,54	1,00	0,02	5 %	X	
		Wiederverwertung		0,70	0,80	0,01			
		Stoffliche Verwertung	geschl. Kreislauf		0,00	0,70			0,00
			offener Kreislauf		0,49	0,60			0,00
			Downcycling		64,55	0,40			0,26
		Thermische Verwertung	erneuerbar zertifiziert		0,00	0,40			0,00
			nicht erneuerbar		0,00	0,20			0,00
			energet. Beseitigung		0,12	0,00			0,00
		Verfüllung		0,00	0,20	0,00			
		Deponierung		32,60	0,20	0,07			
Entsorgung	als gefährlicher Abfall		0,00	0,00	0,00				
214	Schadstoffbelastung [Qualitativ]	nicht bewertbar		0,00	0,00	0 %			



Abb. 7.21: Fallbeispiel DGNB-ZI – Kreislaufführungspotenzial ZI(H) (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V., o.D.)

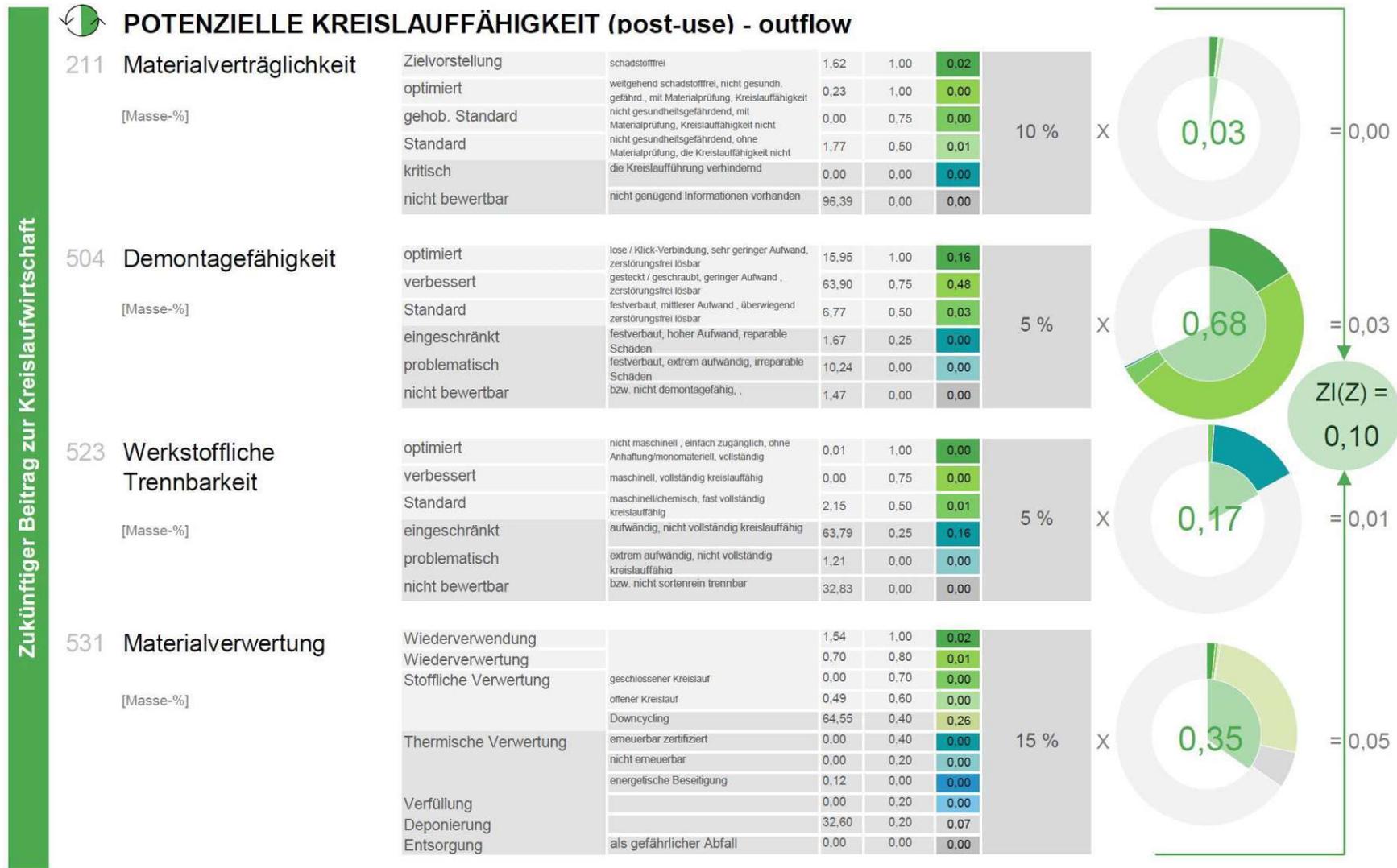


Abb. 7.22: Fallbeispiel DGNB-ZI – Kreislauffähigkeitspotenzial ZI(Z) (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V., o.D.)

### 7.4.2 Berechnungsauszug – Trockenbauwand IW07

Als Rechenbeispiel zur Erklärung der einzelnen Berechnungsschritte wird in diesem Unterkapitel ebenfalls die Trockenbauwand des Innenwandaufbaus IW07, siehe Anhang 9.2 Tabelle 9.5, berechnet.

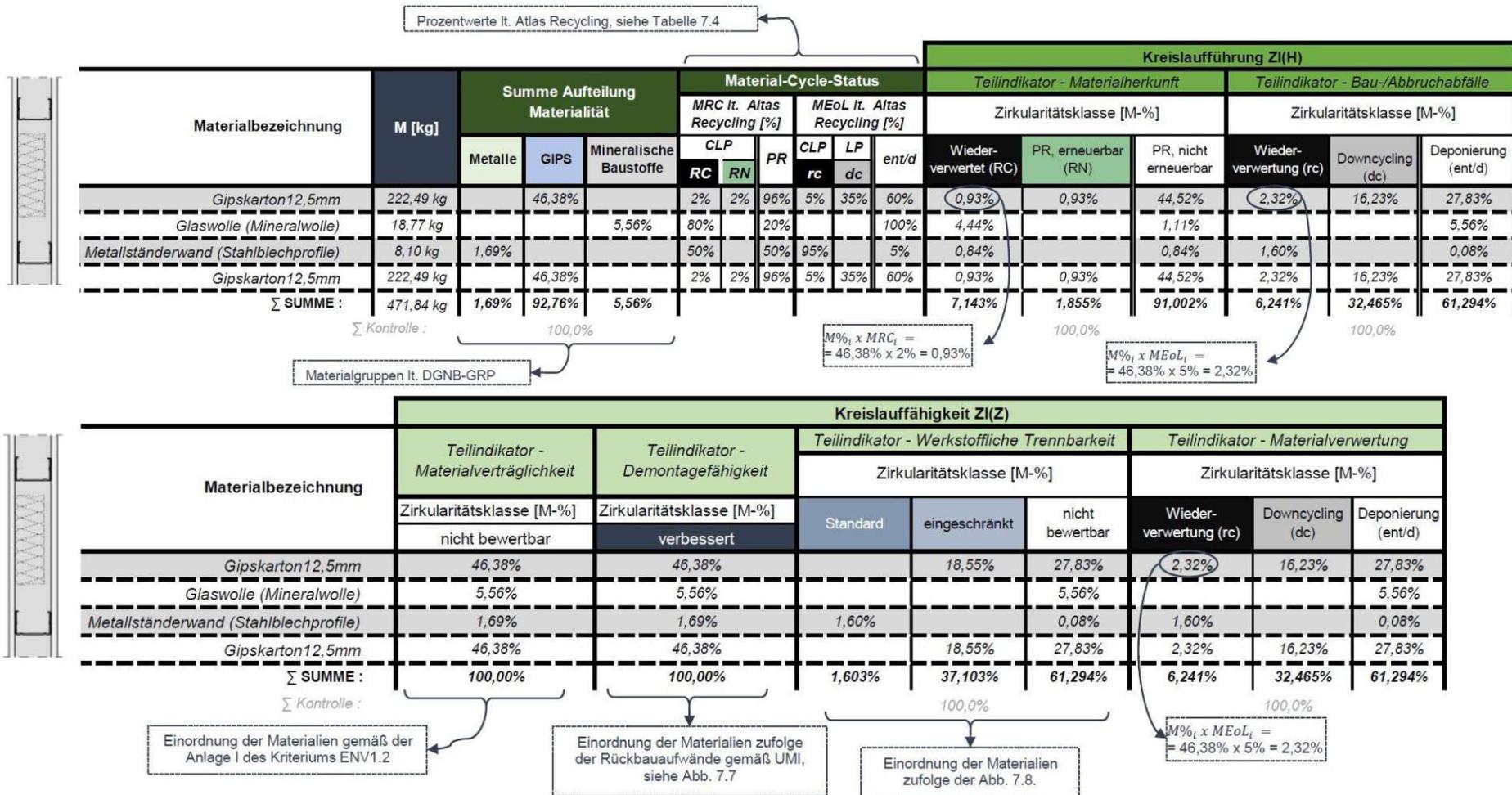


Abb. 7.23: Fallbeispiel DGNB-ZI – Rechenbeispiel Trockenbauwand IW07 – Teilindikatoren des DGNB-ZI (eigene Darstellung)

Teilindikator	Zirkularitätsklasse		m <sub>ZK</sub> x f <sub>ZK</sub> =			x g <sub>TI(H)</sub> =			Z <sub>I</sub>
<b>Materialherkunft</b> [Masse-%]	Sekundärmaterial	Wiederverwendet (RC)	7,14%	x	1,00	=	7,14%	x	4,29%
	Primärrohstoffe, erneuerbar	nicht zertifiziert (RN)	1,86%	x	0,50	=	0,93%	x	0,56%
	Primärrohstoffe, nicht erneuerbar (PR)		91,00%	x	0,00	=	0,00%	x	0,00%
<b>Σ = 5%</b>									
<b>Bau- und Abbruchabfälle</b> (ungefährliche Abfälle der betrachteten Baumaßnahme) [Masse-%]	Wiederverwertung		6,24%	x	0,80	=	4,99%	x	0,25%
	Stoffliche Verwertung	offener Kreislauf	32,46%	x	0,60	=	19,48%	x	0,97%
	Deponierung		61,29%	x	0,20	=	12,26%	x	0,61%
<b>Σ = 2%</b>									
<b>Materialverträglichkeit</b> [Masse-%]	nicht bewertbar	nicht genügend Informationen vorhanden	100%	x	0,00	=	0,00%	x	0,00%
<b>Σ = 0%</b>									
<b>Demontagefähigkeit</b> [Masse-%]	verbessert	gesteckt / geschraubt, geringer Aufwand, zerstörungsfrei lösbar	100%	x	0,75	=	75,00%	x	3,75%
<b>Σ = 4%</b>									
<b>Werkstoffliche Trennbarkeit</b> [Masse-%]	Standard	maschinell/chemisch, fast vollständig kreislauffähig	1,60%	x	0,50	=	0,80%	x	0,04%
	eingeschränkt	aufwändig, nicht vollständig kreislauffähig	37,10%	x	0,25	=	9,28%	x	0,46%
	nicht bewertbar		61,29%	x	0,00	=	0,00%	x	0,00%
<b>Σ = 1%</b>									
<b>Materialverwertung</b> [Masse-%]	Wiederverwertung		6,24%	x	0,80	=	4,99%	x	0,75%
	Stoffliche Verwertung	offener Kreislauf	32,46%	x	0,60	=	19,48%	x	2,92%
	Deponierung		61,29%	x	0,20	=	12,26%	x	1,84%
<b>Σ = 6%</b>									

ZI(H)  
7%

ZI(Z)  
10%



Abb. 7.24: Fallbeispiel DGNB-ZI – Rechenbeispiel Trockenbauwand IW07 - Ergebnis des DGNB-ZI (eigene Darstellung)

Die Berechnung des DGNB-Zirkularitätsindex für die Trockenbauwand IW07 ist in Abb. 7.23 bis Abb. 7.24 abgebildet. Die untersuchte Trockenbauwand IW07 weist gemäß des DGNB-ZI eine Zirkularität von 16% auf. Dieses Schema ist für jeden Schichtaufbau zu wiederholen. Das Gesamtergebnis des DGNB-ZI ist im folgenden Kapitel 7.4.3 dargestellt.

### 7.4.3 Ergebnis – DGNB-ZI

Nach der Ermittlung sämtlicher Teilindikatoren für das Kreislaufführungs- und Kreislauffähigkeitspotenzial werden die beiden Einzelpotenziale aufsummiert, um den DGNB-Zirkularitätsindex zu erhalten. Der Ablauf folgt dabei dem Berechnungsauszug aus Kapitel 7.4.2 und wird für jedes Material einer jeden Bauteilschicht der Kostengruppe KG300 durchgeführt. Das Ergebnis des DGNB-ZI ist für das untersuchte Fallbeispiel in Abb. 7.25 grafisch dargestellt.



Abb. 7.25: Fallbeispiel DGNB-ZI – Ergebnis des DGNB-Zirkularitätsindex (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V., o.D.)

Das Bewertungsergebnis, der DGNB-Zirkularitätsindex, wird wie in Kapitel 6.44.4.3 beschrieben, ermittelt. Für das untersuchte Gebäude UC9 ergibt sich ein DGNB-ZI und somit ein Kreislaufpotenzial von 13,0%. Vor allem bei der Kreislaufführung, wo in Summe 65% des Kreislaufpotenzials des DGNB-ZIs liegen, konnten nur 3% erreicht werden. Dies ist vor allem auf den Teilindikator der Materialherkunft zurückzuführen. Dieser wird wie in Abb. 7.21 grafisch ersichtlich ist mit einem Gewichtungsfaktor  $g_{TI}$  von 0,6 beaufschlagt und hat somit am meisten Auswirkung auf das Kreislaufführungspotenzial. Auf Grund des hohen nicht nachwachsenden Primärrohstoffanteils geht der Teilindikator Materialherkunft für das untersuchte Gebäude mit nur 1% in die Wertung ein. Da ein Gebäude erst ab einem Kreislaufpotenzial von >50% als zirkulär anzusehen ist, ist das untersuchte Gebäude als nicht zirkulär einzustufen.

## 8 Diskussion und Ausblick möglicher Standardisierung

Die bisherige Arbeit widmete sich der Analyse bestehender Bewertungsmöglichkeiten zur Messung der Zirkularität von Gebäuden. Es wurde der Unterschied der klassischen Gebäudezertifizierung zur Messung der Nachhaltigkeit eines Gebäudes zu den erst kürzlich entwickelten Zirkularitätsbewertungssystemen aufgezeigt. In weiterer Folge wurden drei Zirkularitätsbewertungssysteme untersucht und im Zuge einer Fallstudie berechnet. Damit wurde die Forschungsfrage „Wie kann das Kreislaufpotenzial bestehender und künftiger Bauvorhaben ermittelt werden?“ untersucht und beantwortet. Im folgenden Kapitel werden die gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst und damit die zweite Forschungsfrage „Können die Ergebnisse unterschiedlicher Bewertungssysteme verglichen werden?“ diskutiert. Zuerst werden die Unterschiede zwischen den Bewertungssystemen aufgezeigt und im Anschluss die Ergebnisse der Fallstudie verglichen und analysiert. Abschließend werden Möglichkeiten zur Standardisierung der Systeme erörtert und die größten Hürden, beziehungsweise die größten Weiterentwicklungspotenziale, aufgezeigt.

### 8.1 Gegenüberstellung der Ergebnisse

Die Bewertungsarten und -methodiken der drei untersuchten Zirkularitätsbewertungssysteme sind in Kapitel 4 bis Kapitel 6 beschrieben. Eine Gegenüberstellung der Systemgrenzen und eingehenden Berechnungsparameter unterschiedlicher Bewertungssysteme, unter anderem die in dieser Arbeit untersuchten Zirkularitätsbewertungssysteme, wurde von DGNB im Zuge der Schaffung des DGNB-ZI angestellt. Dies ist grafisch in Abb. 8.1 dargestellt (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e. V., 2024).

Methode	Circularity Score (CS)	Concular Circularity Performance Index (CPX)	DGNB Zirkularitätsindex (DGNB ZI)	EPEA Circularity Passport® Buildings (CP)	IBO Entsorgungsindikator (EI)	Madaster Circularity Indicator** (MCI)	Urban Mining Index (UMI)	Recycling-Graph	Zirkularitäts-Index zur Bewertung der Kreislauffähigkeit (Bund)
Umfang									
Ebenen									
Phasen									
Teilindikatoren Kreislauf-führung (Heute / Pre-Use)		Materialherkunft	Materialherkunft, Bau-/Abbruchabfälle, Schadstoffbelastung	Materialherkunft, CO <sub>2</sub> -Fußabdruck, Schadstoffbelastung		Materialherkunft, CO <sub>2</sub> -Fußabdruck	Materialherkunft, CO <sub>2</sub> -Fußabdruck, Schadstoffbelastung		
Teilindikatoren Kreislauf-fähigkeit (Zukunft / Post-Use)	Wiedereinsetzbarkeit, Demontagefähigkeit, Materialverwertung	Wiedereinsetzbarkeit, Demontagefähigkeit, Werkstoff, Trennbarkeit, Materialverwertung	Materialverträglichkeit, Demontagefähigkeit, Werkstoff, Trennbarkeit, Materialverwertung	Demontagefähigkeit, Werkstoff, Trennbarkeit, Materialverwertung	Materialverwertung	Demontagefähigkeit, Materialverwertung	Materialverträglichkeit, Demontagefähigkeit*, Werkstoff, Trennbarkeit*, Materialverwertung*	Demontagefähigkeit, Materialverwertung	Materialverträglichkeit, Demontagefähigkeit, Materialverwertung

Legende

Phasen: Heutiger Beitrag (Pre-Use) (= Konstruktionsphase) Zukünftiger Beitrag (Post-Use) (= Nachnutzungsphase) Heutiger + Zukünftiger Beitrag mit Nutzungsphase

Ebenen: Gebäudeebene Bauteilebene Materialebene

\* Nach materialspezifischem eoL-Szenario für selektiven Rückbau bzw. üblichen Abbruch inklusive Bewertung der Wirtschaftlichkeit des Rückbaus  
 \*\* basiert auf dem Material Circularity Indicator (MCI) der Ellen MacArthur Foundation

Abb. 8.1: Zirkularitätsbewertungsmethoden mit Systemgrenzen und berücksichtigten Zirkularitätsindikatoren (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e. V., 2024)

Wie in Abb. 8.1 ersichtlich ist, gibt es keine einheitlichen Systemgrenzen. Die Einbindung der Betrachtungsebenen ist nicht systemübergreifend gleich. Die drei analysierten Zirkularitätsbewertungssysteme UMI, MZI (MCI) und DGNB-ZI führen zwar eine Bewertung auf Baustoff-, Bauteilschicht- und Gebäudeebene durch, was jedoch für andere Bewertungssysteme nicht immer der Fall ist.

Neben den Unterschieden zu der Einbindung der Betrachtungsebenen, ist vor allem die zeitliche Systemgrenze zur Berücksichtigung der einzelnen Lebenszyklusphasen zwischen den Bewertungssystemen stark abweichend. In den drei untersuchten Bewertungssystemen werden die Lebenszyklusphasen eines Gebäudes ebenfalls nicht einheitlich berücksichtigt. Der Urban Mining Index als auch der Madaster Zirkularitätsindikator berücksichtigen zwar die drei Phasen

- Herstellungsphase (Pre-Use-Phase)
- Nutzungsphase (Use-Phase)
- Rückbauphase (Post-Use-Phase)

der DGNB-Zirkularitätsindex klammert allerdings die Nutzungsphase in der aktuellen Version jedoch noch aus. Das soll zwar in neueren Versionen über die Einführung des Teilindikators Flexibilität geändert werden, dies ist aber in der untersuchten Version noch nicht inkludiert.

Ein weiterer signifikanter Unterschied zwischen den Bewertungssystemen ist die nicht einheitliche Berücksichtigung diverser Zirkularitätsindikatoren. Neben der Tatsache, dass diese je nach Bewertungssystem zur Berechnung eines Kreislaufpotenzials unterschiedlich gewichtet werden, werden auch pro Bewertungssystem abweichende Indikatoren berücksichtigt. In den drei untersuchten Bewertungssystemen werden die beiden Teilindikatoren Materialherkunft und Materialverwertung zwar berücksichtigt, die Ermittlung dieser Teilindikatoren ist jedoch stark abweichend. Dies beginnt bereits bei der Verwendung unterschiedlicher Materialdatenbanken mit abweichenden Zirkularitätsattributen. Auch die Wahl und der Einfluss der Material-End-of-Life-Szenarien ist nicht in jedem System ersichtlich, beziehungsweise einheitlich. Bei den untersuchten Bewertungssystemen UMI und DGNB-ZI können die beiden Zirkularitätsindikatoren im Gegensatz zum MZI zumindest nachvollzogen werden. Dies erschwert einen Vergleich. Die beiden analysierten Bewertungssysteme UMI und DGNB-ZI haben theoretisch die größte Überschneidung bei der Berücksichtigung der Indikatoren. Der DGNB-ZI, der in seiner ersten Version im Jahr 2024 erschienen ist, ermöglicht die Verwendung der UMI-Indikatoren „Demontagefähigkeit“ und „werkstoffliche Trennbarkeit“ und bietet so die Möglichkeit den im Jahr 2021 veröffentlichten Urban Mining Index miteinzubeziehen.

### 8.1.1 Unterschiede in den Bewertungsergebnissen

Dieses Kapitel widmet sich dem Vergleich der Fallstudienresultate aus Kapitel 7. Die Ergebnisse für den untersuchten Rohbau eines Einfamilienhauses in der Vorplanungsphase lauten in steigender Reihenfolge wie folgt:

- **DGNB-Zirkularitätsindex DGNB-ZI = 13%**
- **Urban Mining Index UMI = 16%**
- **Madaster-Zirkularitätsindikator MZI = 38%**

Betrachtet man die Ergebnisse, fällt auf, dass der Madaster- Zirkularitätsindikator mit 38% deutlich positiver ausfällt als bei den beiden anderen Bewertungssystemen. Die beiden Kreislaufpotenziale des UMI und DGNB-ZI sind dahingegen mit einer Abweichung von 3% recht nah beisammen. Dies ist auf mehrere Gründe zurückzuführen.

Eine Ursache weshalb die Zirkularitätsindizes des UMI und DGNB-ZI ähnlich ausfallen, sind die Berücksichtigung fast identer Zirkularitätsindikatoren und die Verwendung derselben Materialdatenbank für die Durchführung der Fallstudie. Es ist zwar nicht erforderlich dieselben Materialdatenbanken zu verwenden, da DGNB-ZI aber der Anwender:in einige Freiheiten lässt, ist dies als Vorteil für die Vergleichbarkeit zu sehen. Die Abweichungen von in Summe 3% ergeben sich in der unterschiedlichen Wichtung der Teilindikatoren.

Das ermittelte Kreislaufpotenzial des MZI weist einen Unterschied von 22% zu dem zweithöchsten Index des DGNB-ZI auf und bewertet damit das Gebäude mit Abstand am besten. Dies ist auf mehrere Gründe zurückzuführen, welche zum überwiegenden Teil bereits in Abb. 8.1 dargestellt und analysiert wurden. Neben der Tatsache, dass nicht ersichtlich ist welche zirkulären Materialattribute verwendet, setzt Madaster in der Bewertung Recycling und Downcycling gleich. Somit wird nicht unterschieden ob ein Material im geschlossenen Kreislauf geführt wird oder ob es auf Grund von Qualitätsverlusten in offenen Kreisläufen geführt wird. Da der überwiegende Teil der masseintensivsten Materialien zufolge der End-of-Life-Szenarien des Atlas Recycling einem Downcycling zugeführt werden, könnte hier das Ergebnis entsprechend verzerrt werden. Hier muss aber erwähnt werden, dass diese Annahme auf den Atlas Recycling zurückzuführen ist und nicht bekannt ist, wie Madaster die EoL-Szenarien für die Materialien bestimmt. Unterstützt wird diese Annahme aber durch den Vergleich der Post-Use beziehungsweise Materialverwertungsanteile der jeweiligen Bewertungssysteme am Gesamtergebnis:

- **DGNB-Zirkularitätsindex DGNB-ZI – ZI(Z):** **10%**
- **Urban Mining Index UMI – UMI<sub>Post-Use</sub>:** **25%**
- **Madaster-Zirkularitätsindikator MZI – Materialverwertung:** **55%**

Daraus ist ersichtlich, dass das Kreislaufpotenzial in der Post-Use-Phase deutlich mehr zu dem Kreislaufpotenzial des untersuchten Gebäudes beiträgt als die Pre-Use-Phase.

## 8.2 Ausblick zur Standardisierung & Weiterentwicklung

Im folgenden Kapitel werden die aktuell wichtigsten Standardisierungsmöglichkeiten und Hürden in der Zirkularitätsbewertung, die sich im Zuge dieser Arbeit kristallisiert haben, aufgezeigt, um das Weiterforschungspotenzial für die nahe Zukunft zu verdeutlichen.

### 8.2.1 Möglichkeiten zur Standardisierung der Zirkularitätsbewertung

Für den Wechsel des linearen Wirtschaftssystems zur Kreislaufwirtschaft im Bauwesen, braucht es neben der Akzeptanz bei den Akteur:innen dieser Branche, auch die Werkzeuge, um die Kreislaufwirtschaft messbar zu machen. Diese sollen und müssen auch von unterschiedlichen Unternehmen entwickelt werden und sollten auf das jeweilige Land zugeschnitten sein, um das derzeitige und zukünftige Potenzial von Recyclingmaterialien und Recyclingmöglichkeiten wahrheitsgetreu abzubilden. Wie in Abb. 8.1 ersichtlich ist, unterscheiden sich die gängigsten Zirkularitätsbewertungssysteme im deutschsprachigen Raum deutlich voneinander. Die Vorgabe von Mindestsystemgrenzen und gewissen Zirkularitätsindikatoren wäre somit ein entscheidender Schritt Richtung Standardisierung. Die Erweiterung durch zusätzliche Zirkularitätsindikatoren und die Wichtung dieser sollte aber jedem System überlassen bleiben, da es keine bessere oder schlechtere Art der Zirkularitätsbewertung gibt. Die Lebenszyklusphasen der Herstellung, Nutzung und des Rückbaus sollten in jedem Bewertungssystem abgebildet werden.

Ähnlich wie bei der Harmonisierung zur Definition einer ökologisch nachhaltigen Wirtschaftstätigkeit im europäischen Binnenmarkt braucht es eine klare Linie bei der Ermittlung

des Kreislaufpotenzials eines Gebäudes (Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union, 2020). Nur so können auch die technischen Bewertungskriterien der EU-Taxonomie für alle Länder herangezogen werden, um prüfen zu können, ob der geplante Neubau oder die Sanierung den Mindestanforderungen für Investoren genügen. Auch bei der Methode zur Ermittlung der Lebenszyklus-Treibhausgasemissionen verlangt die europäische Kommission eine einheitliche Berechnungsmethode, um eine Vergleichbarkeit möglich zu machen. Daher wurde unter anderem im Jahr 2024 eine Sammlung an ISO-Norm Regelwerken veröffentlicht, um Zirkularitätsbewertungen zu normieren und diesen damit Glaubwürdigkeit zu verleihen, siehe Kapitel 3.2.

Bei der Analyse, der in dieser Diplomarbeit untersuchten drei Bewertungssysteme, sind folgende Ansätze als sehr positiv aufgefallen und könnten für eine Standardisierung der Systeme ebenfalls in Betracht gezogen werden:

### 1. Urban Mining Index – Rückbauaufwände kombiniert mit Faktor Wert und Arbeit

Für die Bestimmung, ob ein Material einem hochwertigen EoL-Szenario zugeteilt wird, wird im UMI über die beiden Faktoren Wert und Arbeit gesteuert. Damit werden die Zirkularitätsindikatoren der Post-Use-Phase definiert. Dies wird als sehr praxisnahe und -relevant angesehen. Ist das Potenzial für das Recycling eines Materials theoretisch als sehr gut anzusehen, dieses aber auf Grund eines hohen Demontage- und Trennbarkeitsaufwandes praktisch aber nicht realisierbar, so kann dieses Potenzial nicht umgesetzt werden. Dies wird mit der Methodik des UMI berücksichtigt und bietet für die Rückbauphase einen enormen Mehrwert

### 2. DGNB-Zirkularitätsindex – Wichtung der Zirkularitätsklassen

DGNB nutzt zur Wichtung der Zirkularitätsklassen, im UMI System Qualitätsklassen genannt, der einzelnen Teilindikatoren Bewertungsfaktoren. Dadurch gehen die Wiederverwendung und -verwertung positiver in die Bewertung ein als die Weiterverwertung. Der Urban Mining Index nimmt das Loop-Potenzial zwar auch nur zu 50% in die Bewertung mit ein, DGNB kann mit ihrem Bewertungssystem zwischen den einzelnen Zirkularitätsklassen/Qualitätsstufen genauer abstufen. Damit geht in die Bewertung die Wiederverwendung positiver ein als die Wiederverwertung, was im Hinblick auf die Reduktion des Abfalles und Energieverbrauches von Recyclingprozessen sinnvoll ist.

### 3. Madaster-Zirkularitätsindikator – Korrekturfaktoren für die Bestandsbewertung

Madaster nutzt für die Bestimmung des MZI Korrekturfaktoren, um unvollständige Materialangaben zu Masse oder Zirkularitätsattributen im Ergebnis des Zirkularitätsindikators wiederzugeben. Der Ansatz wird vom Verfasser dieser Diplomarbeit für Neubauten als kritisch angesehen, da damit die Motivation zur ganzheitlichen Gebäudeerfassung über ein entsprechendes Gebäudemodell und Materialpässe reduziert wird. Für die Bewertung von Bestandsgebäuden könnte dieser Ansatz jedoch sinnvoll sein. Hier braucht es aber eine klare Abgrenzung und Abstufung wie diese Korrekturfaktoren aussehen könnten. In der untersuchten Version des Madaster-Zirkularitätsindikators war nicht ersichtlich, wie diese Korrekturfaktoren berechnet werden.

Eine weitere wichtige Maßnahme zur Standardisierung der Zirkularitätsbewertungssysteme, wäre die Schaffung einer Materialdatenbank für Baustoffe und -produkte, in welcher zirkuläre Attribute wie Rezyklatanteile, Demontagefähigkeit, Trennbarkeit einzelner Komponenten und Informationen zu chemischen Inhaltsstoffen abgebildet werden. Diese Ebene der Materialdatenbank könnte auf EU-Ebene greifen und auf den Vorgaben der EU an die Produktherstellung gemäß der EU-Bauproduktverordnung aufbauen. Jeder europäische Mitgliedstaat müsste für die zirkulären Materialattribute, wie die üblichen oder hochwertigen Material-End-of-Life-Szenarien oder Recyclingpotenziale, diese Materialdatenbank, auf Grundlage der Möglichkeiten pro Mitgliedsstaat, erweitern. Für die Wiedergabe des künftige

Recyclingpotenzials wurde vom BBSR der Technologiefaktor entwickelt, welcher im BNB Kriteriensteckbrief 4.1.4 Rückbau, Trennung, Verwertung eingesetzt wird (BBSR - Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung, 2024). Dies könnte als Vorlage für die Österreich dienen.

## 8.2.2 Hürden bei der Zirkularitätsbewertung

Die aktuellen Hürden Österreichs für die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft im Bausektor sind bereits im Kapitel 2.3.2 in Tabelle 2.5 gelistet. Dieses Kapitel widmet sich konkret den aktuellen Hürden bei der Zirkularitätsbewertung. Für eine aussagekräftige Anwendung von Zirkularitätsbewertungssystemen in Österreich braucht es eine entsprechende Basis hinsichtlich einer zirkulären Materialdatenbank. Das Bewertungssystem des Urban Mining Index und DGNB-ZI nutzen für die Bestimmung der jeweiligen Indikatoren den Atlas Recycling und Rückbauaufwände, welche auf Statistiken aus Deutschland basieren. Auch Grenzwertdefinitionen stammen von Verordnungen beziehungsweise Gesetzen aus Deutschland. Diese können zum Teil von österreichischen Verordnungen, beziehungsweise Gesetzen abweichen. Da Produkthersteller bei ihren Umweltproduktdeklarationen (EPD) dazugehörenden Baustoffe aktuell nur im Ausnahmefall zirkuläre Materialattribute wie Material-Recycling-Content und Material-End-of-Life-Szenarien angeben, fehlt es an einer soliden Basis für die Schaffung einer Materialdatenbank mit zirkulären Attributen am Standort Österreich. Für die Durchführung der Fallstudie wurden daher notgedrungen, wie in Kapitel 7.1.5 beschrieben, der Atlas Recycling für die Auswertung des MEoL und MRC herangezogen (Seggewies, Riegler-Floors, & Rosen, 2018). Dieser nutzt aber wie bereits erwähnt Statistiken, wie zum Beispiel die Abfall- und Recyclingstatistik, aus Deutschland. Da jedoch keine bessere Literatur für Material-Recycling-Content und Material-End-of-Life für Österreich aufliegt, wurde hier auf den Atlas Recycling zurückgegriffen.

Zur Bestimmung des Rückbauaufwandes gibt es in Österreich keine quantifizierbaren Durchschnittswerte für Arbeitsaufwände und Kosten zu Abbruch- und Rückbauarbeiten. Diese sind jedoch ein entscheidender Faktor zur Festlegung des End-of-Life-Szenarios. Hier bräuchte es, ähnlich wie bereits in der Dissertation von Dr. Rosen im Urban Mining Index für den Standort Deutschland erarbeitet, zu typischen Abbruch- und Rückbautätigkeiten die entsprechenden Aufwände ausgewertet. Neben den Aufwänden spielt auch der Faktor Wert eine entscheidende Rolle in der Nachnutzbarkeit von Materialien. Dazu bedarf es einer Analyse von Abbruch- und Rückbaukosten zu typischen Aufbauten und Materialien. In der Praxis sind diese Daten jedoch schwer abgreifbar und es müssten entsprechende Abbruch- und Rückbaubaustellen begleitet und analysiert werden. Auch das aktuelle Potenzial von Recyclinganlagen des Standorts Österreich für die Verwertung von Baustoffen und die Ausnutzung dieser, gehört den Bedürfnissen der Kreislaufwirtschaft angepasst und „flächendeckend“, sprich in einem gewissen Transportradius, in Österreich angeboten. Schwieriger wird es in der Prognose von End-of-Life-Szenarien für die Bewertung von Neubauten. Diese müssen zum Zeitpunkt der Bewertungserstellung die End-of-Life-Szenarien von Bauwerken abschätzen, die erst Jahrzehnte später rückgebaut werden. So kann zum Beispiel aktuell Altholz thermisch verwertet werden, in Zukunft soll das die Energieerzeugung aber auf 100% erneuerbare Energie umgestellt werden, wodurch fossile Brennstoffe an Bedeutung verlieren und das End-of-Life-Szenario für Altholz daher irrelevant werden könnte.

## 8.3 Fazit

In Anbetracht der EU-Taxonomie, mit welcher nachhaltige Bauprojekte und Investitionen in nachhaltige Technologien gesteuert werden, wird die Zirkularitätsbewertung eine entscheidende Rolle bei der Förderung zirkulärer und damit nachhaltiger Bauprojekte einnehmen. Die vorliegende Diplomarbeit zeigt, dass den Akteur:innen im Bauwesen eine Auswahl an Zirkularitätsbewertungsmöglichkeiten zur Verfügung stehen, welche in den Systemgrenzen, eingehenden Materialdaten, betrachteten Zirkularitätsindikatoren und Ergebnissen stark abweichen können. Für die Anwendung sollten Materialdatenbanken mit zirkulären Materialattributen, passend zum jeweiligen Standort, aufliegen, um ein glaubwürdiges Ergebnis zu liefern. Nur durch Transparenz hinsichtlich der eingehenden Materialdaten und Wichtung der Zirkularitätsindikatoren können der Zirkularitätsbewertung Glaubwürdigkeit verliehen werden. Dies ist ein entscheidender Faktor für die Messung der Zirkularität im Bauwesen und für die Schaffung von Akzeptanz. Zirkularitätsbewertungen zeigen bereits heute das Potenzial der verbauten Umwelt hinsichtlich des Wandels zur Kreislaufwirtschaft. Anhand der Fallstudie, in welcher der Rohbau eines Einfamilienhauses in Ziegelbauweise und mit weitestgehend in Österreich üblichen Aufbauten untersucht wurde, zeigt, dass mit konventionellen Bauweisen kein positives Kreislaufpotenzial ermittelt werden kann. Im Zuge diverser Forschungsarbeiten wurden bereits unterschiedliche Bauweisen untersucht und das große Potenzial von Bauprojekten mit Fokus auf der zirkulären Planung aufgezeigt. Für die Messung des Kreislaufpotenzials muss für das zu untersuchende Gebäude das richtige Bewertungssystem in Hinblick auf die zu berücksichtigenden Systemgrenzen und Standorte gewählt werden. Die Anwendung dieser Zirkularitätsbewertungssysteme verlangt von den Anwender:innen ein umfangreiches Wissen über die verbauten Materialien und das Potenzial, welches dieses nach dem End-of-Life am untersuchten Standort besitzen werden. Die Anwendbarkeit der untersuchten Systeme variierte teilweise stark. Während bei den durchgeführten Systemen die Methodik hinter der Berechnung gut und verständlich strukturiert war, schaffen es nur der Urban Mining Index und der DGNB-Zirkularitätsindex die Ermittlung und Berechnung der Zirkularitätsindikatoren nachvollziehbar zu gestalten. Leider geht im System von Madaster nicht hervor, welche Materialwerte die Plattform als Eingangswerte nutzt, was das System nicht transparent gestaltet. Daher ist die starke Abweichung des Zirkularitätspotenzials im Vergleich zu den beiden anderen Systeme nur schwer nachvollziehbar. Für die untersuchten Bewertungssysteme gibt es Werkzeuge zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials. Für den Urban Mining Index wurde ein Excel-Tool von Dr. Rosen zur Verfügung gestellt, welches zum Zeitpunkt der Bewertungsdurchführung für Forschungsarbeiten auf Anfrage bereitgestellt wird. Bei Madaster kann die digitale Plattform von Madaster genutzt werden. Es bedarf hier zwar ein Abonnement, aber dafür kann es abseits von Forschungsarbeiten von allen Akteur:innen in der Baubranche genutzt werden. DGNB bietet mit dem frei zugänglichen Excel-Tool des DGNB-Gebäuderessourcenpass ebenfalls ein Werkzeug zur Ermittlung des Kreislaufpotenzials an. Dieses verlangt im Vergleich zu den beiden anderen untersuchten Bewertungssystemen von den Anwender:innen die meiste Selbstständigkeit bei der Berechnung. Die wichtigsten Erkenntnisse zur durchgeführten Fallstudie und der Ergebnisdiskussion sind in Tabelle 8.1 dargestellt.

Der Standort Österreich hat mit der österreichischen Kreislaufwirtschaftsstrategie bereits die wichtigsten Hürden und Hebel zur Umsetzung der europäischen Vorgaben zur Erreichung der Klimaziele identifiziert und entsprechende Monitoring Maßnahmen geschaffen. Die Zeit zur Umsetzung dieser Maßnahmen ist jetzt, die Bewertungssysteme zur Messung der Kreislauffähigkeit gehören auf den Standort Österreich angepasst und angewendet. Die Kreislaufwirtschaft und die damit einhergehenden Änderungen hinsichtlich des Umganges mit Abfall und dem Thema Wiederverwendung ist stark von Verbraucherentscheidungen abhängig. Geprägt durch das lineare Wirtschaftssystem, werden Produkte oft vor dem tatsächlichen Lebensende entsorgt und durch neue Produkte ersetzt. Es muss ein Markt für kreislauffähige Produkte und Gebäude geschaffen werden und ein entsprechendes

Umdenken in der Bevölkerung was den Wert von wiederverwendeten beziehungsweise -verwerteten Produkten stattfinden.

EIGENSCHAFTEN	DGNB ZI	UMI	MCI
<b>Zirkularitätsindex</b> <i>(über gesamten Lebenszyklus)</i>	<p>ZI = 0,13 (von 1,00)</p>	<p>UMI 16%</p>	<p>38%</p>
Systemgrenzen			
Lebenszyklusphasen	Pre-Use Post-Use	Pre-Use Use Post-Use	Pre-Use Use Post-Use
DIN 276 Kostengruppen	KG300-KG500	KG300	KG100-KG700
Anwendungsfall	Neubau	Neubau	Neubau   Bestand
Zirkuläre Materialwerte	- Mehrere Optionen	- Atlas Recycling - Rückbauaufwände lt. Rosen	- Madaster Datenbank
Merkmale			
Positive Merkmale:	- Detaillierte Wichtung d. Zirkularitätsklassen - Freiheit bei der Wahl zirk. Materialwerte	- Unterscheidung zw. CLP und LP - Detaillierte Rückbauaufwände mit Arbeit und Wert verknüpft	- Bewertung von Bestandsgebäuden mit Korrekturfaktoren
negative Merkmale:	- Nur Neubau - Use-Phase aktuell nicht berücksichtigt	- Nur Neubau - Beschränkt auf KG300	- unnachvollziehbare zirk. Materialwerte - Keine Unterscheidung zw. CLP und LP

Tabelle 8.1: Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse der Fallstudie und Ergebnisdiskussion (eigene Darstellung)

Die anfänglich formulierten Forschungsfragen zu den Messmöglichkeiten der Zirkularität und die Vergleichbarkeit dieser sind somit beantwortet und es konnte aufgezeigt werden, dass für die Sichtbarmachung der Kreislaufwirtschaft im Bausektor bereits Messmöglichkeiten vorhanden sind. Um diesen auch eine entsprechende Glaubwürdigkeit geben zu können, braucht es eine klare Vorgabe zu den Mindestanforderungen hinsichtlich Betrachtungsebenen, die zu berücksichtigenden Lebenszyklusphasen als auch die wichtigsten Zirkularitätsindikatoren. Es braucht für jeden Mitgliedsstaat und somit Standort Materialdatenbanken mit entsprechenden zirkulären Materialattributen.

## 9 Anhang

### 9.1 Fallbeispiel – Massenermittlung nach Baustoffen

Massenermittlung nach Baustoffen						
DIN 276	Etage	Aufbau / Profil	Fläche	Volumen	Flächenmasse	Masse
<b>Brettschichtholz</b>						
330	EG	AW Aufbau 6 UC9	17,53 m <sup>2</sup>	0,088 m <sup>3</sup>	1,50 kg/m <sup>2</sup>	26,30 kg
330	EG	AW Aufbau 6 UC9	17,53 m <sup>2</sup>	0,526 m <sup>3</sup>	9,00 kg/m <sup>2</sup>	157,77 kg
330	DG	AW Aufbau 5 UC9	8,29 m <sup>2</sup>	0,166 m <sup>3</sup>	6,00 kg/m <sup>2</sup>	49,74 kg
351	DG	Decke Aufbau 1 UC9	63,30 m <sup>2</sup>	3,17 m <sup>3</sup>	15,00 kg/m <sup>2</sup>	767,57 kg
353	DG	FB Aufbau 07 UC9	47,67 m <sup>2</sup>	1,19 m <sup>3</sup>	7,50 kg/m <sup>2</sup>	361,91 kg
353	DG	FB Aufbau 07 UC9	47,67 m <sup>2</sup>	2,15 m <sup>3</sup>	13,50 kg/m <sup>2</sup>	651,44 kg
353	KG	FB Aufbau 02 UC9	33,34 m <sup>2</sup>	0,67 m <sup>3</sup>	6,00 kg/m <sup>2</sup>	200,04 kg
353	EG	FB Aufbau 03 UC9	33,60 m <sup>2</sup>	0,67 m <sup>3</sup>	6,00 kg/m <sup>2</sup>	201,60 kg
353	EG	FB Aufbau 04 UC9	15,72 m <sup>2</sup>	0,47 m <sup>3</sup>	9,00 kg/m <sup>2</sup>	141,48 kg
<b>Summe:</b>				<b>9,092 m<sup>3</sup></b>	<b>73,50 kg/m<sup>2</sup></b>	<b>2557,845 kg</b>
<b>EPS</b>						
330	DG	AW Aufbau 4 UC9	34,35 m <sup>2</sup>	1,374 m <sup>3</sup>	1,00 kg/m <sup>2</sup>	34,35 kg
330	DG	AW Aufbau 5 UC9	8,73 m <sup>2</sup>	0,35 m <sup>3</sup>	1,00 kg/m <sup>2</sup>	8,73 kg
353	DG	FB Aufbau 07 UC9	47,67 m <sup>2</sup>	1,67 m <sup>3</sup>	0,88 kg/m <sup>2</sup>	42,23 kg
353	EG	FB Aufbau 03 UC9	33,60 m <sup>2</sup>	0,07 m <sup>3</sup>	0,05 kg/m <sup>2</sup>	1,68 kg
361	DG	Dach Aufbau 1 UC9	75,78 m <sup>2</sup>	3,41	0,75 kg/m <sup>2</sup>	85,3
<b>Summe:</b>				<b>6,869 m<sup>3</sup></b>	<b>3,68 kg/m<sup>2</sup></b>	<b>172,290 kg</b>
<b>Fliesen weiß</b>						
330	EG	AW Aufbau 6 UC9	17,53 m <sup>2</sup>	0,088 m <sup>3</sup>	7,80 kg/m <sup>2</sup>	136,73 kg
340	EG	IW Aufbau 5 UC9	11,20 m <sup>2</sup>	0,056 m <sup>3</sup>	7,80 kg/m <sup>2</sup>	87,36 kg
340	EG	IW Fliesen UC9	12,42 m <sup>2</sup>	0,062 m <sup>3</sup>	7,80 kg/m <sup>2</sup>	96,88 kg
353	EG	FB Aufbau 01 UC9	7,95 m <sup>2</sup>	0,04 m <sup>3</sup>	7,80 kg/m <sup>2</sup>	62,01 kg
<b>Summe:</b>				<b>0,246 m<sup>3</sup></b>	<b>31,20 kg/m<sup>2</sup></b>	<b>382,980 kg</b>
<b>Fliesenkleber</b>						
330	EG	AW Aufbau 6 UC9	17,53 m <sup>2</sup>	0,088 m <sup>3</sup>	8,25 kg/m <sup>2</sup>	144,62 kg
340	EG	IW Aufbau 5 UC9	11,20 m <sup>2</sup>	0,056 m <sup>3</sup>	8,25 kg/m <sup>2</sup>	92,40 kg
340	EG	IW Fliesen UC9	12,42 m <sup>2</sup>	0,062 m <sup>3</sup>	8,25 kg/m <sup>2</sup>	102,47 kg
353	EG	FB Aufbau 01 UC9	7,95 m <sup>2</sup>	0,04 m <sup>3</sup>	8,25 kg/m <sup>2</sup>	65,59 kg
<b>Summe:</b>				<b>0,246 m<sup>3</sup></b>	<b>33,00 kg/m<sup>2</sup></b>	<b>405,075 kg</b>
<b>Folie</b>						
330	EG	AW Aufbau 6 UC9	17,53 m <sup>2</sup>	0,002 m <sup>3</sup>	0,09 kg/m <sup>2</sup>	1,58 kg
340	EG	IW Aufbau 5 UC9	5,60 m <sup>2</sup>	0,001 m <sup>3</sup>	0,09 kg/m <sup>2</sup>	0,50 kg
353	DG	FB Aufbau 07 UC9	47,67 m <sup>2</sup>	0,005 m <sup>3</sup>	0,09 kg/m <sup>2</sup>	4,29 kg
361	DG	Dach Aufbau 1 UC9	75,78 m <sup>2</sup>	0,01 m <sup>3</sup>	0,09 kg/m <sup>2</sup>	6,82 kg
<b>Summe:</b>				<b>0,015 m<sup>3</sup></b>	<b>0,36 kg/m<sup>2</sup></b>	<b>13,192 kg</b>
<b>Gipskarton</b>						
330	EG	AW Aufbau 6 UC9	17,53 m <sup>2</sup>	0,263 m <sup>3</sup>	12,75 kg/m <sup>2</sup>	223,51 kg
340	EG	IW Aufbau 5 UC9	11,20 m <sup>2</sup>	0,168 m <sup>3</sup>	12,75 kg/m <sup>2</sup>	142,80 kg
330	DG	AW Aufbau 4 UC9	34,35 m <sup>2</sup>	0,515 m <sup>3</sup>	12,75 kg/m <sup>2</sup>	437,96 kg
330	DG	AW Aufbau 5 UC9	8,73 m <sup>2</sup>	0,131 m <sup>3</sup>	12,75 kg/m <sup>2</sup>	111,31 kg
340	DG	IW Aufbau 7 UC9	35,18 m <sup>2</sup>	0,53 m <sup>3</sup>	12,75 kg/m <sup>2</sup>	448,55 kg
361	DG	Dach Aufbau 1 UC9	75,78 m <sup>2</sup>	0,91 m <sup>3</sup>	8,50 kg/m <sup>2</sup>	766,34 kg
<b>Summe:</b>				<b>2,515 m<sup>3</sup></b>	<b>72,25 kg/m<sup>2</sup></b>	<b>2130,463 kg</b>

<b>Metallständerwand (C-Profil)</b>						
330	DG	AW Aufbau 4 UC9	6,04 m <sup>2</sup>	0,846 m <sup>3</sup>	1,60 kg/m <sup>2</sup>	9,67 kg
330	DG	AW Aufbau 5 UC9	6,04 m <sup>2</sup>	0,85 m <sup>3</sup>	1,60 kg/m <sup>2</sup>	9,67 kg
<b>Summe:</b>			<b>1,692 m<sup>3</sup></b>	<b>3,20 kg/m<sup>2</sup></b>	<b>19,340 kg</b>	
<b>Blech</b>						
361	EG	Dach Aufbau 2 UC9	10,25 m <sup>2</sup>	0,01025	7,80 kg/m <sup>2</sup>	8,12 kg
<b>Summe:</b>			<b>0,010 m<sup>3</sup></b>	<b>7,80 kg/m<sup>2</sup></b>	<b>8,12 kg</b>	
<b>Gipsputz</b>						
330	KG	AW Aufbau 1 UC9	85,04 m <sup>2</sup>	1,148 m <sup>3</sup>	20,25 kg/m <sup>2</sup>	1722,06 kg
330	KG	AW Aufbau 2 UC9	18,44 m <sup>2</sup>	0,166 m <sup>3</sup>	13,50 kg/m <sup>2</sup>	248,94 kg
340	KG	IW Aufbau 1 UC9	27,16 m <sup>2</sup>	0,549 m <sup>3</sup>	30,30 kg/m <sup>2</sup>	822,95 kg
340	KG	IW Aufbau 1 UC9	27,16 m <sup>2</sup>	0,551 m <sup>3</sup>	30,45 kg/m <sup>2</sup>	827,02 kg
340	KG	IW Aufbau 2 UC9	26,28 m <sup>2</sup>	0,520 m <sup>3</sup>	29,70 kg/m <sup>2</sup>	780,52 kg
330	EG	AW Aufbau 3 UC9	108,98m <sup>2</sup>	1,177 m <sup>3</sup>	16,20 kg/m <sup>2</sup>	1765,48 kg
340	EG	IW Aufbau 3 UC9	16,10 m <sup>2</sup>	0,290 m <sup>3</sup>	13,50 kg/m <sup>2</sup>	434,70 kg
340	EG	IW Aufbau 4 UC9	13,62 m <sup>2</sup>	0,294 m <sup>3</sup>	16,20 kg/m <sup>2</sup>	441,29 kg
340	EG	IW Aufbau 6 UC9	89,88 m <sup>2</sup>	1,079 m <sup>3</sup>	9,00 kg/m <sup>2</sup>	1617,84 kg
330	DG	AW Aufbau 4 UC9	34,35 m <sup>2</sup>	0,278 m <sup>3</sup>	12,15 kg/m <sup>2</sup>	417,35 kg
330	DG	AW Aufbau 5 UC9	8,73 m <sup>2</sup>	0,07 m <sup>3</sup>	12,15 kg/m <sup>2</sup>	106,07 kg
351	DG	Decke Aufbau 1 UC9	63,30 m <sup>2</sup>	0,32 m <sup>3</sup>	7,50 kg/m <sup>2</sup>	474,75 kg
<b>Summe:</b>			<b>6,439 m<sup>3</sup></b>	<b>210,90 kg/m<sup>2</sup></b>	<b>9658,962 kg</b>	
<b>Hochlochziegel</b>						
330	KG	AW Aufbau 1 UC9	85,04 m <sup>2</sup>	30,189 m <sup>3</sup>	477,48 kg/m <sup>2</sup>	40604,47 kg
330	KG	AW Aufbau 2 UC9	18,44 m <sup>2</sup>	4,333 m <sup>3</sup>	316,08 kg/m <sup>2</sup>	5828,42 kg
340	KG	IW Aufbau 1 UC9	27,16 m <sup>2</sup>	9,234 m <sup>3</sup>	457,30 kg/m <sup>2</sup>	12420,27 kg
340	KG	IW Aufbau 2 UC9	13,14 m <sup>2</sup>	0,788 m <sup>3</sup>	80,70 kg/m <sup>2</sup>	1060,40 kg
330	EG	AW Aufbau 3 UC9	108,98m <sup>2</sup>	31,059 m <sup>3</sup>	383,33 kg/m <sup>2</sup>	41774,76 kg
340	EG	IW Aufbau 3 UC9	8,05 m <sup>2</sup>	1,892 m <sup>3</sup>	316,08 kg/m <sup>2</sup>	2544,40 kg
340	EG	IW Aufbau 4 UC9	6,81 m <sup>2</sup>	1,941 m <sup>3</sup>	383,33 kg/m <sup>2</sup>	2610,44 kg
340	EG	IW Aufbau 6 UC9	44,94 m <sup>2</sup>	2,696 m <sup>3</sup>	80,70 kg/m <sup>2</sup>	3626,66 kg
330	DG	AW Aufbau 4 UC9	34,35 m <sup>2</sup>	7,385 m <sup>3</sup>	289,18 kg/m <sup>2</sup>	9933,16 kg
330	DG	AW Aufbau 5 UC9	8,73 m <sup>2</sup>	1,88 m <sup>3</sup>	289,18 kg/m <sup>2</sup>	2524,50 kg
322		Fundament UC9	16,02 m <sup>2</sup>	9,46 m <sup>3</sup>	517,83 kg/m <sup>2</sup>	12721,59 kg
<b>Summe:</b>			<b>100,87 m<sup>3</sup></b>	<b>3591,15 kg/m<sup>2</sup></b>	<b>135649,076kg</b>	
<b>Mineralputz</b>						
330	KG	AW Aufbau 1 UC9	85,04 m <sup>2</sup>	1,148 m <sup>3</sup>	20,25 kg/m <sup>2</sup>	1722,06 kg
330	KG	AW Aufbau 2 UC9	18,44 m <sup>2</sup>	0,166 m <sup>3</sup>	13,50 kg/m <sup>2</sup>	248,94 kg
330	EG	AW Aufbau 3 UC9	108,98m <sup>2</sup>	1,177 m <sup>3</sup>	16,20 kg/m <sup>2</sup>	1765,48 kg
330	DG	AW Aufbau 4 UC9	34,35 m <sup>2</sup>	0,278 m <sup>3</sup>	12,15 kg/m <sup>2</sup>	417,35 kg
330	DG	AW Aufbau 5 UC9	8,73 m <sup>2</sup>	0,07 m <sup>3</sup>	12,15 kg/m <sup>2</sup>	106,07 kg
<b>Summe:</b>			<b>2,840 m<sup>3</sup></b>	<b>74,25 kg/m<sup>2</sup></b>	<b>4259,898 kg</b>	
<b>Mineralwolle weich</b>						
330	EG	AW Aufbau 6 UC9	17,53 m <sup>2</sup>	0,526 m <sup>3</sup>	0,91 kg/m <sup>2</sup>	15,93 kg
340	EG	IW Aufbau 5 UC9	5,60 m <sup>2</sup>	0,168 m <sup>3</sup>	0,91 kg/m <sup>2</sup>	5,09 kg
330	DG	AW Aufbau 4 UC9	34,35 m <sup>2</sup>	3,435 m <sup>3</sup>	3,03 kg/m <sup>2</sup>	104,08 kg
330	DG	AW Aufbau 5 UC9	8,73 m <sup>2</sup>	0,873 m <sup>3</sup>	3,03 kg/m <sup>2</sup>	26,45 kg
340	DG	IW Aufbau 7 UC9	17,59 m <sup>2</sup>	0,88 m <sup>3</sup>	1,52 kg/m <sup>2</sup>	26,65 kg
353	DG	FB Aufbau 07 UC9	47,67 m <sup>2</sup>	3,34 m <sup>3</sup>	2,12 kg/m <sup>2</sup>	101,11 kg
361	DG	Dach Aufbau 1 UC9	75,78 m <sup>2</sup>	8,95 m <sup>3</sup>	2,42 kg/m <sup>2</sup>	271,52 kg
<b>Summe:</b>			<b>18,168 m<sup>3</sup></b>	<b>13,94 kg/m<sup>2</sup></b>	<b>550,834 kg</b>	
<b>Mörtel dunkel</b>						
330	KG	AW Aufbau 1 UC9	85,04 m <sup>2</sup>	5,953 m <sup>3</sup>	101,50 kg/m <sup>2</sup>	8631,56 kg
330	KG	AW Aufbau 2 UC9	18,44 m <sup>2</sup>	0,830 m <sup>3</sup>	65,25 kg/m <sup>2</sup>	1203,21 kg
340	KG	IW Aufbau 1 UC9	27,16 m <sup>2</sup>	1,901 m <sup>3</sup>	101,50 kg/m <sup>2</sup>	2756,74 kg
340	KG	IW Aufbau 2 UC9	13,14 m <sup>2</sup>	0,263 m <sup>3</sup>	29,00 kg/m <sup>2</sup>	381,06 kg
330	EG	AW Aufbau 3 UC9	108,98m <sup>2</sup>	5,994 m <sup>3</sup>	79,75 kg/m <sup>2</sup>	8691,16 kg
340	EG	IW Aufbau 3 UC9	8,05 m <sup>2</sup>	0,362 m <sup>3</sup>	65,25 kg/m <sup>2</sup>	525,26 kg
340	EG	IW Aufbau 4 UC9	6,81 m <sup>2</sup>	0,375 m <sup>3</sup>	79,75 kg/m <sup>2</sup>	543,10 kg

340	EG	IW Aufbau 6 UC9	44,94 m <sup>2</sup>	0,449 m <sup>3</sup>	14,50 kg/m <sup>2</sup>	651,63 kg
330	DG	AW Aufbau 4 UC9	34,35 m <sup>2</sup>	1,374 m <sup>3</sup>	58,00 kg/m <sup>2</sup>	1992,30 kg
330	DG	AW Aufbau 5 UC9	8,73 m <sup>2</sup>	0,349 m <sup>3</sup>	58,00 kg/m <sup>2</sup>	506,34 kg
322		Fundament UC9	16,02 m <sup>2</sup>	1,77 m <sup>3</sup>	101,50 kg/m <sup>2</sup>	2543,57 kg
<b>Summe:</b>			<b>19,620 m<sup>3</sup></b>	<b>754,00 kg/m<sup>2</sup></b>	<b>28425,925 kg</b>	
<b>Estrich</b>						
322	KG	Decke Aufbau 3 UC9	61,91 m <sup>2</sup>	4,95 m <sup>3</sup>	192,00 kg/m <sup>2</sup>	11886,72 kg
353	EG	FB Aufbau 01 UC9	7,95 m <sup>2</sup>	0,56 m <sup>3</sup>	168,00 kg/m <sup>2</sup>	1335,60 kg
<b>Summe:</b>			<b>5,509 m<sup>3</sup></b>	<b>360 kg/m<sup>2</sup></b>	<b>13222,320 kg</b>	
<b>Bitumen</b>						
353	DG	FB Aufbau 07 UC9	47,67 m <sup>2</sup>	0,24 m <sup>3</sup>	6,00 kg/m <sup>2</sup>	286,02 kg
<b>Summe:</b>			<b>0,238 m<sup>3</sup></b>	<b>6,00 kg/m<sup>2</sup></b>	<b>286,020 kg</b>	
<b>Blähbeton 1100 kg/m<sup>3</sup></b>						
353	DG	FB Aufbau 07 UC9	47,67 m <sup>2</sup>	2,38 m <sup>3</sup>	55,00 kg/m <sup>2</sup>	2621,85 kg
<b>Summe:</b>			<b>2,384 m<sup>3</sup></b>	<b>55,00 kg/m<sup>2</sup></b>	<b>2621,850 kg</b>	
<b>Einlageziegel (Hourdis)</b>						
351	EG	Decke Aufbau 2 UC9	51,49 m <sup>2</sup>	3,60 m <sup>3</sup>	51,94 kg/m <sup>2</sup>	2674,25 kg
<b>Summe:</b>			<b>3,604 m<sup>3</sup></b>	<b>51,94 kg/m<sup>2</sup></b>	<b>2 674,25 kg</b>	
<b>Stahl(I-Träger)</b>						
351	EG	Decke Aufbau 2 UC9	51,49 m <sup>2</sup>	0,14 m <sup>3</sup>	39,00 kg/m <sup>2</sup>	1104,46 kg
<b>Summe:</b>			<b>0,142 m<sup>3</sup></b>	<b>39,00 kg/m<sup>2</sup></b>	<b>1104,461 kg</b>	
<b>Stroh (zw. KVH)</b>						
351	DG	Decke Aufbau 1 UC9	63,30 m <sup>2</sup>	0,41 m <sup>3</sup>	1,00 kg/m <sup>2</sup>	41,15 kg
<b>Summe:</b>			<b>0,411 m<sup>3</sup></b>	<b>1,00 kg/m<sup>2</sup></b>	<b>41,145 kg</b>	
<b>Holz Schalung (Sparschalung)</b>						
361	EG	Dach Aufbau 2 UC9	10,25 m <sup>2</sup>	0,256 m <sup>3</sup>	12,50 kg/m <sup>2</sup>	128,13 kg
361	DG	Dach Aufbau 1 UC9	75,78 m <sup>2</sup>	1,516 m <sup>3</sup>	10,00 kg/m <sup>2</sup>	757,80 kg
<b>Summe:</b>			<b>1,772 m<sup>3</sup></b>	<b>22,50 kg/m<sup>2</sup></b>	<b>885,925 kg</b>	
<b>Vollholz (KVH)</b>						
351	DG	Decke Aufbau 1 UC9	63,30 m <sup>2</sup>	1,33 m <sup>3</sup>	10,00 kg/m <sup>2</sup>	664,92 kg
<b>Summe:</b>			<b>1,330 m<sup>3</sup></b>	<b>10,00 kg/m<sup>2</sup></b>	<b>664,92 kg</b>	
<b>Teppich beige</b>						
353	DG	FB Aufbau 07 UC9	47,67 m <sup>2</sup>	0,24 m <sup>3</sup>	1,25 kg/m <sup>2</sup>	59,59 kg
<b>Summe:</b>			<b>0,238 m<sup>3</sup></b>	<b>1,25 kg/m<sup>2</sup></b>	<b>59,588 kg</b>	
<b>Laminat</b>						
353	EG	FB Aufbau 03 UC9	33,60 m <sup>2</sup>	0,34 m <sup>3</sup>	8,30 kg/m <sup>2</sup>	278,88 kg
<b>Summe:</b>			<b>0,336 m<sup>3</sup></b>	<b>8,30 kg/m<sup>2</sup></b>	<b>278,880 kg</b>	
<b>Parkett</b>						
353	EG	FB Aufbau 04 UC9	15,72 m <sup>2</sup>	0,24 m <sup>3</sup>	7,50 kg/m <sup>2</sup>	117,90 kg
<b>Summe:</b>			<b>0,236 m<sup>3</sup></b>	<b>7,50 kg/m<sup>2</sup></b>	<b>117,900 kg</b>	
<b>PVC default</b>						
353	EG	FB Aufbau 03 UC9	33,60 m <sup>2</sup>	0,03 m <sup>3</sup>	1,39 kg/m <sup>2</sup>	46,70 kg
<b>Summe:</b>			<b>0,034 m<sup>3</sup></b>	<b>1,39 kg/m<sup>2</sup></b>	<b>46,704 kg</b>	
<b>Schüttung</b>						
353	EG	FB Aufbau 01 UC9	7,95 m <sup>2</sup>	0,32 m <sup>3</sup>	52,00 kg/m <sup>2</sup>	413,40 kg
353	EG	FB Aufbau 03 UC9	33,60 m <sup>2</sup>	1,34 m <sup>3</sup>	52,00 kg/m <sup>2</sup>	1747,20 kg
353	EG	FB Aufbau 04 UC9	15,72 m <sup>2</sup>	0,63 m <sup>3</sup>	52,00 kg/m <sup>2</sup>	817,44 kg
353	DG	FB Aufbau 07 UC9	47,67 m <sup>2</sup>	1,91 m <sup>3</sup>	52,00 kg/m <sup>2</sup>	2478,84 kg
<b>Summe:</b>			<b>4,198 m<sup>3</sup></b>	<b>208,00 kg/m<sup>2</sup></b>	<b>5456,880 kg</b>	
<b>Terrazzo</b>						
353	EG	FB Aufbau 01 UC9	7,95 m <sup>2</sup>	0,24 m <sup>3</sup>	60,00 kg/m <sup>2</sup>	477,00 kg
<b>Summe:</b>			<b>0,239 m<sup>3</sup></b>	<b>60,00 kg/m<sup>2</sup></b>	<b>477,000 kg</b>	
<b>Dachpappe</b>						
361	EG	Dach Aufbau 2 UC9	10,25 m <sup>2</sup>	0,021 m <sup>3</sup>	2,40 kg/m <sup>2</sup>	1,25 kg
361	DG	Dach Aufbau 1 UC9	75,78 m <sup>2</sup>	0,152 m <sup>3</sup>	2,40 kg/m <sup>2</sup>	275,87 kg
<b>Summe:</b>			<b>0,1721 m<sup>3</sup></b>	<b>4,80 kg/m<sup>2</sup></b>	<b>277,120 kg</b>	

Dachziegel grau						
361	DG	Dach Aufbau 1 UC9	75,78 m <sup>2</sup>	0,57 m <sup>3</sup>	11,50 kg/m <sup>2</sup>	1307,21 kg
<b>Summe:</b>			<b>0,568 m<sup>3</sup></b>	<b>11,50 kg/m<sup>2</sup></b>	<b>1307,205 kg</b>	

Tabelle 9.1: Fallbeispiel Einfamilienhaus – Massenermittlung nach Baumaterialien (eigene Darstellung)

FENSTER / TÜREN						
Baustoff / Beschreibung	Material / Produkt	DIN 276	Etage	Breite/Höhe	Fläche	Gewicht
Fenster 01	PVC-Fenster	381	KG	0,5 x 1,2m	0,60 m <sup>2</sup>	19,75 kg
Fenster 02	PVC-Fenster	381	KG	0,5 x 1,2m	0,60 m <sup>2</sup>	19,75 kg
Fenster 03	PVC-Fenster	381	EG	0,5 x 1,4m	0,70 m <sup>2</sup>	22,42 kg
Fenster 04	PVC-Fenster	381	EG	0,5 x 1,4m	0,70 m <sup>2</sup>	22,42 kg
Fenster 05	PVC-Fenster	381	EG	0,75 x 0,4 m	0,30 /m <sup>2</sup>	9,64 kg
Fenster 06	PVC-Fenster	381	EG	0,75 x 1,4 m	1,05 m <sup>2</sup>	29,22 kg
Fenster 07	PVC-Fenster	381	KG	1,0 x 1,0 m	1,00 m <sup>2</sup>	31,20 kg
Fenster 08	PVC-Fenster	381	DG	1,0 x 1,2 m	1,20 m <sup>2</sup>	37,44 kg
Fenster 09	PVC-Fenster	381	EG	1,0 x 1,4 m	1,40 m <sup>2</sup>	36,03 kg
Fenster 10	PVC-Fenster	381	EG	1,0 x 1,4 m	1,40 m <sup>2</sup>	36,03 kg
Fenster 11	PVC-Fenster	381	KG	1,1 x 1,2 m	1,32 m <sup>2</sup>	34,24 kg
Fenster 12	PVC-Fenster	381	KG	1,1 x 1,2 m	1,32 m <sup>2</sup>	34,24 kg
Fenster 13	PVC-Fenster	381	EG	1,2 x 1,4 m	1,68 m <sup>2</sup>	41,47 kg
Fenster 14	PVC-Fenster	381	KG	1,0 x 1,0 m	1,00 m <sup>2</sup>	31,20 kg
Eingangstür	Holztür	381	EG	0,8 x 2,0 m	1,60 m <sup>2</sup>	40,44 kg
Balkontür	Holztür	381	DG	0,8 x 2,0 m	1,60 m <sup>2</sup>	40,44 kg

Tabelle 9.2: Fallbeispiel Einfamilienhaus – Massenermittlung Fenster &amp; Türen (eigene Darstellung)

## 9.2 Fallbeispiel – Massenermittlung nach Bauteilschichten

FUNDAMENT								
Baustoff / Beschreibung	Etage	Beschreibung	DIN 276	Klassifizierung	Masse	Austauschsch. [80a]	Zirkularitätsattribut: Demontageaufwand	Zirkularitätsattribut: Trennbarkeit (Materialanteile im Loop)
<b>Fundament UC9 (Streifenfundament)</b>							<b>Aufwand lt. UMI</b>	<b>Kreislauffähigkeit / Aufwand</b>
Hochlochziegel	KG	Fundament UC9	322	Flachgründungen und Bodenplatten	14718,772 kg	0	sehr hoher Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, extrem aufwendig
Mörtel dunkel	KG	Fundament UC9	322	Flachgründungen und Bodenplatten	2800,204 kg	0	sehr hoher Aufwand	nicht sortenrein trennbar / nicht bewertbar
<b>Summe: 17518,976 kg</b>								
<b>Decke Aufbau 3 UC9</b>							<b>Aufwand lt. UMI</b>	<b>Kreislauffähigkeit / Aufwand</b>
Estrich	KG	Decke Aufbau 3	322	Flachgründungen und Bodenplatten	14883,840 kg	0	mittlerer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
<b>Summe: 14883,840 kg</b>								

Tabelle 9.3: Fallbeispiel – Massenermittlung Bauteilschichten – Kostengruppe 320 „Gründung, Unterbau“ (eigene Darstellung)

AUSSENWÄNDE								
Baustoff / Beschreibung	Etage	Beschreibung	DIN 276	Klassifizierung	Masse	Austauschsch. [80a]	Zirkularitätsattribut: Demontageaufwand	Zirkularitätsattribut: Trennbarkeit (Materialanteile im Loop)
<b>AW Aufbau 1</b>							<b>Aufwand lt. UMI</b>	<b>Kreislauffähigkeit / Aufwand</b>
Gipsputz	KG	AW Aufbau 1	336	Außenwandbekleidungen, innen	1722,263 kg	1	geringer Aufwand	nicht sortenrein trennbar / nicht bewertbar
Hochlochziegel	KG	AW Aufbau 1	331	Tragende Außenwände	40609,249 kg	0	geringer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
Mörtel dunkel	KG	AW Aufbau 1	335	Außenwandbekleidungen, außen	8324,269 kg	0	geringer Aufwand	nicht sortenrein trennbar / nicht bewertbar
Mineralputz	KG	AW Aufbau 1	335	Außenwandbekleidungen, außen	1722,263 kg	1	geringer Aufwand	nicht sortenrein trennbar / nicht bewertbar
<b>Summe: 52378,043 kg</b>								
<b>AW Aufbau 2</b>							<b>Aufwand lt. UMI</b>	<b>Kreislauffähigkeit / Aufwand</b>
Gipsputz	KG	AW Aufbau 2	336	Außenwandbekleidungen, innen	248,940 kg	1	geringer Aufwand	nicht sortenrein trennbar / nicht bewertbar
Hochlochziegel	KG	AW Aufbau 2	331	Tragende Außenwände	5878,027 kg	0	geringer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
Mörtel dunkel	KG	AW Aufbau 2	335	Außenwandbekleidungen, außen	1244,700 kg	0	geringer Aufwand	nicht sortenrein trennbar / nicht bewertbar
Mineralputz	KG	AW Aufbau 2	335	Außenwandbekleidungen, außen	240,642 kg	1	geringer Aufwand	nicht sortenrein trennbar / nicht bewertbar
<b>Summe: 7612,309 kg</b>								

Baustoff / Beschreibung	Etage	Beschreibung	DIN 276	Klassifizierung	Masse	Austauschhä. [80a]	Zirkularitätsattribut: Demontageaufwand	Zirkularitätsattribut: Trennbarkeit (Materialanteile im Loop)
<b>AW Aufbau 3</b>							<b>Aufwand lt. UMI</b>	<b>Kreislauffähigkeit / Aufwand</b>
Gipsputz	EG	AW Aufbau 3	336	Außenwandbekleidungen, innen	1765,800 kg	1	geringer Aufwand	nicht sortenrein trennbar / nicht bewertbar
Hochlochziegel	EG	AW Aufbau 3	331	Tragende Außenwände	41694,462 kg	0	geringer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
Mörtel dunkel	EG	AW Aufbau 3	335	Außenwandbekleidungen, außen	8829,000 kg	0	geringer Aufwand	nicht sortenrein trennbar / nicht bewertbar
Mineralputz	EG	AW Aufbau 3	335	Außenwandbekleidungen, außen	1706,940 kg	1	geringer Aufwand	nicht sortenrein trennbar / nicht bewertbar
<b>Summe: 53996,202 kg</b>								
<b>AW Aufbau 4</b>							<b>Aufwand lt. UMI</b>	<b>Kreislauffähigkeit / Aufwand</b>
Gipsputz	DG	AW Aufbau 4	336	Außenwandbekleidungen, innen	253,206 kg	0	geringer Aufwand	nicht sortenrein trennbar / nicht bewertbar
Gipskarton	DG	AW Aufbau 4	336	Außenwandbekleidungen, innen	304,740 kg	0	geringer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
C-Profil (Metallständerwand)	DG	AW Aufbau 4	336	Außenwandbekleidungen, innen	9,670 kg	0	geringer Aufwand	fast vollständig kreislauffähig
Mineralwolle weich	DG	AW Aufbau 4	336	Außenwandbekleidungen, innen	67,750 kg	0	sehr geringer Aufwand	fast vollständig kreislauffähig
EPS	DG	AW Aufbau 4	336	Außenwandbekleidungen, innen	20,530 kg	0	geringer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
Hochlochziegel	DG	AW Aufbau 4	331	Tragende Außenwände	7971,675 kg	0	geringer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
Mörtel dunkel	DG	AW Aufbau 4	335	Außenwandbekleidungen, außen	1688,040 kg	0	geringer Aufwand	nicht sortenrein trennbar / nicht bewertbar
Mineralputz	DG	AW Aufbau 4	335	Außenwandbekleidungen, außen	326,354 kg	1	geringer Aufwand	nicht sortenrein trennbar / nicht bewertbar
<b>Summe: 10641,965 kg</b>								
<b>AW Aufbau 5</b>							<b>Aufwand lt. UMI</b>	<b>Kreislauffähigkeit / Aufwand</b>
Gipsputz	DG	AW Aufbau 5	336	Außenwandbekleidungen, innen	100,724 kg	0	geringer Aufwand	nicht sortenrein trennbar / nicht bewertbar
Gipskarton	DG	AW Aufbau 5	336	Außenwandbekleidungen, innen	105,698 kg	0	geringer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
C-Profil (Metallständerwand)	DG	AW Aufbau 5	336	Außenwandbekleidungen, innen	3,847 kg	0	geringer Aufwand	fast vollständig kreislauffähig
Mineralwolle weich	DG	AW Aufbau 5	336	Außenwandbekleidungen, innen	17,834 kg	0	sehr geringer Aufwand	fast vollständig kreislauffähig
EPS	DG	AW Aufbau 5	336	Außenwandbekleidungen, innen	5,886 kg	0	geringer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
Hochlochziegel	DG	AW Aufbau 5	331	Tragende Außenwände	2378,306 kg	0	geringer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
Mörtel dunkel	DG	AW Aufbau 5	335	Außenwandbekleidungen, außen	503,618 kg	0	geringer Aufwand	nicht sortenrein trennbar / nicht bewertbar
Mineralputz	DG	AW Aufbau 5	335	Außenwandbekleidungen, außen	129,821 kg	1	geringer Aufwand	nicht sortenrein trennbar / nicht bewertbar
Holzlattung (Unterkonstruktion)	DG	AW Aufbau 5	336	Außenwandbekleidungen, innen	18,031 kg	1	sehr geringer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
Brettschichtholz (behandelt)	DG	AW Aufbau 5	336	Außenwandbekleidungen, innen	49,740 kg	1	sehr geringer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
<b>Summe: 3313,503 kg</b>								

Baustoff / Beschreibung	Etag	Beschreibung	DIN 276	Klassifizierung	Masse	Austauschhä. [80a]	Zirkularitätsattribut: Demontageaufwand	Zirkularitätsattribut: Trennbarkeit (Materialanteile im Loop)
<b>AW Aufbau 6 (Windfang Eingangsbereich)</b>							<b>Aufwand lt. UMI</b>	<b>Kreislauffähigkeit / Aufwand</b>
Fliesen weiß	EG	AW Aufbau 6	336	Außenwandbekleidungen, innen	136,734 kg	1	mittlerer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
Gipskarton	EG	AW Aufbau 6	336	Außenwandbekleidungen, innen	223,508 kg	1	geringer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
Brettschichtholz	EG	AW Aufbau 6	336	Außenwandbekleidungen, innen	157,770 kg	1	geringer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
C-Profil (Metallständerwand)	EG	AW Aufbau 6	332	Nichttragende Außenwand	8,134 kg	1	geringer Aufwand	fast vollständig kreislauffähig
Mineralwolle weich	EG	AW Aufbau 6	335	Außenwandbekleidungen, außen	11,314 kg	1	sehr geringer Aufwand	fast vollständig kreislauffähig
Dampfbremse	EG	AW Aufbau 6	335	Außenwandbekleidungen, außen	1,578 kg	1	sehr geringer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
Brettschichtholz	EG	AW Aufbau 6	335	Außenwandbekleidungen, außen	105,180 kg	1	sehr geringer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
<b>Summe: 788,839 kg</b>								

Tabelle 9.4: Fallbeispiel – Massenermittlung Bauteilschichten – Kostengruppe 330 „Außenwand/vertikale Baukonstruktion, außen“ (eigene Darstellung)

INNENWÄNDE								
Baustoff / Beschreibung	Etag	Beschreibung	DIN 276	Klassifizierung	Masse	Austauschhä. [80a]	Zirkularitätsattribut: Demontageaufwand	Zirkularitätsattribut: Trennbarkeit (Materialanteile im Loop)
<b>IW Aufbau 1</b>							<b>Aufwand lt. UMI</b>	<b>Kreislauffähigkeit / Aufwand</b>
Gipsputz	KG	IW Aufbau 1	345	Innenwandbekleidungen	827,022 kg	0	sehr geringer Aufwand	nicht sortenrein trennbar / nicht bewertbar
Hochlochziegel	KG	IW Aufbau 1	341	Tragende Innenwand	12493,328 kg	0	sehr geringer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
Mörtel dunkel	KG	IW Aufbau 1	345	Innenwandbekleidungen	2658,285 kg	0	sehr geringer Aufwand	nicht sortenrein trennbar / nicht bewertbar
Gipsputz	KG	IW Aufbau 1	345	Innenwandbekleidungen	822,948 kg	0	sehr geringer Aufwand	nicht sortenrein trennbar / nicht bewertbar
<b>Summe: 16801,583 kg</b>								
<b>IW Aufbau 2</b>							<b>Aufwand lt. UMI</b>	<b>Kreislauffähigkeit / Aufwand</b>
Gipsputz	KG	IW Aufbau 2	345	Innenwandbekleidungen	390,258 kg	0	sehr geringer Aufwand	nicht sortenrein trennbar / nicht bewertbar
Hochlochziegel	KG	IW Aufbau 2	341	Tragende Innenwand	1102,814 kg	0	sehr geringer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
Mörtel dunkel	KG	IW Aufbau 2	345	Innenwandbekleidungen	342,954 kg	0	sehr geringer Aufwand	nicht sortenrein trennbar / nicht bewertbar
Gipsputz	KG	IW Aufbau 2	345	Innenwandbekleidungen	390,258 kg	0	sehr geringer Aufwand	nicht sortenrein trennbar / nicht bewertbar
<b>Summe: 2226,284 kg</b>								
<b>IW Aufbau 3</b>							<b>Aufwand lt. UMI</b>	<b>Kreislauffähigkeit / Aufwand</b>
Gipsputz	EG	IW Aufbau 3	345	Innenwandbekleidungen	108,675 kg	0	sehr geringer Aufwand	nicht sortenrein trennbar / nicht bewertbar
Hochlochziegel	EG	IW Aufbau 3	341	Tragende Innenwand	2566,058 kg	0	sehr geringer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
Mörtel dunkel	EG	IW Aufbau 3	345	Innenwandbekleidungen	525,263 kg	0	sehr geringer Aufwand	nicht sortenrein trennbar / nicht bewertbar
Gipsputz	EG	IW Aufbau 3	345	Innenwandbekleidungen	108,675 kg	0	sehr geringer Aufwand	nicht sortenrein trennbar / nicht bewertbar
<b>Summe: 3308,671 kg</b>								

Baustoff / Beschreibung	Etag	Beschreibung	DIN 276	Klassifizierung	Masse	Austauschh. [80a]	Zirkularitätsattribut: Demontageaufwand	Zirkularitätsattribut: Trennbarkeit (Materialanteile im Loop)
<b>IW Aufbau 4</b>							<b>Aufwand lt. UMI</b>	<b>Kreislauffähigkeit / Aufwand</b>
Gipsputz	EG	IW Aufbau 4	345	Innenwandbekleidungen	110,322 kg	0	sehr geringer Aufwand	nicht sortenrein trennbar / nicht bewertbar
Hochlochziegel	EG	IW Aufbau 4	341	Tragende Innenwand	2604,948 kg	0	sehr geringer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
Mörtel dunkel	EG	IW Aufbau 4	345	Innenwandbekleidungen	533,223 kg	0	sehr geringer Aufwand	nicht sortenrein trennbar / nicht bewertbar
Gipsputz	EG	IW Aufbau 4	345	Innenwandbekleidungen	110,322 kg	0	sehr geringer Aufwand	nicht sortenrein trennbar / nicht bewertbar
<b>Summe: 3358,815 kg</b>								
<b>IW Aufbau 5</b>							<b>Aufwand lt. UMI</b>	<b>Kreislauffähigkeit / Aufwand</b>
Fliesen weiß	EG	IW Aufbau 5	345	Innenwandbekleidungen	43,680 kg	0	mittlerer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
Gipskarton	EG	IW Aufbau 5	342	Nichttragende Innenwand	71,400 kg	0	geringer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
Dampfbremse	EG	IW Aufbau 5	342	Nichttragende Innenwand	0,504 kg	0	sehr geringer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
Metallständerwand	EG	IW Aufbau 5	342	Nichttragende Innenwand	2,598 kg	0	geringer Aufwand	fast vollständig kreislauffähig
Mineralwolle weich	EG	IW Aufbau 5	342	Nichttragende Innenwand	3,614 kg	0	sehr geringer Aufwand	fast vollständig kreislauffähig
Gipskarton	EG	IW Aufbau 5	342	Nichttragende Innenwand	71,400 kg	0	geringer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
Fliesen weiß	EG	IW Aufbau 5	345	Innenwandbekleidungen	43,680 kg	0	mittlerer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
<b>Summe: 292,317 kg</b>								
<b>IW Aufbau 6</b>							<b>Aufwand lt. UMI</b>	<b>Kreislauffähigkeit / Aufwand</b>
Gipsputz	EG	IW Aufbau 6	345	Innenwandbekleidungen	404,460 kg	0	sehr geringer Aufwand	nicht sortenrein trennbar / nicht bewertbar
Hochlochziegel	EG	IW Aufbau 6	341	Tragende Innenwand	3529,947 kg	0	sehr geringer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
Mörtel dunkel	EG	IW Aufbau 6	345	Innenwandbekleidungen	625,565 kg	0	sehr geringer Aufwand	nicht sortenrein trennbar / nicht bewertbar
Gipsputz	EG	IW Aufbau 6	345	Innenwandbekleidungen	404,460 kg	0	sehr geringer Aufwand	nicht sortenrein trennbar / nicht bewertbar
<b>Summe: 4964,432 kg</b>								
<b>IW Aufbau 7</b>							<b>Aufwand lt. UMI</b>	<b>Kreislauffähigkeit / Aufwand</b>
Gipskarton	DG	IW Aufbau 7	342	Nichttragende Innenwand	222,488 kg	0	geringer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
C-Profil (Metallständerwand)	DG	IW Aufbau 7	342	Nichttragende Innenwand	8,097 kg	0	geringer Aufwand	fast vollständig kreislauffähig
Mineralwolle weich	DG	IW Aufbau 7	342	Nichttragende Innenwand	18,770 kg	0	sehr geringer Aufwand	fast vollständig kreislauffähig
Gipskarton	DG	IW Aufbau 7	342	Nichttragende Innenwand	222,488 kg	0	geringer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
<b>Summe: 471,842 kg</b>								
<b>IW Fliesen UC9 (Fliesen auf besteh. Innenwand)</b>							<b>Aufwand lt. UMI</b>	<b>Kreislauffähigkeit / Aufwand</b>
Fliesen weiß	EG	Fliesen UC9	345	Innenwandbekleidungen	96,876 kg	0	mittlerer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
<b>Summe: 199,341 kg</b>								

Tabelle 9.5: Fallbeispiel – Massenermittlung Bauteilschichten – Kostengruppe 340 „Innenwand/vertikale Baukonstruktion, innen“ (eigene Darstellung)

DECKE								
Baustoff / Beschreibung	Etage	Beschreibung	DIN 276	Klassifizierung	Masse	Austauschh. [80a]	Zirkularitätsattribut: Demontageaufwand	Zirkularitätsattribut: Trennbarkeit (Materialanteile im Loop)
<b>Decke Aufbau 1 UC9</b>						<b>Aufwand lt. UMI</b>		<b>Kreislauffähigkeit / Aufwand</b>
Vollholz	DG	DeckeAufbau1	352	Deckenbeläge	664,650 kg	0	mittlerer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
Brettschichtholz (Holzträger)	DG	DeckeAufbau1	351	Deckenkonstruktion	550,710 kg	0	geringer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
Stroh	DG	DeckeAufbau1	351	Deckenkonstruktion	359,544 kg	0	geringer Aufwand	ohne Anhaftung/monomateriell, vollständig kreislauffähig
Brettschichtholz	DG	DeckeAufbau1	353	Deckenbekleidung	227,880 kg	0	mittlerer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
Gipsputz	DG	DeckeAufbau1	353	Deckenbekleidung	474,750 kg	0	mittlerer Aufwand	nicht sortenrein trennbar / nicht bewertbar
<b>Summe: 702,630 kg</b>								
<b>Decke Aufbau 2 UC9</b>						<b>Aufwand lt. UMI</b>		<b>Kreislauffähigkeit / Aufwand</b>
Einlageziegel (Hourdis)	EG	DeckeAufbau2	351	Deckenkonstruktion	2273,674 kg	0	nicht bewertbar	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
Stahlträger IP100	EG	DeckeAufbau2	351	Deckenkonstruktion	1506,375 kg	0	sehr hoher Aufwand	fast vollständig kreislauffähig
<b>Summe: 3780,049 kg</b>								
<b>FB Aufbau 01 UC9</b>						<b>Aufwand lt. UMI</b>		<b>Kreislauffähigkeit / Aufwand</b>
Fliesen weiß	EG	FB Aufbau 01	352	Deckenbeläge	30,654 kg	0	mittlerer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
Terrazzo	EG	FB Aufbau 01	352	Deckenbeläge	235,800 kg	0	hoher Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
Schüttung (Sand)	EG	FB Aufbau 01	352	Deckenbeläge	204,360 kg	0	sehr hoher Aufwand	vollständig kreislauffähig
Estrich	EG	FB Aufbau 01	352	Deckenbeläge	1320,480 kg	0	mittlerer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
<b>Summe: 1524,840 kg</b>								
<b>FB Aufbau 2 UC9</b>						<b>Aufwand lt. UMI</b>		<b>Kreislauffähigkeit / Aufwand</b>
Brettschichtholz	KG	FB Aufbau 02	352	Deckenbeläge	200,040 kg	0	hoher Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
<b>Summe: 200,040 kg</b>								
<b>FB Aufbau 03 UC9</b>						<b>Aufwand lt. UMI</b>		<b>Kreislauffähigkeit / Aufwand</b>
Laminat	EG	FB Aufbau 03	352	Deckenbeläge	223,104 kg	1	hoher Aufwand	nicht sortenrein trennbar / nicht bewertbar
EPS (Trittschaldämmung)	EG	FB Aufbau 03	352	Deckenbeläge	16,800 kg	0	geringer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
Trennfolie PVC	EG	FB Aufbau 03	352	Deckenbeläge	46,704 kg	0	sehr geringer Aufwand	nicht sortenrein trennbar / nicht bewertbar
Lattung (Sandgebettet)	EG	FB Aufbau 03	352	Deckenbeläge	60,480 kg	0	geringer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
Schüttung (Sand)	EG	FB Aufbau 03	352	Deckenbeläge	1572,480 kg	0	sehr hoher Aufwand	fast vollständig kreislauffähig
<b>Summe: 1632,960 kg</b>								

Baustoff / Beschreibung	Etage	Beschreibung	DIN 276	Klassifizierung	Masse	Austauschhä. [80a]	Zirkularitätsattribut: Demontageaufwand	Zirkularitätsattribut: Trennbarkeit (Materialanteile im Loop)
<b>FB Aufbau 04 UC9</b>							<b>Aufwand lt. UMI</b>	<b>Kreislauffähigkeit / Aufwand</b>
Parkett	EG	FB Aufbau 04	352	Deckenbeläge	117,915 kg	0	sehr hoher Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
EPS (Trittschalldämmung)	EG	FB Aufbau 04	352	Deckenbeläge	7,861 kg	0	geringer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
Trennfolie PVC	EG	FB Aufbau 04	352	Deckenbeläge	21,854 kg	0	sehr geringer Aufwand	nicht sortenrein trennbar / nicht bewertbar
Lattung (Sandgebettet)	EG	FB Aufbau 04	352	Deckenbeläge	28,300 kg	0	geringer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
Schüttung (Sand)	EG	FB Aufbau 04	352	Deckenbeläge	735,790 kg	0	sehr hoher Aufwand	fast vollständig kreislauffähig
<b>Summe: 764,089 kg</b>								
<b>FB Aufbau 07 UC9</b>							<b>Aufwand lt. UMI</b>	<b>Kreislauffähigkeit / Aufwand</b>
Teppich beige (Nylon)	DG	FB Aufbau 07	352	Deckenbeläge	83,423 kg	8	geringer Aufwand	fast vollständig kreislauffähig
Spanplatte	DG	FB Aufbau 07	352	Deckenbeläge	595,875 kg	1	geringer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
Lattung	DG	FB Aufbau 07	352	Deckenbeläge	186,628 kg	0	geringer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
Mineralwolle weich	DG	FB Aufbau 07	352	Deckenbeläge	46,149 kg	0	sehr geringer Aufwand	fast vollständig kreislauffähig
Dampfbremse (PE-Folie)	DG	FB Aufbau 07	352	Deckenbeläge	4,290 kg	0	sehr geringer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
EPS (Trittschalldämmung)	DG	FB Aufbau 07	352	Deckenbeläge	41,711 kg	0	mittlerer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, extrem aufwendig
Blähton	DG	FB Aufbau 07	352	Deckenbeläge	2621,850 kg	0	hoher Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, extrem aufwendig
Trennfolie (Bituminös)	DG	FB Aufbau 07	352	Deckenbeläge	286,020 kg	0	geringer Aufwand	nicht sortenrein trennbar / nicht bewertbar
Schüttung (Sand)	DG	FB Aufbau 07	352	Deckenbeläge	2478,840 kg	0	sehr hoher Aufwand	fast vollständig kreislauffähig
<b>Summe: 6344,786 kg</b>								

Tabelle 9.6: Fallbeispiel – Massenermittlung Bauteilschichten – Kostengruppe 350 „Decken/Horizontale Baukonstruktionen“ (eigene Darstellung)

DACH								
Baustoff / Beschreibung	Etage	Beschreibung	DIN 276	Klassifizierung	Masse	Austauschhä. [80a]	Zirkularitätsattribut: Demontageaufwand	Zirkularitätsattribut: Trennbarkeit (Materialanteile im Loop)
<b>Dach Aufbau 1 UC9</b>							<b>Aufwand lt. UMI</b>	<b>Kreislauffähigkeit / Aufwand</b>
Dachziegel grau	DG	Dach Aufbau 1	363	Dachdeckung	1324,110 kg	0	geringer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
Dachpappe	DG	Dach Aufbau 1	363	Dachdeckung	276,336 kg	1	sehr geringer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
Spanplatte	DG	Dach Aufbau 1	361	Dachkonstruktionen	1151,400 kg	1	geringer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
EPS (Dach)	DG	Dach Aufbau 1	364	Dachbekleidung	61,312 kg	0	sehr geringer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
Mineralwolle weich	DG	Dach Aufbau 1	364	Dachbekleidung	198,161 kg	0	sehr geringer Aufwand	fast vollständig kreislauffähig
Brettschichtholz (Holzträger)	DG	Dach Aufbau 1	361	Dachkonstruktionen	1202,062 kg	0	sehr geringer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
Dampfbremse (PE-Folie)	DG	Dach Aufbau 1	363	Dachdeckung	10,363 kg	1	sehr geringer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
Gipskarton	DG	Dach Aufbau 1	364	Dachbekleidung	978,690 kg	1	geringer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
<b>Summe: 5202,433 kg</b>								
<b>Dach Aufbau 2 UC9 (Windfang)</b>							<b>Aufwand lt. UMI</b>	<b>Kreislauffähigkeit / Aufwand</b>
Blech	EG	Dach Aufbau 2	363	Dachdeckung	7,995 kg	0	hoher Aufwand	fast vollständig kreislauffähig
Dachpappe	EG	Dach Aufbau 2	363	Dachdeckung	1,230 kg	1	sehr geringer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
Spanplatte	EG	Dach Aufbau 2	363	Dachdeckung	128,125 kg	1	geringer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
Brettschichtholz (Holzträger)	EG	Dach Aufbau 2	361	Dachkonstruktionen	107,010 kg	0	sehr geringer Aufwand	nicht vollständig kreislauffähig, aufwendig
<b>Summe: 244,360 kg</b>								

Tabelle 9.7: Fallbeispiel – Massenermittlung Bauteilschichten – Kostengruppe 360 „Dächer“ (eigene Darstellung)

### 9.3 Material-Cycle-Status von Baustoffen nach Atlas Recycling

In den folgenden Grafiken sind die in Kapitel 3.2.4 beschriebenen Material-Cycle-Status laut Atlas Recycling für unterschiedlicher Baustoffe und Produkte nach Bauteilgruppen dargestellt. Die Farblegenden zu den Qualitätsstufen sind in Abb. 3.6 auf Seite 39 abgebildet. Die Tabellen sind in Abb. B 2.14, B 2.25, B 2.29, B 2.33, B 2.34, B 2.42, B 2.46 sowie B 2.51 im Atlas Recycling zu finden (Seggewies, Riegler-Floors, & Rosen, 2018). Atlas Recycling bezieht sich für die Angaben zur Lebensdauer der unterschiedlichen Materialien auf EPDs und Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BSB - Bundesinstitut für Bau-, Stadt-, und Raumforschung, 2017).

	Material Gründung und Tragwerk	Wärmeleit- fähigkeit [W/(mK)]	Rohdichte [kg/dm³]	Druck-/ Zug- festigkeit [N/mm²]	Brand- verhalten [DIN EN 13501-1]	Material-Cycle-Status	weitere Recycling- potenziale
biotische Materialien	Konstruktionsvollholz (KVH) konventionelle Forstwirtschaft	0,15	3,5–5,5	16–29 <sup>1)</sup>	D-s2 d0 <sup>2)</sup>		
	Brettschichtholz (BSH) konventionelle Forstwirtschaft	0,15	4,1–4,5	24–32 <sup>1)</sup>	D-s2 d0 <sup>3)</sup>		
metallische Materialien	Konstruktionsstahl <sup>4)</sup> (Walzprofile und Grobbleche)	40–57	7,85–7,96	340–730 <sup>4)</sup>	A1		
	Ziegel-Hochlochmauerstein	0,5–0,68	1,2–1,6	4–28	A1		
mineralische Materialien	Kalksandstein-Mauerstein (KS) <sup>5)</sup>	0,5–1,3	1,2–2,2	4–60	A1		
	Porenbeton-Mauerstein <sup>6)</sup> für Außenwände ohne zusätzliche Wärmedämmung	0,08	0,35	2,0	A1		←
	Porenbeton-Mauerstein für Außenwände mit zusätzlicher Wärmedämmung <sup>6) 8)</sup>	0,12	0,5	4,0	A1		←
	Porenbeton-Mauerstein nichttragende Innenwände <sup>6)</sup>	1,4	0,5	–	A1		←
	Konstruktionsbeton C12/15–C50/60 <sup>7) 8)</sup>	2,1	2,0–2,6	12–50 <sup>9)</sup>	A1		

<sup>1)</sup> Die Angaben sind Herstellerangaben, beziehen sich auf ausgewählte Produkte und gelten nicht für die gesamte Produktgruppe.  
<sup>2)</sup> Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung <sup>3)</sup> Bauteile > 20 mm dick <sup>4)</sup> > 380 kg/m³ und > 40 mm dick <sup>5)</sup> nur Zugfestigkeit  
<sup>6)</sup> f<sub>yk, cyl</sub> = charakteristische Festigkeit von Zylindern, 150 mm Durchmesser, 30 mm Länge, Alter 28 Tage <sup>7)</sup> bei Außenwänden zusätzliche Dämmung erforderlich  
<sup>8)</sup> ohne Stahlanteil, Expositionsklasse XC <sup>9)</sup> MLP: RC-Gesteinskörnung Typ 1, max. Anteil an RC-Gesteinskörnung nach DIN 1045 nach der Richtlinie des DAfStB

Abb. 9.1: Anhang 9.3: Atlas Recycling Material-Cycle-Status – Abbildung B2.14 (Seggewies, Riegler-Floors, & Rosen, 2018)

Material	Brandverhalten [DIN EN 13501-1]	Lebensdauer	Material-Cycle-Status	weitere Recy- clingpotenziale	
<b>biotische Materialien</b>	Massivholzbretter/Lattungen konventionelle Forstwirtschaft	D-s2 d0 <sup>1)</sup>	30–40 <sup>2)</sup>	MRC MLP MEoL	
	Lärchenholzschindeln konventionelle Forstwirtschaft	E	> 50	MRC MLP MEoL	
	Thermoholz (TMT) <sup>3)</sup> konventionelle Forstwirtschaft	D-s2 d0 <sup>1)</sup>	40 <sup>3)</sup>	MRC MLP MEoL	
	Holzwerkstoffplatte konventionelle Forstwirtschaft	D-s2 d2-d0 <sup>4)</sup>	40	MRC MLP MEoL	
	Reet (Schilfrohr) <sup>5)</sup>	E	30	MRC MLP MEoL	
<b>metallische Materialien</b>	Stahlprofiltafel (verzinkt, polyesterbeschichtet)	A1	40–45 <sup>6)</sup>	MRC MLP MEoL	
	Edelstahl/wetterfester Baustahl, Blech <sup>6)</sup>	A1	45/> 50 <sup>7)</sup>	MRC MLP MEoL	
	Aluminiumblech, lackiert	A1	> 50	MRC MLP MEoL	
	Zinkblech	A1	45/> 50 <sup>7)</sup>	MRC MLP MEoL	
	Kupferblech	A1	> 50	MRC MLP MEoL	
	Recycling-Kupferblech <sup>8)</sup>	A1	> 50	MRC MLP MEoL	
	<b>fossiles Material</b>	Polycarbonat-Stegplatte <sup>9)</sup>	B-s2-s1 d0	30	MRC MLP MEoL
Naturwerksteinplatte		A1	> 50	MRC MLP MEoL	
Faserzement- und Glasfaserbetonplatte		A2	> 50	MRC MLP MEoL	
Vormauerklinker <sup>9)</sup>		A1	> 50	MRC MLP MEoL	
Profilbauglas <sup>9)</sup>		A1	> 50	MRC MLP MEoL	
Glaskeramik <sup>9)</sup>		A1	> 50	MRC MLP MEoL	

<sup>1)</sup> Die Angaben sind Herstellerangaben, beziehen sich auf ausgewählte Produkte und gelten nicht für die gesamte Produktgruppe. Die veröffentlichten Tabellenwerte sind Richtwerte, die von Einzelfällen zum Teil weit abweichen können. <sup>2)</sup> > 350 kg/m<sup>3</sup> und > 20 mm dick <sup>3)</sup> Lebensdauern in Abhängigkeit von Holzart und Bearbeitung/Behandlung <sup>4)</sup> Lebensdauer als Fassadenbekleidung nicht bekannt. Vergleichbarkeit ermittelt über die Dauerhaftigkeitsklasse geeigneter Laubbölder <sup>5)</sup> > 390 kg/m<sup>3</sup> in Abhängigkeit von der Dicke des Materials und der Endanwendung (Belüftung der Konstruktion) <sup>6)</sup> je nach Einsatzbereich <sup>7)</sup> MRC und MLP angenommen wie Konstruktionsstahl allgemein <sup>8)</sup> 45 Jahre als vorgehängte hinterlüftete Fassade (VHF), sonstige Anwendung > 50 Jahre und in Abhängigkeit von der Blechdicke

Abb. 9.2: Anhang 9.3: Atlas Recycling Material-Cycle-Status – Abbildung B2.25 (Seggewies, Riegler-Floors, & Rosen, 2018)

Material Wand, Decke, Dach: Bauplatten außen/innen	Wärmeleit- fähigkeit [W/(m K)]	Dampfdiffu- sionswider- standszahl [μ]	Brandverhalten [DIN EN 13501-1]	Material-Cycle-Status	weitere Recycling- potenziale
Massivholz-Diagonalplatte *)	0,13	207/22 <sup>1)</sup>	D-s2 d0-d2 <sup>2)</sup>	0% 20% 40% 60% 80% 100% MRC MLP MEoL	
OSB-Platte konventionelle Forstwirtschaft E1	0,13	200/150	D-E-s2 d0-d2 <sup>3)</sup>	MRC MLP MEoL	
OSB-Platte *) nachhaltige Forstwirtschaft E1	0,13	200/300	D-E-s2 d0-d2 <sup>3)</sup>	MRC MLP MEoL	
Spanplatte konventionelle Forstwirtschaft E1	0,12	15/50	D-E-s2 d0-d2 <sup>3)</sup>	MRC MLP MEoL	
Spanplatte *) nachhaltige Forstwirtschaft E1	0,1–0,18 <sup>4)</sup>	50/100	D-s2 d0 <sup>5)</sup>	MRC MLP MEoL	
Holzfaserverplatte *) anteilig nachhaltige Forstwirtschaft für außenseitige Beplankungen E1	0,09	11	D-s2 d0 <sup>6)</sup>	MRC MLP MEoL	
Holzfaserverplatte *) anteilig nachhaltige Forstwirtschaft für inenseitige Beplankungen E1	0,18	185	E-s2 d0-d2 <sup>7)</sup>	MRC MLP MEoL	
Strohbauplatte *)	0,10	10/10	E	MRC MLP MEoL	← 
Gipskartonplatte	0,25	10/4	A2-s1 d0	MRC MLP MEoL	
Lehmbauplatte *)	0,35	5–10	A1 <sup>8)</sup>	MRC MLP MEoL	

biotische Materialien

mineralische Materialien

\*) Die Angaben sind Herstellerangaben, beziehen sich auf ausgewählte Produkte und gelten nicht für die gesamte Produktgruppe.  
<sup>1)</sup> 10% Holzfeuchte/60% Holzfeuchte <sup>2)</sup> je nach Einbauart bei 30 mm Dicke <sup>3)</sup> je nach Einbauart und Dicke <sup>4)</sup> in Abhängigkeit von der Rohdichte <sup>5)</sup> bei Dicke 22 mm  
<sup>6)</sup> bei 15 mm Dicke <sup>7)</sup> je nach Einbauart bei 8 mm Dicke <sup>8)</sup> raumseitig nicht brennbar

Abb. 9.3: Anhang 9.3: Atlas Recycling Material-Cycle-Status – Abbildung B2.29 (Seggewies, Riegler-Floors, & Rosen, 2018)

	Material Fußbodenunterkonstruktionen	Wärmeleit- fähigkeit [W/(m K)]	Dampfdiffusions- widerstandszahl [μ]	Brand- verhalten [DIN EN 13501-1]	Lebens- dauer	Material-Cycle-Status	weitere Recycling- potenziale
biotisches Material	OSB-Platte *) anteilig nachhaltige Forstwirtschaft E1	0,13	200/300	D <sub>fl</sub> -s1-E <sup>1)</sup>	> 50 <sup>2)</sup>		
	Gussasphaltestrich <sup>3)</sup>	0,7	50000	B <sub>fl</sub> -s1	> 50 <sup>4)</sup>		
fossiles Material	Gipskartonplatte	0,25	10/4	A2-s1	> 50 <sup>2)</sup>		
	Estrichziegel *)	0,67	200/120000 <sup>5)</sup>	A1	> 50 <sup>2)</sup>		

Für weitere Plattenwerkstoffe aus biotischem Material siehe Abb. B 2.29 (S. 82)

\*) Die Angaben sind Herstellerangaben, beziehen sich auf ausgewählte Produkte und gelten nicht für die gesamte Produktgruppe. Die veröffentlichten Tabellenwerte sind Richtwerte, die von Einzelfällen zum Teil weit abweichen können. <sup>1)</sup> je nach Rohdichte, Einbauart und Dicke <sup>2)</sup> als Trockenestrich <sup>3)</sup> MEoL: Angenommen wurden die Verwertungsquoten der Fraktion Straßenaufbruch. <sup>4)</sup> als Sichtoberfläche <sup>5)</sup> unglasiert/glasiert

Abb. 9.4: Anhang 9.3: Atlas Recycling Material-Cycle-Status – Abbildung B2.33 (Seggewies, Riegler-Floors, & Rosen, 2018)

	Material Boden, Decke: Oberflächen	Brandverhalten [DIN EN 13501-1]	Lebensdauer	Material-Cycle-Status	weitere Recycling- potenziale
biotische Materialien	Massivholzdielen	D <sub>fl</sub> -s1-C <sub>fl</sub> -s1 <sup>1)</sup>	> 50		➔
	Mehrschichtparkett	D <sub>fl</sub> -s1-C <sub>fl</sub> -s1 <sup>2)</sup>	40		
	Linoleum *)	C <sub>fl</sub> -s1	10		
fossiles Material	Nylon-Teppichfliese *)	B <sub>fl</sub> -s1 <sup>3)</sup>	10		➔

\*) Die Angaben sind Herstellerangaben, beziehen sich auf ausgewählte Produkte und gelten nicht für die gesamte Produktgruppe. Die veröffentlichten Tabellenwerte sind Richtwerte, die von Einzelfällen zum Teil weit abweichen können.

<sup>1)</sup> je nach Holzart und Dicke. C<sub>fl</sub>-s1 erreichen Massivholzböden aus Eiche (> 650 kg/m<sup>3</sup>), Buche (> 680 kg/m<sup>3</sup>) oder Fichte (> 450 kg/m<sup>3</sup>). <sup>2)</sup> je nach Holzart und Dicke. C<sub>fl</sub>-s1 erreichen Mehrschicht-Parkettböden mit einer Nutzschicht aus Eiche, wenn sie in einer Stärke von mehr als 20 mm verbaut werden <sup>3)</sup> unverklebt geprüft

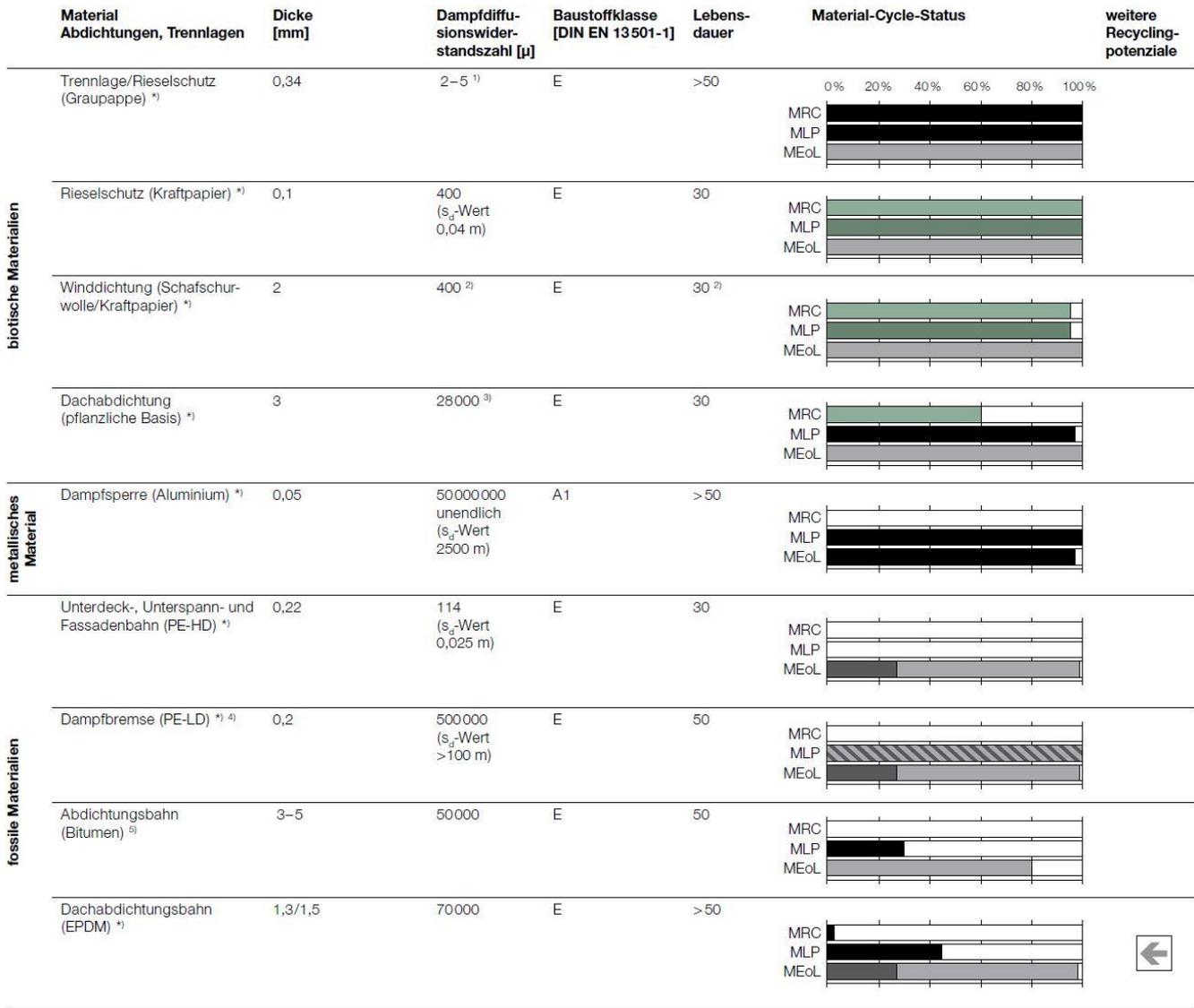
Abb. 9.5: Anhang 9.3: Atlas Recycling Material-Cycle-Status – Abbildung B2.34 (Seggewies, Riegler-Floors, & Rosen, 2018)

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

Material Dämmungen	Anwendungsgebiet Kurzeichen [nach DIN 4108-10]	Wärmeleitfähigkeit [W/(mK)]	Rohdichte [kg/dm³]	Dampfdiffusionswiderstandszahl [μ]	Baustoffklasse [DIN EN 13501-1]	Lebensdauer	Material-Cycle-Status	weitere Recyclingpotenziale		
biologische Materialien	Holzfaserdämmplatte (Lignin gebunden) *)	DAD, DZ, DI, DEO, WH, WTR	0,04	0,16	5	E	> 50	MRC: 0% MLP: 0% MEoL: 0%	↗	
	Holzspandämmung mit Soda und Molke *)	DZ, DI, WH	0,049	0,07	2	E	30	MRC: 0% MLP: 0% MEoL: 0%	↗	
	Korkdämmplatte *)	DAD, DAA, DZ, DI, DEO, WAB, WAP, WZ, WH, WI, WTR	0,037	0,11	5-10	E	> 50	MRC: 0% MLP: 0% MEoL: 0%	↗	
	Korkdämmgranulat *)	DZ, DEO, DES, WH, WI	0,045	0,125	5-10 <sup>1)</sup>	E	> 50 <sup>2)</sup>	MRC: 0% MLP: 0% MEoL: 0%	↗	
	Zelluloseflocken, boratfrei *)	DAD, DZ, DI, WH, WI, WTR	0,039-0,042 <sup>3)</sup>	0,03-0,06	2	B s2 d0 <sup>4)</sup>	50	MRC: 0% MLP: 0% MEoL: 0%	↗	
	Hanfasermatte mit PLA-Stützfaser *)	DAD, DZ, DI, WAB, WH, WI, WTH, WTR	0,04	0,028-0,046	1-2	E	50	MRC: 0% MLP: 0% MEoL: 0%	↗	
	Jutefasermatte mit PLA-Stützfaser *)	DZ, DI, WAB, WH, WI, WTR	0,038	0,034-0,04	1-2	E	50	MRC: 0% MLP: 0% MEoL: 0%	↗	
	Kokosfaserdämmung	DZ, DI, WH, WI, WTR	0,045-0,05	0,05-0,14	1-2	E	50	MRC: 0% MLP: 0% MEoL: 0%	↗	
	Schilfrohrdämmmatte	DI, DEO, DES, WAB, WAP, WI	0,061	0,19-0,225	1-2	E	20-30	MRC: 0% MLP: 0% MEoL: 0%	↗	
	Seegraswolle *)	DZ, DI, DEO, DES, WH, WI, WTR	0,039	0,065-0,075	1-2	E	> 50	MRC: 0% MLP: 0% MEoL: 0%	↗	
Schafschurwolle *)	DZ, DI, DEO, WH, WI, WTR	0,039	0,018	1	E s1, d0	> 50	MRC: 0% MLP: 0% MEoL: 0%	↗		
fossiles Material	Polystyrol Hartschaum (EPS)	DAD, DAA, DZ, DI, DEO, DES, WAB, WAP, WAA, WZ, WI	0,035-0,045	0,015-0,03	20-100	E	50	MRC: 0% MLP: 0% MEoL: 0%	↗	
	Blähton	DEO, DES	0,1-0,16	0,3-0,8	3	A1	> 50	MRC: 0% MLP: 0% MEoL: 0%	↘	
	mineralische Materialien	Schaumglasdämmplatte	DAD, DAA, DI, DEO, WAB, WAA, WAP, WZ, WI, WTR, PW, PB	0,038-0,042	0,1-0,12	unendlich	A1	> 50 <sup>5)</sup>	MRC: 0% MLP: 0% MEoL: 0%	↘
		Schaumglasschotter *)	PW, PB	0,103	0,16-0,19	2-4	A1	> 50	MRC: 0% MLP: 0% MEoL: 0%	↘
		Glaswolle (KMF) *)	DZ, WH, WI	0,035	0,018-0,021	1	A1	50	MRC: 0% MLP: 0% MEoL: 0%	↘

\*) Die Angaben sind Herstellerangaben, beziehen sich auf ausgewählte Produkte und gelten nicht für die gesamte Produktgruppe.  
Die veröffentlichten Tabellenwerte sind Richtwerte, die von Einzelfällen zum Teil weit abweichen können. <sup>1)</sup> keine Angabe vom Hersteller, angenommen in Anlehnung an Kork aus Neumaterial <sup>2)</sup> angepasst an Korkplatte <sup>3)</sup> 0,039 W/(mK) als Einblasdämmung, 0,042 W/(mK) gesprüht <sup>4)</sup> bei Einbau 40-100 mm, > 100 mm <sup>5)</sup> vergleichbar mit Schaumglasschotter

Abb. 9.6: Anhang 9.3: Atlas Recycling Material-Cycle-Status – Abbildung B2.42 (Seggewies, Riegler-Floors, & Rosen, 2018)



\*) Die Angaben sind Herstellerangaben, beziehen sich auf ausgewählte Produkte und gelten nicht für die gesamte Produktgruppe. Die veröffentlichten Tabellenwerte sind Richtwerte, die von Einzelfällen zum Teil weit abweichen können.  
<sup>1)</sup> in Anlehnung an Holzfaserplatte im Allgemeinen <sup>2)</sup> in Anlehnung an Kraftpapier <sup>3)</sup> in Anlehnung an ein vergleichbares Produkt desselben Herstellers <sup>4)</sup> MLP: Möglichkeit eines Anteils an Recyclingmaterial (vgl. Produktionen anderer Produkte) naheliegend (Einschätzung der Autoren) <sup>5)</sup> MLP nach Herstellerangabe, alle anderen Angaben allgemein

Abb. 9.7: Anhang 9.3: Atlas Recycling Material-Cycle-Status – Abbildung B2.46 (Seggewies, Riegler-Floors, & Rosen, 2018)

## 10 Literaturverzeichnis

- Achatz, A., Margelik, E., Romm, T., Kasper, T., & Jäger, D. (2021). *Kreislaufbauwirtschaft: Projekt-Endbericht*. Wien: Umweltbundesamt.
- Austrian Standards International. (2021). *ÖNORM EN 15643: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Allgemeine Rahmenbedingungen zur Bewertung von Gebäuden und Ingenieurbauwerken*. Wien: Austrian Standards International.
- Austrian Standards International. (2022). *ÖNORM EN 17472: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der Nachhaltigkeit von Ingenieurbauwerken - Rechenverfahren*. Wien: Austrian Standards International.
- Austrian Standards International. (2024). *ÖNORM EN 15978: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der Umwelleistung von Gebäuden - Anforderungen und Anleitungen*. Wien: Austrian Standards International.
- BBSR – Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. (2020). *Umweltfußabdruck von Gebäuden in Deutschland*. Von <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2020/bbsr-online-17-2020.html> abgerufen
- BBSR - Bundesinstitut für Bau-, Stadt-, und Raumforschung. (2017). *Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen*.
- BBSR - Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung. (2024). *Endbericht - Fortentwicklung und Evaluierung des BNB-Kriteriensteckbriefs 4.1.4 Rückbau, Trennung, Verwertung*. Berlin.
- BMF - Bundesministerium für Finanzen. (2015). *313. Verordnung des Bundesministers für Finanzen: Voranschlags- und Rechnungsabschlussverordnung 2015 - VRV 2015 - Anlagen*.
- BMK – Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. (2022). *Die österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie*.
- BMK - Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. (2024). *Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich. Statusbericht 2024 für das Referenzjahr 2022*. Von [https://www.bmk.gv.at/themen/klima\\_umwelt/abfall/aws/bundes\\_awp/bawp2023.html](https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/abfall/aws/bundes_awp/bawp2023.html) abgerufen

BMK – Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. (2024). *Die österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie: erster Fortschrittsbericht Juni 2024*.

BMLFUW - Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. (2015). *Recycling-Baustoffverordnung*.

Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union. (2020). *über die Einrichtung eines Rahmens zur Erleichterung nachhaltiger Investitionen und zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/2088 (No. Verordnung (EU) 2020/852)*. Amtsblatt der Europäischen Union.

Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union. (2021). *Europäisches Klimagesetz (No. Verordnung (EU) 2021/1119)*. Amtsblatt der Europäischen Union.

Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e. V. (2023). *DGNB System Kriterienkatalog Gebäude Neubau Version 2023*. Abgerufen am 21. Juli 2023 von DGNB: Das DGNB System für Neubau: <https://www.dgnb.de/de/zertifizierung/gebaeude/neubau>

Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e. V. (2024). *Grundlegendes Qualitätsverständnis und DGNB Zirkularitätsindex*. Abgerufen am 5. Oktober 2024 von Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen - Zirkularitätsindizes: <https://www.dgnb.de/de/nachhaltiges-bauen/zirkulaeres-bauen/zirkularitaetsindizes-fuer-bauwerke>

Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V. (2019). *Circular Economy Report 2019*. Von <https://www.dgnb.de/de/dgnb-richtig-nutzen/publikationen-und-downloads> abgerufen

Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V. (2023). *DGNB System – Kriterienkatalog Gebäude Neubau Version 2023 - TEC 1.6 Zirkuläres Bauen*.

Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V. (o. D.). *Anleitung: Begleitdokument zum DGNB Gebäuderessourcenpass*. Abgerufen am 28. September 2024 von DGNB: Der Gebäuderessourcenpass der DGNB: <https://www.dgnb.de/de/nachhaltiges-bauen/zirkulaeres-bauen/gebaeuderessourcenpass>

Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V. (o. D.). *Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen - Über die DGNB*. Abgerufen am 12. Oktober 2024 von <https://www.dgnb.de/de/dgnb/ueber-die-dgnb>

- Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V. (o. D.). *DGNB: Zirkuläres Bauen im DGNB System*. Abgerufen am 18. Oktober 2024 von <https://www.dgnb.de/de/nachhaltiges-bauen/zirkulaeres-bauen/im-dgnb-system>
- Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V. (o.D.). *Der Gebäude-ressourcenpass der DGNB*, 1.2. Abgerufen am 27. Dezember 2024 von <https://www.dgnb.de/de/nachhaltiges-bauen/zirkulaeres-bauen/gebaeuderessourcenpass>
- DIN - Deutsches Institut für Normung. (2018). *DIN 276: Kosten im Bauwesen*.
- DIN - Deutsches Institut für Normung. (2021). *DIN 277: Grundflächen und Rauminhalte im Hochbau*.
- Ellen MacArthur Foundation. (1. Januar 2015). *Growth within: A circular economy vision for a competitive Europe*. Abgerufen am 11. 05 2024 von [www.ellenmacarthurfoundation.org](http://www.ellenmacarthurfoundation.org):  
<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/growth-within-a-circular-economy-vision-for-a-competitive-europe>
- Ellen MacArthur Foundation. (2019). *Circularity Indicators - An Approach to Measuring Circularity - Methodology*. Abgerufen am 25. Mai 2024 von Ellen MacArthur Foundation - Material Circularity Indicator (MCI):  
<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/material-circularity-indicator>
- Ellen MacArthur Foundation. (o. D.). *About us - What we do*. Abgerufen am 25. Mai 2024 von <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/about-us/what-we-do>
- Europäische Kommission. (2019). *Der Europäische Grüne Deal (No. COM(2019)640 final)*.
- Europäische Kommission. (2020). *Der europäische Grüne Deal - Renovierungswelle*. doi:10.2833/26597
- Europäische Kommission. (2020). *Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft Für ein saubereres und wettbewerbsfähigeres Europa (No. COM(2020) 98 final)*.
- Europäische Kommission. (2021). *zur Ergänzung der Verordnung (EU) 2020/852 des Europäischen Parlaments und des Rates durch Festlegung der technischen Bewertungskriterien (No. Verordnung (EU) 2021/2139)*.
- Europäische Kommission. (2023). *zur Ergänzung der Verordnung (EU) 2020/852 des Europäischen Parlaments und des Rates durch Festlegung der technischen Bewertungskriterien (No. Verordnung (EU) 2023/2486)*.

- Europäische Union. (o. D.). *European Green Deal - Strategie - Chemikalienstrategie*. (E. Union, Herausgeber) Abgerufen am 9. November 2024 von [https://environment.ec.europa.eu/strategy/chemicals-strategy\\_en?prefLang=de&etrans=de](https://environment.ec.europa.eu/strategy/chemicals-strategy_en?prefLang=de&etrans=de)
- European Commission. (2020). *Leading the way to a global circular economy: state of play and outlook (No. SWD(2020) 100 final)*.
- European Commission, Directorate-General for Environment. (2021). *Level(s), Putting circularity into practice*. Publications Office of the European Union.
- Figl, H., Fellner, M., Schneider-Marín, P., & Nemeth, I. (2024). *Endbericht - Fortentwicklung und Evaluierung des BNB-Kriteriensteckbriefs 4.1.4 Rückbau, Trennung, Verwertung*. BBSR - Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung.
- GlobalABC. (2020). *2019 Global Status Report for Buildings and construction*.
- Hertwich, E., Lifset, R., Pauliuk, S., Heeren, N., Ali, S., Tu, Q., . . . Wolfram, P. (2019). *Resource Efficiency and Climate Change: Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future*. doi:10.5281/zenodo.3542681
- IBO - Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH. (o.D.). *Recycling-Bauprodukte – ein Beitrag zu den Umweltzielen*. Abgerufen am 11. Februar 2025 von <https://www.ibo.at/wissensverbreitung/ibomagazin-online/ibomagazin-artikel/data/recycling-bauprodukte-ein-beitrag-zu-den-umweltzielen>
- ISO - Internationale Organisation für Normung. (2024). *ISO 59020:2024: Circular economy — Measuring and assessing circularity performance*.
- Madaster Foundation GmbH. (o. D.). *Introducing Madaster Foundation*. Abgerufen am 23. Mai 2024 von <https://madasterfoundation.org/>
- Madaster Foundation GmbH. (o.D.). *Madaster Platform*. Abgerufen am 11. Februar 2025 von <https://platform.madaster.com/>
- Madaster Germany GmbH. (21. Juni 2021). *Madaster Zirkularitätsindikator*. (M. G. GmbH, Hrsg.) Abgerufen am 4. Juni 2024 von Zirkularität: <https://docs.madaster.com/de/de/platform-pages/building/circularity.html>
- Madaster Germany GmbH. (2024). *Madaster Benutzerhandbuch*. Abgerufen am 4. Juni 2024 von Madaster: Home - Handbücher: <https://docs.madaster.com/de/de/resources/downloads>
- McDonough, W., & Braungart, M. (2002). *Cradle to cradle: Remaking the way we make things*. New York: North Point Press.

OIB - Österreichisches Institut für Bautechnik. (2023). *OIB-Grundlagendokument: zur Ausarbeitung einer OIB-Richtlinie 7 Nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen*.

Rosen, A. (1. Dezember 2021). Urban Mining Index – Planungs- und Bewertungsinstrument für zirkuläres Bauen. *Bauphysik*, 43(6), 357-365. doi:10.1002/bapi.202100035

Rosen, A. (2021). *Urban Mining Index : Entwicklung einer Systematik zur quantitativen Bewertung der Kreislaufkonsistenz von Baukonstruktionen in der Neubauplanung*. Stuttgart : Fraunhofer IRB Verlag.

Seggewies, J., Riegler-Floors, P., & Rosen, A. (2018). *Atlas Recycling*. doi:10.11129/9783955534165

# 11 Abbildungsverzeichnis

ABB. 1.1: ÖSTERREICHS ZUSAMMENSETZUNG VON BAU- UND ABBRUCHABFÄLLEN (BMK - BUNDESMINISTERIUM FÜR KLIMASCHUTZ, UMWELT, ENERGIE, MOBILITÄT, INNOVATION UND TECHNOLOGIE, 2024) .....	8
ABB. 1.2: RESEARCHDESIGN – ZIRKULARITÄTBEWERTUNG IM BAUWESEN (EIGENE DARSTELLUNG) .....	11
ABB. 2.1: EU GRÜNER DEAL 2019 .....	14
ABB. 2.2: SCHLÜSSELBEREICHE FÜR DIE UMSETZUNG EINER KREISLAUFWIRTSCHAFT IM ÖSTERREICHISCHEN BAUWESEN .....	24
ABB. 2.3: ÖSTERREICHS PROZENTUELLE ZIRKULÄRE NUTZUNGSRATE WIEDERVERWENDETER STOFFE GEMESSEN AM GESAMTEN MATERIALEINSATZ LAUT EUROSTAT .....	30
ABB. 3.1: SCHRITTE DES BEWERTUNGSPROZESSES (AUSTRIAN STANDARDS INTERNATIONAL, 2022).....	33
ABB. 3.2: INFORMATIONSMODULE LT. ÖNORM EN 15643 .....	35
ABB. 3.3: BETRACHTUNGSZEITRAUM IM VERHÄLTNIS ZUR GEFORDERTEN NUTZUNGSDAUER DES BEWERTUNGSGEGENSTANDES (AUSTRIAN STANDARDS INTERNATIONAL, 2022) .....	35
ABB. 3.4: ABLAUF EINER ZIRKULARITÄTBEWERTUNG LAUT ISO 59020 .....	37
ABB. 3.5: SYSTEMATIK DES DATENEINGANGS BEI DER ZIRKULARITÄTBEWERTUNG ZUFOLGE ISO 59020 .....	39
ABB. 3.6: ATLAS RECYCLING – MATERIAL-CYCLE-STATUS MIT MASSEANTEILEN FÜR MRC, MLP UND MEOL .....	39
ABB. 3.7: ATLAS RECYCLING – MATERIAL-CYCLE-STATUS – WEITERE RECYCLINGPOTENZIALE].....	40
ABB. 3.8: ATLAS RECYCLING – END-OF-LIFE-SZENARIEN VON WERTSTOFFEN (SEGGEWIES, RIEGLER-FLOORS, & ROSEN, 2018)] .....	41
ABB. 4.1: BERECHNUNGSSYSTEMATIK DER KREISLAUFPOTENZIALE NACH QUALITÄTSSSTUFEN (ROSEN, 2021) .....	42
ABB. 4.2: SYSTEMGRENZEN DES URBAN MINING INDEX (ROSEN, 2021) .....	45
ABB. 4.3: BERECHNUNGSEBENEN UMI (ROSEN, 2021) .....	46
ABB. 4.4: UMI-BEWERTUNGSPARAMETER MIT EINHEITEN UND EIGENSCHAFTEN .....	46
ABB. 4.5: BERECHNUNGSPARAMETER DER KREISLAUFPOTENZIALE FÜR PRE-USE UND POST-USE (ROSEN, 2021) .....	48
ABB. 4.6: GRENZWERTE FÜR SCHADSTOFFEN LAUT UMI .....	49
ABB. 4.7: QUALITÄTSSSTUFEN ALS VARIABLEN IN DEN JEWEILIGEN KREISLÄUFEN (ROSEN, 2021) .....	49
ABB. 4.8: MCR EINER SPANNPLATTE (ROSEN, 2021).....	50
ABB. 4.9: MLP EINER SPANNPLATTE (ROSEN, 2021) .....	51
ABB. 4.10: FAKTOR $F_w$ DES EINGANGSPARAMETER ARBEITSAUFWAND (ROSEN, 2021).....	52
ABB. 4.11: FAKTOR $F_v$ DES EINGANGSPARAMETERS WERT (ROSEN, 2021).....	52

ABB. 4.12: WICHTUNG DER LOOPS UND LEBENSZYKLUSPHASEN IM UMI AUF GEBÄUDEEBENE (ROSEN, 2021) .....	53
ABB. 5.1: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER STOFFSTRÖME (MADASTER GERMANY GMBH, 2021) .....	58
ABB. 5.2: MESSMETHODE DES GEWICHTETEN DURCHSCHNITTS (MADASTER GERMANY GMBH, 2021) .....	60
ABB. 5.3: KORREKTURFAKTOREN FÜR DEN MADASTER ZI-SCORE (MADASTER GERMANY GMBH, 2021) .....	60
ABB. 5.4: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER STOFFSTRÖME INKLUSIVE MCI-INDIKATOREN (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2019).....	62
ABB. 5.5: AUFBAU DES MCI AUF UNTERNEHMENSEBENE (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2019) .....	65
ABB. 6.1: DGNB-ZI – DER GEBÄUDERESSOURCENPASS ALS DATENBASIS FÜR DEN ZIRKULARITÄTSINDIKATOREN.....	71
ABB. 6.2: DGNB-ZI – VORHANDENE ANWENDUNGSFÄLLE INKLUSIVE GEWICHTUNGSFAKTOR PRO TEILINDIKATOR.....	73
ABB. 6.3: DGNB-ZI – BETRACHTUNGSEBENEN UND INFORMATIONSGRUNDLAGEN (DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR NACHHALTIGES BAUEN – DGNB E. V., 2024) .....	74
ABB. 6.4: DGNB-ZIRKULARITÄTSINDEX – NUTZUNGSDAUER DER GEBÄUDESCHICHTEN .....	80
ABB. 6.5: DGNB-GEBÄUDEZERTIFIZIERUNG – GRUNDSTRUKTUR UND WICHTUNG DER EINGEHENDEN QUALITÄTEN .....	82
ABB. 6.6: DGNB-GEBÄUDEZERTIFIZIERUNG – BEEINFLUSSBARKEIT DER PROJEKTPARAMETER IN DER VORZERTIFIZIERUNG (DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR NACHHALTIGES BAUEN – DGNB E.V., 2023).....	83
ABB. 7.1: FALLBEISPIEL - 3D-GEBÄUDEMODELL DES UNTERSUCHTEN BAUWERKS, SOFTWARE ARCHICAD 26 (EIGENE DARSTELLUNG).....	86
ABB. 7.2: FALLBEISPIEL - GRUNDRISS 1. KELLERGESCHOß, SOFTWARE ARCHICAD 26, (EIGENE DARSTELLUNG) .....	87
ABB. 7.3: FALLBEISPIEL - GRUNDRISS ERDGESCHOSS, SOFTWARE ARCHICAD 26, (EIGENE DARSTELLUNG).....	87
ABB. 7.4: FALLBEISPIEL - GRUNDRISS 1. DACHGESCHOSS, SOFTWARE ARCHICAD 26, (EIGENE DARSTELLUNG) .....	88
ABB. 7.5: FALLBEISPIEL - GEBÄUDESCHNITT S10-S10, SOFTWARE ARCHICAD 26, (EIGENE DARSTELLUNG).....	88
ABB. 7.6: FALLBEISPIEL EINFAMILIENHAUS – GRAFISCHE DARSTELLUNG DER MASSEANTEILE DER VERBAUTEN BAUSTOFFGRUPPEN, (EIGENE DARSTELLUNG) .....	91
ABB. 7.7: FALLBEISPIEL EINFAMILIENHAUS – BESTIMMUNG DES ZIRKULARITÄTSATTRIBUTS „DEMONTAGEFÄHIGKEIT“ (DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR NACHHALTIGES BAUEN – DGNB E. V., 2024).....	92
ABB. 7.8: FALLBEISPIEL EINFAMILIENHAUS – BESTIMMUNG DES ZIRKULARITÄTSATTRIBUTS „TRENNBARKEIT“ (DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR NACHHALTIGES BAUEN – DGNB E. V., 2024) .....	93

ABB. 7.9: FALLBEISPIEL UMI – AUFBAU DER INNENWAND IW07 (SOFTWARE: EXCEL-TOOL UMI, BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL).....	98
ABB. 7.10: FALLBEISPIEL UMI – MATERIALERFASSUNG DES KONSTRUKTIVEN ELEMENTS GIPSKARTONPLATTE (SOFTWARE: EXCEL-TOOL UMI, BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL) .....	99
ABB. 7.11: FALLBEISPIEL UMI – IW07 – MATERIAL-RECYCLING-CONTENT MRC EINER GIPSKARTONPLATTE (SOFTWARE: EXCEL-TOOL UMI, BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL).....	100
ABB. 7.12: FALLBEISPIEL UMI – RECHENBEISPIEL TROCKENBAUWAND IW07, (EIGENE DARSTELLUNG).....	101
ABB. 7.13: FALLBEISPIEL – ERGEBNIS UMI (EIGENE DARSTELLUNG).....	102
ABB. 7.14: FALLBEISPIEL UMI - ERGEBNIS KREISLAUFPOTENZIALE NACH DIN 276 (SOFTWARE: EXCEL-TOOL UMI, BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL) .....	103
ABB. 7.15: FALLBEISPIEL MADASTER MZI - ERGEBNISDARSTELLUNG MATERIALSTRÖME AUF DER EBENE DER GEBÄUDESCHICHTEN (MADASTER FOUNDATION GMBH, O.D.).....	107
ABB. 7.16: FALLBEISPIEL MADASTER MZI – MATERIALSTROM EINGESETZTER MATERIALIEN/PRODUKTE (MADASTER FOUNDATION GMBH, O.D.).....	108
ABB. 7.17: FALLBEISPIEL MADASTER MZI – RECYCLINGPOTENZIALE MINERALISCHER BAU- UND ABRUCHABFÄLLE LT. STATUSBERICHT 2024 ZUR ÖSTERREICHISCHEN ABFALLWIRTSCHAFT .....	109
ABB. 7.18: FALLBEISPIEL MADASTER MZI – RECHENBEISPIEL TROCKENBAUWAND IW07 (EIGENE DARSTELLUNG.....	111
ABB. 7.19: FALLBEISPIEL MADASTER MZI – MZI-SCORE EXKLUSIVE KORREKTURFAKTOR (MADASTER FOUNDATION GMBH, O.D.) .....	112
ABB. 7.20: FALLBEISPIEL MADASTER MZI – MZI-SCORE INKLUSIVE KORREKTURFAKTOR (MADASTER FOUNDATION GMBH, O.D.) .....	112
ABB. 7.21: FALLBEISPIEL DGNB-ZI – KREISLAUFFÜHRUNGSPOTENZIAL ZI(H) (DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR NACHHALTIGES BAUEN – DGNB E.V., O.D.).....	115
ABB. 7.22: FALLBEISPIEL DGNB-ZI – KREISLAUFFÄHIGKEITSPOTENZIAL ZI(Z) (DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR NACHHALTIGES BAUEN – DGNB E.V., O.D.).....	116
ABB. 7.23: FALLBEISPIEL DGNB-ZI – RECHENBEISPIEL TROCKENBAUWAND IW07 – TEILINDIKATOREN DES DGNB-ZI (EIGENE DARSTELLUNG).....	117
ABB. 7.24: FALLBEISPIEL DGNB-ZI – RECHENBEISPIEL TROCKENBAUWAND IW07 - ERGEBNIS DES DGNB-ZI (EIGENE DARSTELLUNG.....	118
ABB. 7.25: FALLBEISPIEL DGNB-ZI – ERGEBNIS DES DGNB-ZIRKULARITÄTSINDEX (DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR NACHHALTIGES BAUEN – DGNB E.V., O.D.).....	119
ABB. 8.1: ZIRKULARITÄTSBEWERTUNGSMETHODEN MIT SYSTEMGRENZEN UND BERÜCKSICHTIGTEN ZIRKULARITÄTSINDIKATOREN (DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR NACHHALTIGES BAUEN – DGNB E. V., 2024).....	120
ABB. 9.1: ANHANG 9.3: ATLAS RECYCLING MATERIAL-CYCLE-STATUS – ABBILDUNG B2.14 (SEGGEWIES, RIEGLER-FLOORS, & ROSEN, 2018) .....	138
ABB. 9.2: ANHANG 9.3: ATLAS RECYCLING MATERIAL-CYCLE-STATUS – ABBILDUNG B2.25 (SEGGEWIES, RIEGLER-FLOORS, & ROSEN, 2018) .....	139

ABB. 9.3: ANHANG 9.3: ATLAS RECYCLING MATERIAL-CYCLE-STATUS – ABBILDUNG B2.29 (SEGGEWIES, RIEGLER-FLOORS, & ROSEN, 2018) .....	140
ABB. 9.4: ANHANG 9.3: ATLAS RECYCLING MATERIAL-CYCLE-STATUS – ABBILDUNG B2.33 (SEGGEWIES, RIEGLER-FLOORS, & ROSEN, 2018) .....	141
ABB. 9.5: ANHANG 9.3: ATLAS RECYCLING MATERIAL-CYCLE-STATUS – ABBILDUNG B2.34 (SEGGEWIES, RIEGLER-FLOORS, & ROSEN, 2018) .....	141
ABB. 9.6: ANHANG 9.3: ATLAS RECYCLING MATERIAL-CYCLE-STATUS – ABBILDUNG B2.42 (SEGGEWIES, RIEGLER-FLOORS, & ROSEN, 2018) .....	142
ABB. 9.7: ANHANG 9.3: ATLAS RECYCLING MATERIAL-CYCLE-STATUS – ABBILDUNG B2.46 (SEGGEWIES, RIEGLER-FLOORS, & ROSEN, 2018) .....	143

## 12 Tabellenverzeichnis

TABELLE 1.1: ABFALLKATEGORIEN UND -MASSEN DER BAU- UND ABBRUCHABFÄLLE ÖSTERREICHS 2022 (BMK - BUNDESMINISTERIUM FÜR KLIMASCHUTZ, UMWELT, ENERGIE, MOBILITÄT, INNOVATION UND TECHNOLOGIE, 2024) (EIGENE DARSTELLUNG) .....	9
TABELLE 2.1: TECHNISCHES BEWERTUNGSKRITERIUMS „BAUGEWERBE UND IMMOBILIEN – NEUBAU“ FÜR DAS ZIEL „ÜBERGANG ZUR KREISLAUFWIRTSCHAFT“ NACH ANHANG II DER EU-VERORDNUNG 2023/2486 (EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2023), (EIGENE DARSTELLUNG) .....	20
TABELLE 2.2: TECHNISCHES BEWERTUNGSKRITERIUMS „BAUGEWERBE UND IMMOBILIEN – RENOVIERUNG“ FÜR DAS ZIEL „ÜBERGANG ZUR KREISLAUFWIRTSCHAFT“ NACH ANHANG II DER EU-VERORDNUNG 2023/2486 (EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2023), (EIGENE DARSTELLUNG) .....	21
TABELLE 2.3: TECHNISCHES BEWERTUNGSKRITERIUMS „BAUGEWERBE UND IMMOBILIEN – ABBRUCH VON GEBÄUDEN UND ANDEREN BAUWERKEN“ FÜR DAS ZIEL „ÜBERGANG ZUR KREISLAUFWIRTSCHAFT“ NACH ANHANG II DER EU-VERORDNUNG 2023/2486 (EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2023), (EIGENE DARSTELLUNG) .....	22
TABELLE 2.4: TECHNISCHES BEWERTUNGSKRITERIUMS „BAUGEWERBE UND IMMOBILIEN – VERWENDUNG VON BETON IM TIEFBAU“ FÜR DAS ZIEL „ÜBERGANG ZUR KREISLAUFWIRTSCHAFT“ NACH ANHANG II DER EU-VERORDNUNG 2023/2486 (EUROPÄISCHE KOMMISSION, 2023), (EIGENE DARSTELLUNG) .....	23
TABELLE 2.5: Kernaussagen zu den Hürden der Kreislaufwirtschaft im Bausektor nach Lebenszyklusphasen (Achatz, Margelik, Romm, Kasper, & Jäger, 2021), (Eigene Darstellung) .....	25
TABELLE 2.6: Kernaussagen zu den Hebeln der Kreislaufwirtschaft im Bausektor nach Lebenszyklusphasen (Achatz, Margelik, Romm, Kasper, & Jäger, 2021), (Eigene Darstellung) .....	27
TABELLE 3.1: BEWERTUNG VON BESTANDSGEBÄUDEN – BERÜCKSICHTIGUNG VON BAUTEILEN IN LEBENSZYKLUSPHASEN (Austrian Standards International, 2024), (Eigene Darstellung) .....	34
TABELLE 3.2: AUSZUG KERNINDIKATOREN FÜR Zirkularität zufolge ISO 59020:2024 (Sprache Englisch).....	38
TABELLE 6.1: KREISLAUFFÜHRUNG – TEILINDIKATOR MATERIALHERKUNFT MIT Zirkularitätsklassen und Bewertungsfaktor (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB E. V., 2024), (Eigene Darstellung) .....	75
TABELLE 6.2: KREISLAUFFÜHRUNG – TEILINDIKATOR BAU- & ABBRUCHABFÄLLE MIT Zirkularitätsklassen und Bewertungsfaktor (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB E. V., 2024), (Eigene Darstellung) .....	76

TABELLE 6.3: KREISLAUFFÜHRUNG – TEILINDIKATOR SCHADSTOFFBELASTUNG MIT ZIRKULARITÄTSKLASSEN UND BEWERTUNGSFAKTOR (DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR NACHHALTIGES BAUEN – DGNB E. V., 2024), (EIGENE DARSTELLUNG) .....	77
TABELLE 6.4: KREISLAUFFÄHIGKEIT – TEILINDIKATOR MATERIALVERTRÄGLICHKEIT MIT ZIRKULARITÄTSKLASSEN UND BEWERTUNGSFAKTOR (DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR NACHHALTIGES BAUEN – DGNB E. V., 2024), (EIGENE DARSTELLUNG) .....	78
TABELLE 6.5: KREISLAUFFÄHIGKEIT – TEILINDIKATOR DEMONTAGEFÄHIGKEIT MIT ZIRKULARITÄTSKLASSEN UND BEWERTUNGSFAKTOR (DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR NACHHALTIGES BAUEN – DGNB E. V., 2024), (EIGENE DARSTELLUNG) .....	79
TABELLE 6.6: KREISLAUFFÄHIGKEIT – TEILINDIKATOR WERKSTOFFLICHE TRENNBARKEIT MIT ZIRKULARITÄTSKLASSEN UND $F_{zk}(Z)$ (DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR NACHHALTIGES BAUEN – DGNB E. V., 2024), (EIGENE DARSTELLUNG) .....	79
TABELLE 6.7: KREISLAUFFÄHIGKEIT – TEILINDIKATOR MATERIALVERWERTUNG MIT ZIRKULARITÄTSKLASSEN UND BEWERTUNGSFAKTOR (DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR NACHHALTIGES BAUEN – DGNB E. V., 2024), (EIGENE DARSTELLUNG) .....	80
TABELLE 7.1: FALLBEISPIEL EINFAMILIENHAUS – END-OF-LIFE-SZENARIEN „HOCHWERTIG“ UND „STANDARD“ (ROSEN, 2021), (EIGENE DARSTELLUNG) .....	94
TABELLE 7.2: MRC NACH QUALITÄTSSTUFEN INKLUSIVE ABKÜRZUNGEN NACH ATLAS RECYCLING UND UMI (SEGGEWIES, RIEGLER-FLOORS, & ROSEN, 2018) (ROSEN, 2021), (EIGENE DARSTELLUNG) .....	95
TABELLE 7.3: MEOL NACH QUALITÄTSSTUFEN INKLUSIVE ABKÜRZUNGEN NACH ATLAS RECYCLING UND UMI (SEGGEWIES, RIEGLER-FLOORS, & ROSEN, 2018) (ROSEN, 2021), (EIGENE DARSTELLUNG) .....	95
TABELLE 7.4: FALLBEISPIEL EINFAMILIENHAUS – MRC- UND MEOL-WERTE VERBAUTER MATERIALIEN UND PRODUKTEN (SEGGEWIES, RIEGLER-FLOORS, & ROSEN, 2018) (ROSEN, 2021), (EIGENE DARSTELLUNG) .....	96
TABELLE 7.5: FALLBEISPIEL MADASTER – MZI-EINGABEFELDER FÜR QUELLDATENERFASSUNG MITTELS EXCEL-VORLAGE (MADASTER EXCEL-VORLAGE), (EIGENE DARSTELLUNG) .....	105
TABELLE 8.1: ZUSAMMENFASSUNG DER WICHTIGSTEN ERKENNTNISSE DER FALLSTUDIE UND ERGEBNISDISKUSSION (EIGENE DARSTELLUNG) .....	126
TABELLE 9.1: FALLBEISPIEL EINFAMILIENHAUS – MASSENERMITTLUNG NACH BAUMATERIALIEN (EIGENE DARSTELLUNG) .....	130
TABELLE 9.2: FALLBEISPIEL EINFAMILIENHAUS – MASSENERMITTLUNG FENSTER & TÜREN (EIGENE DARSTELLUNG) .....	130
TABELLE 9.3: FALLBEISPIEL – MASSENERMITTLUNG BAUTEILSCHICHTEN – KOSTENGRUPPE 320 „GRÜNDUNG, UNTERBAU“ (EIGENE DARSTELLUNG) .....	131
TABELLE 9.4: FALLBEISPIEL – MASSENERMITTLUNG BAUTEILSCHICHTEN – KOSTENGRUPPE 330 „AUßENWAND/VERTIKALE BAUKONSTRUKTION, AUßEN“ (EIGENE DARSTELLUNG) .....	133

TABELLE 9.5: FALLBEISPIEL – MASSENERMITTLUNG BAUTEILSCHICHTEN – KOSTENGRUPPE 340 „INNENWAND/VERTIKALE BAUKONSTRUKTION, INNEN“ (EIGENE DARSTELLUNG).....	134
TABELLE 9.6: FALLBEISPIEL – MASSENERMITTLUNG BAUTEILSCHICHTEN – KOSTENGRUPPE 350 „DECKEN/HORIZONTALE BAUKONSTRUKTIONEN“ (EIGENE DARSTELLUNG).....	136
TABELLE 9.7: FALLBEISPIEL – MASSENERMITTLUNG BAUTEILSCHICHTEN – KOSTENGRUPPE 360 „DÄCHER“ (EIGENE DARSTELLUNG) .....	137