

Ressourcennutzung Gebäude: Entwicklung eines Nachweisverfahrens zur Bewertung der nachhaltigen Nutzung natürlicher Ressourcen in Bauwerken

Abschlussbericht über o.g. Forschungsvorhaben
gefördert unter dem AZ: 34301 / 01-25
von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Antragsteller:

Ruhr-Universität Bochum (RUB)
Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
Prof. Dr.-Ing. Annette Hafner

Projektbearbeitung:

Prof. Dr.-Ing. Annette Hafner, Projektleitung (RUB)
Dipl.-Ing. Karina Krause (RUB)
Samuel Ebert, M.Sc. (TUM)
Dipl.-Ing. M.A. Stephan Ott (TUM)
Marco Krechel, M.Sc. (TUM)

Ort und Datum:

Bochum, 05.06.2020

Bezugsmöglichkeit des Berichts:

Ruhr-Universität Bochum

Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften

Ressourceneffizientes Bauen, Prof. Dr.-Ing. Annette Hafner

Universitätsstr. 150, IC5-161

44801 Bochum

Fon: 0234-32- 21414

Fax: 0234-32-14815

annette.hafner@rub.de

www.ruhr-uni-bochum.de/reb/index.html.de

Dieser Bericht ist über die Website des Lehrstuhls Ressourceneffizientes Bauen in elektronischer Form abrufbar.

Abschlussbericht zum Projekt Ressourcennutzung Gebäude: Entwicklung eines Nachweisverfahrens zur Bewertung der nachhaltigen Nutzung natürlicher Ressourcen in Bauwerken

Ressourcennutzung Gebäude: Entwicklung eines Nachweisverfahrens zur Bewertung der nachhaltigen Nutzung natürlicher Ressourcen in Bauwerken

Abschlussbericht über o.g. Forschungsvorhaben
gefördert unter dem AZ: 31943
von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt


Antragsteller:

Ruhr-Universität Bochum (RUB)
Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen
Prof. Dr.-Ing. Annette Hafner

Projektbearbeitung:

Prof. Dr.-Ing. Annette Hafner, Projektleitung (RUB)
Dipl.-Ing. Karina Krause (RUB)
Samuel Ebert, M.Sc. (TUM)
Dipl.-Ing. M.A. Stephan Ott (TUM)
Marco Krechel, M.Sc. (TUM)

Ort und Datum: Bochum, 05.06.2020

06/02		Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt			
Az	34301 / 01-25	Referat	Fördersumme	124.536 €	
Antragstitel		<i>Ressourcennutzung Gebäude: Entwicklung eines Nachweisverfahrens zur Bewertung der nachhaltigen Nutzung natürlicher Ressourcen in Bauwerken</i>			
Stichworte					
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
18 Monate	01.07.2018	31.05.2020 (nach Verlängerung)	1		
Zwischenberichte	1				
Bewilligungsempfänger			Tel: 0234-32-21413		
Ruhr-Universität Bochum Fakultät für Bau- und Umweltwissenschaften Ressourceneffizientes Bauen Universitätsstr. 150 IC 5/ 159 44801 Bochum			Fax: 0234-32-14815		
			Projektleitung Prof. Dr. Annette Hafner		
			Bearbeiter		
Kooperationspartner		TU München, Lehrstuhl Holzbau und Baukonstruktion			
Zielsetzung und Anlass des Vorhabens					
<p>Mit dem Ziel die Nachhaltigkeit für Gebäude und deren Bauprodukte bewertbar zu machen, steht das Projekt inmitten einer sich sehr dynamisch entwickelnden Thematik, die aufgrund der Dringlichkeit ökologischer Herausforderungen wie Ressourcenknappheit und Klimawandel bereits verschiedene Ansätze, Vorschläge und Entwicklungen hervorgebracht hat. Ziel dieser Vorstudie ist es den aktuellen Stand der Entwicklungen in der Bewertung einer nachhaltigen Ressourcennutzung zu analysieren und auszuloten, welche Ansatzpunkte und Methodiken für die Implementierung von Umweltkennzahlen für Gebäude geeignet sind, um eine nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen beim Bauen bewerten und umzusetzen zu können.</p> <p>Wesentliche Herausforderung und Bestandteil des Projektes ist der Versuch, den Widerspruch zwischen der komplexen, wissenschaftlichen Bewertung der nachhaltigen Verwendung natürlicher Ressourcen und der praxisgerechten Implementierung der Anforderungen in den Bauprozess zu lösen.</p>					
Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden					
<p>Um ein geeignetes Nachweisverfahren zu entwickeln, das eine nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen adäquat abbildet, müssen folgende Aspekte untersucht und beantwortet werden. Zu Beginn ist – ausgehend von der Zielfunktion einer nachhaltigen Ressourcennutzung – die Grundanforderung zu formulieren, um anschließend wesentliche Leistungsmerkmale zu identifizieren, die diese Grundanforderung beschreiben. Im Anschluss an eine Betrachtung und Untersuchung des Kontexts und des Wirkungsgefüges dieser Leistung(en) können spezifische Anforderungen sowie Ziel- oder Grenzwerte formuliert und gesetzt werden, die dem Anwendungsprofil gerecht werden. Erst dann kann ein entsprechendes Nachweisverfahren entwickelt werden, dass bestehende Leistung und gesetzte Anforderung vergleicht und prüft. Der Modellansatz stützt sich auf ein Stoffstrommodell zur Ermittlung der recyclingfähigen und der zu beseitigenden Baustoffe einer Konstruktion. Für eine grundlegende Strukturierung des Stoffstrommodells dient die Einteilung der Prozesse nach den standardisierten Lebenszyklusphasen gemäß DIN EN 15804 (Bauprodukte) und DIN EN 15978 (Gebäude). Schnittstellen und Kategorien des Modells werden mit den nationalen und europäischen Statistiken sowie Stoffstrommodellierungen vereinheitlicht, indem auf bestehende Strukturen hinsichtlich der Gruppierung von Bauprodukten, auf die Klassifizierung von Bauabfällen und auf normative Standards zurückgegriffen wird. Als wesentliche Entscheidungsparameter im Rahmen der Planung steht neben der Auswahl der Baustoffe, die Wahl der Fügung dieser Baustoffe zu Bauteilen und die Fügung der</p>					

Bauteile untereinander zu Räumen und dem Gebäude als Ganzem. Verbindungen zwischen Baustoffen und Bauteilen lassen sich unterscheiden in formschlüssige, kraftschlüssige und stoffschlüssige Verbindungen und resultieren aus der Fügemethode. Die mögliche Auswahl an Fügemethoden orientiert sich an der Systematik der DIN 8580.

Das Modell beschreibt die Recyclingfähigkeit auf Bauteilebene und umfasst damit sowohl die materialspezifische Verwertbarkeit der Baustoffe als auch die Einschränkungen hinsichtlich der Lösbarkeit der Fügungen und der tatsächlich resultierenden Abfallströme.

Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse der Modellentwicklung und der beispielhaften Modellanwendung offenbaren wesentliche Aspekte der Recyclingfähigkeit. Auch wenn der Modellansatz noch eine Weiterentwicklung, Validierung und Optimierung bedarf, zeigt sich bereits das Potential die Recyclingfähigkeit von Bauteilen anhand technischer Parameter und klarer Zusammenhänge abzubilden.

Es ist festzuhalten, dass eine realistisch verfügbares Recyclingpotenzial lediglich auf Bauteilebene abgebildet werden kann. Eine alleinige Betrachtung der Baustoffe kann wesentliche Aspekte der Errichtung (Fügungen), des Rückbaus (Lösbarkeit) und der Abfallbehandlung nicht abdecken. Das vorgestellte Modell schafft es über die Summe der einzelnen Baustoffe hinaus, das Bauteil im Gesamten inklusive der Fügungen und im Kontext der Errichtung (A5) und des Rückbaus (C1) zu beschreiben. Die Entwicklung des Modells hat gezeigt, dass mit der grundlegenden Strukturierung der Ökobilanzierung eine geeignete Modellstruktur bereits existiert und verwendet wird. Die Autoren empfehlen daher auf diesem Betrachtungsrahmen weitere Entwicklungen aufzubauen. Auf diese Weise können zukünftig der Thematik der Recyclingfähigkeit und Ressourceneffizienz auch die Problematik der Umweltwirkungen (LCA) gegenübergestellt und Wechselwirkungen berücksichtigt werden. Die Ergebnisse zeigen auch die Notwendigkeit neben einem möglichst hochwertigen Recycling die absolute Masse des verbauten Materials in Relation zu sehen (Hinsichtlich Transport und Umweltwirkungen). Im Sinne einer nachhaltigen Nutzung von Rohstoffen ist immer eine maximale stoffliche Verwertung (MRU/MSM/MMR) anzustreben und erst danach eine energetische Verwertung (MERf). Eine Beseitigung von Baustoffen (MWD) ist im Sinne einer kompletten Kreislaufführung zu vermeiden. Nachwachsende Rohstoffe (Nawaros) nehmen hierbei eine Sonderrolle ein und bieten grundsätzlich das Potential einer energetischen Substitution fossiler Energieträger durch energetische Verwertung. Idealerweise werden allerdings auch Nawaros erst maximal stofflich, das heißt entlang der material-spezifischen Nutzungskaskade, genutzt und abschließend energetisch verwertet. Allgemein stellt sich die Frage inwiefern mit unterschiedlichen Rohstoffgruppen umzugehen ist und inwiefern die Verwertungswege rohstoffbezogen unterschiedlich bewertet werden müssen.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Ebert, Samuel; Ott, Stephan; Krause, Karina; Hafner, Annette; Krechel, Marco (2020): Modell der Recyclingfähigkeit auf Bauteilebene. In: Bautechnik 97 (S1), S. 14–25. DOI: 10.1002/bate.201900109.

Ott, Stephan (2019) European Standards for Sustainability of Construction Works – Projects of TUM Chair of Timber Structures and Building Construction, Gastvorlesung, Prof. Daman Panesar, University Toronto, 04.10.2019.

Ott, Stephan (2020) Workshop Recycling and Circularity Task 2.2 – BASAJAUN Building A Sustainable Joint Between Rural And Urban Areas Through Circular And Innovative Wood Construction Value Chains (862942), gefördert EU Horizon 2020 Programm.

Aktuell ist eine englischsprachige Veröffentlichung in Arbeit um die Thematik auch in internationalen Diskussionen einzubinden.

Fazit

Abschließend kann festgehalten werden, dass mit dem aktuellen Modell ein Ansatz entwickelt wurde, der sich als Grundlage und Rahmenwerk für eine weitere Diskussion der Bewertung der Recyclingfähigkeit von Bauwerken und der nachhaltigen Ressourcennutzung anbietet.

INHALTSVERZEICHNIS

Begriffe und Definitionen	IX
Kurzfassung.....	12
1 Projektbeschreibung.....	13
1.1 Hintergrund.....	13
1.2 Projektziele.....	16
1.3 Projektentwicklung und Methodik.....	16
2 Entwicklung eines Nachweisverfahrens.....	18
2.1 Problemstellung und Stand des Wissens.....	18
2.1.1 Begriffsklärung und Ziel des Nachweisverfahrens.....	18
2.1.2 Methoden der Nachweisverfahren.....	20
2.1.3 Bestehende Methode der Ökobilanzierung.....	22
2.1.4 Problematik einer reinen Betrachtung der Baustoffe.....	25
2.1.5 Stoffstrombetrachtung auf nationaler Ebene.....	26
2.2 Modellentwicklung eines Nachweisverfahrens.....	27
2.2.1 Aufbau des Modellansatzes.....	27
2.2.2 Beispielhafte Anwendung des Modells.....	33
2.2.3 Ergebnisse der Ökobilanzierung.....	34
2.2.4 Ergebnisse des Bauteilmodells der Recyclingfähigkeit.....	36
3 Zusammenfassung und Ausblick.....	39
4 Literaturverzeichnis	40
Abbildungsverzeichnis.....	44
Tabellenverzeichnis.....	45

Begriffe und Definitionen

Ressourcen: Im engeren Sinne Rohstoffe und Energieträger; Unterscheidung in erneuerbare Ressourcen wie Nahrung, Holz, Wasser und nicht erneuerbare Ressourcen wie Rohstoffe fossiler Brennstoffe. Ressourcen der Erde stellen aus ökonomischer Sicht natürliche Produktionsmittel (Rohstoffe) für die Wirtschaft dar. Sie sind zugleich unsere Lebensgrundlage. Die Ressource Umwelt dient darüber hinaus als Aufnahmemedium für sämtliche menschlichen Abfälle und Emissionen. Der in der Ökonomie verwendete Begriff "natürliche Ressourcen" impliziert die sogenannten "Umweltmedien" "Boden" (mit allen mineralischen Rohstoffen, fossilen Energieträgern etc.), "Wasser" und "Luft", einschließlich des Begriffs der Biodiversität. Zu dem Begriff "natürliche Ressourcen" gehören die Unterbegriffe "erneuerbare" und "nicht erneuerbare" Ressourcen.

Erneuerbare Ressourcen beziehen ihre Nährstoffe "aus organischem Abfall, der über natürliche Prozesse im Kreislauf geführt wird, und zwar so, dass im gleichen Zeitraum so viel rezykliert wie geerntet wird." (Bringezu und Klütting 2004) Das bedeutet also, dass erneuerbare Ressourcen, wie z.B. Wald- und Fischbestände sich im für die menschliche Planung relevanten Zeitraum regenerieren können. Doch es gibt auch Ressourcen, die grundsätzlich erneuerbar sind und auch nachwachsen können. Diese werden in der Praxis nicht erneuert und können demzufolge nicht in der gleichen Form nachwachsen, da zwar geerntet oder gerodet wird, es aber keine ausgleichende Stoffabgabe gibt. Als Beispiel kann man den Tropenwald nehmen: Wird dieser gerodet, dauert es sehr lange, bis sich diese Ressource regeneriert hat. Im schlimmsten Fall kann der Bewuchs völlig verarmen, wenn als Folge der Rodung Nährstoffe durch die Erosion entzogen werden und insofern das biologisch-geologische Umfeld der Rohstoffproduktion geschädigt wird. Das kann zur Folge haben, dass sich eine natürlich erneuerbare Ressource zu einer degradierten oder gar ausgestorbenen Ressource entwickelt. Die Art der Bewirtschaftung entscheidet folglich darüber, ob eine erneuerbare Ressource auch tatsächlich regeneriert wird. Strömende Ressourcen wie geothermische oder Solarenergie sind ebenfalls erneuerbare Ressourcen, für deren Nutzung aber andere Ressourcen erforderlich sind. So sind beispielsweise Energie, Materialien und Raum nötig, um Windturbinen oder Solarzellen zu bauen.

Nicht erneuerbare Ressourcen, wie traditionelle Energieträger (z.B. Öl, Kohle oder Erdgas) und mineralische Rohstoffe (z.B. Eisen oder Nickel) charakterisieren sich dadurch, dass sie sich nicht in dem Zeitraum und der Geschwindigkeit regenerieren können, in dem wir sie der Erde entnehmen: "Eine in der Gegenwart abgebaute Einheit einer erschöpflichen Ressource mindert also den künftig verfügbaren Bestand um genau eine Einheit." (Endres und Querner 2000) Dadurch entsteht also eine Rivalität zwischen Gegenwart und Zukunft. Während früher die gesellschaftspolitischen Diskussionen um die erschöpflichen Ressourcen gingen, so spielen heutzutage die regenerierbaren Ressourcen der Erde eine größere Rolle. Dabei bereiten vor allem die Abholzung der tropischen Regenwälder, die Überfischung der Meere und die befürchtete Verödung der Erde durch eine Reduktion der Artenvielfalt in der öffentlichen Diskussion Sorgen. Demzufolge wird die Forderung nach einer nachhaltigen Entwicklung immer höher.

Nachhaltige Nutzung: Die natürlichen Ressourcen sind für das Überleben und die Entwicklung des Menschen lebenswichtig. Einige dieser Ressourcen, wie Mineralien, Tier- und Pflanzenarten und Lebensräume sind begrenzt — wenn sie erschöpft oder vernichtet werden, sind sie für immer verschwunden. Andere Ressourcen, wie Luft, Wasser und Holz, sind erneuerbar — allerdings verlassen wir uns üblicherweise auf die Fähigkeit das natürliche System der Erde, diese Ressourcen für uns nachwachsen zu lassen, zu erneuern und zu reinigen. Obwohl viele Auswirkungen der übermäßigen Ausbeutung auf lokaler Ebene spürbar sind, wird die Ressourcenbewirtschaftung durch die wachsenden Wechselbeziehungen zwischen den Staaten und durch den internationalen Handel mit natürlichen Ressourcen zu einem globalen Thema.

Recycling: Wenn die beim Bau und Betrieb eines Gebäudes eingesetzten Materialien nach ihrer ursprünglichen Nutzung für eine neue Verwendung eingesetzt werden, spricht man von Recycling: Aus einem Abfallprodukt wird ein Sekundärrohstoff. Laut Definition von Recycling gemäß dem Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen lautet: „Recycling (...) ist jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfälle zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden; es schließt die Aufbereitung organischer Materialien ein, nicht aber die energetische Verwertung und die Aufbereitung zu Materialien, die für die Verwendung als Brennstoff oder zur Verfüllung bestimmt sind“ (KrWG 2012). Der größte Vorteil beim Recycling ist, dass sich die Abfallmenge vermindert, währenddessen knapper werdende Rohstoffe geschont werden. Je nach technischen Recyclingverfahren entstehen beim Recyclingprozess auch Nachteile. Die ist beispielsweise der Fall bei Kunststoff, da beim Recycling das Material nicht mehr in die ursprüngliche Qualität gebracht werden kann. Diesen Prozess der Abwertung nennt man auch Downcycling. Upcycling ist demnach ein Prozess, mit dem hochwertigere Produkte als bei der Primärherstellung hergestellt werden können.

LCA: Abkürzung für Life Cycle Assessment = Lebenszyklusanalyse => siehe Ökobilanz.

Ökobilanz: Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Outputflüsse und der potentiellen Umweltwirkungen eines Produktsystems, beispielsweise ein Gebäude, im Verlauf seines Lebenswegs. Schritte einer Ökobilanz: Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens, Sachbilanz, Wirkungsabschätzung und Auswertung.

Stoffflussanalyse: Methode zur Erfassung der Materie- und Energieflüsse sowie der Energielager in einem gegebenen Raum in einem definierten Zeitabschnitt.

Stoffstromanalyse / „Ökologischer Rucksack“: Um eine bestimmte Menge von Endprodukten oder Dienstleistungen bereitstellen zu können, muss eine mehr oder weniger große Menge von Roh- und Hilfsstoffen bewegt werden, deren Gesamtmasse die der Endprodukte um ein Vielfaches übersteigen kann. Um einen einzigen Computer herzustellen, müssen z.B. (einschließlich des Abraums der Rohstoffgewinnung) 10 bis 20 Tonnen Material bewegt werden. Dabei ist noch nicht der Wasserbedarf berücksichtigt. Die Stoffstromanalyse zielt darauf

ab, die Materialmasse, die im Endprodukt nicht mehr auftaucht („ökologischer Rucksack“), möglichst gering zu halten, ohne Abstriche bei der Qualität zu machen. Weiterhin ermöglicht die Betrachtung des Ökologischen Rucksacks die Berücksichtigung von Umwelteffekten, die durch den Abbau von Stoffen entstehen, die aber nicht während der Produktion vor Ort im Unternehmen entstehen. Dadurch lassen sich Verlagerungen von Emissionen vermeiden.

Ressourceneffizienz tritt dann ein, wenn die Ressourcennutzung effizienter verlaufen soll, indem das gleiche Produktionsergebnis bzw. die gleiche Dienstleistung mit weniger Naturverbrauch (Ressourcen) produziert werden soll. Somit soll der Ressourcenverbrauch von der Wertschöpfung und dem Wohlstand einer Gesellschaft entkoppelt werden. Ressourceneffizienz fordert demnach den effizienten Einsatz von Materialien, Wasser und Energie sowie die sparsame Nutzung von Flächen.

Emissionen: Die von einer Anlage ausgehenden Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen, Licht, Wärme, Strahlen und ähnliche Erscheinungen.

Primärenergie: Primärenergie ist die in natürlich vorkommenden Energiequellen zur Verfügung stehende Energie. Dazu zählen nicht erneuerbare Energien u. a. aus Steinkohle, Braunkohle, Erdöl, Erdgas und Uran sowie erneuerbare Energien u. a. aus Biomasse, Sonnenstrahlung, Erdwärme, Wasser- und Windkraft (BMVBS 2011).

Treibhauspotenzial: Das Treibhauspotenzial (Global Warming Potential, GWP) ist der potenzielle Beitrag eines Stoffes zur Erwärmung der bodennahen Luftschichten d. h. zum so genannten Treibhauseffekt. Der Beitrag des Stoffes wird als GWP Wert relativ zu dem Treibhauspotenzial des Stoffes Kohlendioxid (CO₂) angegeben. Das Treibhauspotenzial wird in [kg CO₂-Äq/ funktionale Einheit] ausgedrückt.

Je niedriger der Wert des CO₂-Äquivalents ist, umso niedriger ist die potenzielle Wirkung auf die globale Erwärmung und die damit verbundenen Umweltwirkungen.

Primärkonstruktion: Unter Primärkonstruktion wird die tragende Konstruktion eines Gebäudes verstanden. Sie umfasst alle Komponenten, die zur Aufnahme der Lasten und deren Einleitung in die Fundamente benötigt werden.

Kurzfassung

Um einen geregelten Ablauf bei der Entwicklung und Herstellung von Gebäuden zu gewährleisten wird gemäß den anerkannten Regeln der Bautechnik gebaut, geändert und instandgehalten. Die grundlegenden Anforderungen (Basic Requirements for Construction Works - BWR) an Gebäude und Bauprodukte werden auf europäischer Ebene in der Bauproduktenverordnung festgelegt. Um eine Rechtsgültigkeit auf nationaler Ebene zu erreichen, werden die Anforderungen in die MBO (Musterbauordnung) und die jeweiligen Landesbauordnungen übertragen und in den Listen der technischen Baubestimmungen festgehalten (Muster - Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen - M-VVTB). Die nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen (Grundanforderung 7, Bauproduktenverordnung) kann auf nationaler Ebene aktuell noch nicht berücksichtigt werden, da bisher kein umsetzbares Bewertungsverfahren vorliegt, das diese Grundanforderung beschreibt. Das Vorprojekt „Ressourcennutzung Gebäude“ bildet die Grundlage zur Entwicklung eines geeigneten Nachweisverfahrens für Gebäude zur Bewertung dieser Grundanforderung.

Mit dem Ziel die Nachhaltigkeit für Gebäude und deren Bauprodukte bewertbar zu machen, steht das Projekt inmitten einer sich sehr dynamisch entwickelnden Thematik, die aufgrund der Dringlichkeit ökologischer Herausforderungen wie Ressourcenknappheit und Klimawandel bereits verschiedene Ansätze, Vorschläge und Entwicklungen hervorgebracht hat. Ziel dieser Vorstudie ist es den aktuellen Stand der Entwicklungen in der Bewertung einer nachhaltigen Ressourcennutzung zu analysieren und auszuloten, welche Ansatzpunkte und Methoden für die Implementierung von Umweltkennzahlen für Gebäude geeignet sind, um eine nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen beim Bauen bewerten und umzusetzen zu können.

1 Projektbeschreibung

1.1 Hintergrund

Die Art und Weise wie Gebäude errichtet werden, welche Grundanforderungen dabei zu beachten sind und wie diese berücksichtigt werden, sind auf europäischer und nationaler Ebene durch technische Baubestimmungen geregelt. Gemäß der europäischen Bauproduktenverordnung sind entsprechend Anhang I Gebäude so zu errichten, dass Ressourcen geschont und umweltverträgliche Bau- und Rohstoffe verwendet werden (Europäische Union 2011). Die Übertragung dieser Anforderungen auf nationale technische Baubestimmungen, die bei der Erfüllung der Grundanforderungen an Bauwerke zu beachten sind (MVV TB 2019), stellt sich wie folgt dar:

Tabelle 1: Grundanforderungen an Bauwerke (EU/DE)

Bauproduktenverordnung (EU) Nr. 305/2011 <i>vom 9. März 2011, in Kraft seit 1. Juli 2013</i> <i>[EU] BauPVO</i>	Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB) <i>Stand: 15.01.2020</i> <i>[DE] MVV TB – A</i>
1. Mechanische Festigkeit und Standsicherheit	A1 Mechanische Festigkeit und Standsicherheit
2. Brandschutz	A2 Brandschutz
3. Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz	A3 Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz
4. Sicherheit und Barrierefreiheit b. d. Nutzung	A4 Sicherheit und Barrierefreiheit b. d. Nutzung
5. Schallschutz	A5 Schallschutz
6. Energieeinsparung und Wärmeschutz	A6 Wärmeschutz
7. Nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen	--

Bei näherer Betrachtung fällt auf, dass Teile der Grundanforderung 3 und die gesamte Grundanforderung 7 der EU-Verordnung auf nationaler Ebene nicht abgedeckt werden. Die Darstellung / Quantifizierung der Emission von Treibhausgasen (vgl. (Europäische Union 2011) Punkt 3.b) wird entsprechend der nationalen technischen Baubestimmungen nicht gefordert (s. (MVV TB 2019) Punkt A 3/3.2). Ebenso wird die Anforderung „Nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen“ (vgl. (Europäische Union 2011) Punkt 7) nicht berücksichtigt, da eine geeignete Methode, die diese Aspekte durch entsprechende Kennwerte abbildet, noch nicht existiert.

Mit dem Inkrafttreten der Bauproduktenverordnung und der vollständigen Ablösung der Bauproduktenrichtlinie (von 1988) im Juli 2013 wurden die Grundanforderungen an Gebäude um den Punkt 7: *Nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen* erweitert. Dieser besagt: „Das Bauwerk muss derart entworfen, errichtet und abgerissen werden, dass die natürlichen Ressourcen nachhaltig genutzt werden und insbesondere Folgendes gewährleistet ist: a) Das Bauwerk, seine Baustoffe und Teile müssen nach dem Abriss wiederverwendet oder recycelt

werden können; b) das Bauwerk muss dauerhaft sein; c) für das Bauwerk müssen umweltverträgliche Rohstoffe und Sekundärbaustoffe verwendet werden.“ Bis heute gibt es noch kein Nachweisverfahren, wie die damit gemeinten Anforderungen an Bauprodukte nachgewiesen werden können oder auch was genau darunter zu verstehen ist. Es besteht aber von unterschiedlichen Seiten der Wunsch, hierzu ein möglichst einfaches Nachweisverfahren zu finden.

Auf dem Weg zu einer Nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen im Bauwesen nimmt das Thema der Kreislaufführung der Baustoffe neben der Reduzierung von Treibhausgasen in der Herstellung und Nutzung (klimaneutraler Gebäudebestand) und der Maximierung der Lebensdauer (Dauerhaftigkeit) eine zentrale Rolle ein. Mit einem Anteil von ca. 50% der Rohstoffverwendung (Herczeg et al. 2014) und ca. 50% des Abfallaufkommens (in Deutschland) (Kreislaufwirtschaft Bau 2018) spielt das Bauwesen eine entscheidende Rolle, bei der Herausforderung natürliche Ressourcen nachhaltig zu nutzen. Mit unterschiedlichen Initiativen und mit regulatorischen Mitteln versucht die Europäische Union dem Ziel eines schonenden Umgangs bei der Nutzung von natürlichen Ressourcen im Bauwesen zu begegnen. Dabei verfolgt sie in verschiedenen Ankündigungen und Regelwerken diese Ziele:

- a. Kreislaufführung von Produkten, Materialien und Ressourcen sowie Minimierung der Abfallerzeugung (Europäische Union 2015)
- b. Vermeidung der Verknappung von Ressourcen durch eine nachhaltige Ressourcenbewirtschaftung
- c. Erweiterung des Eco-Design über Energieeffizienz hinaus durch Reparaturfähigkeit, Dauerhaftigkeit, Erweiterbarkeit, Recyclingfähigkeit von Produkten und die Identifikation von Materialien und Substanzen in Produkten
- d. Durch abfallwirtschaftliche Produktverantwortung die Hersteller zur Verantwortung für das Lebensende von Produkten in wirtschaftlicher Hinsicht zu sanktionieren oder zu motivieren, in dem sie auf gesetzlicher Grundlage beispielsweise Rücknahmesysteme für ihre Produkte einführen müssen
- e. Bauproduktenverordnung (CPD) mit den Grundanforderungen an Gebäude (ER) insbesondere um den Punkt 7: Nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen (Europäische Union 2011)

Darüber hinaus wurde bereits in der Mitteilung der Kommission (Europäische Union 2011), die Notwendigkeit der Reduzierung des Ressourcenverbrauchs, die effektivere Ressourcennutzung durch angepasste Planung und die ressourcenschonendere Herstellung von Produkten unter anderem durch Nutzung von Sekundärmaterial aufgeführt. Als maßgeblich einflussgebend wurden Transportwege zu den Recycling-Anlagen, das Erreichen des erforderlichen Reinheitsgrades der wiederverwerteten Materialien sowie die Recycling- und Produktionsprozesse gesehen.

Den Stand der Dinge im wissenschaftlichen Diskurs fasst (Europäische Kommission 2014) zusammen und stellt drei Gruppen in der Kreislaufführungsdiskussion aus der Sicht der Hierarchieebenen der Wertschöpfung fest. Die oberste Ebene betrifft langzeitiges Bemühen in der Haltung von **Materialien** in technischen Kreisläufen durch Recycling und energetischen Nutzung. Die mittlere Ebene beschreibt eine Kreislaufführung unter Wiedereinbeziehung von Unternehmen bei Erhaltung der **Produkte**: durch Aufarbeitung, Aufwertung und Umnutzung.

Dieser Ansatz wird momentan weltweit vernachlässigt. Als untere Ebene wird eine kurzzeitige, nutzer- und konsumentenorientierte Kreislaufführung von Produkten verstanden, die ein alternatives Nutzen von Produkten durch teilen, mieten und reduzieren betrifft. Übertragen auf den Gebäudesektor bzw. das Bauwesen findet die untere Ebene teilweise Anwendung und könnte im Hinblick auf zum Beispiel Komponenten der Gebäudetechnik stärker ausgebaut werden. Die mittlere Ebene findet sich mit Umbau- und Sanierungstätigkeiten ebenfalls wieder, da sie in der Langlebigkeit des Produkts Gebäude und seiner physischen Masse begründet ist. Dass die obere Ebene im Bauwesen einen starken Verbesserungsbedarf hat, lässt sich am Rückgang von Deponiekapazität, Kostensteigerungen für die Entsorgung von Bauschutt und -abfällen und der gesellschaftspolitischen Diskussion um die Nutzung und die Begrenztheit der natürlichen Ressourcen (BMUB 2016) ablesen.

Die Thematik der Ressourceneffizienz ist in den letzten Jahren unter anderem durch die EU-Initiative zur Kreislaufwirtschaft auch in Deutschland immer mehr in den Fokus der politischen Diskussion gerückt. 2012 wurde das Deutsche Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess) beschlossen und mit ProgRess II 2016 ein erster Fortschrittsbericht vorgelegt. Das Ziel ist die Gesamtrohstoffproduktivität in Deutschland bis 2030 gegenüber 2010 um 30 % zu steigern (BMUB 2016). Mit der (Europäische Union 2015) wurde ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft geschaffen. Es geht „im Kern darum, die Ökodesign-Richtlinie über energieverbrauchsrelevante Produkte hinaus so zu erweitern, dass der Ökodesign-Rahmen auf ein möglichst breites Produktspektrum angewendet werden kann und zur Kreislaufwirtschaft beiträgt.“ (Europäische Union 2015)

Von der deutschen Abfallgesetzgebung wird bereits eine hochwertige Verwertung von Materialien im Bauwesen eingefordert. Hochwertig ist eine Verwertung dann, wenn sie auf die wertgebenden Eigenschaften eines Abfalls abzielt und diese möglichst umfänglich nutzt. Dafür stehen bereits vorliegende geschlossene Stoffkreisläufe im Bausektor. 2015 fielen in Deutschland ca. 208,9 Mio. Tonnen Bau- und Abbruchabfälle an. Damit machte diese Abfallgruppierung 52 % des gesamten Abfallaufkommens aus. Der Anteil lag auch in den vergangenen Jahren auf ähnlichem Niveau. Jedoch ist ein Rückgang des gesamten Abfallaufkommens im Vergleich zum Jahr 2000 zu verzeichnen. Dies resultiert ausschließlich aus dem konjunkturell bedingten Rückgang der Bau- und Abbruchabfälle von 30 %. Die Verwertungsquote liegt bei den Bau- und Abbruchabfällen bei 89 % und bei der Recyclingquote bei 88 %. (Destatis 2020)

Trotz einer hohen Recyclingquote von 88 % im Bauwesen fehlt es an Motivation für den Einsatz an Recyclingmaterial. Nach (Deilmann et al. 2017) kann die Rezyklatbeimengungsquote von derzeit ca. 7 % über 16 % (2030) auf 21 % im Jahr 2050 anwachsen (in Masseinheiten zwischen 19 und 13 Mio. t).

Ressourceneffizienz wird definiert als der erforderliche Einsatz von Ressourcen für die Bereitstellung eines bestimmten Nutzens. Ein Rückgang des Bedarfs an Primärressourcen im Bauwesen bedeutet eine Ressourcenschonung, durch z.B. sparsame Nutzung, neue Technologien oder Einsatz von Sekundärressourcen. Die Ressourcenschonung hat zudem einen unmittelbaren positiven Einfluss auf die Ressourceneffizienz.

1.2 Projektziele

Ziel der Vorstudie ist es, durch eine umfangreiche Recherche und Analyse alle bereits existierenden wissenschaftlichen Bewertungsansätze und -methoden zur Entwicklung von möglichen Umweltkennwerte von Bauprodukten und Gebäuden zu erfassen, die sich als Ausgangspunkt eignen, um eine nachhaltige Nutzung von natürlichen Ressourcen in Bauwerken abzubilden. Gleichzeitig sollen durch die Grundlagenrecherche relevante Anknüpfungspunkte in der Praxis für eine mögliche Umsetzung und Anwendung der Kennwerte identifiziert werden. Auf diese Weise schafft die Vorstudie die Ausgangslage, um eine Verbindung zwischen der weitreichenden wissenschaftlichen Komplexität und einer möglichst einfachen praktischen Umsetzung zu schaffen. Das Projekt leistet damit einen wesentlichen Beitrag, die im vorherigen Kapitel dargestellte Diskrepanz zwischen den Grundanforderungen nach der BauPVO (Europäische Union 2011) und den aktuellen Inhalten der Technischen Baubestimmungen (MVV TB 2019) zu beseitigen. Dies soll durch die Identifikation einer vereinfachten Bewertungsmethodik erfolgen, anhand derer die Anforderung einer nachhaltigen Nutzung natürlicher Ressourcen abgebildet werden kann. Die existierende Vielzahl und Vielfalt an Diskussionen, Meinungen, Indikatoren und Methoden offenbart die Notwendigkeit – wenn möglich – die bestehenden, relevanten Ansätze zu berücksichtigen, zu vergleichen und zu bewerten. Gleichzeitig gilt es diese dahingehend zu untersuchen, welche Ansätze ein maximales Weiterentwicklungs- und Ausbaupotential enthalten unter Berücksichtigung von negativen Rückkopplungen und alternativer Auswirkungen.

Ein praxisorientiertes Verfahren ist erforderlich, um praktikable, nachvollziehbare auf transparenten und objektiven Kriterien basierende Methodik und damit eine Anwendbarkeit zu erhalten. Ziel war es, ein Nachweisverfahren zu identifizieren und zu entwickeln, das es ermöglicht den Punkt BWR 7 der BauPVO (Europäische Union 2011) vereinfacht abzubilden.

1.3 Projektentwicklung und Methodik

Um ein geeignetes Nachweisverfahren zu entwickeln, das eine nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen adäquat abbildet, müssen folgende Aspekte untersucht und beantwortet werden. Zu Beginn ist – ausgehend von der Zielfunktion einer nachhaltigen Ressourcennutzung – die Grundanforderung zu formulieren, um anschließend wesentliche Leistungsmerkmale zu identifizieren, die diese Grundanforderung beschreiben. Im Anschluss an eine Betrachtung und Untersuchung des Kontexts und des Wirkungsgefüges dieser Leistung(en) können spezifische Anforderungen sowie Ziel- oder Grenzwerte formuliert und gesetzt werden, die dem Anwendungsprofil gerecht werden. Erst dann kann ein entsprechendes Nachweisverfahren entwickelt werden, dass bestehende Leistung und gesetzte Anforderung vergleicht und prüft.

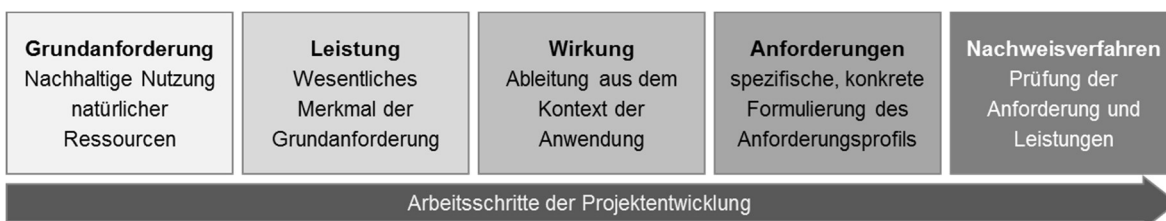


Abbildung 1: Notwendige Arbeitsschritte zur Entwicklung eines Nachweisverfahrens

Die **Grundanforderung**, die im Projektmittelpunkt steht, ist der Punkt 7 der BauPVO (EU): Eine Nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen. Dieses Ziel kann allerdings auf verschiedene Weise interpretiert und abgebildet werden, weshalb eine grundlegende Eingrenzung und Definition unter Berücksichtigung der aktuellen Diskussionen nötig ist, um eine konkrete Entwicklung und Implementierung eines Nachweisverfahrens zu ermöglichen (s. Kapitel 2.1).

Das Identifizieren wesentlicher Merkmale, die sich als **Leistungsbeschreibung** eignen um die Grundanforderung ausreichend und konkret zu beschreiben, steht im unmittelbaren Zusammenhang mit einem Verständnis des Kontexts ‚Bauprodukt und Bauwerk‘. Ohne eine hinreichende Untersuchung der Zusammenhänge und Auswirkungen der Baukonstruktion, sowohl auf Produkt- wie auch auf Gebäudeebene, über den gesamten Lebenszyklus, läuft eine Auswahl bestimmter Merkmale Gefahr nur eingegrenzte Wirkungen zu beschreiben und wesentliche zusätzliche Aspekte oder Rückkopplungen zu vernachlässigen (s. Kapitel 2.2).

Die **Wirkungen** einer wesentlichen Leistungsbeschreibung stehen im Spannungsfeld von technischen, wissenschaftlichen und politischen-wirtschaftlichen Anforderungen (Wiggering und Müller 2004). Dies erfordert ein konsistentes Rahmensystem, in dem Systemgrenzen, Betrachtungshorizont und Inhalte sorgfältig anhand Sensitivitätsanalysen, Konsistenzprüfungen und Machbarkeitsstudien entwickelt und abgegrenzt werden. Der Abgleich und die Zusammenführung der methodischen Komplexität mit der Seite der Anwendbarkeit stellt dabei die größte Herausforderung dar. Neben der primären Identifikation von Schnittstellen zwischen Praxis und Wissenschaft liegt ein besonderer Schwerpunkt auf der Untersuchung des Entwicklungspotentials und der Anpassungsmöglichkeiten an zukünftige Erfordernisse (s. Kapitel 2.3 und Kapitel 3).

Bereits existierende Bewertungsmethoden ökologischer Aspekte bestehen in Form des standardisierten Verfahrens der Ökobilanzierung, weshalb die statistische Erfassung bestehender oder neuermittelter Durchschnittswerte, Kennwerte oder Richtwerte auf den aktuellen normativen Grundsätzen für Gebäude aufbaut (DIN EN 15978 2012; DIN EN 15804 2014).

2 Entwicklung eines Nachweisverfahrens

2.1 Problemstellung und Stand des Wissens

2.1.1 Begriffsklärung und Ziel des Nachweisverfahrens

Eine ökologisch nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen im Bauwesen kann auf folgende drei Kernpunkte zusammengefasst werden:

1. Nachhaltige Nutzung und Schutz der Ressourcen durch die Gewährleistung einer konsistenten **Kreislaufführung** der Stoffströme;
2. Schutz von Ökosystemen durch Minimierung der **Umweltwirkungen**, die durch eine Nutzung im Laufe des Lebenszyklus entstehen, im Rahmen der Umweltverträglichkeitsgrenzen;
3. Eine möglichst lange Nutzung und **Dauerhaftigkeit** des Bauwerks.

Eine Betrachtung und Beurteilung einer nachhaltigen Nutzung der drei Kernpunkte kann auf verschiedenen Betrachtungsebenen erfolgen. Unterschiedliche Methoden und Untersuchungsrahmen sind notwendig in Abhängigkeit der jeweiligen Betrachtungsebene. Tabelle 2 zeigt die Inhalte dargestellt auf den verschiedenen Betrachtungsebenen von Produkt zu Gebäude auf. Dabei wird für jedes Thema dargestellt, womit die nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen bewertet werden kann.

Tabelle 2: Betrachtungsebenen einer nachhaltigen Nutzung natürlicher Ressourcen

	Kreislaufführung (Recycling)	Umweltwirkungen (Emissionen)	Dauerhaftigkeit (Nutzungsdauer)
Gebäudeebene	Recyclingfähigkeit der einzelnen Bauteile	Ökobilanzierung von Gebäuden	Nutzungsdauer Gebäude (Standort, Nutzung, Wert etc.)
Bauteilebene	Recyclingfähigkeit der einzelnen Bauteilschichten	Ökobilanzierung von Bauteilen	Nutzungsdauer Bauteil (Austausch, Lage, Qualität, etc.)
Baustoffebene	Lebenszyklusphasen C und Modul D der Ökobilanzierung	Ökobilanzierung von Baustoffen (EPD)	Nutzungsdauer Baustoff (Lebensdauer, Funktion, Lage, etc.)

Insbesondere das Thema der Recyclingfähigkeit (roter Rahmen) und wie diese abgeschätzt werden kann, wird häufig der Experteneinschätzung überlassen und ist in weiten Teilen noch ungelöst. Außerdem zeigt sich, dass die schon normativ eingeführte Ökobilanzierung für die Beschreibung der Umweltwirkungen (Emissionen) einen guten Bewertungsmaßstab darstellt. Das Thema Nutzungsdauern (von Produkt bis Gebäudeebene) wird bisher über die Liste der Dauerhaftigkeiten von Bauprodukten des BBSR (BBSR 2011) auf einem deklarativen Wege gelöst. Deshalb wird in diesem Projekt das Thema Recyclingfähigkeit auf Gebäude- und Bauteilebene vertieft betrachtet. Um das Ziel eines schonenden Umgangs bei der Nutzung von natürlichen Ressourcen im Bauwesen abzubilden, muss der Begriff „Ressourcen“ weiter differenziert und konkretisiert werden. Zu den natürlichen Ressourcen zählen Rohstoffe (abio-

tisch und biotisch) zur stofflichen und energetischen Nutzung sowie Boden und Fläche, Biodiversität, Wasser und Luft (BMUB 2016). In der Ökologie gilt das Rationalprinzip mit dem Ziel eines schonenden Umgangs mit Rohstoffen, der eine nachhaltige Nutzung von Rohstoffen sowohl in stofflicher als auch in energetischer Hinsicht erfordert. Dazu zählen Rohstoffe zur stofflichen Nutzung, die untergliedert werden können in:

Rohstoffe zur stofflichen Nutzung- Materialien und Baustoffe gemäß (BMUB 2016):

- Erze (und Metalle)
- Mineralische Rohstoffe (für Industrie und Bau)
- Biotische Rohstoffe zur stofflichen Nutzung (nachwachsende Rohstoffe)
- Fossile Rohstoffe zur stofflichen Nutzung

Rohstoffe zur energetischen Nutzung – Energieträger und Brennstoffe gemäß (BMUB 2016):

- Fossile Rohstoffe zur energetischen Nutzung – nicht erneuerbare Energie
- Biotische Rohstoffe zur energetischen Nutzung – erneuerbare Energie

Das Ziel einer nachhaltigen Nutzung begründet sich auf der zeitlich und räumlich begrenzten Verfügbarkeit dieser Rohstoffe, die sich auf das den Planeten Erde beschränkt (Raum). Bezogen auf die zeitliche Verfügbarkeit ist festzuhalten, dass alle Rohstoffe sich regenerieren – selbst fossile Ressourcen – allerdings aufgrund der gravierenden Unterschiede in den Regenerationszyklen verglichen mit dem menschlichen Generationenmaßstab, erneuerbare (oder nachwachsende) Ressourcen von nicht erneuerbaren Ressourcen unterschieden werden.

Im Zentrum einer nachhaltigen Nutzung von Rohstoffen zur stofflichen Nutzung steht neben der Dauerhaftigkeit und der Umweltverträglichkeit der Rohstoffe, das Schließen von Stoffkreisläufen durch Recycling. Der Begriff des Recyclings wird seitens des VDI definiert als

„erneute Verwendung oder Verwertung von Produkten, Teilen von Produkten sowie Werkstoffen in Form von Kreisläufen“ (VDI Richtlinie 2234 2002),

und umfasst die Verwendung und Verwertung von Produkten am Ende der Nutzungs-/Gebrauchsphase, ohne Verwertung näher zu differenzieren. Das Kreislaufwirtschaftsgesetz definiert den Begriff Recycling und Wiederverwendung wie folgt:

„Wiederverwendung ist jedes Verfahren, bei dem Erzeugnisse oder Bestandteile [z. B. Bauteile], die keine Abfälle sind, wieder für denselben Zweck verwendet werden, für den sie ursprünglich bestimmt waren.“ (KrWG 2012)

„Recycling [...] ist jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfälle zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden; es schließt die Aufbereitung organischer Materialien ein, nicht aber die energetische Verwertung und die Aufbereitung zu Materialien, die für die Verwendung als Brennstoff oder zur Verfüllung bestimmt sind.“ (KrWG 2012)

Als mögliche Entsorgungs- und Verwertungswege werden gemäß der Definition des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG 2012) (s. Tabelle 3) unterschieden:

Tabelle 3: Übersicht der möglichen Verwertungswege

Kategorie	Abfallströme (Material)
1 Wiederverwendung	Material zur Wiederverwendung
2 Wiederverwertung	Sekundärmaterial zur stofflichen Nutzung mit gleichwertigen Stoffniveau
3	Sekundärmaterial zur stofflichen Nutzung mit minderwertigen Stoffniveau
4 Endgültige Verwertung	Material zur endgültigen, stofflichen Verwertung
5	Material zur endgültigen, energetischen Verwertung
6 Beseitigung	Material zur Beseitigung

Als wesentliches Merkmal für eine nachhaltige, stoffliche Nutzung von Rohstoffen dient einerseits der Anteil der wiederverwendbaren und -verwertbaren Baustoffe und dem gegenüber, der Anteil der zu beseitigenden Baustoffe. Im Kontext der recyclingfähigen Stoffe, muss unterschieden werden zwischen Wiederverwendung und stofflicher Verwertung. Recycling beschreibt sowohl eine Wiederverwendung (Produkt-Recycling) und eine wiederholbare Kreislaufführung auf gleichwertigem (Werkstoff-Recycling) sowie auf minderwertigem Qualitätsniveau (Downcycling), als auch ein einmaliges Schließen des Kreislaufes durch eine endgültige Verwertung (zur stofflichen oder energetischen Substitution). Eine endgültige Verwertung beschreibt eine einmalige Verwertung, z.B. in Form von Verfüllungen (stofflich) oder Energiegewinnung (energetisch). Eine wiederholte Verwertung im Sinne einer wiederholten Kreislaufführung ist damit ausgeschlossen. Das Nachweisverfahren soll diese Differenzen abbilden und dient als Grundlage zur Ermittlung einer Recyclingquote und für eine Erhöhung der Recyclinganteile in neuen Baustoffen, die als Ziele und Indikatoren des ProgRess Programms identifiziert wurden (BMUB 2016).

Das Nachweisverfahren soll Planer dabei unterstützen den Gebäudeentwurf und die Wahl der Konstruktion hinsichtlich Baustoffe und Fügungen so zu wählen, dass die verwendeten Stoffe in geschlossenen Stoffkreisläufen gehalten werden können – wie es nach dem Anhang I der Bauproduktenverordnung (Europäische Union 2011) (Europäische Union 2011)vorgeschrieben und auch das Rahmenwerk LEVEL(s) der EU zur Beschreibung der Nachhaltigkeit von Gebäuden unter Punkt 2 vorsieht (Dodd et al. 2017).

2.1.2 Methoden der Nachweisverfahren

Die nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen (Grundanforderung 7, Bauproduktenverordnung) kann auf nationaler Ebene aktuell noch nicht berücksichtigt werden, da bisher kein umsetzbares Nachweisverfahren vorliegt, das diese Grundanforderung beschreibt.

Im Baubereich reichen die Entwicklungen von den Methoden der Umweltkennzeichnungen (nach ISO 14020 ff.), über die Nachhaltigkeitszertifizierung von Gebäuden bis hin zur Methode der Ökobilanzierung (s. Kapitel 2.1.3). Diese Bewertungsmethoden unterscheiden sich

stark in der Adressierung der angesprochenen Umweltthemen, in der Akzeptanz und Anwendbarkeit innerhalb der Praxis und insbesondere im Komplexitätsgrad der Methode.

Die Methoden der Umweltkennzeichnungen beziehen sich beispielsweise primär auf Bauprodukte und bilden durch Labels, Deklarationen oder umfangreiche EPDs (Environmental Product Declaration) in erster Linie eine Entscheidungshilfe für Endverbraucher und Händler bei der Produktwahl.

Die Gebäudezertifizierungen (BNB/DGNB/LEED/BREEAM etc.)¹ sind meist modular aufgebaut, um den dynamischen Wandel, die Datenverfügbarkeit und die Vielzahl an betrachteten Kriterien abzubilden (Hauser et al. 2010). Diese Systeme finden immer mehr Verwendung, vor allem im Bereich von Büroimmobilien (Statista). Sie sind allerdings nicht verpflichtend, außer im Fall der Bundesbauten, da sich der Bund selbst zu einer Zertifizierung aller neuerichteten Büro- und Verwaltungsgebäude nach dem BNB-System verpflichtet hat. Die Anzahl an bereits zertifizierten Gebäuden zeigt, dass diese Systeme – wenn auch sehr unterschiedlich in ihrem Anforderungsprofil – sich trotz Mehrkosten und zusätzlichen Fachplanern bewähren, allerdings bisher nur langsam verbreiten (Europäische Nachhaltigkeitsstatistik 2015).

Der Bericht „Europäische Bewertungsdokumente für nachhaltige Bauprodukte: Informationen für KMU“, welcher im Rahmen des EUINTERREG IVB-Projektes SPIN (Sustainable Production through Innovation in SMEs) durch das Baltic Sea Region Programme 2007-2013 erstellt wurde, werden Vorschläge zur Umsetzung der Grundanforderung Nr. 7 erarbeitet mit dem Ziel, dass KMUs die Bauproduktenverordnung besser verstehen und umsetzen können. (Malkwitz et al. 2014)

In Bezug auf die Umsetzung der Forderung der Rezyklierbarkeit wird dargestellt, dass der Hersteller die Rezyklierbarkeit seines Produkts mitbedenken muss. Des Weiteren wird für die Umsetzung auf den Steckbrief 4.1.4 „Rückbau, Trennung und Verwertung“ der BNB Zertifizierung sowie die Berücksichtigung der Rezyklierbarkeit im Rahmen einer Ökobilanzierung (s. nachfolgendes Kapitel) bzw. EPDs verwiesen. (Malkwitz et al. 2014)

Die Aspekte der „[...] Dauerhaftigkeit verfolgen letztendlich das gleiche Ziel, wie sie auch im Rahmen der Nachhaltigkeit verlangt werden. Da die Aspekte und Anforderungen an die Dauerhaftigkeit in der Bauproduktenverordnung mit großer Wahrscheinlichkeit aus der Bauproduktenrichtlinie übernommen werden, sind nach Ansicht der Autoren keine weiteren Anforderungen an Bauprodukte hinsichtlich der Dauerhaftigkeit zu stellen (Malkwitz et al. 2014)“.

Im Rahmen eines europäischen Zulassungserfahrens, und die dabei geforderte Einhaltung der Normungen, für Bauprodukte ist die Berichterstattung über gefährliche Stoffe (vergl. REACH-Verordnung) in Produkten verpflichtend und prüfungsrelevant, wodurch nach (Malkwitz et al. 2014) die Umweltfreundlichkeit behandelt wird.

In dem Projekt „Ressourcenschonung durch Produktkennzeichnung für Bauprodukte: Erstellung eines Kriterienkatalogs für die Stufeneinteilung von Bauprodukten in der Normung“

¹ BNB = Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen; DGNB = Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen; LEED = Leadership in Energy and Environmental Design; BREEM = Building Research Establishment Environmental Assessment Method

wurde unter anderem EPDs auf Ihre Eignung geprüft die Ressourceninanspruchnahme darzustellen. „Als Informationsinstrument zur detaillierten Darstellung der Bauprodukte ist die EPD grundsätzlich geeignet, jedoch führt die BWR 7 zu höherem Informationsbedarf (Kirchner 2012)“. Es wurde festgestellt, dass die Informationen für die Recyclingfähigkeit, Dauerhaftigkeit sowie die Umweltverträglichkeitskriterien nicht vollumfänglich abgebildet werden. Für die Schließung dieser Informationslücken wird unter anderem empfohlen den EPD-Typ „von der Wiege bis zur Bäre“ verbindlich einzuführen. (Kirchner 2012) (vergl. Kapitel 2.1.4)

2.1.3 Bestehende Methode der Ökobilanzierung

Die Methode der Ökobilanzierung wurde in den letzten Jahren für das Bauwesen stetig weiterentwickelt und durch einheitliche Berechnungsregeln harmonisiert. Resultierend aus der Normungsarbeit des CEN/TC 350 wurden Vorgehen, Grenzen sowie Inhalt und Kommunikation einer Ökobilanz definiert und festgehalten (vgl. ISO 14040, ISO 14044, DIN EN 15804, DIN EN 15978 u.v.m.). Durch den Prozess der Normung und die Arbeit des CEN/TC 350 wurde ein internationaler Konsens und allgemeiner Standard für die Methode und damit auch die Auswahl der Indikatoren erarbeitet – wie nachfolgend dargestellt:

Tabelle 4: Normative Grundlagen für die Ökobilanzierung von Gebäuden

DIN EN ISO 14040	Grundsätze und Rahmenbedingungen einer Ökobilanz
DIN EN ISO 14044	Anforderungen und Anleitungen einer Ökobilanz
DIN EN 15643-2	Rahmenbedingungen für die Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden
DIN EN 15978	Berechnungsmethode für die Ökobilanzierung von Gebäuden
DIN EN 15804	Grundregeln für die Methodik der Ökobilanzierung von Bauprodukten

Die Ökobilanz ist die einzige internationale genormte Methode einer ökologischen Produktanalyse. Sie baut bereits auf dem Systemgedanken auf und basiert damit auf einer vereinfachten Systemanalyse (Klöpffer und Grahl 2009; Kreissig 2009) Eine Ökobilanzierung wird durch die DIN EN ISO 14040 und 14044 definiert als „Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Outputflüsse und der potenziellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges.“ (DIN EN 14040 2009) Das bedeutet, dass mit der Methode Ökobilanzierung, Systeme unterschiedlicher Größe und Umfangs betrachtet werden können, z.B. ein Bauprodukt, ein gesamtes Bauteil oder auch Gebäude die diese untergeordneten Systeme umfassen. Daher entsprechen die Indikatoren einer kumulativen Charakteristik, da sie sowohl für Baustoffe, Bauteile, Räume einzeln oder das Gebäude im Gesamten ermittelt werden können und jeweils das Ziel hinsichtlich des der Qualität vollständig beschreiben.

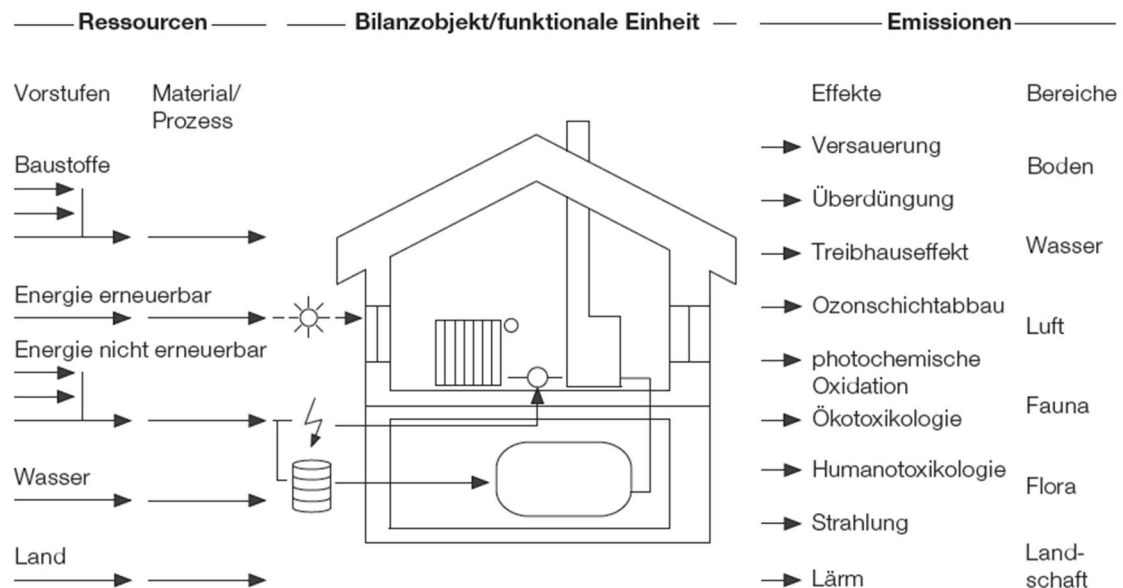


Abbildung 2: Systemmodell der Stoff- und Energieströme bei einer Ökobilanz eines Gebäudes (Kreissig 2009)

Die Methode baut dabei auf den Grundsätzen der Lebenswegbetrachtung, einer umweltbezogenen Ausrichtung, eines relativen Ansatzes (funktionelle Einheit), der Iteration, der Transparenz, der Ganzheitlichkeit und der Priorität eines wissenschaftlichen Ansatzes auf. Das Vorgehen zur Bilanzierung gliedert sich in vier Phasen (DIN EN 14040 2009):

1. Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens;
2. Sachbilanz;
3. Wirkungsabschätzung und
4. Auswertung.

Entsprechend dem Grundsatz der Ganzheitlichkeit umfasst und beschreibt die Methode der Ökobilanzierung eine Vielzahl an Umweltwirkungen, Input- und Outputströme, die eine umweltbezogene Auswirkung darstellen. Das große Potential einer Ökobilanz, die den gesamten Lebenszyklus eines Produktes oder Gebäudes mitsamt den zugrundeliegenden Prozessen darstellen kann, wird durch die stetige Erweiterung und Anpassung der Datenbanken mit Wirkungen der Prozesse (ökobau.dat, ecoinvent, etc.) und eine vermehrte Anwendung immer mehr freigesetzt. Allerdings bleibt diese Methode auch aufgrund ihrer Komplexität primär den Fachexperten zugänglich.

Hinsichtlich der Entwicklung einer Bewertung des Ziels der nachhaltigen Nutzung von Rohstoffen muss unterschieden werden in energetische und stoffliche Rohstoffe. Für das Abbilden der *energetischen Rohstoffe* kann analog zur Beschreibung der Umweltwirkungen auf die Methode der Ökobilanzierung zurückgegriffen werden. Darüber hinaus bietet die Ökobilanz bereits erste Indikatoren zur Bewertung stofflicher Rohstoffe.

Tabelle 5: Übersicht der Indikatoren der Ökobilanzierung hinsichtlich Ressourcennutzung gemäß (DIN EN 15804 2014)

Ökobilanz-Indikatoren		Einheit
PERE	Einsatz erneuerbarer Primärenergie - ohne die erneuerbaren Primärenergieträger, die als Rohstoffe verwendet werden	MJ, unterer Heizwert
PERM	Einsatz der als Rohstoff verwendeten, erneuerbaren Primärenergieträger (stoffliche Nutzung)	MJ, unterer Heizwert
PERT*	Gesamteinsatz erneuerbarer Primärenergie – Primärenergie und die als Rohstoff verwendeten erneuerbaren Primärenergieträger (energetische + stoffliche Nutzung)	MJ, unterer Heizwert
PENRE	Einsatz nicht erneuerbarer Primärenergie ohne die als Rohstoff verwendeten nicht erneuerbaren Primärenergieträger	MJ, unterer Heizwert
PENRM	Einsatz der als Rohstoff verwendeten nicht erneuerbaren Primärenergieträger (stoffliche Nutzung)	MJ, unterer Heizwert
PENRT*	Gesamteinsatz nicht erneuerbarer Primärenergie – Primärenergie und die als Rohstoff verwendeten nicht erneuerbaren Primärenergieträger (energetische + stoffliche Nutzung)	MJ, unterer Heizwert
CRU	Komponenten für die Weiterverwendung	kg
MFR	Stoffe zum Recycling	kg
MER	Stoffe für die Energierückgewinnung	kg

* Die Indikatoren PERT und PENRT ergeben sich automatisch durch entsprechende Summenbildung.

Die Indikatoren PERT und PENRT ergeben sich durch die entsprechende Summe der erneuerbaren und nicht-erneuerbaren Primärenergie-Indikatoren ($PERT=PERE+PERM$ und $PENRT=PENRE+PENRM$). Das Ausweisen dieser Summenindikatoren beruht auf der historisch gewachsenen einseitigen Betrachtung der Erneuerbarkeit der Primärenergie im Gegensatz zur Art der Nutzung. Anhand der einzelnen Indikatoren der Ökobilanzierung können jedoch grundsätzlich vier verschiedene Merkmale abgebildet werden. Einerseits kann mit den Indikatoren der energetischen Nutzung ($PERE + PENRE$) dargestellt werden wieviel Primärenergie insgesamt im Laufe des Lebenszyklus verbraucht wird und dabei zusätzlich der Anteil der erneuerbaren Primärenergie ($PERE / [PENRE + PERE]$) aufgezeigt werden. Analog dazu bilden die Indikatoren der Primärenergie zur stofflichen Nutzung ($PERM + PENRM$) den Energiegehalt ab, der in den Stoffen enthalten ist und am Ende ggf. für eine energetische Nutzung zur Verfügung steht. Der Anteil der erneuerbaren Primärenergie ist dabei ebenfalls abbildbar ($PERM / [PENRM + PERM]$). Die Problematik hinsichtlich verbrauchter Primärenergie ($PERE + PENRE$) und der Primärenergie, die im Material noch enthalten ist ($PERM + PENRM$), wurde bereits an anderer Stelle diskutiert (Ebert et al. 2020b). Analog zu diesen Ergebnissen

wird in dieser Arbeit ebenfalls die Ergebnisse der Primärenergie nach energetischer und stofflicher Nutzung gegliedert.

Zur Beschreibung der Recyclingfähigkeit und zum Abbilden geschlossener Stoffkreisläufe im Rahmen einer Kreislaufwirtschaft wird die Methode der Ökobilanzierung um Aspekte des Stoffstrommanagements erweitert, die die wesentlichen technischen Merkmale, Parameter und Zusammenhänge am Ende des Lebenszyklus von Gebäuden abbilden.

2.1.4 Problematik einer reinen Betrachtung der Baustoffe

Ein Instrument um Stoffströme im Bauwesen auf unterschiedlichen Ebenen abzubilden ist die Ökobilanzierung. Grundsätzlich hat die Ökobilanzierung von Produkten den Anspruch, alle Umwelteinflüsse von der Bereitstellung der Rohstoffe bis zur Entsorgung der Abfallstoffe am Ende des Lebenszyklus, abzubilden. Nach (DIN EN 15804 2014) werden die Lebensabschnitte eines Produktes in Informationsmodule A bis D unterteilt, um für eine Bilanzierung auf Gebäudeebene nach (DIN EN 15978 2012) harmonisierte Informationen bereitstellen zu können. Der Rückbau auf Gebäudeebene wird in den Informationsmodulen C1 bis C4 (End-of-Life) abgebildet. Alle möglichen Last- und Gutschriften über den Lebensweg hinaus, welche bei der Wiederverwendung oder dem Recycling, wie auch bei der Rückgewinnung von Rohstoffen entstehen können, werden in Modul D bilanziert. Die Frage, ob es möglich ist das Potenzial einer hochwertigen Verwertung auf Bauproduktebene und auf Gebäudeebenen mithilfe von Parametern der Ökobilanzierung darzustellen, wurde bereits untersucht (Krause und Hafner 2018). Die Informationen in Modul D können sich nach DIN EN 15804 und DIN EN 15978 aus den Modulen A5, B2, C3 und/oder C4 zusammensetzen und können z.B. auch die Entsorgung von Verpackungsmaterial eines Produktes enthalten. Die daraus resultierenden Gutschriften werden in Modul D ausgewiesen und mit weiteren Gutschriften verrechnet. In diesem Fall kann sowohl auf Produkt- als auch auf Gebäudeebene nicht differenziert werden zwischen Gutschriften aus dem Verwertungsweg des Verpackungsmaterials und dem Verwertungsweg des eigentlichen Produkts. Die Berechnungen in (Krause 2020) zeigen, dass zur Zeit bis zu 10% der Gutschriften beispielsweise für den Indikator GWP auf die Verwertung des Verpackungsmaterials zurückzuführen sind und damit zu einem frühen Zeitpunkt anfallen als der Rückbau des Gebäudes.

Nach DIN EN 15804:2014-07 sind die Informationsmodule A „Herstellung“ eine verpflichtende Angabe bei der Produktökobilanz. Die anderen Informationsmodule sind optional anzugeben. Seit März 2020 ist die überarbeitete DIN EN15804:2020-03 in Kraft getreten. Eine entscheidende Änderung ist, dass alle Bauprodukte und -materialien die Module A1-A3, die Module C1-C4 und das Modul D deklarieren müssen. „Ausschließlich bei Produkten, die alle drei der nachfolgend aufgeführten Bedingungen erfüllen, ist eine Ausnahme von dieser Anforderung zulässig:

- das Produkt oder Material wird während des Einbaus physisch mit anderen Produkten so verbunden, dass es bei der Entsorgung nicht physisch von ihnen getrennt werden kann; und
- das Produkt oder Material ist aufgrund von physikalischen oder chemischen Umwandlungsprozessen bei der Entsorgung nicht mehr identifizierbar; und
- das Produkt oder Material enthält keinen biogenen Kohlenstoff.“ (DIN EN 15804)

Aktuell sind aber noch überwiegend nur die Module A1-A3 deklariert. Um auf Gebäudeebene einen vollständigen Lebenszyklus abzudecken wird dem betrachteten Material ein generischer Datensatz als End-of-Life Szenario zugeordnet. Generische Daten sind allgemeingültige Durchschnittswerte für die Aufbereitung oder Entsorgung von bestimmten Produktgruppen. Das bedeutet, dass nicht produktspezifische Informationen wiedergegeben werden und zusätzlich keine Informationen zu Modul D vorhanden sind. Aus diesem Grund wird für eine vollständige, produktspezifische Auflistung der Entsorgungswege innerhalb des entwickelten Modells auf Literaturangaben zurückgegriffen.

Als Beispiel werden derzeit mineralische Materialien wie Beton, Ziegel und Kalksandstein laut (Destatis 2020) zu 93% stofflich verwertet ohne die Qualitätsstufe zu differenzieren, der Rest wird auf Deponien gelagert. Nach dem Stand der Technik ließe sich der Recyclinganteil erhöhen, u. a. durch die Erhöhung der Recyclingrate von Betonbruch für Recyclingbeton von < 0,5 % auf 45 % (Deilmann et al. 2017). Zukünftig sollen Betone mit einem Recyclinganteil von mindestens 90 % (Deilmann et al. 2017) an der Gesteinskörnung hergestellt werden, sodass die Recyclingquote von Betonen und Ziegeln steigt. Außerdem reichen bei höherwertigen Verwertungsverfahren vereinzelt die Kapazitäten der Anlagen (noch) nicht aus (vgl. Gipsrecycling).

Angaben zur Verwertung von Baustoffen sind in der ÖKOBAUDAT, als zugrunde gelegte Datenbank für Produktökobilanzen, teilweise nicht vorhanden oder beziehen sich auf herstellerspezifische Produkte. Daher werden, in dieser Arbeit, die in der ÖKOBAUDAT gelisteten Baustoffe den zugehörigen in der Literatur angegebenen Verwertungs- und Entsorgungsszenarien zugeordnet. Dabei wird zwischen dem aktuellen Stand, dem aktuell möglichen Stand (Stand der Technik) und den zukünftig möglichen Stand (Stand der Forschung) unterschieden. Um die Wiederverwendbarkeit einiger Baustoffe zu ermöglichen wird deren Trennbarkeit und ein zerstörungsfreier Ausbau vorausgesetzt, weshalb die Verbindungen von Baustoffen untereinander, zu berücksichtigen sind. Bisherige Verfahren zur Bewertung der Recyclingfähigkeit, z.B. der Ökobilanzierung (Betrachtung des Modul D) oder der Nachhaltigkeitsbewertung stellen aktuell noch keinen oder einen eingeschränkten wechselseitigen Bezug zwischen Baustoff und Bauteil dar. Eine Bewertung der Trennbarkeit oder der Sortenreinheit erfolgten häufig unsystematisch. Aus diesem Grund ist – aus Sicht der Autoren – ein erweiterter Modellansatz notwendig, der eine Betrachtung von Bauteilen im Gesamtkontext darstellt. Bauteile umfassen dabei sowohl Baustoffe als auch die Thematik des Fügens der Baustoffe, wie bereits von (Schwede und Störl 2017) diskutiert und vorgeschlagen. Auf diese Weise kann eine Einschätzung der Verwertbarkeit der Output-Stoffströme argumentativ und nachvollziehbar erfolgen.

2.1.5 Stoffstrombetrachtung auf nationaler Ebene

„Einzelstoffbezogene Analysen auf nationaler Ebene wurden seit den 70er Jahren insbesondere für Schwermetalle durchgeführt. [...] Die Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ griff solche Analysen am Beispiel von Kadmium, Benzol und R134a sowie ausgewählten umweltpolitischen relevanten Stoffen aus dem Bereich der Chlorchemie auf und entwickelte sie zu einer systematischen Grundlage für stoffpolitische Handlungsvorschläge weiter (Held 1994).“ (Friege et al. 1998)

Im Rahmen des Projekts KartALII (Hedemann und Meinshausen 2016) wurde für Deutschland ein Stoffstrommodell entwickelt, das als Planungsgrundlage für Sekundärressourcen aus langlebigen Gütern dienen soll. Es wurde eine Datenbank mit einem rechnenden Stoffstrommodell kombiniert, um sowohl auf Güterebene als auch auf Materialebene den Bestand sowie dessen Dynamik erfassen und analysieren zu können. „Die Analyseschichten nutzen verschiedene Analysemethoden (Top-Down und Bottom-Up) und greifen auf unterschiedliche Datenquellen zurück. Innerhalb der Schichten werden jeweils materialflussbezogene Analysen (MFA-Analysen) und abfallwirtschaftliche Analysen durchgeführt und zusammengeführt. Materialflussanalysen betrachten güterbezogene Materialflüsse. Abfallwirtschaftliche Analysen setzen an Abfallfraktionen an, die einer grundsätzlich anderen Gliederungslogik folgen und keine unmittelbaren Material- und Güterbezüge aufweisen.“ (Schiller et al. 2015)

Die Gegenüberstellung der Ergebnisse der beiden Analysemethoden Top-Down und Bottom-Up zeigen Abweichungen in beide Richtungen. Speziell für den Wohngebäudebereich wurde je nach Methode ein Materiallager von bis zu 9.269 Mio. t ermittelt. Basierend auf Bautätigkeitsstatistiken wurde für das Bezugsjahr 2010 ein Materialoutput von 18 Mio. t ermittelt. „Mit den in der Bautätigkeitsstatistik (Destatis 2011) gemeldeten Abgängen werden die tatsächlichen Abgänge im Gebäudebereich nicht vollständig erfasst.“ (Schiller et al. 2015) Es wird davon ausgegangen, dass der Materialoutput tatsächlich größer ist. Die genaue Ermittlung der Materialströme auf Gebäudeebene sowie auf Materialebene bedarf weiterer Forschungsarbeit. Das im folgenden vorgestellte Modell liefert einen zukünftigen Lösungsansatz.

2.2 Modellentwicklung eines Nachweisverfahrens

2.2.1 Aufbau des Modellansatzes

Der Modellansatz stützt sich auf ein Stoffstrommodell zur Ermittlung der recyclingfähigen und der zu beseitigenden Baustoffe einer Konstruktion. Für eine grundlegende Strukturierung des Stoffstrommodells dient die Einteilung der Prozesse nach den standardisierten Lebenszyklusphasen gemäß DIN EN 15804 (Bauprodukte) und DIN EN 15978 (Gebäude). Schnittstellen und Kategorien des Modells werden mit den nationalen und europäischen Statistiken und Stoffstrommodellierungen nach (Steger et al. 2018) und (Hedemann und Meinshausen 2016) vereinheitlicht, indem auf bestehende Strukturen hinsichtlich der Gruppierung von Bauprodukten nach (Deilmann et al. 2017), auf die Klassifizierung von Bauabfällen nach Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung 2013) und auf normative Standards (DIN 8588 2013; DIN EN 15804 2014; DIN 18007 2000) zurückgegriffen wird.

Im Sinne der Zielsetzung des entwickelten Stoffstrommodells zur Abbildung der Recyclingfähigkeit ergeben sich die nachfolgenden Indikatoren für das Ziel der Schonung von Rohstoffen (Ebert 2020a):

Tabelle 6: Kategorisierung der Stoff- und Abfallströme nach ressourcenbezogenen Output-Indikatoren

Kategorie	Abfallströme (Material)	Einheit
1	MRU Material zur Wiederverwendung (engl. <i>Material for Re-Use</i>)	kg / %-Anteil
2	MSM Material zur gleichwertigen stofflichen Verwertung als Sekundärmaterial (engl. <i>Material for Secondary Material Use</i>)	kg / %-Anteil
3	MMR Material zur minderwertigen stofflichen Verwertung (engl. <i>Material for Material Recovery</i>)	kg / %-Anteil
4	MMRf Material zur endgültigen stofflichen Verwertung (engl. <i>Material for final/one-time Material Recovery</i>)	kg / %-Anteil
5	MERf Material zur endgültigen energetischen Verwertung (engl. <i>Material for final/one-time Energy Recovery</i>)	kg / %-Anteil
6	MWD Material zur Deponierung (engl. <i>Material for Waste and Disposal</i>)	kg / %-Anteil

Für die Ermittlung der ressourcenbezogenen Output-Indikatoren gilt es, die Menge an Rohstoffen quantitativ zu ermitteln, die der jeweiligen Kategorie zugeschrieben werden kann. Mithilfe eines nachvollziehbaren Stoffstrommodells können diese Größen ermittelt werden. Wesentlich für eine zielführende Betrachtung des Gebäuderückbaus und der Abfallbehandlung ist eine Differenzierung von Baustoff- und Bauteilebene (Krause und Hafner 2018). Die Wahl von Materialien eines Bauteilaufbaus schließt das Potential der Baustoffe für eine material-spezifische Verwertbarkeit mit ein (vgl. Kap. 1.3). Inwiefern dieses Potential durch den Einbau und die Errichtung des Gebäudes sowie durch den Einfluss der Nutzung am Ende des Lebenszyklus noch zur Verfügung steht und genutzt werden kann ist, neben der materialspezifischen Verwertbarkeit, abhängig von der Konfiguration der Baustoffe in einem Bauteil. Die Konfiguration der Bauteile unterscheidet sich hinsichtlich der Anzahl an Baustoffen, welcher Baustoff-Gruppe (Gruppierung in Rohstoffkategorie und Baustoffkategorien nach Deilmann/Reichenbach (Deilmann et al. 2017)) die Baustoffe zugeordnet werden können und wie diese Baustoffschichten in der Lebenszyklusphase „A5 – Errichtung/Einbau“, miteinander gefügt wurden. Für eine nachvollziehbare Darstellung dieser Zusammenhänge werden die einzelnen Lebenszyklusphasen Rückbau/Abriss (C1) und die Abfallbehandlung (C3) näher betrachtet. Der Ablauf der Phase C1 beschreibt idealerweise einen selektiven Rückbau, der drei grundsätzliche Prozesse umfasst:

- Ausbau/Demontage
- Entkernung
- Abbruch

Allgemein wird bei einer Bauwerksbeseitigung zwischen zwei Verfahren unterschieden, einem Abbruch und einem Rückbau. Beide Verfahren können zusätzlich auch selektiv erfolgen. Unter dem Begriff Abbruch wird ein Trennverfahren verstanden ohne ausdrückliche Berücksichtigung des Materialbestandes. Dem gegenüber steht der Rückbau mit dem Ziel, möglichst

unvermischte Materialien zu erhalten (Müller 2018). Entsprechend erfolgt der Rückbau häufig selektiv, kontrolliert, systematisch oder auch recyclinggerecht in einer schrittweisen Demontage, Entkernung und abschließendem Abbruch. Im Rahmen der Bewertung der Recyclingfähigkeit wird ein reines Abbruchverfahren ausgeschlossen und von einem Rückbauverfahren ausgegangen. Für die Möglichkeit einer Demontage, einer Entkernung oder des Abbruchs sind zwei Informationen ausschlaggebend:

- Die Lösbarkeit der Fügung hinsichtlich der Schädigung
- Eine mögliche Kategorisierung der Output-Stoffströme (bzw. der Baustoff-Gruppe) hinsichtlich Schadstoffe oder Störstoffe

Als wesentliche Entscheidungsparameter im Rahmen der Planung steht neben der Auswahl der Baustoffe, die Wahl der Fügung dieser Baustoffe zu Bauteilen und die Fügung der Bauteile untereinander zu Räumen und dem Gebäude als Ganzem. Verbindungen zwischen Baustoffen und Bauteilen lassen sich unterscheiden in formschlüssige, kraftschlüssige und stoffschlüssige Verbindungen und resultieren aus der Fügemethode. Die mögliche Auswahl an Fügemethoden orientiert sich an der Systematik der DIN 8580. Auf Grundlage der ausgewählten Fügung im Rahmen der Planung und der Errichtung wird eine Aussage zur Lösbarkeit dieser Verbindung getroffen (DIN 8591 2003). Die Lösbarkeit der Fügemethoden wird mit einer dreistufigen Zuordnung klassifiziert in:

Tabelle 7: Klassifizierung der Lösbarkeit von Fügemethoden

Symbol	Lösbarkeit
+	OHNE Schädigung lösbar
o	mit ausreichend geringer Schädigung lösbar
-	MIT Schädigung lösbar

Auf dieser Grundlage wird jede Fügung zwischen den Baustoffen einer dieser drei Kategorien zugeordnet. Dabei wurden nicht eindeutige Fügemethoden unterschieden, falls diese durch fehlende Zugänglichkeit, fehlende Erkennbarkeit hohe Anzahl oder andere Einflüsse eine Schädigung erfahren oder Ihre Lösbarkeit anderweitig eingeschränkt wird. Die Übersicht kann hinsichtlich neuer Entwicklungen von Fügemethoden im Bauwesen auch jederzeit erweitert oder bei Bedarf auch weiter differenziert werden.

Tabelle 8: Übersicht über mögliche Fügemethoden (DIN 8591 2003) und ihrer Lösbarkeit (Schwede und Störl 2017)

Fügemethodik	Kürzel	Verbindung	Lösbarkeit
Zusammensetzen			
Auflegen, Aufsetzen, Schichten (lose)	AUF-I	FSV	+
Auflegen, Aufsetzen, Schichten (magnetisch)	AUF-m	FSV	+
Einlegen, Einsetzen (Zapfen, Versatz, Einklemmen)	EIN	FSV	+
Ineinanderschieben (Gelenkbolzen, Dübel)	INEIN	FSV	+
Einhängen (z.B. von Federn)	HÄNG	FSV	+
Einrenken (Reiß-, Klett-, Bajonettverschluss)	RENK	FSV	+
federnd Spreizen (Schnappverschluss)	SPREI	FSV	+

Füllen			
Einfüllen	FÜL	FSV	+
Tränken, Imprägnieren	IMP	SSV	-
An- und Einpressen			
Schrauben vorgeformt (Bolzen, SL, SLV, GV, GVP)	vSRA	KSV	+
Schrauben selbstformend (Holzschrauben)	sSRA+	KSV	o
Schrauben selbstformend (verdeckt, hohe Anzahl)	sSRA-	KSV	-
Klemmen / Klemmverschluss (z.B. Seilklemme)	KLEM	KSV	+
Klammern	KLAM	KSV	+
Fügen durch Presspassung (Schrumpfen/Dehnen)	PRESS	KSV	o
Nageln, Nagelplatten, Verstiften, Einschlagen	NAG+	KSV	o
Klammern, Holznägeln, hohe Anzahl an Nägeln	NAG-	KSV	-
Verkeilen	KEIL	KSV	+
Verspannen	SPANN	KSV	+
Urformen			
Ausgießen (Gießen von Ortbeton, Halbfertigteile)	AGIE	SSV	o
Einbetten (Eingießen von Anschlussbauteilen)	EIBET	SSV	-
Vergießen von zwei Bauteilen (Fugen)	VGIE	SSV	-
Eingalvanisieren	GALV	SSV	-
Ummanteln	UMM	SSV	-
Kitten	KIT	SSV	-
Umformen			
Fügen durch Umformen drahtförmiger Körper	UMFD	FSV	o
Fügen d. Umformen bei Blech-, Rohr- und Profilteilen	UMFB	FSV	o
Fügen durch Nietverfahren	NIET	FSV	-
Schweißen			
Pressverbindungsschweißen	PSCHW	SSV	-
Schmelzverbindungsschweißen	SSCHW	SSV	-
Löten			
Verbindungsweichlöten	WLÖT	SSV	-
Verbindungshartlöten	HLÖT	SSV	-
Kleben			
Kleben mit physikalischen abbindenden Klebstoffen	PKLEB	SSV	-
Kleben mit chemisch abbindenden Klebstoffen	CKLEB	SSV	-
Kleben mit löslichen Klebstoffen	KLEB+	SSV	o
Beschichten (aus dem flüssigen Zustand)			
Anstreichen, Lackieren	STR	SSV	-
Beschichten (aus dem plastischen Zustand)			
Spachteln	SPA	SSV	-
Beschichten (aus dem breiigen Zustand)			
Putzen, Verputzen	PUT	SSV	-

Schadstoffe (baustoffimmanent, nutzungsbedingt oder umweltbedingt) müssen vor dem Abbruchprozess aussortiert werden und werden dementsprechend während des Entkernungsprozesses entfernt, da eine Demontage nicht notwendig ist. Störstoffe beschreiben alle Baustoffe, die keine Verwertungskompatibilität mit dem Bauschutt aufweisen und in der späteren

Abfallbehandlung mühsam aussortiert werden müssen und werden daher ebenfalls entfernt. Eine Trennung kann während der Rückbau- und Abrissphase, oder während der Abfallaufbereitungsphase geschehen. Ist eine Lösbarkeit der Fügung nur im Zusammenhang mit einer Schädigung möglich, erfolgt die Trennung durch Entkernung oder Abbruch. In der Regel werden Störstoffe während der Entkernung gelöst und mineralische Störstoffe, die nicht ohne Schädigung gelöst werden können, im Bauschutt durch Sortierung entfernt. Für eine Demontage müssen die wiederverwendbaren Baustoffe und Bauteile ohne oder mit sehr geringer Schädigung gelöst werden können. Als Resultat der Rückbau- und Abrissphase ergeben sich entsprechend aus den Demontageprozessen geborgene und **wiederverwendbare Bauteile** (WV), aus den Entkernungsprozessen **Baustellenabfälle** (BA) und kleinere Mengen an Bauschutt und aus dem Abbruch entsprechend **Bauschutt** (BS). Im Rahmen der Abfallbehandlungsphase (C3) wird entschieden welchen Entsorgungsweg die Stoffströme einschlagen.

Die Aufteilung erfolgt anhand der Abfallkategorien auf Grundlage der Arbeiten von (Deilmann et al. 2017), (Steger et al. 2018) und dem Monitoring-Bericht der Kreislaufwirtschaft Bau (Kreislaufwirtschaft Bau 2018):

Tabelle 9: Übersicht der Annahmen für die Abfallströme zur Ermittlung der Recyclingfähigkeit

Baustoff-Gruppe	MRU ⁽¹⁾	MSM	MMR	MMRf	MERf	MWD	Quelle
Beton (BS)	k.A. ⁽²⁾	0,0%	77,7%	16,1%	0,0%	6,2%	[2] / [3]
Ziegel (BS)	k.A. ⁽³⁾	0,0%	77,7%	16,1%	0,0%	6,2%	[1] / [3]
Kalksandstein (BS)	k.A.	0,0%	77,7%	16,1%	0,0%	6,2%	[1] / [3]
Porenbeton (BS)	k.A.	0,0%	77,7%	16,1%	0,0%	6,2%	[1] / [3]
Fliesen, Ziegel & Keramik (BS)	k.A.	0,0%	77,7%	16,1%	0,0%	6,2%	[1] / [3]
Sonstiges Mineralisches (BS)	k.A.	0,0%	77,7%	16,1%	0,0%	6,2%	[1] / [3]
Mineralische Dämmstoffe (BA)	k.A.	0,0%	64,9%	28,9%	0,0%	6,2%	[1] / [3]
Gipskarton (BA)	k.A.	0,0%	4,5%	40,1%	0,0%	55,4%	[3]
Sonstige Gipsprodukte (BA)	k.A.	0,0%	4,5%	40,1%	0,0%	55,4%	[3]
Flachglas (BA)	k.A.	0,0%	83,3%	0,0%	0,0%	16,7%	[2]
Bau-/Konstruktionsholz (BA)	k.A. ⁽⁴⁾	0,0%	11,5%	0,0%	88,5%	0,0%	[2]
Holzwerkstoffe (BA)	k.A. ⁽⁴⁾	0,0%	11,5%	0,0%	88,5%	0,0%	[2]
Papier/Pappe (BA)	k.A.	0,0%	11,5%	0,0%	88,5%	0,0%	[2]
Sonstiges Holz (BA)	k.A.	0,0%	4,3%	0,0%	95,7%	0,0%	[1] / [2]
Kunststoff-Dämmstoffe (BA)	k.A.	0,0%	25,3%	0,0%	72,3%	2,4%	[1] / [2]
Kunststoff-Fenster/-Türen (BA)	k.A. ⁽⁶⁾	0,0%	36,6%	0,0%	61,0%	2,4%	[1]
KS-Dachbahnen & Folien (BA)	k.A.	0,0%	25,3%	0,0%	72,3%	2,4%	[1] / [2]
Sonstige Kunststoffe (BA)	k.A.	0,0%	25,3%	0,0%	72,3%	2,4%	[1] / [2]
Stahl, Eisen (BA)	k.A. ⁽⁵⁾	97,5%	0,0%	0,0%	0,0%	2,5%	[2]
Alu., Kupfer, Zink, Blei (BA)	k.A. ⁽⁵⁾	91,2%	0,0%	0,0%	0,0%	8,8%	[2]

Anmerkungen:

- (1) Für die Wiederverwendung liegen keine statistischen Daten vor, weshalb das Stoffstrommodell herangezogen wird. Beispielhafte Wiederverwendungsmöglichkeiten werden angegeben.
- (2) Z.B. Fertigteile, oder Fassadenelemente
- (3) Z.B. Vollziegel und Klinker
- (4) Z.B. großformatige Platten und Träger, abhängig von der Geometrie
- (5) Z.B. großformatige Träger, abhängig von der Geometrie und Nutzung
- (6) In Abhängigkeit von der Schädigung und dem Zustand der Elemente

Das Modell beschreibt die Recyclingfähigkeit auf Bauteilebene und umfasst damit sowohl die materialspezifische Verwertbarkeit der Baustoffe als auch die Einschränkungen hinsichtlich der Lösbarkeit der Fügungen und der tatsächlich resultierenden Abfallströme. Inwiefern ein Bauteil und die darin enthaltenen Baustoffe in Kreisläufen geführt werden können (Recyclingfähigkeit) hängt vom Rückbau (C1) und der Abfallbehandlung (C3) ab. Der Rückbau entscheidet anhand der Rohstoffkategorie (Baustoff-Gruppe), dem materialspezifischen Verwertbarkeitspotential und der Fügung (Lösbarkeit), wie und in welcher Rückbauphase das Bauteil zurückgebaut wird. Daraus entstehen Abfallströme, die im Rahmen der Abfallbehandlung gemäß dem aktuellen Stand des Verfahrens (Machbarkeit) hinsichtlich Aufwand, Kosten und Ergebnis aufbereitet werden. Im Gegensatz zur Methodik nach (Schwede und Störl 2017) wird von einer Bewertung der Rückbaufähigkeit vorerst abgesehen, um lediglich den Stoffstrom und die technischen Zusammenhänge abzubilden. Das Modell bildet zum aktuellen Entwicklungsstand noch nicht den ökonomischen Aufwand oder ökologischen Wirkungen der Errichtung und des Rückbaus ab (hinsichtlich Umweltverträglichkeit), kann diesen allerdings zukünftig aufgrund der Berücksichtigung der Lebenszyklusphasen gemäß einer Ökobilanz nach DIN EN 15978 problemlos integrieren, sofern Daten hierzu verfügbar gemacht werden (Ebert 2020a).

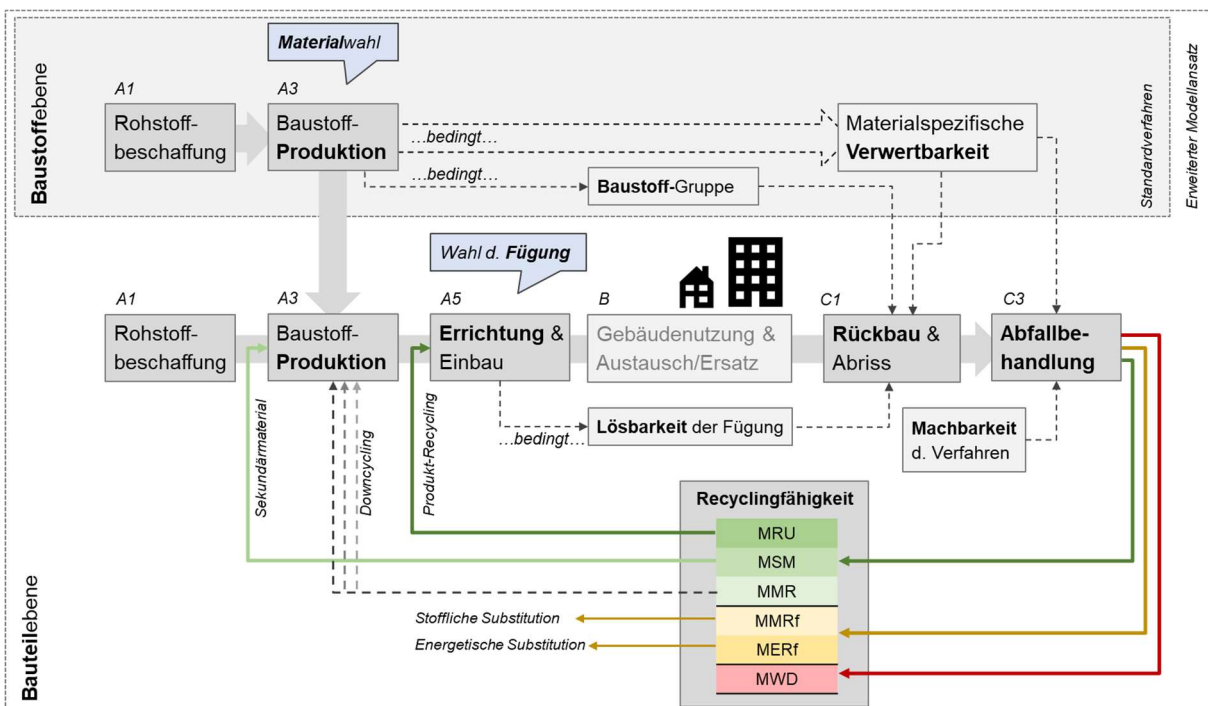


Abbildung 3: Modellansatz des Nachweisverfahrens der Recyclingfähigkeit auf Bauteilebene

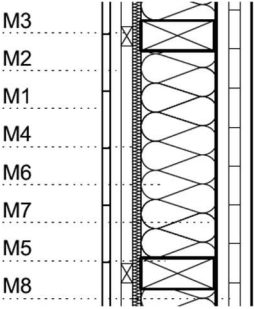
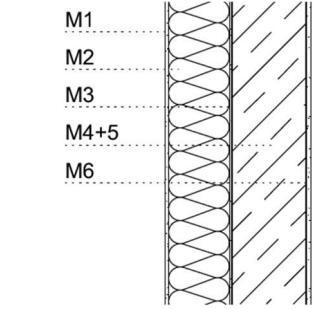
2.2.2 Beispielhafte Anwendung des Modells

Der beschriebene Modellansatz wird an zwei Beispielen getestet. Dazu werden Außenwandkonstruktionen mit je 1 m² analysiert. Die Beispielkonstruktionen sind dem THG-Projekt (Hafner et al. 2017) entnommen. Die im Rahmen dieses Projekts durchgeführten Ökobilanzen erfolgen unter Berücksichtigung der normativen Standards (DIN EN 14040 2009; DIN EN ISO 14044; DIN EN 15978 2012; DIN EN 15804 2014; DIN EN 16485). Eine nach DIN EN ISO 14044 geforderte kritische Prüfung (critical review), welche die Standards der ISO/TS 14071 (2014) eingehalten hat, wurde für die Ökobilanzen durchgeführt.

Die berechneten Bauteile (s. Tabelle 10) stammen aus Gebäuden, die alle eine funktionale Äquivalenz aufweisen. Das bedeutet, dass die Gebäude eine äquivalente funktionelle Qualität aufweisen hinsichtlich der Einhaltung gesetzlicher Anforderungen an Standsicherheit und Tragfähigkeit, Brandschutzanforderungen, Schallschutzanforderungen und der Einhaltung des EnEV-Standards 2009 oder besser.

Ein Vergleich der beiden Bauteile zeigt den deutlichen Massenunterschied (Faktor 1:6,3) der beiden Außenwände, mit identischer Funktion. Nach Zuordnung der Baustoffe zu einem spezifischen Verwertungspotential (nach aktuellem Stand der baustoffspezifischen Verwertungsmöglichkeiten) stellt sich dieses bei der Holzbauweise mit einem möglichen Wiederverwendungsanteil (MRU) von 79% dar. Eine stofflich gleichwertige Verwertung (MSM) ist bei den meisten Holzwerkstoffen nur sehr eingeschränkt möglich, weshalb die Außenwand in Holzbauweise eine Kaskadennutzung in Form einer minderwertigen stofflichen Verwertung (MMR) ausweist. Auf Baustoffebene weist die Außenwand in Massivbauweise mit WDVS ein Potential von 94% auf, die Baustoffe stofflich zu verwerten. Im Folgenden wird überprüft, ob dieses Potential, das den Baustoffen zugeschrieben wird auch auf Bauteilebene, nach Errichtung und Rückbau voll ausgeschöpft werden kann.

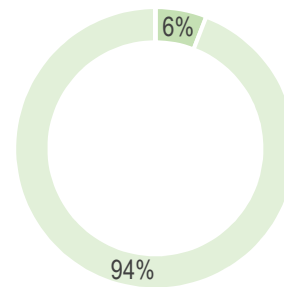
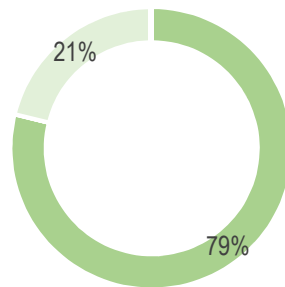
Tabelle 10: Übersicht der beiden Bauteile in Holzmassiv- und Stahlbetonbauweise mit WDVS auf Baustoffebene, inkl. aller Baustoffschichten, Fügungen und dem Verwertbarkeitspotential der Baustoffe

	Außenwand Holzmassiv	Außenwand Stahlbeton mit WDVS
		
Anzahl Materialien	8	6
Anzahl Fügungen	11	5
Flächengewicht	85,8 kg/m ²	540,1 kg/m ²
Bauteildicke	373 mm	385 mm
U-Wert	0,19 W/m ² K	0,21 W/m ² K

Baustoffe <i>inkl. Potential der Verwertbarkeit der Baustoffe¹</i>				
M1 Fichte (Bekleidung), 20mm	3	M1 Putzsystem, 10mm	3	
M2 Konterlattung (b/h=30/50, e=800mm)	3	M2 Mineralwolle (WDVS), 160mm	2	
M3 Lattung (b/h=30/50, e=625mm)	3	M3 Klebemörtel, 5mm	3	
M4 Holzfaserdämmplatte, 22mm	3	M4 Normalbeton C20/25, 20mm	3	
M5 KVH Fichte (b/h=80/200, e=625mm)	1	M5 Bewehrungsstahl, 1% Bewehrung	2	
M6 Zellulose Dämmung, 200mm	1	M6 Gips-Innenputz, 10mm	3	
M7 Dampfbremse, 0,15mm	5			
M8 Brettsperholz, 93mm	1			

Baustoffebene
Massenverhältnis der Baustoffe nach dem Potential der Verwertbarkeit

1	MRU
2	MSM
3	MMR
4	MMRf
5	MERf
6	MWD



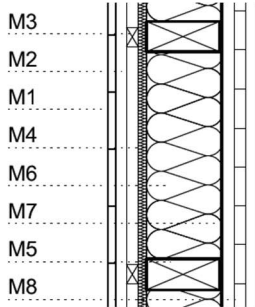
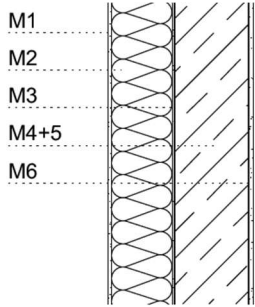
¹ In Bezug auf das Potenzial der Verwertbarkeit wird der Verwertungsweg nach aktuellem Stand der Technik ausgewiesen. Dieser kann von den spezifischen Szenarien, die im Modul D der jeweiligen Baustoffe angenommen werden, abweichen.

2.2.3 Ergebnisse der Ökobilanzierung

Die Ergebnisse der Ökobilanzberechnung (vgl. Tabelle 11) zeigen die Stärke der Ökobilanzierungsmethode in der Abbildung der energetischen Rohstoffe (Primärenergie) und die noch bestehenden Schwachstellen, was die stofflichen Output-Indikatoren hinsichtlich der Stoffströme, angeht. Festzuhalten ist, dass die Außenwand in Holzbauweise ein Einsparpotential von 71,3% hinsichtlich des Treibhausgaspotentials aufweist (GWP). Hinsichtlich der energetischen Rohstoffe lässt sich ebenfalls ein geringes Einsparpotential (14%) erkennen, insbesondere hinsichtlich nicht erneuerbarer Primärenergie (49%). Mithilfe der Indikatoren der Primärenergie zur stofflichen Nutzung (PERM und PENRM) lässt sich bereits das Potential einer energetischen Verwertung abbilden, dass in diesem Fall lediglich bei der Holzbauvariante vorliegt (1427 MJ). Bei der Primärenergie zur stofflichen Nutzung ist zu beachten, dass sich diese über den gesamten Lebenszyklus als Belastung in der Herstellungsphase und Gut-schrift in der Entsorgungsphase, ausgleicht (und bis auf wenige Verluste gleich null ist). Um die stofflich genutzte Primärenergie im betrachteten System darzustellen, werden die Ergebnisse der Herstellungsphase (A1-A3) herangezogen. Hinsichtlich der Output-Indikatoren CRU, MFR und MER ist festzuhalten, dass die Datengrundlage an dieser Stelle noch Lücken aufweist. Außerdem wird bei der Außenwand in Holzbauweise am Ende des Lebenszyklus als Abfall ein Großteil der Stoffe sowohl als Material für ein weiteres Recycling, als auch als Material für energetische Verwertung ausgewiesen. Realistisch kann allerdings nur ein Szenario genutzt werden. Bei der Massivbauvariante fehlen, bis auf den Datensatz für Beton, weitestgehend jegliche Angaben für Wiederverwendung, Recycling oder Verwertung. An dieser Stelle wird unter anderem deutlich, wie schwer eine vollständige Beschreibung der Recyclingfähigkeit auf Baustoffebene ist, da keine eindeutige Aussage getroffen werden kann,

ob das Material nun nach dem Lebensende stofflich weitergenutzt oder energetisch verwertet wird. Auch die Aussage, dass Beton vollständig als ein Material zum Recycling gewertet wird ist kritisch zu hinterfragen, da die Realität dies nicht widerspiegelt. Die Ergebnisse der Ökobilanzierung zeigen die Problematik der Unklarheit in der Berechnung der Abfallströme.

Tabelle 11: Ergebnisse der Ökobilanzierung der beiden Bauteile in Holzmassiv- und Stahlbetonbauweise mit WDVS auf Bauteilebene

Ökobilanzergebnisse	Außenwand Holzmassiv	Außenwand Stb. mit WDVS
		
Ergebnisse der Umweltwirkungen pro m ² -Bauteilfläche		
GWP	24,3 kg-CO ₂ -Äq./m ²	84,6 kg-CO ₂ -Äq./m ²
AP	0,097 kg SO ₂ -Äq./m ²	0,216 kg SO ₂ -Äq./m ²
EP	0,026 kg PO ₄ ³⁻ -Äq./m ²	0,032 kg PO ₄ ³⁻ -Äq./m ²
POCP	0,018 kg Ethen-Äq./m ²	0,013 kg Ethen-Äq./m ²
ODP	1,3E-7 kg CFC11-Äq./m ²	7,8E-8 kg CFC11-Äq./m ²
ADPE	7,58E-04 kg Sb.-Äq./m ²	3,60E-04 kg Sb.-Äq./m ²
ADPF	336,6 MJ/m ²	666,3 MJ/m ²
Ergebnisse des Ressourceneinsatzes pro m ² -Bauteilfläche		
PERE + PENRE Verbrauchte Primärenergie - energetische Nutzung; A1-C4	695 MJ/m ²	817 MJ/m ²
PERE / (PERE + PENRE) Anteil der erneuerbaren Primärenergie - energetische Nutzung; A1-C4	51 %	18 %
PERM + PENRM Primärenergie die als Rohstoff verwendet wird - stoffliche Nutzung; A1-A3	1427 MJ/m ²	43 MJ/m ²
PERM / (PERM + PENRM) Anteil der erneuerbaren Primärenergie - stoffliche Nutzung; A1-A3	97 %	27 %
CRU	0,0 kg/m ²	0,0 kg/m ²
MFR	69,1 kg/m ²	475,2 kg/m ²
MER	83,2 kg/m ²	0,0 kg/m ²
Anmerkungen: Berechnet mit ÖKOBAUDAT, BMUB, Version 2019-III vom 30.09.2019; Betrachtungszeitraum 50 Jahre; Berechnung cradle to gate mit Optionen (A1-C4)		

2.2.4 Ergebnisse des Bauteilmodells der Recyclingfähigkeit

Die Baustoffe und die Wahl der Fügung dienen als Eingangsparameter für das Bauteilmodell zur Berechnung der Recyclingfähigkeit. Die Fügungen werden anhand bestehender Klassifizierungen als mit, ohne und teilweise mit/ohne Schädigung lösbar kategorisiert.

Tabelle 12: Übersicht der Ergebnisse der Recyclingfähigkeit der beiden Bauteile in Holzmassiv- und Stahlbetonbauweise mit WDVS auf Bauteilebene

Ergebnisse des Bauteilmodells der Recyclingfähigkeit	Außenwand Holzmassiv	Außenwand Stb. mit WDVS

Abbildung der Konstruktion des Bauteils mit Baustoffschichten und Fügungen

Fügungen der Baustoffe
Untereinander (Fügematrix)²

+ OHNE Schädigung lösbar

o mit / ohne Schädig. lösbar

- MIT Schädigung lösbar

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

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

Ergebnisse des Ressourceneinsatzes bzw. Stoffströme pro m²-Bauteilfläche

1 MRU Material zur Wiederverwendung	8,7 kg/m ²	10 %	0,0 kg/m ²	0 %
2 MSM Material zur gleichwertigen stofflichen Verwertung als Sekundärmaterial	0,0 kg/m ²	0 %	21,0 kg/m ²	3 %
3 MMR Material zur minderwertigen stofflichen Verwertung	8,8 kg/m ²	10 %	393,0 kg/m ²	74 %
4 MMRf Material zur endgültigen stofflichen Verwertung	0,0 kg/m ²	0 %	89,0 kg/m ²	16 %
5 MERf Material zur endgültigen energetischen Verwertung	67,4 kg/m ²	80 %	0,0 kg/m ²	0 %
6 MWD Material zur Deponierung	0,0 kg/m ²	0 %	37,9 kg/m ²	7 %

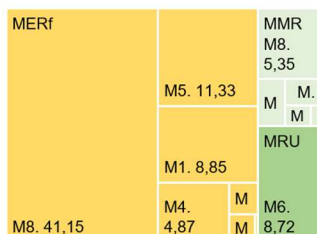
² in Anlehnung an (Schwede und Störl 2017)

Aufgrund der schadigungsfreien Fügungen bei der Holzbauvariante, kann das Wiederverwendungspotential der Dämmung (M6) auch vollständig genutzt werden, wohingegen das Potential beim Brettsper Holz und dem Konstruktionsvollholz aufgrund der nicht schadigungsfreien Fügungen der Holzfaserverplatte und der Dampfbremse verloren geht. Der Großteil der Baustoffe wird als Baustellenabfälle im Entkernungsprozess beseitigt und wird auf Grundlage der aktuellen Abfallströme zu 80% energetisch verwertet und die restlichen 10% als minderwertige stoffliche Verwertung recycelt. Im Einzelfall kann das Verhältnis der Verwertung der Massivholzprodukte am Lebensende auch variieren. Sollten die Einzelfälle zur Regel werden, wird sich das Verhältnis zwischen stofflicher und energetischer Verwertung zugunsten einer stofflichen Verwertung der Holzprodukte (Kaskadennutzung) verändern.

Die Außenwand in Massivbauweise wird im Rückbau fast vollständig mit Schädigung der Bauteilschichten wieder getrennt bzw. abgerissen. Als Baustellenabfälle wird neben dem Dämmstoff auch der Gips-Innenputz im Rahmen der Entkernung entsorgt. Der Großteil des Bauschutts entsteht während des Abrisses, auch wenn bereits der Außenputz als kleinere Mengen Bauschutt bei der Trennung des WDVS anfällt. Im Rahmen des Abbruchs wird auch der Bewehrungsstahl separiert und als Baustellenabfall entsorgt. Auf Basis der aktuellen Verteilung der Abfallströme werden 3% der Baustoffe einer gleichwertigen stofflichen Verwertung zugeführt, z.B. der Bewehrungsstahl. 74% des mineralischen Bauschuttes werden als minderwertige stoffliche Verwertung primär im Erdbau und Straßenbau wiederverwertet (Kreislaufwirtschaft Bau 2018). 16% des Bauschuttes werden endgültig verwertet in Form von Verfüllung von Abgrabungen und auf Deponien (Kreislaufwirtschaft Bau 2018). Übrig bleiben 7%, die beseitigt werden müssen, darunter auch der Gipsputz (vgl. Tabelle 12).

Außenwand Holzmassiv

85,8 kg/m²



Außenwand Stahlbeton mit WDVS

540,1 kg/m²



Abbildung 4: Bauteilebene | Massenverhältnis des Bauteils und der Baustoffe hinsichtlich der Recyclingfähigkeit

Tabelle 13: Ergebnisse der einzelnen Indikatoren des Stoffstrommodells für das Bauteil in Holzmassivbauweise

AW in Massivholzbauweise	Masse	M-%	1	2	3	4	5	6
<i>Baustoffe / Bauteilschichten</i>	[kg]	[%]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]
M1 Fichte (Bekleidung), 20mm	10,00	12%	0,0	0,0	1,2	0,0	8,9	0,0
M2 Konterlattung (b/h=30/50, e=800mm)	0,94	1%	0,0	0,0	0,1	0,0	0,8	0,0
M3 Lattung (b/h=30/50, e=625mm)	0,32	0%	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0
M4 Holzfaserdämmplatte, 22mm	5,50	6%	0,0	0,0	0,6	0,0	4,9	0,0
M5 KVH Fichte (b/h=80/200, e=625mm)	12,80	15%	0,0	0,0	1,5	0,0	11,3	0,0
M6 Zellulose Dämmung, 200mm	8,72	10%	8,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
M7 Dampfbremse, 0,15mm	0,15	0%	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,0
M8 Brettsper Holz, 93mm	46,50	55%	0,0	0,0	5,3	0,0	41,2	0,0

Tabelle 14: Ergebnisse der einzelnen Indikatoren des Stoffstrommodells für das Bauteil in Stahlbetonbauweise mit WDVS

AW in Stahlbetonbauweise	Masse	M-%	1	2	3	4	5	6
<i>Baustoffe / Bauteilschichten</i>	[kg]	[%]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]
M1 Putzsystem, 10mm	16,00	3%	0,0	0,0	12,4	2,6	0,0	1,0
M2 Mineralwolle (WDVS), 160mm	16,00	3%	0,0	0,0	10,4	4,6	0,0	1,0
M3 Klebemörtel, 5mm	8,00	1%	0,0	0,0	6,2	1,3	0,0	0,5
M4 Normalbeton C20/25, 20mm	475,20	88%	0,0	0,0	369,2	76,5	0,0	29,5
M5 Bewehrungsstahl, 1% Bewehrung	15,70	3%	0,0	15,3	0,0	0,0	0,0	0,4
M6 Gips-Innenputz, 10mm	10,00	2%	0,0	0,0	0,5	4,0	0,0	5,5

Das Bauteilmodell liefert auf diese Weise zwei wesentliche Informationen zur Abschätzung einer nachhaltigen Nutzung der stofflichen Ressourcen. Auf der einen Seite wird mit der Darstellung der Kreislauffähigkeit der Stoffströme (vgl. Abbildung 4) deutlich, inwiefern der Planer durch die Wahl der Baustoffe und die Wahl der Fügung die Menge der Stoffströme und die Art der Stoffströme beeinflussen kann – mit dem Ziel möglichst wenig Rohstoffe zu verwenden, eine Beseitigung (MWD) zu vermeiden und die Rückführung in Stoffkreisläufe zu maximieren (MRU, MSM, MMR). Auf der anderen Seite können zudem die Umweltwirkungen gemäß Ökobilanzierung (vgl. Tabelle 11) abgebildet werden, um die Umweltverträglichkeit abzuschätzen.

3 Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse der Modellentwicklung und der beispielhaften Modellanwendung offenbaren wesentliche Aspekte der Recyclingfähigkeit. Auch wenn der Modellansatz noch eine Weiterentwicklung, Validierung und Optimierung bedarf, zeigt sich bereits das Potential die Recyclingfähigkeit von Bauteilen anhand technischer Parameter und klarer Zusammenhänge abzubilden.

Es ist festzuhalten, dass eine realistisch verfügbares Recyclingpotenzial lediglich auf Bauteilebene abgebildet werden kann. Eine alleinige Betrachtung der Baustoffe kann wesentliche Aspekte der Errichtung (Fügungen), des Rückbaus (Lösbarkeit) und der Abfallbehandlung nicht abdecken. Das beschriebene Modell schafft es über die Summe der einzelnen Baustoffe hinaus, das Bauteil im Gesamten inklusive der Fügungen und im Kontext der Errichtung (A5) und des Rückbaus (C1) zu beschreiben. Die Entwicklung des Modells hat gezeigt, dass mit der grundlegenden Strukturierung der Ökobilanzierung eine geeignete Modellstruktur bereits existiert und verwendet wird. Die Autoren empfehlen daher auf diesem Betrachtungsrahmen weitere Entwicklungen aufzubauen. Auf diese Weise können zukünftig der Thematik der Recyclingfähigkeit und Ressourceneffizienz auch die Problematik der Umweltwirkungen (LCA) gegenübergestellt und Wechselwirkungen berücksichtigt werden.

Hierfür ist es allerdings notwendig die Datensätze der ÖKOBAUDAT soweit zu vereinheitlichen, dass alle Datensätze obligatorisch auch Modul C und D angeben. Aus Sicht der Autoren und im Sinne der Definition der Recyclingfähigkeit ist auch eine weitere Differenzierung der Indikatoren (in MRU, MSM, MMR, MMRf, MERf, MWD) anzustreben. Außerdem ist zwingend darauf zu achten, dass die Rechenregeln für die einzelnen Ressourcenindikatoren über alle Produktkategorien hinweg gleich angewendet werden. Zukünftig könnten die Inkonsistenzen und Datenlücken in der Berechnung des Modul D mit Hilfe der Ressourcenindikatoren auch spezifisch berechnet und ausgewiesen werden (z.B. Verteilung stoffliche oder energetische Substitution).

Die Ergebnisse zeigen auch die Notwendigkeit neben einem möglichst hochwertigen Recycling die absolute Masse des verbauten Materials in Relation zu sehen (Hinsichtlich Transport und Umweltwirkungen). Im Sinne einer nachhaltigen Nutzung von Rohstoffen ist immer eine maximale stoffliche Verwertung (MRU/MSM/MMR) anzustreben und erst danach eine energetische Verwertung (MERf). Eine Beseitigung von Baustoffen (MWD) ist im Sinne einer kompletten Kreislaufführung zu vermeiden. Nachwachsende Rohstoffe (Nawaros) nehmen hierbei eine Sonderrolle ein und bieten grundsätzlich das Potential einer energetischen Substitution fossiler Energieträger durch energetische Verwertung. Idealerweise werden allerdings auch Nawaros erst maximal stofflich genutzt und abschließend energetisch verwertet. Allgemein stellt sich die Frage wie mit unterschiedlichen Rohstoffgruppen umzugehen ist und inwiefern die Bewertungswege rohstoffbezogen unterschiedlich bewertet werden müssen.

Abschließend kann festgehalten werden, dass mit dem aktuellen Modell ein Ansatz entwickelt wurde, der sich als Grundlage und Rahmenwerk für eine weitere Diskussion der Bewertung der Recyclingfähigkeit von Bauwerken anbietet. Langfristiges Ziel dieser Entwicklung ist ein geeignetes Nachweisverfahren zur Abbildung der wesentlichen Grundanforderung (CPD, ER) Punkt 7: Nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen (Europäische Union 2011).

4 Literaturverzeichnis

Abfallverzeichnis-Verordnung (2013): Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis (Abfallverzeichnis-Verordnung - AVV). Paderborn: Salzwasser Verlag.

BBSR (2011): Nutzungsdauern von Bauteilen zur Lebenszyklusanalyse nach BNB. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung. Online verfügbar unter <https://www.nachhaltigesbauen.de/baustoff-und-gebaeuedaten/nutzungsdauern-von-bauteilen.html>, zuletzt aktualisiert am 02.06.2020.

BMUB (2016): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II. Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen: vom Bundeskabinett am 2. März 2016 beschlossen. Hg. v. BMUB. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Berlin. Online verfügbar unter http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/progress_ii_broschuere_bf.pdf.

BMVBS (2011): Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen Büro- und Verwaltung. Online verfügbar unter https://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/veroeffentlichungen/Bewertungssystem_Nachhaltiges_Bauen.pdf, zuletzt geprüft am 30.05.2020.

Bringezu, Stefan; Klüting, Rainer (2004): Erdlandung. Navigation zu den Ressourcen der Zukunft. Stuttgart: Hirzel.

Deilmann, Clemens; Reichenbach, Jan; Krauß, Norbert; Gruhler, Karin (2017): Materialströme im Hochbau. Potenziale für eine Kreislaufwirtschaft. Stand: Dezember 2016. Hg. v. Claus Asam und Wencke Haferkorn. Bonn: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (Schriftenreihe Zukunft Bauen, Band 06).

Destatis (2011): Fachserie 19, Reihe 1 Abfallentsorgung, Datenbasis abfallwirtschaftliche Mengenflussbetrachtungen Jahr 2009.

Destatis (2020): Abfallwirtschaft. Statistisches Bundesamt. Online verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/_inhalt.html, zuletzt geprüft am 31.05.2020.

DIN 18007 (2000): Abbrucharbeiten - Begriffe, Verfahren, Anwendungsbereiche: Beuth Verlag.

DIN 8588 (2013): Fertigungsverfahren Zerteilen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe: Beuth Verlag.

DIN 8591 (2003): Fertigungsverfahren Zerlegen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe: Beuth Verlag.

DIN EN 14040 (2009): Umweltmanagement - Ökobilanz. Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006); deutsche und englische Fassung EN ISO 14040:2006. [Stand:] November 2009 (Deutsche Norm: EN ISO).

DIN EN 15804 (2014): Nachhaltigkeit von Bauwerken — Umweltproduktdeklarationen — Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte.

DIN EN 15804: DIN EN 15804:2020-03, Nachhaltigkeit von Bauwerken_ - Umweltproduktdeklarationen_ - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte; Deutsche Fassung EN_15804:2012+A2:2019.

DIN EN 15978 (2012): Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden - Berechnungsmethode. Ausgabe: 2012-10-01.

DIN EN 16485: DIN EN 16485:2014-07, Rund- und Schnittholz_ - Umweltproduktdeklarationen_ - Produktkategorieeregeln für Holz und Holzwerkstoffe im Bauwesen; Deutsche Fassung EN_16485:2014.

DIN EN ISO 14044: DIN EN ISO 14044:2018-05, Umweltmanagement_ - Ökobilanz_ - Anforderungen und Anleitungen (ISO_14044:2006_ + Amd_1:2017); Deutsche Fassung EN_ISO_14044:2006_ + A1:2018.

Dodd, Nicholas; Cordella, Mauro; Traverso, Marzia; Donatello, Shane (2017): Level(s) – A common EU framework of core sustainability indicators for office and residential buildings. Parts 1 and 2: Introduction to Level(s) and how it works. JRC Technical Report. Seville.

Ebert, Samuel (2020a): Managing Complexity in Building Construction by System Modelling for Value-Based Decision Making. unv. Diss.

Ebert, Samuel; Ott, Stephan; Krause, Karina; Hafner, Annette; Krechel, Marco (2020b): Modell der Recyclingfähigkeit auf Bauteilebene. In: *Bautechnik* 97 (S1), S. 14–25. DOI: 10.1002/bate.201900109.

Endres, Alfred; Querner, Immo (2000): Die Ökonomie natürlicher Ressourcen. 2., vollst. überarb. und erw. Aufl. Stuttgart: Kohlhammer.

Europäische Kommission (2014): Effizienter Ressourceneinsatz im Gebäudesektor. COM (2014) 445 final - DE. Büssel.

Europäische Nachhaltigkeitsstatistik (2015): Grün kommt! Europäische Nachhaltigkeitsstatistik 2015. Frankfurt am Main.

Europäische Union (2011): Verordnung (EU) Nr. 305/2011 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 9.März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates.

Europäische Union (2015): Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy. COM(2015) 614 final. Büssel.

Friege, Henning; Engelhardt, Claudia; Henseling, Karl Otto (Hg.) (1998): Das Management von Stoffströmen. Geteilte Verantwortung - Nutzen für alle. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Hafner, Annette; Rüter, Sebastian; Diederichs, Stefan; Ebert, Samuel; Kleinhenz, Miriam; Krechel, Marco et al. (2017): Treibhausgasbilanzierung von Holzgebäuden - Umsetzung neuer Anforderungen an Ökobilanzen und Ermittlung empirischer Substitutionsfaktoren (THG-Holzbau). Abschlussbericht: Berichtszeitraum: 01.01.2014-31.12.2016. Unter Mitar-

beit von Annette Hafner, Sebastian Rüter, Stefan Diederichs, Samuel Ebert, Miriam Kleinhenz, Marco Krechel et al. München: Technische Universität München Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion.

Hauser, Gerd; Eßig, Natalie; Ebert, Thilo (2010): Zertifizierungssysteme für Gebäude. Nachhaltigkeit bewerten - Internationaler Systemvergleich - Zertifizierung und Ökonomie. Berlin, München: De Gruyter; Detail (DETAIL Green Books). Online verfügbar unter http://www.degruyter.com/search?f_0=isbnissn&q_0=9783955530143&searchTitles=true.

Hedemann, Jan; Meinshausen, Ingo (2016): Kartierung des anthropogenen Lagers in Deutschland - Entwicklung eines dynamischen Stoffstrommodells und Aufbau einer Datenbank zur Prognose des Sekundärrohstoffaufkommens (KartAL II). Abschlussbericht. Hamburg (Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, UBA-FB-002503).

Held, Martin (1994): Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“. In: *UWSF - Z. Umweltchem. Ökotox.* 6 (4). DOI: 10.1007/BF03166358.

Herczeg, Márton; McKinnon, David; Milios, Leonidas; Bakas, Ioannis (2014): Resource efficiency in the building sector. Final report. Rotterdam.

Kirchner, Doris (2012): Europäische Bewertungsdokumente für nachhaltige Bauprodukte: Informationen für KMU. im Rahmen des Baltic-Sea-Region-Projekts "SPIN". Dessau-Roßlau.

Klöpffer, Walter; Grahl, Birgit (2009): Ökobilanz (LCA). Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf. Weinheim: Wiley-VCH-Verl.

Krause, Karina (2020): Strategische Erfassung der Sekundärressourcen basierend auf Ökobilanzen und einem Geoinformationssystem am Beispiel von drei Wohngebieten. unv. Diss.

Krause, Karina; Hafner, Annette (2018): Relevance of the information content in module D on circular economy of building materials. Life Cycle Analysis and Assessment in Civil Engineering, Proceedings of the Sixth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE 2018), 28-31 October 2018, Ghent, Belgium. Unter Mitarbeit von Robby Caspeepe, Luc Taerwe und Dan M. Frangopol. Milton: Chapman and Hall/CRC (Life-Cycle of Civil Engineering Systems Ser, v.5). Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/gbv/detail.action?docID=5561053>.

Kreislaufwirtschaft Bau (2018): Mineralische Bauabfälle Monitoring 2016. Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2016. Berlin.

Kreissig, Johannes (2009): Die DGNB stellt vor: Ein Deutsches Gütesiegel für nachhaltiges Bauen. In: *Stahlbau* 78 (S1), S. 75–77. DOI: 10.1002/stab.200990041.

KrWG (2012): Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen. Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG.

Malkwitz, Alexander; Karl, Christian K.; Leckinghaus, Ilka; Bhar, Riadh; Scheepmaakers, Jeroen; Uhe, Dominik; Schminke, Eva (2014): Ressourcenschonung durch Produktkennzeichnung für Bauprodukte: Erstellung eines Kriterienkatalogs für die Stufeneinteilung von Bauprodukten in der Normung. Dessau-Roßlau.

Müller, Anette (2018): Baustoffrecycling. Entstehung - Aufbereitung - Verwertung. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

MVV TB (2019): Veröffentlichung der Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen. Berlin.

Schiller, Georg; Ortlepp, Regine; Krauß, Norbert; Steger, Sören; Schütz, Helmut; Acosta Fernandez, José et al. (2015): Kartierung des anthropogenen Lagers in Deutschland zur Optimierung der Sekundärrohstoffwirtschaft. Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie (Texte / Umweltbundesamt, 2015,83).

Schwede, Dirk; Störl, Elke (2017): Methode zur Analyse der Rezyklierbarkeit von Baukonstruktionen. In: *Bautechnik* 94 (1), S. 1–9. DOI: 10.1002/bate.201600025.

Statista: Marktanteile der Green-Building-Zertifizierungssysteme in Deutschland in den Jahren 2015 bis 2018. Statista GmbH. Hamburg. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/452469/umfrage/marktanteile-der-green-building-zertifizierungssysteme-in-deutschland/>, zuletzt geprüft am 31.05.2020.

Steger, Sören; Ritthoff, Michael; Bulach, Winfried (2018): Stoffstromorientierte Ermittlung des Beitrags der Sekundärrohstoffwirtschaft zur Schonung von Primärrohstoffen und Steigerung der Ressourcenproduktivität. Wuppertal, Darmstadt (Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, UBA-FB-002704).

VDI Richtlinie 2234 (2002): Recyclingorientierte Produktentwicklung. Korr. Nachdr. 2002-10, Ausg. dt./engl (VDI-Richtlinien).

Wiggering, Hubert; Müller, Felix (2004): Umweltziele und Indikatoren. Wissenschaftliche Anforderungen an ihre Festlegung und Fallbeispiele. Berlin, Heidelberg: Springer (Geowissenschaften + Umwelt).

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Notwendige Arbeitsschritte zur Entwicklung eines Nachweisverfahrens	16
Abbildung 2: Systemmodell der Stoff- und Energieströme bei einer Ökobilanz eines Gebäudes (Kreissig 2009).....	23
Abbildung 3: Modellansatz des Nachweisverfahrens der Recyclingfähigkeit auf Bauteilebene	32
Abbildung 4: Bauteilebene Massenverhältnis des Bauteils und der Baustoffe hinsichtlich der Recyclingfähigkeit	37

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Grundanforderungen an Bauwerke (EU/DE)	13
Tabelle 2: Betrachtungsebenen einer nachhaltigen Nutzung natürlicher Ressourcen	18
Tabelle 3: Übersicht der möglichen Verwertungswege.....	20
Tabelle 4: Normative Grundlagen für die Ökobilanzierung von Gebäuden	22
Tabelle 5: Übersicht der Indikatoren der Ökobilanzierung hinsichtlich Ressourcennutzung gemäß (DIN EN 15804 2014)	24
Tabelle 6: Kategorisierung der Stoff- und Abfallströme nach ressourcenbezogenen Output-Indikatoren.....	28
Tabelle 7: Klassifizierung der Lösbarkeit von Fügemethoden	29
Tabelle 8: Übersicht über mögliche Fügemethoden (DIN 8591 2003) und ihrer Lösbarkeit (Schwede und Störl 2017)	29
Tabelle 9: Übersicht der Annahmen für die Abfallströme zur Ermittlung der Recyclingfähigkeit	31
Tabelle 10: Übersicht der beiden Bauteile in Holzmassiv- und Stahlbetonbauweise mit WDVS auf Baustoffebene, inkl. aller Baustoffschichten, Fügungen und dem Verwertbarkeitspotential der Baustoffe	33
Tabelle 11: Ergebnisse der Ökobilanzierung der beiden Bauteile in Holzmassiv- und Stahlbetonbauweise mit WDVS auf Bauteilebene.....	35
Tabelle 12: Übersicht der Ergebnisse der Recyclingfähigkeit der beiden Bauteile in Holzmassiv- und Stahlbetonbauweise mit WDVS auf Bauteilebene.....	36
Tabelle 13: Ergebnisses der einzelnen Indikatoren des Stoffstrommodells für das Bauteil in Holzmassivbauweise	38
Tabelle 14: Ergebnisses der einzelnen Indikatoren des Stoffstrommodells für das Bauteil in Stahlbetonbauweise mit WDVS	38