

Bewertung des Ressourcenverbrauchs im Bauwesen

Eine Analyse von Methoden und Instrumente

Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades

B.Sc Umweltingenieurwesen

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

Betreut von Prof. Dr.-Ing. Werner Lang, M.Sc Kathrin Theiling und M.Sc Iryna Takser
Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen

Eingereicht von Nicole Schiavo Buuck
Göresstraße 11
80798, München
+49 173 4223469

Eingereicht am München, den 02.11.2023

Vereinbarung

zwischen

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

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

– nachfolgend TUM –

und

Frau/ Nicole Schiavo Buuck, Görresstraße 11, 80798 München

– nachfolgend Autorin/Autor –

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

.....

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

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

mit einem Sperrvermerk versehen und nicht an Dritte weitergegeben wird.

(Zutreffendes bitte ankreuzen)

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

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

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

Vergütungen werden nicht gewährt.

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

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

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

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

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

München, den

, den 02.11.2023

.....


.....

(TUM)

(Autor:in)

Erklärung

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

München, 02.11.2023, N. Bult

Ort, Datum, Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----|
| Vereinbarung | I |
| Erklärung | III |
| Inhaltsverzeichnis | 1 |
| Kurzfassung..... | 3 |
| Abstract | 4 |
| Abkürzungsverzeichnis | 5 |
| Glossar | 8 |
| 1. Einleitung..... | 11 |
| 1.1. Zielsetzung der Arbeit..... | 12 |
| 1.2. Forschungsfragen..... | 13 |
| 1.3. Methodische Vorgehensweise | 13 |
| 2. Theoretische Grundlagen | 14 |
| 2.1. Begriffsdefinitionen | 14 |
| 2.1.1. Ressource | 14 |
| 2.1.2. Verbrauch, Erschöpfung, Knappheit, Effizienz und Produktivität..... | 15 |
| 2.1.3. Reserven | 15 |
| 2.2. Eingrenzung des Themas | 17 |
| 2.2.1. Ressource | 17 |
| 2.2.2. Geographisch | 17 |
| 2.2.3. Zu bewertende Konzepte..... | 18 |
| 3. Methoden zur Bewertung des Ressourcenverbrauchs | 19 |
| 3.1. Tabellarische Übersicht | 19 |
| 3.2. Erläuterung der Methodik | 23 |
| 3.2.1. Materialflussanalyse und Materialflussindikatoren | 23 |
| 3.2.2. Material Input Per Service Unit (MIPS) | 25 |
| 3.2.3. Abiotic Depletion Potential (ADP) | 27 |
| 3.2.4. Anthropogenic Stock Extended Abiotic Depletion Potential (AADP)..... | 29 |
| 3.2.5. Energy Surplus | 30 |
| 3.2.6. Distanz-zum-Ziel (DtT)..... | 32 |
| 3.2.7. Exergie (CExD)..... | 33 |
| 3.2.8. Biotische Verfügbarkeit (BRAI) | 35 |
| 3.2.9. Ressourceneffizienzmessung durch ESSENZ | 36 |
| 3.2.10. Ressourceneffizienzmessung durch Struck & Flamme | 38 |
| 3.2.11. Verfügbarkeit biotischer Ressourcen durch BIRD | 39 |

| | | |
|---------|--|----|
| 3.2.12. | Urban Mining Index..... | 41 |
| 3.3. | Vergleich der Vor- und Nachteile | 43 |
| 3.3.1. | Massenbasierte Bewertungen..... | 43 |
| 3.3.2. | Auf Reserven-Förderraten-Verhältnissen basierten Indikatoren | 44 |
| 3.3.3. | Exergetische Indikatoren | 44 |
| 3.3.4. | Ressourceneffizienz auf Produktebene..... | 45 |
| 3.3.5. | Urban Mining Index: System zur Bewertung der Kreislauffähigkeit von Gebäuden | 45 |
| 4. | Bewertung der Ressourcenknappheit im Bauwesen | 46 |
| 4.1. | Datensätze und Datenanalyse für Baurohstoffe | 46 |
| 4.2. | Welche Ressourcen werden durch das Bauwesen verbraucht?..... | 47 |
| 4.2.1. | Wichtigste Baumaterialien und ihre Rohstoffe..... | 48 |
| 4.2.2. | Jährlicher Materialverbrauch im Bauwesen in Deutschland | 49 |
| 4.2.3. | Materiallager in Deutschland..... | 51 |
| 4.3. | Diskussion: Inwiefern besteht eine Ressourcenknappheit im Bauwesen? | 52 |
| 4.3.1. | Anpassung der ESSENZ-Methode zur Bewertung der Ressourcenknappheit in Deutschland | 54 |
| 4.3.2. | Physische Verfügbarkeit vs. andere Einschränkungen von mineralischen Baurohstoffen | 57 |
| 4.4. | Stellen Gebäude Ressourcen dar? | 60 |
| 5. | Zusammenfassung, Fazit, Limitationen und Ausblick | 64 |
| 5.1. | Zusammenfassung, Fazit und Limitationen | 64 |
| 5.1.1. | Zusammenfassung | 64 |
| 5.1.2. | Fazit..... | 65 |
| 5.1.3. | Limitationen | 67 |
| 5.2. | Ausblick | 67 |
| | Literaturverzeichnis..... | 71 |
| | Abbildungsverzeichnis | 81 |
| | Tabellenverzeichnis | 82 |
| | Anhang A..... | 83 |

Kurzfassung

In Deutschland ist das Bauwesen für über 70% des Rohstoffverbrauchs verantwortlich (Umweltbundesamt, 2023). Steigende Anforderungen an die Ressourceneffizienz haben die Bedeutung der Ressourcenbewertung verstärkt, was von Wissenschaftler:innen und Organisationen betont wird. Ressourcenknappheit wird als Problem in der Bauindustrie angesehen, insbesondere im Hinblick auf die Sandknappheit in einigen Regionen (UNEP, 2022). Die Erforschung der Ressourcenknappheit im Bauwesen und die Betrachtung von Gebäuden als Ressourcen sind wichtige Aspekte dieser Arbeit. Das Ziel ist es, bestehende Methoden zur Bewertung des Ressourcenverbrauchs im Bauwesen zu untersuchen und die Ressourcenknappheit in diesem Sektor zu diskutieren.

Die Auswahl der zu bewertenden biotischen und abiotischen Rohstoffen erfolgte auf der Grundlage ihrer Relevanz für Baumaterialien. Ebenso wurden Massenindikatoren, Methoden der Ökobilanzierung und Bewertungen der Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft aufgrund ihrer Bedeutung für den Bausektor ausgewählt. Kapitel 3 gibt einen Überblick über die Methoden zur Bewertung des Ressourcenverbrauchs, gefolgt von einer Zusammenfassung ihrer allgemeinen Vor- und Nachteile. Die Übersichtstabelle dient als Entscheidungshilfe für Planer:innen bei der Bewertung des Ressourcenverbrauchs in Projekten.

Kapitel 4 befasst sich mit der Knappheitsdiskussion im Bausektor und verdeutlicht die Vernachlässigung von Baumineralien in bestehenden Bewertungsmethoden. Die Anwendung von Erschöpfungsindikatoren, die auf Reserven-Förderraten-Verhältnissen basieren, wie das Abiotic Depletion Potential (ADP), wird für den Bausektor in Frage gestellt. Die Arbeit betont auch die Notwendigkeit regionaler Bewertungen, um Aussagen über Ressourcenknappheit treffen zu können. Moderne Bewertungsmethoden berücksichtigen bereits anthropogene Bestände bei der Indikatorenentwicklung, was einen Fortschritt bei der Integration von Gebäuden als Materiallager darstellt.

Zusammenfassend bietet diese Arbeit einen umfassenden Überblick über die Methoden zur Bewertung des Ressourcenverbrauchs im Bauwesen und fördert das Verständnis für die Herausforderungen und Chancen, die mit dem Ressourcenmanagement in diesem Sektor verbunden sind.

Abstract

In Germany, the construction industry is responsible for over 70% of raw material consumption (Umweltbundesamt, 2023). Demands for resource efficiency have increased the importance of resource assessment, which is emphasised by scientists and organisations. Resource scarcity has been identified as a problem in the construction industry, particularly in relation to sand scarcity in some regions (UNEP, 2022). Exploring resource scarcity in construction and considering buildings as resources are important aspects of this work. The aim is to examine existing methods for assessing resource use in construction and to discuss resource scarcity in this sector.

The selection of biotic and abiotic resources to be assessed was based on their relevance to building materials. Similarly, mass indicators, life cycle assessment methods and resource efficiency and circular economy assessments were selected for their relevance to the construction sector. Chapter 3 provides an overview of resource use assessment methods, followed by a summary of their general advantages and disadvantages. The summary table is intended to help planners make decisions when assessing resource use in projects.

Chapter 4 addresses the scarcity debate in the construction sector and highlights the neglect of construction minerals in existing assessment methods. The use of depletion indicators based on reserve-to-production ratios, such as Abiotic Depletion Potential (ADP), is questioned for the construction sector. This paper also emphasises the need for regional assessments to make statements about resource scarcity. Modern assessment methods already include anthropogenic stocks in the development of indicators, which represents a step forward in the integration of buildings as material banks.

In summary, this work provides a comprehensive overview of the methods used to assess resource use in the building sector and promotes understanding of the challenges and opportunities associated with resource management in this sector.

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|---------|--|
| AADP | Anthropogenic Stock Extended Abiotic Depletion Potential |
| ADP | Abiotic Depletion Potential |
| ADPE | Abiotic Depletion Potential Elements |
| ADPF | Abiotic Depletion Potential Fossil |
| Äq. | Äquivalenten |
| BEES | Building for Environmental and Economic Sustainability |
| BIRD | Availability of Terrestrial Biotic Materials in Product Systems |
| BRAI | Biotic Resource Availability Indicator |
| CExD | Cumulative Exergy Demand |
| CF | Charakterisierungsfaktoren |
| CML | Centrum voor Milieukunde, Universität Leiden |
| CRIRSCO | Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards |
| CRM | Europäische Kritische Rohstoffe |
| DEU | Domestic Extraction Used |
| DGNB | Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen |
| DMC | Domestic Material Consumption |
| DMI | Direct Material Input |
| DtT | Distanz zum Ziel |
| EDIP | Environmental Development of Industrial Products |

| | |
|-----------|---|
| EDP | Umweltproduktdeklaration |
| EFH | Einfamilienhaus |
| EI99 | Eco Indicator 99 |
| ESSENZ | Integrierte Methode zur ganzheitlichen Berechnung/Messung von Ressourceneffizienz im Kontext der Nachhaltigkeit |
| ILCD | International Life Cycle Data System |
| ÖÖR-ISBE | Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung- Informationssystem Gebaute Umwelt |
| IUCN | International Union for Conservation of Nature and Natural Resources |
| LCA | Ökobilanz |
| MI | Material Input |
| MIPS | Material Input per Service Unit |
| MFA | Materialflussanalyse |
| MFH | Mehrfamilienhaus |
| MLP | Material-Loop-Potenzial |
| mPR | Milli Personen Reserven |
| MSA | Material System Analysis |
| NWG | Nichtwohngebäude |
| OECD | Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung |
| ÖKOBAUDAT | Ökobilanz-Datenbank für Baustoffe |
| RE | Ressourceneffizienz |

| | |
|--------|--|
| ReCiPe | LCA Methode- Akronym für RIVM, Radboud University, CML und PRé Consultants |
| RIVM | Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (National Institute for Public Health and the Environment) |
| RMC | Raw Material Consumption |
| RMI | Raw Material Input |
| S | Service Unit |
| Sb | Antimon |
| SETAC | Society of Environmental Toxicology and Chemistry |
| SHDB | Social Hotspot Data Base |
| SLCA | Social Life Cycle Assessment |
| SSDI | Surface Squared Driven Indicator |
| TMC | Total Material Consumption |
| TMR | Total Material Requirement |
| TSI | Threatened Species Index |
| UM | Urban Mining |
| UMI | Urban Mining Index |
| UNEP | United Nations Environment Programme |
| USGS | United States Geological Service |

Glossar

Anthropogene Ressourcen

Bestände in der Anthroposphäre, oft als "Abfälle" bezeichnet, die sowohl natürliche Ressourcen (z. B. Mineralien, Wasser) als auch Gebäude und Konsumgüter, umfassen (UNECE, 2018).

Anthroposphäre

Bezieht sich auf den vom Menschen geprägten und gestalteten Bereich oder Raum auf der Erde, der durch menschliche Aktivitäten und Einflüsse geformt wird (Baccini & Bader, 1996).

Baustoff

Material verwendet für Bauwerke (Wormuth & Schneider, 2016).

Egalitaristen in der LCA

Legen den Schwerpunkt auf die gerechte Verteilung von Umweltbelastungen und -schäden. Ihr Ziel ist es, Umweltungerechtigkeiten zu erkennen und zu beseitigen, um eine gleichmäßigere Verteilung der Umweltauswirkungen in der Gesellschaft zu gewährleisten.

Erdkruste

Äußerste feste Schicht der Erde und bildet die äußere Hülle des Planeten. Ca. 10-30 km tief (Bundesverband Geothermie, 2023).

Erschöpfung

Abnahme der Verfügbarkeit einer Ressource auf der Erde, bezogen auf natürliche Vorräte (Van der Voet, 2013).

Exergie

Bewertung der maximal nutzbaren Arbeit einer Ressource, häufig in Bezug auf Energieeffizienz und Ressourcenentzug (Bösch et al., 2007).

Individualisten in der LCA

Fokussieren sich auf individuelle oder Verbraucherentscheidungen und die persönliche Verantwortung. Sie betonen die Notwendigkeit, Verbraucher über Umweltauswirkungen zu informieren und sie zu ermutigen, nachhaltige Entscheidungen zu treffen.

Hierarchisten in der LCA

Setzen auf autoritative Maßnahmen und Vorschriften, um Umweltauswirkungen und -schäden zu reduzieren. Sie unterstützen die Rolle von Regierungen und Institutionen bei der Festlegung von Standards und der Durchsetzung von Umweltvorschriften.

Knappheit

Unzureichende Verfügbarkeit einer Ressource im Vergleich zur Nachfrage. Umfasst ökonomische, politische, wirtschaftliche, ökologische und soziale Aspekte (Van der Voet, 2013).

Kritikalität

Eine knappe Ressource, die für die Gesellschaft unerlässlich ist, unter Berücksichtigung mehrerer Aspekte wie Umwelt, Wirtschaft und Geopolitik (Van der Voet, 2013).

Material

Überbegriff für Stoffe und Stoffgemische (Umweltbundesamt, 2012).

Materialressource

Biomasse, fossile Brennstoffe, Metalle und nichtmetallische Mineralien, die in der Wirtschaft genutzt werden (International Resource Panel et al., 2017).

Natürliche Ressource

Rohstoffe und Umweltmedien wie Luft, Wasser und Boden, die das Leben unterstützen (European Commission, 2003; International Resource Panel et al., 2017; Umweltbundesamt, 2012).

Nutzwertanalyse

Eine Methode zur Bewertung und Entscheidungsfindung, bei der verschiedene Optionen anhand von vorab festgelegten Kriterien und Gewichtungen analysiert werden, um die am besten geeignete Option auszuwählen (Zangemeister, 1970).

Ressource

Materielles oder immaterielles Mittel, das in einem Verfahren verwendet werden kann (Umweltbundesamt, 2012).

Ressourceneffizienz

Das Streben nach erhöhtem Wohlstand und Wirtschaftswachstum mit minimiertem Ressourcenverbrauch und geringeren Umweltauswirkungen (Unep, 2017).

Ressourcenproduktivität

Verhältnis von Produktionsoutput zu Ressourceneinsatz, in Bezug auf den Einsatz natürlicher Ressourcen. (Umweltbundesamt, 2022).

Ressourcenverbrauch

Nutzung von Ressourcen in einer Weise, dass sie in der natürlichen Form nicht erneut verwendet werden können (Umweltbundesamt, 2012).

Rohstoff

Ein Stoff oder Gemisch, das in die Produktion einfließen kann (Umweltbundesamt, 2012).

Rohstoff, abiotisch

Nicht-biotischer Rohstoff oder solcher, der in einen fossilen Zustand umgewandelt wurde (Umweltbundesamt, 2012).

Rohstoff, biotisch

Aus Lebewesen stammender Rohstoff, der nicht in einen fossilen Rohstoff umgewandelt wurde (Umweltbundesamt, 2012).

Sekundärrohstoffe

Materialien, die aus bereits verwendeten Produkten oder Abfällen recycelt oder wiedergewonnen werden, um sie erneut in den Produktionskreislauf einzuführen (Umweltbundesamt, 2012).

Urban Mining

Im Kontext des Bauens: eine kreislaforientierte wirtschaftliche Herangehensweise. Betrachtet die städtischen Gebiete, Siedlungen und alle darin befindlichen Strukturen als Rohstofflager (Rosen, 2021).

Versteckte Flüsse

Beziehen sich in der Stoffstromanalyse auf indirekte oder unbeabsichtigte Material- oder Ressourcenflüsse in einem System, die nicht offensichtlich sind. Sie können in verschiedenen Phasen der Materialnutzung verborgen sein (OECD, 2008).

1. Einleitung

Im 20. Jahrhundert entfiel der größte Teil des globalen Materialabbaus auf den Bau- und Baustoffsektor, mit einem steigenden Trend für das 21. Jahrhundert (Krausmann et al., 2009). In Deutschland ist der Bausektor für mehr als 70 % des Rohstoffabbaus verantwortlich (Umweltbundesamt, 2023).

Die steigende Nachfrage nach CO₂-Neutralität und Ressourceneffizienz hat in den letzten Jahren dazu geführt, dass die Bewertung von Ressourcen im Bauwesen immer mehr an Bedeutung gewinnt. Die Notwendigkeit, Ressourcen zu bewerten und zu verwalten, um eine nachhaltige Entwicklung zu erreichen, wird von vielen Autor:innen und Organisationen betont (Kennedy et al., 2007; Rees, 2009; United Nations Environment Programme, 2011). Eine effektive Bewertung des Ressourcenverbrauchs ist entscheidend, um Abfälle zu reduzieren, Ressourcen und Energie einzusparen und eine Kreislaufwirtschaft im Bauwesen zu etablieren.

Darüber hinaus wird der Begriff der Ressourcenknappheit häufig im Zusammenhang mit dem Bauwesen verwendet (Akanbi et al., 2018; Guerra & Leite, 2021; Mangialardo & Micelli, 2018). Angesichts der zunehmenden Besorgnis über die Sandknappheit in einigen Regionen (UNEP, 2022) ist es von Interesse zu untersuchen, inwiefern eine Ressourcenknappheit im Bauwesen besteht. Laut Autor:innen kann eine Betrachtung von Gebäuden als Materiallager den Verbrauch natürlicher Ressourcen durch den Bausektor verringern (Rosen, 2021; Sharp et al., 2019).

In dieser Bachelorarbeit wird daher untersucht, welche Bewertungsmethoden für den Ressourcenverbrauch im Bauwesen existieren und welche Vor- und Nachteile diese haben. Es wird angestrebt, Planer:innen und Entscheidungsträger:innen eine bessere Kenntnis der verschiedenen Methoden zu vermitteln und ihnen bei der Entscheidungsfindung zu helfen. Anschließend wird die Frage beantwortet, inwieweit eine Ressourcenknappheit im Bauwesen besteht und ob Gebäude als Ressource betrachtet werden können.

1.1. Zielsetzung der Arbeit

Ausgangspunkt der Arbeit war eine erste Sichtung der von der TUM lizenzierten Literatur, die eine Reihe von Forschungslücken aufzeigte und Forschungsinteressen weckte:

- Bisher gab es in der Literatur keine Übersicht, die speziell Methoden zur Bewertung des Ressourcenverbrauchs mit Fokus auf den Bausektor, Vor- und Nachteile der Methoden, Einsatz und Einheiten zusammenfasst.
- Die Methodik zur Bewertung des Ressourcenverbrauchs wurde in der LCA vor allem für Metalle und fossile Brennstoffe für verschiedene Produkte entwickelt (Bach et al., 2016; Goedkoop et al., 2008; Goedkoop & Spriensma, 2001; Guinée & Heijungs, 1995; Randebroek et al., 2023; van Oers et al., 2002). Es gibt jedoch keine spezielle Analyse für den Bausektor, die untersucht, ob es sinnvoll ist, die Erschöpfung für Baumineralien zu bewerten. Die Charakterisierungsfaktoren (CFs) für Produkte mit Baumineralien existieren jedoch im Rahmen der Environmental Product Declaration (EPDs) und werden in den Bilanzen verwendet (Ecoinvent Centre, 2013; EPD International, 2023; ÖKO-BAU.DAT, 2023).
- Die hohen Materialverbrauchsdaten werden im Zusammenhang mit dem Bauwesen hervorgehoben (Bundesverband Baustoffe- Steine und Erden e.V., 2022; Krausmann et al., 2009; Umweltbundesamt, 2023). Es besteht ein Forschungsinteresse, zu wissen, inwiefern eine Ressourcenknappheit im Bauwesen besteht, wenn man die hohen Reservenzahlen von Baumineralien berücksichtigt (U.S Geological Survey, 2015a; van Oers et al., 2002).

Ziel dieser Arbeit ist es, einen Überblick über die Möglichkeiten zu geben, Ressourcen und deren Verbrauch effektiv zu bewerten und zu analysieren. Diese Methoden werden zusammengefasst und kritisch analysiert. Die Bewertung des Ressourcenverbrauchs dient auch als Grundlage für die Beantwortung der Frage nach der Ressourcenknappheit im Bausektor. Es werden Kriterien analysiert, die als Basis für eine korrekte, sektorspezifische Bewertung dienen, um falsche Rückschlüsse über die Knappheit zu vermeiden. Damit verbunden ist auch die Diskussion um die Einbeziehung von Gebäuden als Ressource.

1.2. Forschungsfragen

In der Arbeit sollen folgende Forschungsfragen beantwortet werden:

1. *Welche verschiedenen Bewertungsmethoden werden in der Literatur zur Bewertung des Ressourcenverbrauchs im Bauwesen vorgeschlagen und diskutiert?*
2. *Welche Vor- und Nachteile haben diese Methoden in Bezug auf die Bewertung des Ressourcenverbrauchs?*
3. *Welche Ressourcen werden durch das Bauwesen verbraucht und inwiefern besteht eine Ressourcenknappheit im Bauwesen?*
4. *Stellen Gebäude Ressourcen dar? Wie können Gebäude in dieser Hinsicht in die Bewertung von Ressourcen einbezogen werden?*

1.3. Methodische Vorgehensweise

Eine systematische Literaturrecherche bildet das methodische Vorgehen der Arbeit. Sie dient als Grundlage für die Darstellung und kritische Würdigung der gängigen Methoden zur Bewertung des Ressourcenverbrauchs, für die Diskussion der Knappheit im Bauwesen und der Gebäude als Ressourcenquelle.

2. Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel wird eine theoretische Grundlage für die Arbeit geschaffen, indem die wichtigsten Begriffe definiert werden. Darauf aufbauend wird der Untersuchungsrahmen der Arbeit festgelegt.

2.1. Begriffsdefinitionen

Begriffe wie Ressource, Erschöpfung, Knappheit und Ressourceneffizienz haben unterschiedliche Implikationen, die in der Forschung variieren können. Bei der Berechnung von Ressourcenverbrauchsindikatoren kann allein die gewählte Definition von Reserve zu unterschiedlichen Ergebnissen führen (van Oers & Guinée, 2016; van Oers et al., 2002). Die bewusste Unterscheidung zwischen biotischen und abiotischen Ressourcen sowie die Fokussierung auf spezifische Bewertungsmethoden erfordern eine genaue Erläuterung dieser Begriffe, um den Untersuchungsrahmen für die Leser:innen nachvollziehbar zu machen. Die für diese Arbeit wichtigsten Definitionen werden in diesem Kapitel kurz erläutert.

2.1.1. Ressource

Wissenschaftliche Arbeiten sammeln und diskutieren die unterschiedlichen Definitionen der Ressourcen in der Literatur (Ardente & Mathieux, 2014; Beylot et al., 2020). Der Begriff Ressource ist breit definiert und umfasst alle Mittel, die für einen Prozess eingesetzt werden (Umweltbundesamt, 2012). Bereits hier ist eine Einschränkung notwendig. Die meisten Arbeiten von Organisationen und Wissenschaftler:innen zu Ressourcen beziehen sich auf natürliche Ressourcen, die alle Mittel auf der Erde umfassen, die die Funktion haben, das Leben auf dem Planeten zu erhalten. Dazu gehören Materialien, aber auch die Sonne, die Luft und der Boden (European Commission, 2003; International Resource Panel et al., 2017; Umweltbundesamt, 2012). Das bedeutet, dass es schwierig wäre, allein mit den Begriffen Ressource oder natürliche Ressource Aussagen zur Ressourcenknappheit oder zur Messung des Ressourcenverbrauchs bzw. der Ressourceneffizienz zu treffen, da Ressourcen wie die Sonne oder die Luft sehr abundant oder sogar unendlich sind (United Nations Environment Programme, 2011).

Daher wird den biotischen und abiotischen Rohstoffen sowie den Materialressourcen, die für die Themenabgrenzung in Kapitel 2.2.1 relevant sind, besondere Aufmerksamkeit gegeben. Materialressourcen sind Biomasse, fossile Brennstoffe, Metalle und nichtmetallische Mineralien (International Resource Panel et al., 2017). Abiotische Rohstoffe sind Metalle, Mineralien und fossile Stoffe. Biotische Rohstoffe stammen von Lebewesen und umfassen Holz und andere nachwachsende Rohstoffe (Bach, Berger et al., 2017; Guinée & Heijungs, 1995; Umweltbundesamt, 2012).

2.1.2. Verbrauch, Erschöpfung, Knappheit, Effizienz und Produktivität

Das Glossar zum Ressourcenschutz des Umweltbundesamtes definiert Ressourcenverbrauch als die Nutzung von Ressourcen in einer Weise, dass sie nicht wieder verwendet werden können (Umweltbundesamt, 2012). Die Erschöpfung einer Ressource bedeutet, dass ihr Vorkommen auf der Erde abnimmt. Sie steht in direktem Zusammenhang mit den geologischen (oder natürlichen) Vorräten. Knappheit einer Ressource bedeutet, dass die verfügbare Menge für die Nutzung nicht ausreicht oder bald nicht mehr ausreichen wird, d.h. die Nachfrage ist größer als das Angebot. Bei der Beurteilung von Knappheit werden neben Umweltaspekten auch wirtschaftliche, soziale und geopolitische Aspekte berücksichtigt (van der Voet, 2013a; van Oers & Guinée, 2016).

Auch Ressourceneffizienz und Ressourcenproduktivität unterscheiden sich. Ressourceneffizienz ist die optimale Nutzung von Geld, Material, Personal und anderen verfügbaren Ressourcen einer Person oder Organisation, um effektiv zu funktionieren und gleichzeitig den Verbrauch natürlicher Ressourcen zu minimieren. Der Schwerpunkt liegt auf der nachhaltigen Nutzung und der Verringerung der Umweltauswirkungen (Unep, 2017). Sie ist umfassender als die Produktivität, die lediglich die Produktionsergebnisse mit dem Ressourceneinsatz in Beziehung setzt (Umweltbundesamt, 2012).

2.1.3. Reserven

Die Definitionen von Ressourcenreserven unterscheiden sich zwischen der LCA und den geologischen Gemeinschaften, was zu potenzieller Unklarheit führt. Drielsma et al. (2016) haben diese Unterschiede hervorgehoben, indem sie die Definitionen von Committee for Mineral Reserves International Reporting Standards (CRIRSCO) mit denen des Abiotic Depletion Potential (ADP) verglichen haben. Um die Kommunikati-

on zu verbessern, sollten beide Gemeinschaften ihre Terminologie angleichen. Die geologische Gemeinschaft bewegt sich auf die Definitionen von CRIRSCO zu, was darauf hindeutet, dass die LCA-Gemeinschaft diesem Beispiel folgen könnte (Drielsma et al., 2016; van Oers & Guinée, 2016).

Tabelle 1, Definitionen der Reserven, eigene Darstellung nach Drielsma et al. (2016) und van Oers und Guinée (2016)

| Terminologie | | Definition |
|---------------------------------------|------------------------------------|--|
| Van Oers et al. (2002) | Drielsma et al. (2016) | Ressourcen/Reserven-Klassifizierung für Mineralien (Guinée & Heijungs, 1995; U.S Geological Survey, 2015a, 2015b) |
| <i>ultimate reserve</i> | <i>crustal content</i> | Durchschnittliche Konzentration einer Ressource in ihrer primären Quelle (z. B. der Erdkruste) mit der Masse oder dem Volumen dieser Quelle multipliziert (z. B. bei einer Tiefe von 10 km in der Kruste) (Guinée & Heijungs, 1995) |
| <i>ultimately extractable reserve</i> | <i>extractable global resource</i> | Förderbare Menge einer Ressource in der oberen Erdkruste, die von einer bestimmten Reinheit, physikalischen und chemischen Kriterien abhängt. (U.S Geological Survey, 2015a, 2015b) |
| <i>reserve base</i> | <i>mineral resource</i> | Umfasst Teile von Ressourcen, die den Standards der heutigen Bergbaupraxis entsprechen und das Potenzial für wirtschaftliche Nutzung in der Zukunft haben, unabhängig von der aktuellen Technologie und Wirtschaftslage. Dies schließt wirtschaftlich lebensfähige Ressourcen, grenzwertige und unwirtschaftliche Ressourcen ein. (U.S Geological Survey, 2015a, 2015b). |
| <i>economic reserve</i> | <i>mineral reserve</i> | Der Teil der natürlichen Reserven, der zum Zeitpunkt der Bewertung wirtschaftlich für den Abbau rentabel ist (U.S Geological Survey, 2015a, 2015b). |

2.2. Eingrenzung des Themas

Nachdem im vorangegangenen Kapitel die wesentlichen Begriffe definiert wurden, wird das Untersuchungsfeld dieser Arbeit genau eingegrenzt.

2.2.1. Ressource

In Anlehnung an die zuvor definierten Begriffe im Glossar und im Kapitel 2.1.1 wird der Fokus speziell auf Materialressourcen und Rohstoffe gelegt. Die Definition der Materialressourcen, die Biomasse, fossile Brennstoffe, Metalle und nichtmetallische Mineralien umfasst, bildet den Rahmen für die Bewertung von Baustoffen, da diese die primären Einsatzstoffe für deren Herstellung darstellen (S. Weber et al., 2016). Im Rahmen dieser Arbeit werden sowohl biotische als auch abiotische Rohstoffe betrachtet. Für die Herstellung von Baustoffen werden auch Energie und Wasser benötigt (Bundesverband Baustoffe- Steine und Erden, 2020; S. Weber et al., 2016), die Bewertung dieser Ressourcen erfolgt jedoch in der Regel getrennt (DIN Deutsches Institut für Normung, 2020; EPD International, 2023; Goedkoop et al., 2008). Der Fokus liegt hier auf biotischen und abiotischen Rohstoffen.

2.2.2. Geographisch

In dieser Arbeit wurde im Rahmen der tabellarischen Übersicht im Kapitel 3.1 bewusst auf eine geographische Abgrenzung der betrachteten Bewertungsmethoden verzichtet. Insbesondere wurden Bewertungsmethoden sowohl aus der EU als auch aus den USA aufgenommen.

Außerdem werden in verschiedenen Bewertungsmethoden Daten zu den *ultimate reserve* verwendet, die die Gesamtmenge der Rohstoffe in der gesamten Erdkruste umfassen. (Arendt et al., 2020; Randebrock et al., 2023; van Oers & Guinée, 2016; van Oers et al., 2002). Dies zeigt auch, dass eine Beschränkung auf die in Deutschland üblichen Bewertungsmethoden für die Bewertung der Erschöpfung wenig sinnvoll wäre.

Die Frage der Knappheit kann nur in Bezug auf eine bestimmte Region bewertet werden (Bach, Finogenova et al., 2017; Randebrock et al., 2023; van der Voet, 2013a; van Oers & Guinée, 2016), in diesem Fall lag der Schwerpunkt der Forschungsfrage zur Ressourcenknappheit in Kapitel 4 auf Deutschland.

2.2.3. Zu bewertende Konzepte

Unter Berücksichtigung der Definition von Ressourcenverbrauch und der Tatsache, dass der Schwerpunkt der Arbeit darin besteht, die Risiken für Ökologie und Ökonomie bei der Gewinnung von Rohstoffen aus der Erde für Baumaterialien zu ermitteln, konzentrierte sich die Literaturrecherche auf bestimmte Konzepte.

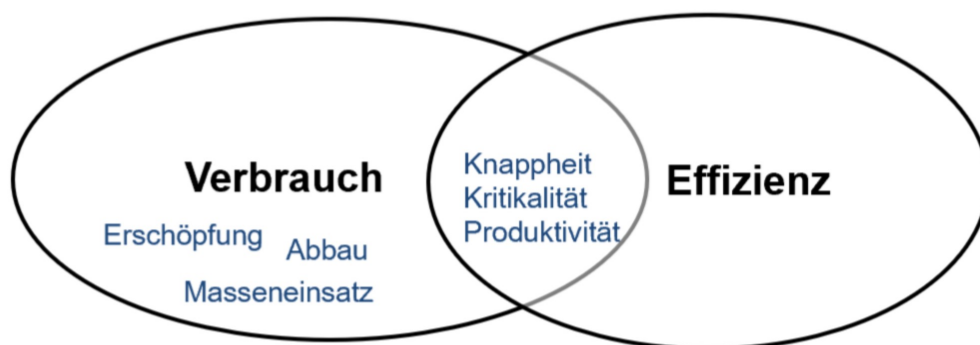


Abbildung 1, Veranschaulichung von Konzepten, die zum Ressourcenverbrauch und zur Ressourceneffizienz gehören, eigene Darstellung

Die tabellarische Übersicht (Tabelle 2) in Kapitel 3.1 fokussiert sich hauptsächlich auf den Ressourcenverbrauch. Daher werden Verbrauch, Abbau, Erschöpfung und Materialeinsatz bewertet, die mit der Entnahme von Rohstoffen aus der Erde verbunden sind. Da einige Methoden für die Bewertung der Ressourceneffizienz auf Produktebene entwickelt wurden (Bach, Berger et al., 2017; Bach et al., 2016; Struck & Flamme, 2023) und Effizienz auch den Verbrauch umfasst (Unep, 2017), werden diese mit einbezogen. Baumaterialien werden in der Ökobilanz als Produkte bewertet (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen, 2018; ÖKOBAU.DAT, 2023), daher wurden die Methoden auf der Produktebene in Tabelle 2 aufgenommen.

Es gibt verschiedene Methoden zur Bewertung von Knappheit, von denen sich die meisten auf Studien auf regionaler Ebene beziehen, die auf einen bestimmten Zeitraum beschränkt sind (Schrijvers et al., 2020). Einige der Methoden zur Bewertung von Ressourcenknappheit verwenden die in der Tabelle in Kapitel 3.1 aufgeführten Indikatoren, um den Ressourcenverbrauch zu messen, wobei in diesem Fall der Schwerpunkt auf der physischen Verfügbarkeit liegt (Arendt et al., 2020; Randebroek et al., 2023).

3. Methoden zur Bewertung des Ressourcenverbrauchs

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die vorherrschenden Methoden für eine Bewertung des Ressourcenverbrauchs im Bauwesen.

Eine wichtige Erkenntnis aus der Literaturrecherche ist, dass die meisten Ressourcen im Bausektor in Ökobilanzen erfasst werden (Fischer et al., 2014). Ausnahmen sind die Indikatoren der Stoffstromanalyse (MFA) und Material Input Per Service Unit (MIPS), die nicht in LCAs enthalten sind, obwohl es Studien gibt, die MFA in LCAs integrieren (Lausselet et al., 2021).

Als Reaktion auf die Kritik, dass viele Methoden zur Bewertung des Ressourcenverbrauchs eine zu einfache und eindimensionale Sicht auf die Ressourcen bieten, sind alternative Ansätze, die eine Bewertung auf Produktebene machen, wie ESSENCE, BIRD und die Struck & Flamme (2023) Methoden entstanden (Bach, Berger et al., 2017; Bach et al., 2016; Struck & Flamme, 2023). Diese neuen Methoden plädieren für eine differenzierte Herangehensweise an die Ressourcenbewertung und zielen auch auf eine Integration in den LCA-Rahmen ab.

Tabelle 2 führt weitere Quellen auf und gibt einen kurzen Überblick über die verfügbaren Methoden. Die Methodik, die den einzelnen Indikatoren oder Bewertungssystemen zugrunde liegt, wird in Kapitel 3.2 erläutert.

3.1. Tabellarische Übersicht

Die folgende Tabelle ist eine kompaktere Version der Darstellung der Methoden zur Bewertung des Ressourcenverbrauchs. Eine ausführliche Darstellung des Einsatzes und der Vor- und Nachteile befindet sich in Anhang A. Die Tabelle beginnt mit den Bewertungsmethoden und Indikatoren innerhalb des MFA. Danach folgen die, die im aktuellen LCA-System enthalten sind. Zuletzt werden die Methoden dargestellt, die in einem integrierten System mit mehreren Dimensionen entwickelt wurden und Ressourceneffizienz oder Kreislauffähigkeit auf Produktebene bewerten.

Tabelle 2, Überblick über Methoden zur Bewertung von Ressourcenverbrauch, Ressourceneffizienz und Kreislauffähigkeit auf Produktebene im Bauwesen, vollständige Darstellung in Anhang A, eigene Darstellung

| Was wird bewertet? | Bewertungsmethode/ Entwickelt von | Definition | Einheit |
|---|--|---|----------------|
| Eingabe von Ressourcen in ein System. | DMI: Direct Material Input Definition aus OECD (2008) MFA System entwickelt von Brunner et al. (1990), Baccini und Brunner (1991) | Materialflussindikator: Massenstrom von Materialien, die in ein Wirtschaftssystem eintreten und darin verarbeitet oder genutzt werden. Es werden inländisch gewonnene und importierte Rohstoffe, Halb- und Fertigprodukte umfasst. | t/a |
| Eingabe von Rohstoffen in ein System | DEU: Domestic Extraction Used Definition aus OECD (2008) MFA System entwickelt von Brunner et al. (1990), Baccini und Brunner (1991), Baccini und Bader (1996) | Materialflussindikator: quantifiziert die Materialströme, die aus der Umwelt stammen und physisch in das Wirtschaftssystem einfließen, entweder zur Weiterverarbeitung oder zum direkten Verbrauch. | t/a |
| Eingabe von Materialien in ein System | TMR: Total Material Requirement Definition aus OECD (2008) MFA System entwickelt von Brunner et al. (1990), Baccini und Brunner (1991), Baccini und Bader (1996) | Materialflussindikator: Misst die Gesamtheit der Materialien, die direkt und indirekt in ein System eintreten, einschließlich versteckter Flüsse. | kg, t, t/a |
| Verbrauch von Materialien in ein System | DMC: Domestic Material Consumption Definition aus OECD (2008) MFA System entwickelt von Brunner et al. (1990), Baccini und Brunner (1991), Baccini und Bader (1996) | Materialflussindikator: Gibt den direkten Massenstrom von Materialien in ein System an, die dort verbraucht werden. | t/a |

| Was wird bewertet? | Bewertungs- methode/ Entwickelt von | Definition | Einheit |
|---|--|--|--|
| Verbrauch von Materialien in ein System | RMC: Raw Material Consumption Definition aus OECD (2008) MFA System entwickelt von Brunner et al. (1990), Baccini und Brunner (1991), Baccini und Bader (1996) | Materialflussindikator: Zeigt die Massen in Rohstoffäquivalenten an, die in ein System einfließen. | t/a |
| Verbrauch von Materialien in ein System | TMC: Total Material Consumption Definition aus OECD (2008) MFA System entwickelt von Brunner et al. (1990), Baccini und Brunner (1991), Baccini und Bader (1996) | Materialflussindikator: Gesamtheit aller Materialien, die einem System direkt oder indirekt durch Verbrauch zugeführt werden, einschließlich versteckter Flüsse. | t/a |
| Materialproduktivität von natürlichen Ressourcen in ein System oder Produkt | MIPS: Material Input per Service Unit Ritthoff et al. (2002) | - Angabe der Menge der für ein Produkt verwendeten Ressourcen. - Berechnet, wie viel Nutzen aus einer bestimmten Menge der Ressource entzogen werden kann. | Abhängig von der gewählten funktionellen Einheit |
| Erschöpfung abiotischer Rohstoffe | ADP: Abiotic Depletion Potential Guinée und Heijungs (1995) ADPE (Abiotic Depletion Potential Elements) und ADPF (Abiotic Depletion Potential Fossil) van Oers et al. (2002) | Erschöpfungspotenzial auf der Basis des Verhältnisses zwischen Fördermenge, Regenerationsrate und Reserve. | ADPE: kg Sb Äq. ADPF: MJ |
| Erschöpfung abiotischer Rohstoffe | AADP: Anthropogenic Stock Extended Abiotic Depletion Potential Schneider et al. (2011), Schneider et al. (2015) | Anpassung des ADP unter Berücksichtigung der Materialmenge in anthropogenen Beständen. | kg Sb Äq. |

| Was wird bewertet? | Bewertungsmethode/ Entwickelt von | Definition | Einheit |
|---|--|---|--|
| Erschöpfung abiotischer Rohstoffe Fokus auf Metalle und fossile Energieträger | Surplus Energy Goedkoop und Spiensma (2001) | Erschöpfungspotenzial auf der Grundlage des überschüssigen Energiebedarfs für die Gewinnung des Materials im Verhältnis zu seiner Konzentration. | MJ surplus |
| Verbrauch abiotischer Rohstoffe | Distance to target (DtT) Alting et al. (1997), Hauschild und Potting (2005) | - Verwendet politische Reduktionsziele, um die Gewichtungsfaktoren für die Ressourcenkategorie zu bestimmen. - Faktoren werden berechnet, indem die aktuellen Auswirkungen mit den politischen Reduktionszielen verglichen werden. | mPR |
| Exergie, Erschöpfung natürlicher Ressourcen | CExD: Cumulative Exergy Demand Bösch et al. (2007) | Zeigt die Qualität der Ressourcen an und gibt Auskunft über die gesamte Exergie, die der Natur für ein Produkt entnommen wird. | MJ |
| Erschöpfung, physikalische Verfügbarkeit biotischer Rohstoffe | BRAI: Biotic Resource Availability Indicator Bach, Berger et al. (2017) | Erschöpfungspotenzial auf der Basis des Verhältnisses zwischen Fördermenge, Regenerationsrate und Reserve. | 1/Individuum |
| Ressourceneffizienz abiotischer Rohstoffe Entwickelt für Metalle und fossile Brennstoffe | ESSENZ TU Berlin, Daimler, Deutsches Kupferinstitut, Evonik, Knauer, Siemens, ThyssenKrupp, Bach et al. (2016) | - Integrierte Methode zur ganzheitlichen Berechnung und Messung von Ressourceneffizienz. - Verfügt über Indikatoren zur ökonomischen, ökologischen und sozialen Dimension der Ressourcenverfügbarkeit. | Vergleichende Methode: Gesamtergebnisse werden in Diagrammen dargestellt |
| Ressourceneffizienz von Baustoffen/ Konstruktionselementen | Struck & Flamme Struck und Flamme (2023) | Nutzwertanalyse für die Wiederverwendbarkeit und Recyclingfähigkeit von Bauteilen, die in eine Bewertung der Ressourceneffizienz einfließen kann, um das ressourceneffizienteste Bauteil auszuwählen. | Vergleichende Methode: Gesamtergebnisse werden in Diagrammen dargestellt |

| Was wird bewertet? | Bewertungs- methode/ Entwickelt von | Definition | Einheit |
|--|--|--|--|
| Verfügbarkeit bio- tischer Rohstoffe | BIRD Bach, Berger et al. (2017) | Bewertung der Verfügbarkeit von terrestrischen biotischen Materialien entlang von Lieferketten unter Berücksichtigung von fünf Dimensionen: physisch, sozioökonomisch, abiotisch, sozial und ökologisch. | Vergleichende Methode: Gesamtergebnisse werden in Diagrammen dargestellt |
| Kreislauffähigkeit von Baukonstruktionen | Urban Mining Index Rosen (2021) | Systematik zur Bewertung der Kreislauffähigkeit von Baukonstruktionen und Gebäuden in der Neubauplanung. Bewertung der Materialität, Konstruktion und Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus zur Abschätzung des Potenzials der sortenreinen Wertstoffrückgewinnung. | Zwischenergebnisse werden in Diagrammen und Tabellen dargestellt. Endergebnis in %. |

3.2. Erläuterung der Methodik

Zum besseren Verständnis, wie Ressourcenverbrauch, -erschöpfung und -effizienz gemessen werden, wird in diesem Kapitel kurz auf die Methodik der Bewertungssysteme bzw. Indikatoren eingegangen. Ziel ist es, einen Überblick darüber zu geben, wie die Ergebnisse berechnet werden. Für eine detaillierte Erläuterung der Methodik wird auf die Literatur verwiesen.

3.2.1. Materialflussanalyse und Materialflussindikatoren

Die Materialflussanalyse (MFA) ist ein Analyserahmen, der die Ströme natürlicher Ressourcen und Materialien innerhalb eines definierten Systems, i.d.R. einer Volkswirtschaft, untersucht. Die verschiedenen Arten der MFA und ihre Indikatoren sind im OECD-Leitfaden für die Messung von Materialflüssen und Ressourcenproduktivität beschrieben, der die Grundlage für dieses Unterkapitel bildet (OECD, 2008). Basierend auf den Prinzipien der Massenbilanzierung, untersucht die MFA die Wechselwirkungen zwischen Materialflüssen, menschlichen Aktivitäten und Umweltauswirkungen.

Die Materialsystemanalyse (MSA), eine Untergruppe der MFA, konzentriert sich auf materialspezifische Flussrechnungen. Im Gegensatz zur MFA, die einen breiten Überblick bietet, ist die MSA auf bestimmte Rohstoffe oder Halbfertigprodukte wie Zement, Eisen und Stahl fokussiert.

Innerhalb des gesamten MFA-Rahmens werden verschiedene Indikatoren verwendet, um Einblicke in die Materialflüsse zu erhalten. Für die tabellarische Übersicht in Kapitel 3.1 wurden diejenigen Stoffstromindikatoren ausgewählt, die auch im Deutschen Glossar für Ressourcenschutz enthalten sind (Umweltbundesamt, 2012). Es handeln sich dabei um Input- und Verbrauchsindikatoren.

Input-Indikatoren stellen Materialien dar, die zur Unterstützung wirtschaftlicher Aktivitäten, wie z.B. der Produktion von Exportgütern, eingesetzt werden. Sie geben Aufschluss über die Produktionsweise einer Region oder eines Landes und werden von Faktoren wie dem Außenhandelsmuster, der Ausstattung mit natürlichen Ressourcen und dem Technologieniveau einer Region bzw. eines Landes beeinflusst. Die wichtigsten Input-Indikatoren sind:

- Domestic Extraction Used (DEU): quantifiziert die Materialströme, die aus der Umwelt stammen und physisch in das Wirtschaftssystem einfließen, entweder zur Weiterverarbeitung oder zum direkten Verbrauch. Die Materialien werden zu Produkten verarbeitet oder ihnen hinzugefügt
- Direct Material Input (DMI): umfasst alle Materialien, die einen wirtschaftlichen Wert haben und direkt in Produktions- und Konsumprozessen eingesetzt werden. Die Beziehung zwischen DMI und DEU wird durch folgende Formel definiert:

$$DMI = DEU + Import \quad (3.1)$$

- Total Material Requirement (TMR): erfasst neben dem DMI auch die ungenutzten Materialströme in Bezug auf die Materialgewinnung, die nicht als Produkte in die Wirtschaft fließen, sowie die indirekten Materialflüsse, die mit Importen in andere Länder verbunden sind. Sie quantifiziert die gesamte Materialgrundlage einer Volkswirtschaft, indem sie Importe in ihre Äquivalente an primären Ressourcenaufnahmen um-

rechnet, wenn man die ungenutzten und indirekten Materialströme hinzufügt.

Verbrauchsindikatoren sind direkt mit Verbrauchsarten verknüpft und spiegeln die Materialien wider, die von verschiedenen wirtschaftlichen Aktivitäten verbraucht werden. Die Differenz zwischen Konsum- und Inputindikatoren ist ein Hinweis auf den Grad der Integration einer Volkswirtschaft mit der Weltwirtschaft, der auch von der Größe der Wirtschaft abhängt. Die wichtigsten Verbrauchsindikatoren sind:

- Domestic Material Consumption (DMC): misst die Gesamtmenge der in einer bestimmten Volkswirtschaft direkt verbrauchten Materialien. Seine Beziehung zum DMI wird durch die folgende Gleichung beschrieben:

$$DMC = DMI - \text{Exporte} \quad (3.2)$$

- Total Material Consumption (TMC): bewertet den gesamten Materialverbrauch im Zusammenhang mit inländischen Produktions- und Konsumaktivitäten. Die Formel berücksichtigt sowohl den TMR als auch die damit verbundenen Exporte und deren indirekte Ströme:

$$TMC = TMR - (\text{Exporte} + \text{damit verbundene indirekte Ströme}) \quad (3.3)$$

Indikatoren wie Raw Material Input (RMI) und Raw Material Consumption (RMC) sind Input- und Verbrauchsindikatoren, die sich spezifisch auf Rohstoffe fokussieren.

Die MFA-Indikatoren werden aus statistischen Daten über Input und Verbrauch abgeleitet und in Einheiten wie z. B. t/a umgerechnet. Die Wahl der Einheiten ist hierbei von den physischen und zeitlichen Dimensionen des Bilanzierungsraums abhängig

Daneben gibt es noch Balance-Indikatoren und Output-Indikatoren, die jedoch nicht im Glossar zum Ressourcenschutz enthalten sind und daher auch nicht im Rahmen dieser Bachelorarbeit behandelt werden. Für ergänzende Informationen zu allen Indikatoren und der Methodik, siehe OECD (2008).

3.2.2. Material Input Per Service Unit (MIPS)

MIPS ist ein umweltorientiertes Maß für die Bewertung der Ressourcen, die bei der Produktion oder den Dienstleistungen eines Produkts verbraucht werden. Es wurde

von Ritthoff et al. (2002) eingeführt und beschrieben, was als Grundlage für dieses Unterkapitel gilt.

Die MIPS-Methode quantifiziert, wie viel Ressourcen verbraucht werden, um eine bestimmte Dienstleistung oder Funktion zu erbringen. Durch die Bewertung der verwendeten Materialien ab dem Zeitpunkt ihrer Gewinnung berücksichtigt MIPS die Kategorien der biotischen und abiotischen Rohstoffe sowie Wasser-, Luft- und Landbewegungen im Zusammenhang mit land- und forstwirtschaftlichen Praktiken. Insbesondere wird der gesamte Materialverbrauch von der Produktion bis zur Entsorgung verfolgt und in einen Ressourcenverbrauch umgerechnet. Er wird durch die folgende Gleichung dargestellt:

$$MIPS = \frac{MI}{S} \quad (3.4)$$

MI: *Material Input* (insgesamt eingesetzte Ressourcen);

S: *Serviceeinheit*.

Für die praktische Berechnung von MIPS wird von den Autor:innen ein siebenstufiger Prozess empfohlen:

1. Definition des Ziels und der Serviceeinheit: Das Ziel wird festgelegt und die Serviceeinheit ausgewählt, auf die sich alle Werte beziehen, um eine einheitliche Vergleichsgrundlage für verschiedene Produkte zu gewährleisten.
2. Abbildung des Lebenszyklus des Produkts: Es wird eine Prozesskette erstellt, in der alle mit dem Produkt verbundenen Phasen detailliert beschrieben werden.
3. Erfassen von Inputs und Outputs: Ein geeignetes strukturiertes Format, zbsp. ein Datenblatt, wird verwendet, um die notwendigen Inputs (und ggf. Outputs) zu erfassen.
4. Berechnung des Materialeinsatzes (*Cradle to Product*): Anhand der MI-Faktoren wird der Materialinput von der Ressourcengewinnung bis zur Produktherstellung berechnet.

5. Berechnung des Materialinputs (*Cradle to Grave*): Hier werden auch die Inputs aus der Nutzungsphase und dem Recycling/Entsorgung integriert, um einen umfassenden Überblick zu erhalten.
6. Berechnung des MIPS: Nachdem der gesamte Materialinput ermittelt wurde, wird der MIPS berechnet.
7. Interpretation der Ergebnisse: Analyse und Interpretation des berechneten MIPS-Wertes.

3.2.3. Abiotic Depletion Potential (ADP)

Eine Phase der LCA verarbeitet und interpretiert die Ergebnisse der Bestandsanalyse und konzentriert sich dabei auf die Umweltauswirkungen eines Produkts (DIN Deutsches Institut für Normung, 2020). Das Hauptanliegen des Charakterisierungsmodells für die Erschöpfung abiotischer Ressourcen ist es, den Schweregrad der Erschöpfung einer Ressource im Verhältnis zu einer anderen zu bestimmen und dies in Form von Charakterisierungsfaktoren, die ADPs, auszudrücken. Das erste Konzept eines ADP wurde veröffentlicht, als die CML-Methode für LCA entwickelt wurde. In dieser Arbeit gehen die Autor:innen davon aus, dass das Erschöpfungsproblem eher ein ökologisches und weniger ein ökonomisches Problem ist. (Guinée & Heijungs, 1995)

Das Charakterisierungsmodell verwendet die *ultimate reserves* und die Förderraten eines Rohstoffs. Das ADP wird für jede Förderung von Elementen und fossilen Brennstoffen berechnet. Es ist ein relatives Maß, das die Erschöpfung von Antimon als Referenz verwendet. Die Wahl von Antimon als Referenz ist willkürlich, wurde aber gewählt, weil es das erste Element ist, für das ein vollständiger Datensatz vorlag. (Guinée & Heijungs, 1995)

Der Charakterisierungsfaktor wird nach Guinée und Heijungs (1995) und van Oers und Guinée (2016) wie folgt berechnet:

$$abiotic\ depletion = \sum_i ADP_i \times m_i \quad (3.5)$$

mit:

$$ADP_i = \frac{DR_i / (R_i)^2}{DR_{ref} / (R_{ref})^2} \quad (3.6)$$

ADP_i : Abiotisches Erschöpfungspotenzial der Ressource i (kg Antimonäquivalente/kg der Ressource i);

m_i : Menge der entnommenen Ressource i (kg);

R_i : *ultimate reserve* der Ressource i (kg);

DR_i : Entnahmerate der Ressource i (kg/a), (die Regeneration wird mit Null angenommen);

R_{ref} : *ultimate reserve* der Referenzressource Antimon (kg);

DR_{ref} : Abbaurrate der Referenzressource Antimon (kg/a).

Oers et al. (2002) trennten die Auswirkungskategorien für fossile Brennstoffe (ADPF) von den Elementen (ADPE). Die Methodik zur Berechnung des ADPE ist dieselbe wie bei der ursprünglichen Charakterisierung von ADP; siehe Formel 3.6. Der Grund für die Aktualisierung und Trennung der zwei Kategorien ist, dass fossile Brennstoffe, sowohl als Energiequelle als auch als Material, vollständig substituierbar sind. Das bedeutet, dass sich die ADPs zumindest in Bezug auf die Energiereserven nicht unterscheiden sollten. Daher wurde zunächst ein Gesamt-ADP für fossile Brennstoffe entwickelt, mit der Gleichung nach van Oers et al. (2002):

$$ADPF = \frac{DR_{fossil}/(R_{fossil})^2}{DR_{ref}/(R_{ref})^2} \quad (3.7)$$

$ADPF$: Abiotisches Erschöpfungspotenzial der fossilen Energie in kg Sb-Äq./MJ fossile Energie;

R_{fossil} : *ultimate reserve* fossiler Brennstoffe (MJ);

DR_{fossil} : Abbau oder Produktion fossiler Brennstoffe (MJ/a);

R_{ref} : *ultimate reserve* von Antimon (kg);

DR_{ref} : Extraktionsrate von Antimon (kg/a).

In van Oers et al. (2002) wurde auch eine Kategorie für Baurohstoffe diskutiert. Sie wurde jedoch nicht umgesetzt, da die Autor:innen argumentieren, dass die Reserven

der relevanten Mineralien zu groß oder unendlich sind. Insofern sei das Problem der Erschöpfung für die Baumineralien nicht relevant (van Oers et al., 2002).

Die Aktualisierungen und Diskussionen anhand dieser LCA-Kategorie finden sich in van Oers und Guinée (2016).

3.2.4. Anthropogenic Stock Extended Abiotic Depletion Potential (AADP)

Das AADP-Modell bietet einen Rahmen für die Bewertung der potenziellen Erschöpfung abiotischer Ressourcen, wobei sowohl geologische als auch anthropogene Bestände berücksichtigt werden. Schneider et al. (2011) argumentieren, dass anthropogene Vorräte bei der Bewertung der Ressourcenknappheit berücksichtigt werden müssen, da der Wert abiotischer Ressourcen eher in ihrem funktionalen Nutzen für den Menschen als in ihrer natürlichen Verfügbarkeit liegt. Das Modell betont, dass der tatsächlich gewinnbare Teil der geologischen Reserven klar definiert sein sollte, so dass eine kombinierte Bewertung der geologischen und anthropogenen Reserven möglich ist, um die physische Verfügbarkeit der Ressourcen zu bestimmen. (Schneider et al., 2011, 2015)

Zuverlässige Vorhersagen zukünftiger Fördermengen erfordern die Bewertung aller potenziellen Ressourcen, wobei die Überprüfung der Mineralkonzentrationen in der kontinentalen Kruste und Vorschläge zur Bestimmung der *ultimately extractable reserves* als unerlässlich angesehen werden (Kesler & Wilkinson, 2008, 2009; Rankin, 2011; Skinner, 1976, 1979; Unep, 2011). Die Bestimmung der anthropogenen Reserven basiert auf der potenziell gewinnbaren Menge von Ressourcen innerhalb der Anthroposphäre, die aus der kumulierten Entnahmerate von ca. 1900 bis 2010 mit Daten des USGS und einer angenommenen Dissipationsrate von 20% berechnet wird (Schneider et al., 2011; USGS, 2014).

Die AADP-Methode konzentriert sich auf das Wiederverwendungspotenzial und die Materialverluste. Materialien, die so eingesetzt werden, dass sie wiederverwendet und recycelt werden können, stellen kein Erschöpfungsproblem dar, aber eine Verwendung, die zu einer Dispersion oder ungünstigen Materialkombinationen führt, kann zu Verlusten am Ende des Lebenszyklus führen (Hagelüken & Meskers, 2010; Reuter et al., 2005). Wenn Materialien wiederverwertet werden können, bleibt der Gesamtbestand konstant; der Abbau erschöpft dann den geologischen Bestand, erhöht aber den anthropogenen Bestand (Schneider et al., 2015).

Die Studie definiert die abiotischen Reserven neu, um die Erschöpfung der Ressourcen zu bewerten. Obwohl die *ultimate reserve* von Guinée und Heijungs (1995) für eine vergleichende Bewertung verwendet werden können, sind sie für AADP-Modelle, die anthropogene Bestände einbeziehen, nicht geeignet. Daher werden von Schneider et al. (2015) die Reserven für den menschlichen Verbrauch erneut untersucht und neue Schätzungen für verschiedene Materialien vorgenommen, wobei die in Kapitel 2.1.3 definierte Reservendefinition der *ultimately extractable reserves* verwendet wird. Die Formel zur Berechnung der AADP nach Schneider et al. (2015) lautet:

$$AADP_i = \frac{DR_i}{(R_i + S_i)^2} \times \frac{(R_{ref} + S_{ref})^2}{DR_{ref}} \quad (3.8)$$

$AADP_i$: Anthropogenic Stock Extended Abiotic Depletion Potential in Bezug auf *ultimately extractable reserves* (kg Sb-Äq./kg);

DR_i : Extraktionsrate der Ressource i (kg);

R_i : *ultimately extractable reserve* der Ressource i (kg);

S_i : Anthropogener Bestand der Ressource i (kg);

R_{ref} : Extraktionsrate von Antimon (kg);

S_{ref} : Anthropogener Bestand von Antimon (kg);

DR_{ref} : Extraktionsrate von Antimon (kg).

3.2.5. Energy Surplus

Das Konzept, den Energieüberschuss zur Bewertung des Ressourcenverbrauchs in der LCA miteinzubeziehen, wurde von Goedkoop und Spriensma (2001) eingeführt, als sie die Eco 99-Methode konzipiert haben. Goedkoop und Spriensma (2001) dient als Grundlage für dieses Unterkapitel.

In der EI-99 können die Auswirkungen auf Ressourcen quantifiziert werden, indem die ökonomischen und ökologischen Kosten, die mit dem Abbau von Erzen verbunden sind, berücksichtigt werden. Zu diesen Kosten gehören die für den Abbau benötigten Flächen und die für den Abbau benötigte Energie (Blonk, 1996). Alternative Energiequellen, insbesondere Solar- und Windenergie, haben dazu auch einen hohen Flä-

chenbedarf (Ros, 1993). Diese Flächen- und Energieintensität führte zur Einführung des Begriffs der Überschussenergie durch Müller-Wenk (1998), der die Differenz zwischen dem aktuellen und dem zukünftigen Energiebedarf für die Ressourcengewinnung bezeichnet. Diese Energiedifferenz liefert ein relatives Maß zum Verständnis der Ressourcenerschöpfung.

Für Mineralien untersuchten Chapman und Roberts (1983) die Beziehung zwischen Energieverbrauch und Erzgehalt und stellten fest, dass der Energiebedarf für die Veränderung der chemischen Bindungen von Mineralien konstant ist, während der Energiebedarf für die Metallverarbeitung mit dem Erzgehalt und dem technologischen Fortschritt variiert. Technologische Verbesserungen haben den höheren Energiebedarf bei niedrigeren Erzgehalten ausgeglichen.

Bei der Betrachtung der fossilen Brennstoffe stellen sich Fragen wie etwa nach der schrittweisen Abnahme der Qualität der Brennstoffe und dem Substitutionspotenzial zwischen den Brennstoffen. So kann z.B. die Erschöpfung konventioneller Öl- und Gasvorkommen zu einem Ausweichen auf unkonventionelle Ressourcen führen, was die Berechnung des Energieüberschusses vor neue Herausforderungen stellt (Müller-Wenk, 1999).

Die Methodik zur Bestimmung der Charakterisierungsfaktoren für verschiedene Mineralien und fossile Brennstoffe ist in Goedkoop und Spriensma (2001) beschrieben. Die Schädigung der Ressource wird in MJ überschüssiger Energie gemessen. Ein Schadenswert von 1 bedeutet, dass die zukünftige Gewinnung einer Ressource aufgrund einer geringeren Ressourcenkonzentration oder einer ungünstigeren Beschaffenheit der verbleibenden Ressourcen zusätzliche MJ an Energie erfordert. Dieser zukünftige Referenzpunkt wird auf der Grundlage des Zeitpunkts bestimmt, zu dem die kumulative Entnahme das Fünffache der vor 1990 entnommenen Menge erreicht. Die Wahl des Faktors 5 ist willkürlich, seine Bedeutung nimmt jedoch nach der Normalisierung ab.

Der Ansatz für Mineralien unterscheidet sich von dem für fossile Brennstoffe. Bei Mineralien ist der wichtigste Qualitätsfaktor die Konzentration. Je geringer die Konzentration des Minerals in den Extraktionsprozess, desto mehr Aufwand ist erforderlich, um die Ressource zu gewinnen. Die Einheit für den Schaden ist MJ überschüssige Energie pro kg abgebautes Material.

Bei fossilen Brennstoffen (wie Erdöl, Kohle und Erdgas) ist der Parameter Konzentration weniger aussagekräftig. Stattdessen wird nur der Energieaufwand zur Gewinnung der Ressource berücksichtigt. Die Schadensfaktoren werden in MJ überschüssiger Energie pro kg extrahiertem Brennstoff, pro m³ extrahiertem Gas oder pro MJ extrahierter Energie ausgedrückt.

3.2.6. Distanz-zum-Ziel (DtT)

Die EDIP LCA-Methode basiert auf dänischen politischen Zielen zur Reduzierung verschiedener Umweltauswirkungen. Sie wurde ursprünglich von Alting et al. (1997) entwickelt und von Hauschild und Potting (2005) aktualisiert und ist die dänische Version der LCA. Das Handbuch zur Methode von Pommer et al. (2003) dient als Grundlage für dieses Unterkapitel.

Die Methode bewertet die Umweltauswirkungen und den Ressourcenverbrauch auf der Grundlage vorgegebener politischer Reduktionsziele. Bei der Entwicklung der Methode wurde besonderer Wert auf das Jahr 2000 als Zieljahr gelegt und das Jahr 1990 als Referenzjahr gewählt. Die Referenz- und Zieljahre können je nach Neuberechnung der Indikatorensätze variieren. Für den Ressourcenverbrauch gilt folgender Ansatz:

Die Normalisierung ist der erste Prozess, der darauf abzielt, den Verbrauch einer Ressource ins Verhältnis zu setzen. Durch die Bezugnahme auf die durchschnittliche Auswirkung eines Individuums wird der Ressourcenverbrauch mit Hilfe der folgenden Formel normiert:

$$\text{Normalisierter Verbrauch} = \frac{\text{Spezifischer Verbrauch}}{\text{Durchschnittlicher Verbrauch pro Person und Jahr}} \quad (3.9)$$

Ziel dieser Normalisierung ist es, einen vergleichenden Rahmen zu schaffen. Unter Verwendung von der Einheit Personenäquivalente können die Umweltauswirkungen eines Produkts oder Prozesses dem durchschnittlichen jährlichen Beitrag einer Person gegenübergestellt werden.

Im Rahmen der Gewichtung wird der individuelle Ressourcenverbrauch mit dem Versorgungshorizont in Beziehung gesetzt, der den Anteil der Ressource verdeutlicht, der einem Individuum und seinen Nachkommen auf globaler Ebene zur Verfügung steht. Der Versorgungshorizont stammt aus Informationen zu dem jährlichen Ressourcen-

verbrauch und Reserven. Der Verbrauch wird in der Regel in Milli-Personen-Reserven (mPR) quantifiziert und entsprechend folgendermaßen gewichtet:

$$WR(j) = RC(j) \times SHF(j) \quad (3.10)$$

$WR(j)$: Gewichteter Verbrauch der Ressource j (mPR, dimensionslos);

$RC(j)$: Verbrauch der Ressource j für ein Produkt oder Prozess (kg);

$SHF(j)$: Versorgungshorizontfaktor der Ressource j (dimensionslos).

3.2.7. Exergie (CExD)

Der kumulierte Exergiebedarf (Cumulative Exergy Demand, CExD) ist ein Indikator zur Bewertung der Ressourcenerschöpfung auf der Grundlage der Exergie, die die energetische Qualität von Ressourcen quantifiziert. Der Indikator wurde von Bösch et al. (2007) entwickelt. Bösch et al. (2017) gilt als Grundlage für dieses Unterkapitel.

Exergie ist ein Konzept, das vor allem in der Thermodynamik verwendet wird, um die maximale nützliche Arbeit zu beschreiben, die einem System entnommen werden kann, wenn es ins Gleichgewicht mit einer Referenzumgebung kommt. Sie stellt die Qualität oder das Potenzial der Energie dar, Arbeit zu verrichten. In der Vergangenheit wurden Exergiebewertungen verwendet, um die Energieeffizienz durch die Analyse von Exergieverlusten in Systemen zu bestimmen. Dieses Maß kann auch als Maß für den Bedarf an Ressourcenqualität verwendet werden, wenn die spezifischen Ressourcen, in denen die Exergie eingebettet ist, berücksichtigt werden (Bösch et al., 2007; Szargut, 2005; Szargut et al., 1988; Wall, 1993).

Der CExD-Indikator erfasst die gesamte Exergie, die der Natur entnommen wird, um ein bestimmtes Produkt, einen Prozess oder eine Dienstleistung bereitzustellen. Er summiert die Exergie aller benötigten Ressourcen und gibt damit Auskunft über die Qualität der Energienachfrage. Dies schließt sowohl Energieträger als auch nichtenergetische Materialien ein. Parallel zur Entwicklung des Indikators wurde das Exergiekonzept auf die in der ecoinvent-Datenbank enthaltenen Ressourcen angewendet, wobei verschiedene Exergiearten berücksichtigt wurden: chemische, kinetische, hydro-potenzielle, nukleare, solar-radiative und thermische Exergie.

Verschiedene Wissenschaftler:innen haben den Exergiebedarfsindikator zur Bewertung der Energieeffizienz und Ressourcenqualität angepasst und weiterentwickelt (Bösch et al., 2007; Finnveden & Östlund, 1997; Szargut, 2005; Szargut et al., 1988). Die gewählte Exergie-Methode, die in dieser Bachelorarbeit dargestellt wird, ist CExD, mit dem Hinweis, dass das Konzept der Exergie bereits in anderen Bewertungsmethoden berücksichtigt wird.

Um den Lebenszyklus-Exergiebedarf eines beliebigen Produktes zu quantifizieren, wird der CExD-Indikator als aggregierte Exergie aller Ressourcen definiert, die für einen bestimmten Prozess oder ein bestimmtes Produkt benötigt werden. Er wird in MJ-Äquivalenten ausgedrückt.

Die Berechnungsformel für das CExD nach Bösch et al. (2007) lautet:

$$CExD = \sum_i m_i \times Ex_{(ch),i} + \sum_j n_j \times r_{ex-e(type),j} \quad (3.11)$$

CExD: kumulativer Exergiebedarf pro Einheit des Produkts oder Prozesses (MJ-äq.);

m_i : Masse der Materialressource i (kg);

$Ex_{(ch),i}$: Chemische Exergie pro kg des Stoffes i (MJ-äq. /kg);

n_j : Energiemenge des Energieträgers j (MJ);

$r_{ex-e(type),j}$: Exergie-Energie-Verhältnis des Energieträgers j (MJ-äq. /MJ), wobei $e(type)$ kinetische, potentielle, nukleare, radioaktive oder thermische Exergie umfasst.

Die einzelnen Terme der Gleichung und deren Berechnung finden sich in Bösch et al. (2007). Es gibt eine Differenzierung der Exergieberechnung für Minerale, Metalle und Energieträger, die ebenfalls in Bösch et al. (2007) genau erklärt sind.

Laut Dewulf et al. (2008) ist CExD die am häufigsten angewandte Methode im Rahmen der Exergie. Es gibt jedoch auch andere Indikatoren, die die Exergie in der LCA verwenden (Nwodo & Anumba, 2020):

- Thermo-Ecological Cost (TEC): berücksichtigt nur den kumulierten Verbrauch von nicht-erneuerbaren primären Exergie Ressourcen (Szargut & Stanek, 2007).

- Cumulative Exergy Extraction from Natural Environment (CEExNE): ist eine Erweiterung der Grenzen von CExD um die Landnutzung (Dewulf et al., 2007).
- Industrial/Ecological Cumulative Exergy Demand (ICExD/ECExD): ist eine Erweiterung der CExD-Methode, um den Schwerpunkt auf industrielle bzw. ökologische Prozesse zu legen (Hau & Bakshi, 2004; S. Yang et al., 2015).
- Extended Exergy Accounting (EExA): wird verwendet zur Berechnung ein Warenwert auf der Grundlage seines Ressourcenäquivalenzwerts anstelle seiner steuerlichen Kosten (Sciubba, 2004).

Eine ausführliche Erläuterung und Diskussion der anderen Exergieindikatoren findet sich in Nwodo und Anumba (2020). Da CExD der am häufigsten verwendete Indikator im Rahmen der Exergie-basierten Methoden ist (Dewulf et al. 2008), wurde er in diesem Unterkapitel hervorgehoben, um das Verständnis der wichtigsten Exergie-Berechnungen zu ermöglichen.

3.2.8. Biotische Verfügbarkeit (BRAI)

Der BRAI-Indikator ist eine Methode zur Bewertung der Ressourcenerschöpfung speziell für biotische Ressourcen. Sie wurde im Rahmen der BIRD-Methode von Bach et al (2017) entwickelt, die in Kapitel 3.1 zusammengefasst und in Kapitel 3.2.11 näher erläutert wird. Die Grundannahme ist, dass die Verfügbarkeit biotischer Ressourcen abnimmt, wenn die Entnahmerate die Regenerationsrate übersteigt, was zu einer Verringerung des Ressourcenbestandes führt (Lindeijer et al., 2002) .

Der BRAI quantifiziert dieses Verhältnis, indem er die Differenz zwischen der Entnahme- und der Wiederherstellungsrate, normiert auf den quadrierten Ressourcenbestand, misst. Die Quadrierung des Ressourcenbestandes wird von der Methode des ADP übernommen, welche in Kapitel 3.2.3 erläutert wird. Die Formel zur Berechnung des BRAI lautet:

$$BRAI = \frac{BRAI_i}{BRAI_{ref}} = \frac{\left[\frac{Entnahmerate_i - Regenerationsrate_i}{Ressourcenbestände_i^2} \right] \times TSI_i}{BRAI_{ref}} \quad (3.12)$$

Der mit der BRAI-Methode berechnete Wert gibt jedoch nur einen Einblick in die aktuelle Situation und berücksichtigt nicht die Entwicklung der Bestandserschöpfung in den vorangegangenen Jahren.

Um dieser Einschränkung entgegenzuwirken, wird im BRAI der Threatened Species Index (TSI) berücksichtigt. Der Grund dafür ist, dass der Verlust von gefährdeten Arten schwerwiegendere Folgen hat als der Verlust von weniger oder nicht gefährdeten Arten. Der TSI basiert auf dem Klassifizierungssystem der Roten Liste gefährdeter Arten der International Union for Conservation of Nature and Natural Resources (IUCN) (International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, 2001; *International Union for Conservation of Nature IUCN Red List of Threatened Species.*) In diesem Index wird einer Art, die in die Kategorie „am wenigsten gefährdet“ fällt, der Wert 1 zugewiesen, was bedeutet, dass sie einen vernachlässigbaren Einfluss auf das BRAI-Ergebnis hat. Im Gegensatz dazu wird einer kritisch bedrohten Art der Wert 100 zugewiesen. Dies stellt sicher, dass die TSI zwar einen Einfluss auf den BRAI hat, aber nicht der einzige entscheidende Faktor ist.

Um die Ergebnisse in einen Kontext zu stellen, werden die BRAI-Werte verschiedener biotischer Ressourcen mit einer Referenzart verglichen. In diesem Fall wurde aufgrund der Datenverfügbarkeit der Afrikanische Elefant als Referenzart gewählt.

3.2.9. Ressourceneffizienzmessung durch ESSENZ

Ressourceneffizienz umfasst verschiedene Aspekte und bezieht sich auf die drei Säulen der Nachhaltigkeit (Ökonomie, Ökologie und Soziales), wie im Glossar und in Kapitel 2.1.2 definiert. Die ESSENZ-Methode wurde von Bach et al. (2016) entwickelt und als integrierte Methode zur ganzheitlichen Berechnung und Messung von Ressourceneffizienz im Nachhaltigkeitskontext beschrieben. Bach et al. (2016) gilt als Grundlage für dieses Unterkapitel.

Einen Überblick über die in ESSENZ berücksichtigten Dimensionen und Kategorien sind in Abbildung 2 dargestellt. Zu jeder Kategorie gibt es einen Indikator. Für ausführlichere Informationen darüber, wie diese Indikatoren berechnet werden, siehe Bach et al. (2016).

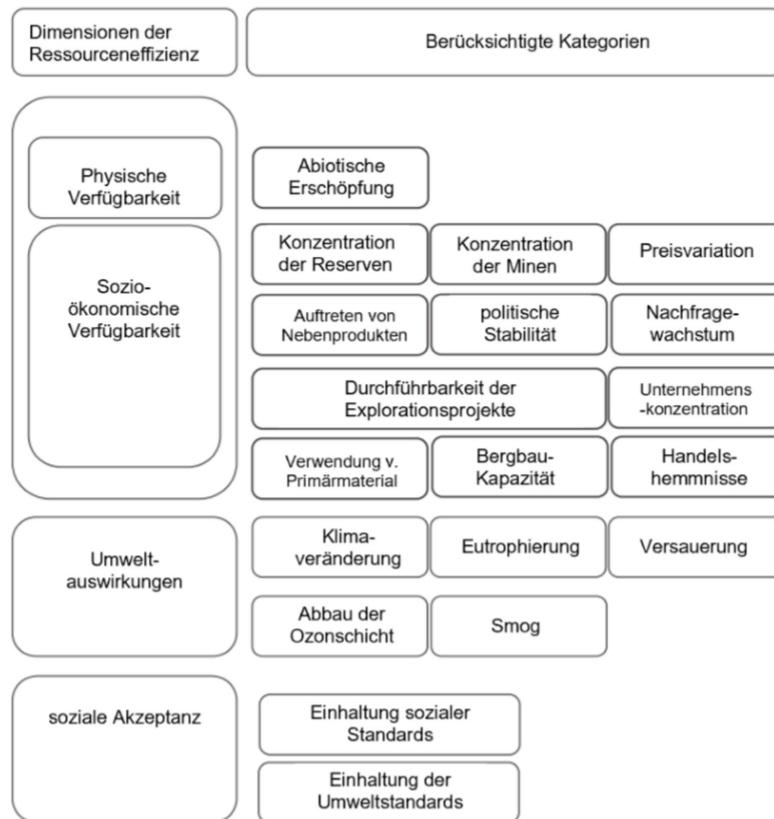


Abbildung 2, Überblick über die in ESSENZ berücksichtigten Dimensionen und Kategorien, eigene Darstellung nach Bach et al. (2016)

Die ESSENZ-Methode unterscheidet zwischen der langfristigen (physische Verfügbarkeit) und der mittelfristigen (sozioökonomische Verfügbarkeit) Perspektive. Die langfristige Verfügbarkeit berücksichtigt Ressourcen in der Erdkruste und anthropogene Lager wie Metalle in Elektronikschrott oder in Gebäuden. Wird die Gewinnung aus beiden Quellen unmöglich, hat dies Auswirkungen auf industrielle Prozesse. Die mittelfristige Verfügbarkeit wird hingegen von sozioökonomischen Aspekten wie der politischen Stabilität beeinflusst. Politische Instabilität, z. B. durch Korruption, kann eine sinnvolle Ressourcenpolitik behindern und damit die Verfügbarkeit von Ressourcen einschränken (Schneider, 2014; Schneider et al., 2016). Die politische Stabilität ist ein Beispiel für einen Indikator; der Indikatorensetz dieser Kategorie ist in Abbildung 2 dargestellt.

Die LCA bewertet die Umweltwirkungen über den gesamten Produktlebenszyklus (DIN Deutsches Institut für Normung, 2020). Die ökologische Dimension wird anhand der in Abbildung 2 dargestellten LCA-Indikatoren bewertet.

In der sozialen Dimension werden soziale Auswirkungen berücksichtigt, wie z. B. Ungleichheiten beim Zugang zu wichtigen Produkten oder Dienstleistungen (z. B. Lebensmittel, Gesundheitsversorgung). Die von der UNEP/SETAC Life Cycle Initiative (United Nations Environment Programme, 2009) propagierte soziale Lebenszyklusanalyse (Social Life Cycle Assessment, SLCA) wird zur Bewertung solcher Auswirkungen eingesetzt (Benoît et al., 2010). Einige Datenbanken, wie die Social Hotspot Data Base (SHDB), bieten Daten zu sozialen Bedingungen in verschiedenen Sektoren und Ländern (Norris et al., 2013). Zu dieser Kategorie gehört auch die Einhaltung der Umweltstandards, bei der die Folgen einer umweltschädlichen Herstellung eines Produkts gemessen werden.

Die Ergebnisse auf ESSENZ werden für jede Kategorie in Form von Vergleichsdiagrammen dargestellt. Die Fallstudie vergleicht z. B. ein Aluminium- und ein Silberkabel. Das Gesamtergebnis wird in einem Netzdiagramm dargestellt, da viele Dimensionen bewertet werden.

3.2.10. Ressourceneffizienzmessung durch Struck & Flamme

Die Struck & Flamme-Methode zielt darauf ab, ein umfassendes Bewertungssystem für die Beurteilung der Wiederverwendbarkeit und Recyclingfähigkeit von Bauteilen zu entwickeln, um die Entscheidungsträger:innen bei der Auswahl der ressourceneffizientesten Bauteile zu unterstützen. Die Methode basiert auf der Nutzwertanalyse, einem Instrument zur Entscheidungsfindung, das komplexe Alternativen anhand eines mehrdimensionalen Zielsystems bewertet (Zangemeister, 1970). Die von Struck und Flamme (2023) veröffentlichte Studie ist Grundlage für dieses Unterkapitel.

Nach Zangemeister (1970) besteht der Prozess der Nutzwertanalyse aus konsistenten Schritten, die sich an spezifische Anwendungsszenarien anpassen. Für den Ansatz von Struck & Flamme war es entscheidend, dass das Bewertungssystem auf verschiedene Bauteile anwendbar bleibt und nicht auf ein bestimmtes Bauteil, wie z. B. Dächer, beschränkt ist. Diese Bewertung konzentriert sich auf die deutsche Bauindustrie und beinhaltet Daten und Bedingungen, die für diese spezifische Region relevant sind. Wichtig ist, dass die Methode nicht auf eine bestimmte Bauweise ausgerichtet ist, so dass unter anderem Holz-, Massiv- und Stahlbau gleichwertig bewertet werden können.

Innerhalb der Nutzwertanalyse berücksichtigt die Methode acht wichtige Kriterien, die in der angegebenen Reihenfolge ausgewertet werden sollen, mit der entsprechenden Gewichtung:

- Trennbarkeit von benachbarten Elementen (10%)
- Vorhandensein von Rücknahmesystemen (20%)
- Schadstoffgehalt des Bauelements (10%)
- Wiederverwendbarkeit (20%)
- Trennbarkeit von Materialien (10%)
- Erwarteter Recyclingprozess mit Besonderheiten wie Reifegrad, Diffusion und Annahmebedingungen (10%)
- Qualität des Recyclingprodukts und Recyclingrate (10%)
- Recyclingrate (10%)

Für jedes Kriterium werden Bewertungstabellen erstellt, die ab einem Schwellenwert oder einer bestimmten Bedingung eine bestimmte Punktzahl vergeben. Diese Bewertungspunkte berücksichtigen die Masse des Materials innerhalb eines Bauteils. Zur besseren Vergleichbarkeit sollte jede Bewertungstabelle die gleiche Anzahl von Punkten vergeben.

3.2.11. Verfügbarkeit biotischer Ressourcen durch BIRD

Die BIRD-Methode, kurz für Availability of Terrestrial Biotic Materials in Product Systems, ist ein innovativer Ansatz auf Produktebene, der entwickelt wurde, um die potenziellen Einschränkungen bei der Verfügbarkeit von terrestrischen biotischen Materialien in der gesamten Lieferkette zu bewerten. Da bisherige Bewertungen sich hauptsächlich auf abiotische Ressourcen konzentrierten, wie in Kapitel 3.1 dargelegt, zielt die BIRD-Methode darauf ab, diese Lücke zu schließen. Sie umfasst 24 Kategorien, die sich auf fünf zentrale Dimensionen erstrecken und die Verfügbarkeit dieser Materialien beeinflussen: physische, sozioökonomische, abiotische, soziale und ökologische Einschränkungen. Die Methode wurde von Bach, Berger et al. (2017) entwickelt und dargestellt; die Studie gilt als Grundlage für dieses Unterkapitel.

Tabelle 3, Überblick über die in BIRD bewerteten Dimensionen und Kategorien, eigene Darstellung nach Bach, Berger et al. (2017).

| Dimension | Kategorie |
|----------------------------------|---------------------------------------|
| Umweltbedingte Einschränkungen | Klimawandel |
| | Versauerung |
| | Eutrophierung |
| | Abbau der Ozonschicht |
| | Smog |
| Soziale Einschränkungen | Einhaltung von Sozialstandards |
| | Einhaltung von Umweltstandards |
| | Lebensmittelsicherheit |
| Abiotische Einschränkungen | Verfügbarkeit von Phosphor |
| | Verfügbarkeit von Land |
| | Naturkatastrophen |
| | Verfügbarkeit von Wasser |
| Sozioökonomische Einschränkungen | Konzentration von Ressourcen |
| | Konzentration von Erntegut |
| | Recycling |
| | Komplexität der Lagerung |
| | Vorkommen als Nebenprodukte |
| | Preisschwankungen |
| | Handelshemmnisse |
| | Politische Instabilität |
| | Nachfragewachstum |
| | Konzentration der Unternehmen |
| Physikalische Einschränkungen | Erschöpfung der biotischen Ressourcen |
| | Wiederauffüllungsrate |
| | Anthropogene Verfügbarkeit |

Die Dimension der umweltbedingten Einschränkungen umfasst potenzielle Herausforderungen bei der Verfügbarkeit von Ressourcen aufgrund von Umweltauswirkungen wie Klimawandel, Versauerung, Eutrophierung, Ozonabbau und Smog. Diese werden durch LCA-Indikatoren berechnet.

Soziale Einschränkungen, wie von der BIRD-Methode dargestellt, umfassen Herausforderungen, die sich aus der Einhaltung von Sozial- und Umweltstandards und der Lebensmittelsicherheit ergeben, mit Erkenntnissen aus Prinzipien wie z.B. dem Food First Principle (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2023).

Abiotische Beschränkungen bezeichnen externe Faktoren, die das Vorhandensein einer biotischen Ressource behindern könnten. Diese Dimension umfasst Überlegungen wie die Verfügbarkeit von Phosphor, Land und Wasser sowie die voraussichtlichen Auswirkungen von Naturkatastrophen, ebenso auf Grundlage externer Quellen. (Bach et al., 2016; Graedel et al., 2012; Schneider et al., 2014)

Die sozioökonomischen Einschränkungen befasst sich mit Aspekten, die den Zugang zu biotischen Materialien behindern könnten. Die BIRD-Methode bewertet in diesem Bereich verschiedene Kategorien, darunter Ressourcenkonzentration, Ernte und Unternehmenskonzentration, Nachfragewachstum, politische Instabilität, Handelshemmnisse, Preisschwankungen, Vorkommen als Nebenprodukt, komplexe Lagerung und Recycling, auf der Grundlage verschiedener Quellen. (Bach et al., 2016; Graedel et al., 2012; Schneider et al., 2014)

Im Bereich der physischen Einschränkungen liegt der Schwerpunkt auf der inhärenten Verfügbarkeit bestimmter Arten, die als biotische Materialien dienen. Dabei werden Faktoren wie die Erschöpfung der biotischen Ressourcen, wie der BRAI-Indikator (siehe Kapitel 3.2.8), die Wiederauffüllungsrate und die anthropogene Verfügbarkeit untersucht.

In Anbetracht der weit verbreiteten Anwendung von LCA zur Bewertung von Produktsystemen (Fischer et al., 2014), wurde die BIRD-Methode so gestaltet, dass sie an LCAs angepasst werden kann.

3.2.12. Urban Mining Index

Der Urban Mining Index (UMI) wurde von Rosen (2021) zur Bemessung der Kreislauffähigkeit von Baukonstruktionen.

Der UMI verwendet mehrere Berechnungsebenen, um den Grad der Kreislaufwirtschaft und die Umweltauswirkungen von Bauwerken zu beurteilen. Diese Ebenen sind wie folgt:

1. Rohstoffebene: Eine Unterscheidung zwischen Primär- und Sekundärrohstoffen sowie zwischen erneuerbaren und nicht erneuerbaren Rohstoffen wird vorgenommen.

2. **Material-Ebene:** Ist die wichtigste Ebene der Arbeit. Baumaterialien werden hinsichtlich ihrer Masse, des Anteils an erneuerbaren oder sekundären Rohstoffen, Wiederverwendung, Material-Recycling-Content (MRC) Qualitätsstufen, End-Of-Life Qualitätsstufen, Schadstofffreiheit, Material-Loop-Potenzial (MLP) und Faktor Wert.
3. **Bauteilschicht-Ebene:** Betrachtet die Schichten von Bauteilen und bewertet den Aufwand für den Rückbau und die sortenreine Trennung.
4. **Bauelement-Ebene:** Es werden Bauelemente aus Bauteilschichten zusammengesetzt, und hier werden die Materialmassen und ihre Kreislaufpotenziale verglichen.
5. **Bauteil-Ebene:** Bezieht sich auf raumbegrenzende flächige Bauteile. Verschiedene Bauteile werden bezüglich des Kreislaufpotenzials verglichen.
6. **Gebäude-Ebene:** Berücksichtigt das gesamte Bauwerk und führt die Bewertung in einem 100-Punkte-System zusammen, um den UMI des Bauwerks zu berechnen.

Die Berechnung erfolgt in Bezug auf die verschiedenen Phasen des Lebenszyklus eines Gebäudes. Die Grundlage für die Berechnung des Kreislaufpotenzials besteht in der Masse der verwendeten Materialien und der Menge der daraus resultierenden Abfälle.

In der Pre-Use Phase werden die Materialmassen, die pro Quadratmeter Baufläche während des gesamten Lebenszyklus des Gebäudes verwendet werden, berechnet. Während der Use-Phase werden die Materialmassen unter der Berücksichtigung der Nutzungsdauer basierend auf ihrer Austauschhäufigkeit multipliziert.

In der Post-Use Phase ist die Masse der während des Lebenszyklus anfallenden Abfälle und Wertstoffe von entscheidender Bedeutung. Die Berechnung berücksichtigt auch den Aufwand für Entsorgung und Wiederverwendung, einschließlich Rückgewinnung, monetärem Wert und Material-Loop-Potenzial. Das MLP bezieht sich auf die potenzielle zukünftige Verwendung von Recyclingmaterialien in einem Produkt, wenn die Produktion optimal auf ihren Anteil an Sekundärrohstoffen ausgerichtet ist.

In den Berechnungen werden verschiedene sogenannten Loops berücksichtigt, darunter Closed-Loop-Potenzial und Loop-Potenzial. Closed-Loop-Potenzial bezieht sich auf die Möglichkeit der Wiederverwendung von Materialien in einem Produkt. Im Pre-Use-Bereich berücksichtigt es alle Massenanteile sekundärer und erneuerbarer Rohstoffe. Im Post-Use-Bereich berücksichtigt es alle Massenanteile von Bauprodukten oder Materialien, die nach dem Rückbau wiederverwendbar oder wiederverwertbar sind und somit qualitativ auf dem ursprünglichen Niveau verwendet werden können. Loop-Potenzial ist erweitertes Closed-Loop-Potenzial. Im Post-Use-Bereich berücksichtigt es nicht nur Materialien, die in geschlossenen Produktionskreisläufen wiederverwendet werden können, sondern auch Materialien, die stofflich in niedriger wertigen Produktionskreisläufen wiederverwertet werden können. Es umfasst auch Materialien, die energetisch aus nachwachsenden Rohstoffen genutzt werden können.

Zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus werden die Faktoren Wert und Arbeit eingeführt. Der Faktor Wert basiert auf Benchmarks und zeigt die Wahrscheinlichkeit der Nachnutzung eines Materials aufgrund seiner Wertigkeit. Der Faktor Arbeit bewertet den Arbeitsaufwand für den selektiven Rückbau. Je nach diesen Parametern erhalten Materialien unterschiedliche Qualitätsstufen.

Schließlich erfolgt die Gewichtung und Berechnung des UMI des Bauwerks, um die Gesamtbewertung auf einer prozentualen Skala zu übertragen. Dieser Index ermöglicht einen umfassenden Vergleich von Bauwerken hinsichtlich ihres Kreislaufpotenzials und ihrer Umweltauswirkungen.

3.3. Vergleich der Vor- und Nachteile

In diesem Kapitel werden die Vor- und Nachteile der in den Kapiteln 3.1 und 3.2 vorgestellten Bewertungsmethoden im Allgemeinen diskutiert. In der Tabelle A in Anhang A sind die detaillierten Vor- und Nachteile der einzelnen Bewertungsmethoden aufgeführt.

3.3.1. Massenbasierte Bewertungen

Massenbasierte Bewertungen wie MFA-Indikatoren und MIPS sind etablierte und leicht verständliche Methoden, da sie lediglich den direkten Masseneinsatz oder -verbrauch berücksichtigen (International Resource Panel, 2016; United Nations Environment Programme, 2011). Dies vereinfacht die Interpretation, jedoch können sie

wichtige Aspekte, die mit der Rohstoffnutzung und -Gewinnung verbunden sind, wie Umweltauswirkungen, Reserven, Regenerationsraten und ökonomisch-politische Faktoren vernachlässigen (Bach, 2014; Bach et al., 2016; Eisenmenger et al., 2016).

3.3.2. Auf Reserven-Förderraten-Verhältnissen basierten Indikatoren

Erschöpfungsindikatoren in der LCA, wie ADP, AADP, Energy Surplus und Distance-To-Target, sind etablierte, international eingesetzte Methoden, die kontinuierlich aktualisiert und in Fachkreisen diskutiert werden. Dies kann für Konsistenz und Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Ressourcenverwendungen und Unternehmen sorgen. Sie zeichnen sich durch ihre Berücksichtigung von Reserven und Regenerationsraten, bzw. den Aufwand für die Gewinnung aus, was eine quantitative Analyse ermöglicht. Im Falle des AADP werden auch anthropogene Bestände berücksichtigt. (Goedkoop et al., 2008; Goedkoop & Spriensma, 2001; Pommer et al., 2003; Schneider et al., 2015; van Oers & Guinée, 2016)

Allerdings sind diese Modelle teilweise subjektiv, da die Wahl der Parameter mit gewisser Unvermeidbarkeit subjektiven Elementen unterliegt. Die Definition von Reserven und Extraktionszahlen wirft komplexe Fragen auf, wie „Wie viel ist tatsächlich verfügbar, welche Definition von Reserven wählt man?“ und „Wie wird die zukünftige Extraktion in Anbetracht technologischer Fortschritte aussehen?“. Dies kann zu Unsicherheiten in den Ergebnissen führen. (Goedkoop & Spriensma, 2001; Guinée & Heijungs, 1995; van Oers & Guinée, 2016)

3.3.3. Exergetische Indikatoren

Indikatoren wie CExD bieten den Vorteil, dass sie auf der inhärenten Exergieeigenschaft von Ressourcen basieren, wodurch weniger Annahmen und subjektive Entscheidungen bei der Festlegung von Charakterisierungsfaktoren erforderlich sind. Sie ermöglichen die exergetische Analyse eines breiten Spektrums von Ressourcentypen. (Bösch et al., 2007)

Allerdings können Exergieberechnungen komplex sein und erfordern detaillierte Informationen über die thermodynamischen Eigenschaften der Materialien (Bösch et al., 2007). Außerdem ist die Berechnung auf Exergieverluste der natürlichen Ressource begrenzt und schließt die des ökologischen Systems aus (Nwodo & Anumba, 2020).

3.3.4. Ressourceneffizienz auf Produktebene

Ressourceneffizienzmethoden auf Produktebene wie ESSENZ, BIRD und Struck & Flamme bieten den Vorteil, dass sie die drei Säulen der Nachhaltigkeit (ökologisch, ökonomisch und sozial) berücksichtigen, bzw. bei Struck & Flamme die Recyclefähigkeit. Dies ermöglicht ein umfassendes Verständnis von Ressourceneffizienz und sie wurden so konzipiert, dass sie in bestehende Lebenszyklusanalysen (LCA) integriert werden können. (Bach, Berger et al., 2017; Bach et al., 2016; Struck & Flamme, 2023)

Jedoch können diese Methoden aufgrund der Vielzahl von Indikatoren und Dimensionen zu Datenmangel oder -unsicherheit führen (Bach, Berger et al., 2017; Bach et al., 2016; Randebrock et al., 2023). Die subjektive Natur bei der Modellerstellung könnte eine Einschränkung darstellen (Struck & Flamme, 2023). Zusätzlich könnte eine hohe Anzahl an Dimensionen die Integration in die LCA erschweren.

3.3.5. Urban Mining Index: System zur Bewertung der Kreislauffähigkeit von Gebäuden

Der Urban Mining Index bietet eine umfassende und ganzheitliche Bewertung der Kreislauffähigkeit von Bauwerken. Der UMI hat den großen Vorteil, dass er speziell für den Bausektor entwickelt wurde und somit die zentralen Aspekte für die Bewertung der Wiederverwendbarkeit von Bauteilen über den gesamten Lebenszyklus berücksichtigt. Beispiele hierfür sind die Beachtung der Pre-Use und Post-Use Phasen (siehe Kapitel 3.1.12) unter ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten. (Rosen, 2021)

Zu den Nachteilen zählen Unsicherheiten in der Modellauswahl, z. B. Abweichungen der tatsächlichen Nutzungsdauern von den Lebensdauertabellen oder technologische Fortschritte in der Materialherstellung, die zu Ungenauigkeiten in den Ergebnissen führen können. Auch die hohe Komplexität der Bewertung auf Bauteilebene macht sie für die Anwender:innen etwas schwer nachvollziehbar. (Rosen, 2021)

4. Bewertung der Ressourcenknappheit im Bauwesen

Dieses Kapitel konzentriert sich auf zwei der Forschungsfragen: *Welche Ressourcen werden durch das Bauwesen verbraucht, und inwiefern besteht eine Ressourcenknappheit im Bauwesen?* und *Stellen Gebäude Ressourcen dar? Wie können Gebäude in dieser Hinsicht in die Bewertung von Ressourcen einbezogen werden?*. Aus Gründen der Klarheit wurde die erste Forschungsfrage in zwei Teile aufgeteilt. In Kapitel 4.1 wird die Frage "Welche Ressourcen werden durch das Bauwesen verbraucht?" behandelt. Im darauffolgenden Kapitel 4.2 wird das Konzept der Knappheit im Zusammenhang mit dem Baugewerbe diskutiert. Schließlich wird in Kapitel 4.3 eine Übersicht über die in der wissenschaftlichen Gemeinschaft herrschende Vision bezüglich der Betrachtung von Gebäuden als Ressource präsentiert.

4.1. Datensätze und Datenanalyse für Baurohstoffe

Eine Studie vom IRP, von Jane (2021) durchgeführt, versuchte zu erkennen, welche Materialien und Rohstoffe in jeder Phase der Wertschöpfungskette des Bausektors verbraucht werden. Die Untersuchung hat gezeigt, dass es bei der genauen Bestimmung der von der Bauindustrie verbrauchten Rohstoffe einige Besonderheiten gibt, die auch bei den Recherchen für diese Bachelorarbeit festgestellt wurden.

1. Die vorhandenen Informationen über in der globalen Wertschöpfungskette des Bausektors verwendete Materialien sind begrenzt und fragmentiert. Typischerweise werden Daten zu Baumaterialien wie Stahl und Zement separat nach Materialtyp und Industriesektor kategorisiert. Folglich fehlt es an umfassender Analyse und Wissen über die Gewinnung, Verarbeitung und Auswirkungen dieser Materialien in der gesamten Wertschöpfungskette des Bausektors. Zur Behebung dieser Wissenslücke ist es entscheidend, ein besseres Verständnis für die verwendeten Materialien, ihre Herkunft und die sozialen, wirtschaftlichen und Umweltauswirkungen der Ressourcengewinnung für die Bauindustrie zu gewinnen. (Jane, 2021)
2. Daten zu Ressourcennutzung und Umweltauswirkungen in den unterschiedlichen Phasen der Wertschöpfungskette des Bausektors sind in verschiedenen

Berichten verstreut. Zum Beispiel konzentriert sich ein Bericht auf den Betrieb von Gebäuden und die damit verbundenen Treibhausgasemissionen (Hertwich et al., 2020), während ein anderer einen Überblick über Materialien im Bauwesen gibt (International Resource Panel et al., 2019). Darüber hinaus sind Informationen über die Verwendung von Materialien in der globalen Wertschöpfungskette des Bausektors begrenzt und werden nach Materialtyp, wie Stahl und Zement, organisiert, ohne eine umfassende Perspektive auf deren Gewinnung und Verarbeitung zu bieten. Berichte über Rohstoffe zeigen die Prozentsätze der von der Bauindustrie verbrauchten Materialien, ohne anzugeben, welche Materialien in die Kategorie fallen und wie viel von jedem Material verwendet wird. In den meisten Fällen ist die höchste spezifische Aufgliederung in den Kategorien „Biomasse“, „Metallische Minerale“, „Nichtmetallische Minerale“ und „Fossile Brennstoffe“ enthalten (Umweltbundesamt, 2022).

3. Die MFA als Messansatz wird von unterschiedlichen Organisationen vorgenommen. Die Untersuchung liegt zwischen natürlichen Ressourcen und fertigen Materialien und stellt eine Schwierigkeit dar, sowohl den Ursprung dieser Materialien als auch ihren endgültigen Einsatzbereitschaftszustand zu erfassen. Diese Situation behindert erheblich das Verständnis für die Verbindung zwischen Baumaterialien und dem Verbrauch natürlicher Ressourcen. (Jane, 2021)

4.2. Welche Ressourcen werden durch das Bauwesen verbraucht?

In Anlehnung an die Abgrenzung des Ressourcenbegriffs in Kapitel 2.2.1 wird im Folgenden untersucht, welche biotischen und abiotischen Rohstoffe im Bausektor verbraucht werden.

Diese Arbeit konzentriert sich auf die Frage des Verbrauchs bei der Gewinnung und Herstellung der Materialien. Die anderen Phasen des Lebenszyklus eines Gebäudes werden zunächst nicht berücksichtigt. In einem ersten Schritt werden die wichtigsten Baustoffe und ihre Rohstoffe dargestellt. Baumaterialien werden in verschiedenen Ländern in unterschiedlichen Mengen produziert und verbraucht, abhängig von ihrer Baugeschichte und den infrastrukturellen Anforderungen (United Nations Environment Programme, 2020). Da die Knappheitsproblematik lokale Charakteristika aufweist (Randebroek et al., 2023; van der Voet, 2013a; van Oers & Guinée, 2016), liegt der

Fokus auf dem Ressourcenverbrauch in Deutschland. Die verfügbaren Verbrauchsdaten für die identifizierten Rohstoffe sind in Kapitel 4.1.2 aufgeführt. Da verschiedene Ansätze zur Bewertung des Ressourcenverbrauchs auch den Materialbestand berücksichtigen (Ioannidou et al., 2015; Randebrock et al., 2023; Schneider et al., 2015), wird in Kapitel 4.1.3 kurz auf den Materialbestand in Deutschland eingegangen.

4.2.1. Wichtigste Baumaterialien und ihre Rohstoffe

Die folgende Tabelle von Rohstoffen für Baumaterialien basiert auf ISO 91.100 (International Classification for Standards, 2023) und dem Buch „Baustoffkunde: Aufbau und Technologie, Arten und Eigenschaften, Anwendung und Verarbeitung“ (S. Weber et al., 2016).

Tabelle 4, Wichtigste Baumaterialien und ihre Rohstoffe, eigene Darstellung nach International Classification for Standards (2023) und S. Weber et al. (2016)

| Baumaterial | Rohstoffe |
|--------------------------------------|--|
| Beton | Kies Sand Zement Wasser Kalkstein Anhydrit |
| Bindemittel | Kalkstein Ton Kreide Schiefer Mergel Kieselsand Hochofenschlacke Rohstoffgips |
| Asphalt, Bitumen | Erdöl Kies Sand Gesteinsmehl |
| Stahl & andere metallische Baustoffe | Eisen Aluminium Zink Blei Kupfer |
| Holz und holzbasierte Dämmstoffe | Nadelbäume Laubbäume |
| Glas | Quarzsand Salz Kalkstein Dolomit |

| Baumaterial | Rohstoffe |
|---|--|
| Gesteinskörnungen für Beton, Straßen und Schienen | Granit Diorit Quarzsand Kalkstein Basalt |
| Kunststoffe | Erdöl |

4.2.2. Jährlicher Materialverbrauch im Bauwesen in Deutschland

Das Umweltbundesamt veröffentlicht jährlich einen nationalen Rohstoffbericht, in dem Daten zu Rohstoffen auf nationaler Ebene gesammelt und analysiert werden. Der aktuelle Bericht ist der Ressourcenbericht für Deutschland 2022 (Umweltbundesamt, 2022). Da es sich um einen umfassenden Bericht handelt, der nicht auf den Baubereich fokussiert ist, finden sich die detailliertesten Informationen zum Bauwesen im Rohstoffeinsatz (RMI) nach Gütergruppen nach der EU-Standardmethode. Rohstoffeinsatz (RMI) ist definiert als die Menge an Rohstoffen, die benötigt wird, um die Güter zu produzieren, die für die Produktions- und Konsumaktivitäten der Wirtschaft zur Verfügung stehen (Eurostat, 2023). Es ist der auf Rohstoffe bezogene DMI aus der Tabelle 2 in Kapitel 3.1.

Tabelle 5, Rohstoffeinsatz (RMI) nach Gütergruppen nach EU-Standardmethode, eigene Darstellung nach Umweltbundesamt 2022 und Lutter et al. 2022 (Lutter et al., 2022; Umweltbundesamt, 2022)

| 2019 Angaben in 1000 t | Biomasse | Met- allerze | Nicht metall. minerale | Fossile En- ergieträger | Gesamt |
|--|----------|-----------------|------------------------------|----------------------------|---------|
| Bauwesen | 4.844 | 21.699 | 270.347 | 17.150 | 314.040 |
| Bergbau | 171 | 3.756 | 19.620 | 35.790 | 59.337 |
| Dienstleistungen | 51.005 | 26.362 | 129.624 | 59.603 | 266.594 |
| Energieversorgung | 435 | 1.866 | 3.014 | 64.393 | 69.708 |
| Fertigung von Produk- ten aus Biomasse | 196.302 | 15.962 | 36.740 | 49.820 | 298.824 |
| Fertigung von Produk- ten aus Metallerzen und nicht-metallischen Mineralien | 3.271 | 294.925 | 204.120 | 64.479 | 566.795 |
| Fertigung von Produk- ten aus fossilen Rohstoffen | 16.955 | 59.372 | 65.124 | 192.543 | 333.994 |

| | | | | | |
|---------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|
| Finanzdienstleistungen | 610 | 850 | 2.047 | 2.291 | 5.798 |
| Land- und Forstwirtschaft | 77.169 | 15.243 | 4.251 | 2.995 | 99.658 |
| Sonstige Güter | 29.798 | 204.403 | 80.435 | 129.585 | 444.221 |
| Verkehr | 2.724 | 2.771 | 3.547 | 37.261 | 46.303 |
| Vertreib und Einzelhandel | 2.716 | 6.307 | 8.825 | 26.999 | 44.847 |
| Gesamt | 386.000 | 639.816 | 827.693 | 682.910 | 2.536.419 |

Diese Tabelle zeigt die Daten des RMI für das Jahr 2019 in 1.000 Tonnen. Es handelt sich um die einzige Tabelle im Rohstoffbericht, die die Ressourcen zwischen Biomasse, Metallerzen, Nicht-metallischen Mineralien und fossilen Energieträgern aufteilt und gleichzeitig einen Vergleich mit anderen Branchen bietet.

Das Bauwesen ist für den Großteil der Gewinnung von nicht-metallischen Mineralien verantwortlich. Metallerze und fossile Energieträger folgen, wobei die Nutzung dieser Materialien in der Baubranche im Vergleich zu anderen Branchen mittel bis niedrig ist.

Die Darstellung der relevantesten Rohstoffe für das Bauwesen zeigte einen großen Bedarf an mineralischen Rohstoffen, gefolgt von Metallerze. Die folgenden Beispiele verdeutlichen, wie viel von diesen Materialien in den vergangenen Jahren in Deutschland verbraucht wurde:

Der aktuelle Bericht vom Verein Deutscher Zementwerke stammt aus dem Jahr 2021/2022 und enthält Daten bezüglich der Industrie im Jahr 2020. In diesem Jahr wurden in Deutschland zur Produktion von etwa 35,5 Millionen Tonnen Zement insgesamt 51,0 Millionen Tonnen Rohstoffe und etwa 30 Terawattstunden Energie verbraucht. Von diesen 35,5 Millionen Tonnen Zement wurden 30,1 Millionen Tonnen für die Herstellung von Mörtel und Beton verwendet (VSZ, 2022).

Um den Bedarf an Baumaterialien zu decken, wurden in Deutschland im Jahr 2020 485 Millionen Tonnen Natursteine, Kies und Sande abgebaut. Lediglich 12,5 Prozent der nationalen Gesamtnachfrage nach Gesteinskörnungen können durch recycelte Baustoffe abgedeckt werden, während weitere 4,9 Prozent durch industrielle Nebenprodukte beigesteuert wurden (Bundesverband Baustoffe- Steine und Erden e.V., 2021a, 2021b, 2022). Beton in Gebäuden ist der größte Verursacher für den Sand- und Kiesverbrauch weltweit (International Resource Panel, 2016) und in Deutschland (IÖR-Informationssystem Gebaute Umwelt, 2023).

Des Weiteren produziert Deutschland im Vergleich zu anderen EU-Ländern die größte Menge an Rohstahl, nämlich ca. 40 Millionen Tonnen jährlich. Im Jahr 2022 wurden ca. 37 Millionen Tonnen Rohstahl produziert. Berücksichtigt man den gesamten Stahlverbrauch eines Landes im Verhältnis zu seiner Bevölkerungszahl, so ist Deutschland mit einem Pro-Kopf-Verbrauch von 426,1 kg im Jahr 2021 der viertgrößte Stahlverbraucher in der EU (World Steel Association, 2022). Der Anteil von Stahl, der in der Bauindustrie verwendet wird, belief sich im Jahr 2022 auf 35 Prozent der gesamten deutschen Stahlnachfrage. (Wirtschaftsvereinigung Stahl, 2022)

Die deutsche Glasindustrie hat mit rund 20 Prozent einen bedeutenden Anteil an der europäischen Glasproduktion (ICF International, 2015). Im Vergleich zu anderen Gläsern ist Flachglas das Glas mit dem zweitgrößten Produktionsanteil, das für die Bauindustrie am wichtigsten ist. Im Jahr 2015 wurden 2.143.000 Tonnen Flachglas produziert (Leisin, 2019). Spezifische Daten zur Produktion von Glas nur für die Bauindustrie konnten nicht gefunden werden.

Generell produziert Deutschland große Mengen an Laub- und Nadelholz für verschiedene Verwendungszwecke, darunter auch Bauholz. Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes betrug im Jahr 2021 der gesamte Holzeinschlag in Deutschland rund 64,3 Millionen Kubikmeter Rohholz. Davon entfielen rund 24,8 Millionen Kubikmeter auf Nadelholz und 39,5 Millionen Kubikmeter auf Laubholz. (Statistisches Bundesamt, 2023a)

Auf eine Recherche der Verbrauchsdaten für Biomasse und Kunststoffe wurde aufgrund des geringen RMI, wie in Tabelle 5 dargestellt, verzichtet.

4.2.3. Materiallager in Deutschland

Bezogen auf das Materialgewicht machen Bauwerke 90 % des anthropogenen Materiallagers in Deutschland aus (Schiller et al., 2015). Eine Studie im IÖR-Informationssystem-Portal beschreibt die Materialzusammensetzung von Gebäuden in verschiedenen Kategorien: Einfamilienhäuser (EFH), Mehrfamilienhäuser (MFH), Nichtwohngebäude (NWG), Verkehrsinfrastruktur und Ver- und Entsorgungssysteme. Die Studie nutzte Daten aus verschiedenen Quellen, darunter das Statistische Bundesamt und den Mikrozensus von 2014 (Destatis, 2014, 2022; IÖR-Informationssystem Gebaute Umwelt, 2023), was als Grundlage für dieses Unterkapitel gilt.

Das IÖR-Informationssystem teilt mineralische Baumaterialien in verschiedene Rohstoffkategorien ein. Die Hauptkomponenten dieser Baumaterialien sind Kies und Splitter, Industrieminerale, Festgestein, Sand, Lockergestein und sonstige Zusätze. Bezogen auf EFH dominieren mineralische Baumaterialien wie Beton und Ziegel, die zusammen 94,06% des Materialbestandes ausmachen. Bei MFH sind es 93,94%. Bei NWG machen mineralische Rohstoffe 88,29% der Materialien aus, wobei Metalle auch eine signifikante Rolle spielen.

In der Kategorie Verkehrsinfrastruktur sind etwa 10 Milliarden Tonnen Baumaterial verbaut, wobei 90 % in Straßen eingebunden sind. Diese sind hauptsächlich aus mineralischen Materialien, insbesondere Gesteinskörnungen. Ein deutlich geringerer Teil besteht aus bituminösen Bindemitteln und Metallen.

Die Ver- und Entsorgungsinfrastruktur umfasst rund 2,3 Milliarden Tonnen Material, hauptsächlich in Wasser- und Abwasserstrukturen. Hier dominieren mineralische Materialien. In vielen Leitungen werden Kunststoffe verwendet.

Zusammenfassend zeigt die Studie, dass in Deutschland mineralische Materialien sowohl in Gebäuden und Infrastrukturen dominieren. Diese sind hauptsächlich Kies, Sand und Gesteinskörnungen. Dieses Wissen ermöglicht es, nicht nur den Gesamtverbrauch zu analysieren, sondern auch zu verstehen, welche spezifischen Rohstoffe in welchem Maße in verschiedenen Bauprojekten eingesetzt werden. Darüber hinaus dient das Materiallager als Grundlage für die Erfassung der Materialien, die am Ende der Lebensdauer aus den Bauwerken gewonnen werden können. Außerdem dient der Materialbestand als Basis für neue Methoden und Indikatoren zum Ressourcenverbrauch, die spezifisch für das Bauwesen konzipiert wurden (Ioannidou et al., 2015; Randebrock et al., 2023). Weitere Ausführungen zur Nutzung von Bauwerken als Ressource folgen in Kapitel 4.4.

4.3. Diskussion: Inwiefern besteht eine Ressourcenknappheit im Bauwesen?

In der wissenschaftlichen Gemeinschaft wird oft im Zusammenhang mit dem Bausektor der Begriff Ressourcenknappheit verwendet (Akanbi et al., 2018; Debacker, 2016; Guerra & Leite, 2021; Mangialardo & Micelli, 2018). Gemäß der Definition von Ressourcenknappheit in Kapitel 2.1.2 ist es aufgrund der vielen Dimensionen dieses The-

mas wichtig, die geografischen Grenzen und die Besonderheiten der Branche, die von betroffenen Materialien abhängig sind, zu berücksichtigen. Es gibt verschiedene Methoden und Studien zur Bewertung der Knappheit von Ressourcen (Habib & Wenzel, 2016; Schrijvers et al., 2020; Sonderegger et al., 2015).

Im Rahmen informeller Marktbefragungen geben Stakeholder:innen an, dass sie Ressourcenknappheit in der Branche wahrnehmen. Das ifo Institut an der Universität München analysiert die Wirtschaftspolitik und erstellt monatlich durch Umfragen einen Knappheitsindikator. Dieser zeigt den Anteil der Unternehmen an, die Produktionshindernisse wegen Rohstoff- oder Zwischenproduktenknappheit melden. Die jüngsten Daten auf der Webseite sind aus dem Juli 2023, schließen aber das Baugewerbe aus (Sauer & Wohlrabe, 2020; Statistisches Bundesamt, 2023b). Nach Kontaktaufnahme mit dem Forschungsinstitut, wurden jedoch die Informationen, die sich auf dem Bausektor beziehen bereitgestellt. Um einen Einblick in die Wahrnehmung der deutschen Bauindustrie über den letzten Jahren zu verschaffen, werden diese Daten präsentiert.

In den letzten 10 Jahren berichteten Unternehmen im Bauhauptgewerbe variierend über Produktionsbeschränkungen durch Ressourcenknappheit. Frühere Jahre zeigten niedrige Einschränkungen von 0,3% bis 1%. Ab Mitte 2015 stieg dieser Wert bis zu einem Höhepunkt von 46% im Jahr 2021. Die Baubranche nimmt Ressourcenknappheit in unterschiedlichen Perioden variabel wahr, beeinflusst durch diverse Faktoren und parallele Trends in anderen Branchen (Statistisches Bundesamt, 2023b). Die oben genannten Daten zeigen die Komplexität der Ressourcenknappheit und ihre Auswirkungen auf den Bausektor.

Nach einer Literaturrecherche und der Analyse verschiedener Methoden zur Bewertung der Kritikalität von Rohstoffen lässt sich feststellen, dass sich die meisten bisher existierende Studien auf Metallen und fossile Brennstoffe beziehen und mit diesem Schwerpunkt entwickelt wurden (Arendt et al., 2020; Bach et al., 2016; European Commission, 2014; Graedel et al., 2015).

Im Rahmen dieser Literaturrecherche wurden in einem ersten Schritt die Ergebnisse von drei Methoden zur Bewertung von Ressourcenknappheit auf drei unterschiedlichen räumlichen Skalen untersucht: Die Europäische Liste kritischer Rohstoffe (CRMs) von 2020, auf europäischer Ebene (Blengini et al., 2020); die SCARCE-Methode mit einer Fallstudie in Deutschland, auf nationaler Ebene (Bach, Finogenova

et al., 2017), und der Rohstoff-Risiko-Index in Bayern; auf regionaler Ebene (Bähr, 2022).

Es ist wichtig anzumerken, dass diese Bewertungsmethoden aufgrund ihrer verschiedenen Methoden und geografischen Implikationen unterschiedliche Ergebnisse liefern. Mit Ausnahme des Rohstoff-Risiko-Index Bayern, der Zement in der orangefarbenen Gruppe als mittleres Risiko einstuft, zeigen die anderen beiden Bewertungsmethoden Metalle und Erdölerzeugnisse als kritisch an, ohne die Mineralien zu berücksichtigen, die für die Herstellung von Baumaterialien benötigt werden. Einige Metalle, wie Eisen, Kupfer, und Bauxit werden in den Untersuchungen kritisch angezeigt (Bach, Finogonova et al., 2017; Blengini et al., 2020), die für Stahl und Stahl-Legierungen wichtig sind (International Classification for Standards, 2023; S. Weber et al., 2016). Die Mineralrohstoffe für die Herstellung von Beton und Glas wurden in den Studien nicht erfasst oder nicht als kritisch eingestuft.

Die Analyse dieser Ergebnisse könnte zu dem Fehlschluss führen, dass es im Baubereich keine oder geringere Ressourcenknappheit gibt. Dies steht im Widerspruch zur zunehmenden Debatte über die Knappheit von Sand, der beispielsweise für die Herstellung von Glas und Beton benötigt wird (Unep, 2022). Viele der derzeitigen Bewertungen der Kritikalität von Rohstoffen sind in mehrfacher Hinsicht mangelhaft, was ihre Anwendbarkeit stark einschränkt (Frenzel et al., 2017).

In diesem Zusammenhang wurde in 2023 die ESSENZ-Methode, die ursprünglich für die Bewertung der Ressourceneffizienz auf Produktebene mit Schwerpunkt auf Metallen entwickelt wurde, an die Besonderheiten der Bauindustrie angepasst (Bach et al., 2016; Randebrock et al., 2023). Diese Anpassung dient als Grundlage für eine bessere Bewertung der für Bauzwecke verwendeten Ressourcen.

4.3.1. Anpassung der ESSENZ-Methode zur Bewertung der Ressourcenknappheit in Deutschland

Die größte Einschränkung in Bezug auf den gängigen Bewertungsmethoden zur Ressourcenknappheit, die in der Studie festgestellt wurde, war die Beziehung zwischen lokalen Besonderheiten und den Ergebnissen der Kritikalität im Bausektor.

In Kapitel 4.1 wurde die Bedeutung des Betons, die enthaltenen Rohstoffe und von Schüttgütern für das Bauwesen erläutert. In der Bauindustrie werden Schüttgüter im

Allgemeinen lokal gehandelt, um die Transportkosten zu senken. Auch wenn Sand und Kies relativ günstig zu kaufen sind (Elsner et al., 2019), tragen die Transportkosten zum Kostenanstieg bei, die sich pro 40 km Fahrtstrecke verdoppeln können (F. Weber et al., 2018). Kurze Wege sind für Transportbeton unerlässlich, denn er muss in maximal 90 Minuten aus dem Mischwagen entladen werden (Grünewald & Biscopring, 2021). Diese kurzen Wege sind nur möglich, wenn die Rohstoffe vor Ort verfügbar sind. Die meisten Methoden zur Bewertung der natürlichen Ressourcen berücksichtigen allerdings die Besonderheiten des lokalen Handels nicht (Ioannidou et al., 2019; Randebrock et al., 2023). Die bestehenden Bewertungen des Ressourcenverbrauchs (siehe Tabelle 2 in Kapitel 3.1) haben Eigenschaften, die auf die Besonderheiten von Metallen und fossilen Brennstoffen zugeschnitten sind (Bach et al., 2016; Goedkoop & Spriensma, 2001; Struck & Flamme, 2023; van Oers et al., 2002), was bei der Bewertung von Baumaterialien ein Problem darstellt (Randebrock et al., 2023).

Die ESSENZ-Methode wurde bereits in Kapitel 3.2.9 erläutert, und ihre Anpassung ist für die Beantwortung der Frage, inwiefern eine Ressourcenknappheit im Bauwesen besteht, relevant. Aus diesem Grund werden die wichtigsten Anpassungen erklärt. Die Fallstudie über die Stadt Herne in Deutschland, die auch innerhalb der Anpassung von ESSENZ in Randebrock et al. (2023) enthalten ist, dient ebenfalls als Einblick und Grundlage für die Antwort auf diese Frage.

Die von Randebrock et al. (2023) analysierten Baumaterialien sind: Stahl, Kupfer und Aluminium sowie die zur Herstellung von Beton und Glas verwendeten Mineralien. Es handelt sich um Sand, Kies, Zement, Kalkstein, Hochofenschlacke, Ton, Gips und Anhydrit für Beton. Die für Glas benötigten Rohstoffen sind Quarzsand, Salz, Kalkstein und Dolomit.

Die Anpassungen der Indikatoren der ESSENZ-Methodik werden so vorgenommen, dass alle Indikatoren ausgeschlossen werden, die den Standort der Bewertung nicht berücksichtigen, z. B. „Import- und Exportbeschränkungen zwischen Ländern“. Da die weiteren Anpassungen von der lokalen Datenverfügbarkeit abhängen, ist es wichtig, dass die Anpassung von ESSENZ gemäß dem zu bewertenden Projekt oder Stadt erfolgt.

Die Ergebnisse der Fallstudie der Stadt Herne führen zu einige Schlussfolgerungen über Rohstoffe in Deutschland sowie für die Stadt. Um zu einem Schluss über die

Ressourcenknappheit im gesamten Land zu gelangen, müsste die Methode in anderen Städten in den verschiedenen Bundesländern angewendet werden.

Eine Besonderheit bei der Anpassung der Methode ist die funktionale Einheit: der Materialbedarf, um den Gebäudebestand in einem begrenzten Gebiet (z.B. zwei Stadtbezirke) ein Jahr lang zu erhalten. Der Gebäudebestand in Deutschland wird in Kapitel 4.1.3 vorgestellt und könnte in Verbindung mit anderen Geodaten für die Analyse mehrerer Städte hilfreich sein.

Eine weitere wichtige Berücksichtigung in der Studie war, dass der Gebäudebestand nicht statisch ist, sodass der jährliche Materialeinsatz auf Wachstums- und Abrissraten des Bestands basiert. In Deutschland wird die jährliche Abrissrate auf 0,12% des Gesamtbestands geschätzt, während das Wachstum bei 0,5% liegt (Wiedenhofer et al., 2015).

In der vorliegenden Arbeit ist es wichtig, drei der angepassten Kategorien näher zu betrachten, da sie die Bedeutung einiger Besonderheiten des Bausektors verdeutlichen. Unter Berücksichtigung der spezifischen Aspekte im Zusammenhang mit mineralischen Rohstoffen und den örtlichen Gegebenheiten ergeben sich für die Indikatoren ADP und Bergbaukapazität signifikante Änderungen.

Wie in Kapitel 3.2.3 dargestellt, sind für die Berechnung des ADP-Indikators Produktionsdaten und die *ultimate reserves* erforderlich. Für Baustoffe liegen jedoch nur Produktionsdaten vor. In Bezug auf die *ultimate reserves* fehlen Daten für die meisten Baustoffe auf globaler und lokaler Ebene. Auf diese Weise verliert der Indikator an Aussagekraft. Daher muss er in einer halbqualitativen Weise bewertet werden. Es wird verglichen, ob die lokalen Reserven langfristig, mittelfristig oder kurzfristig ausreichend sind. Der AADP (siehe Kapitel 3.2.4) wäre auch für die Kritikalität im Bauwesen relevant. Dies liegt daran, dass Gebäude und Infrastruktur den größten Anteil am anthropogenen Bestand in Deutschland ausmachen, insbesondere im Hinblick auf Gesteinskörnungen und Beton (Krausmann et al., 2018). Ohne ausreichende Daten ist die Berechnung jedoch herausfordernd (Pelzeter et al., 2022). Daher wäre zu dem besseren Verständnis des Erschöpfungsproblems im Bauwesen eine umfangreiche Datenerhebung und -verfügbarkeit erforderlich.

Eine weitere wichtige Änderung besteht darin, die Kategorie, die Bergbaukapazität bewertet, durch einen neuen Indikator zu ersetzen, eine Anpassung des Surface

Squared Driven Indicator (SSDI). Die Idee dahinter ist, dass, obwohl Kies in städtischen und ländlichen Gebieten zu finden ist, der Zugang in städtischen Gebieten aufgrund konkurrierender Landnutzungen begrenzt ist. Der Indikator vergleicht die Bergbaufläche mit der städtischen Fläche und die städtischen Flächen mit der gesamten analysierenden Fläche.

Randebrock et al. (2023) hat auch eine Änderung vorgenommen, um den anthropogenen Bestand zu berücksichtigen, indem das Potenzial von Urban Mines hinzugefügt wurde. In Deutschland stammen etwa 12,5% der Gesteinskörnungen aus Urban Mines, mit Wachstumstendenzen (Kreislaufwirtschaft Bau, 2021). In diesem Fall werden zwei Aspekte berücksichtigt: Materialien in alten Gebäuden, ausgenommen historische Gebäude, die nicht abgerissen werden können, und die Tatsache, dass Minen über viele Jahre betrieben werden, während Gebäude nur einmal abgerissen werden können (Ioannidou et al., 2017; Randebrock et al., 2023).

Die angepasste ESSENZ-Methode ist wichtig, um die Komplexität der Bewertung von Knappheit im Bauwesen zu veranschaulichen. Sie berücksichtigt den wichtigen Aspekt des lokalen Handels mit Gesteinskörnungen und Beton aufgrund der notwendigen kurzen Transportwege. Darüber hinaus wird die Tatsache berücksichtigt, dass Materialien aus dem anthropogenen Bestand extrahiert und wiederverwendet werden. Diese Faktoren sind wichtige Gründe dafür, dass Baustoffe, abgesehen von Metallen, in Listen und Studien zur Kritikalität wie SCARCE und der Methode der Europäischen Union, die zu Beginn dieses Kapitels erwähnt wurden, nicht vorkommen. Ein weiterer Hinweis darauf, dass die Bewertung auf lokaler Ebene erfolgen sollte, ist, dass in der Studie, in der kritische Materialien für Bayern bestimmt wurden, Zement auf der Liste der Materialien mit mittlerem Risiko erschien. Obwohl er in einem Vergleich mit anderen Materialien als mittel riskant eingestuft wurde, unterstreicht die Einbeziehung in die lokale Bewertung die Bedeutung, diesen Aspekt zu berücksichtigen.

4.3.2. Physische Verfügbarkeit vs. andere Einschränkungen von mineralischen Baurohstoffen

Im Rahmen der Überlegungen zur Anpassung des ADP für Baustoffe wurde auf die Bildung einer eigenen Kategorie für Baumaterialien verzichtet. Der Grund dafür ist, dass in den Datenbanken für mineralische Baustoffe die Reserven als unendlich, sehr groß oder für einen langen Zeitraum ausreichend angesehen werden. Daher wurde in van Oers et al. (2002) davon ausgegangen, dass die Erschöpfung dieser Ressourcen

kein Problem darstellt. Auch die Vorgaben für die Qualität der Rohstoffe stellen eine Einschränkung dar. Beispielsweise erfordert die Glasherstellung den Abbau von eisenfreiem Sand, was die Vorräte hingegen verringert. Bei der Bewertung des abiotischen Abbaus in der LCA würde die Berücksichtigung dieser Besonderheiten zu einer Verkomplizierung der Charakterisierungsfaktoren führen, weshalb sie nicht in die Berechnung des Indikators einbezogen wurden. (van Oers et al., 2002)

Tatsächlich gelangte Randebroek et al. (2023) während der Analyse des Fallbeispiels in Deutschland zur Anpassung der ESSENZ-Methode zu dem Schluss, dass die physische Verfügbarkeit von meisten Rohstoffen für Beton, wie Kies, Naturstein, Kalkstein und Ton, in Deutschland langfristig ausreichend ist. In Bezug auf Glas ist auch die Verfügbarkeit von Salz, Kalkstein und Dolomit ausreichend. Bei Quarzand ist jedoch nur eine ausreichende Verfügbarkeit für die nächsten Jahrzehnte gewährleistet. Im Durchschnitt zeigt die Verfügbarkeit dieser Materialien eine sichere Perspektive.

Die angepasste Bergbaukapazität (SSDI) gemäß Iouannidou et al. (2015) zeigt ein Ranking der deutschen Bundesländer, wobei Brandenburg, einschließlich Berlin, die beste Position einnimmt, da es größere Bergbauflächen für den Baustoffsektor und einen kleinen Anteil an städtischer Fläche im Verhältnis zur Gesamtfläche aufweist. Das Saarland hingegen übernimmt den letzten Platz, da es einen großen Anteil an städtischer Fläche im Verhältnis zur durchschnittlichen Abbaufäche hat. Diese Informationen dienen als Grundlage für die Bewertung anderer deutscher Städte in Bezug auf die Kritikalität von Materialien, die für den Bausektor relevant sind.

Unter Berücksichtigung dieses Aspekts und anderer wirtschaftlichen und ökologischen Indikatoren im Rahmen der Methode ist es möglich, verschiedene Einschränkungen zu identifizieren, die unabhängig von den Reserven sind und zu einem ganzheitlicheren Verständnis der tatsächlichen Verfügbarkeit wichtiger Materialien für den Sektor führen. Die Ergebnisse zeigen, dass das Risiko der physischen Verfügbarkeit aufgrund geografischer Reserven gering ist, aber die Risiken in Bezug auf diese Materialien mit sozioökonomischen Faktoren zusammenhängen (Randebroek et al., 2023).

Bei der Beantwortung der Forschungsfrage „Inwiefern besteht eine Ressourcenknappheit im Bauwesen?“ sind gewisse Besonderheiten zu beachten. Im Rahmen dieser Arbeit konzentrieren sich die Definitionen von Ressourcen auf materielle Rohstoffe, aber auch Wasser, Energie und Land sind natürliche Ressourcen (siehe Kapitel 2.1.1. Ressourcendefinitionen). Um eine umfassendere Antwort auf die Frage der

Ressourcenknappheit im Allgemeinen geben zu können, müssen auch diese Aspekte berücksichtigt werden.

Aus demselben Blickwinkel heraus, dass Wasser für die Herstellung von Zement und Beton unerlässlich ist, wurden in der Methode von Randebrock et al. (2023) die für die Herstellung dieser Materialien benötigten Rohstoffe mit einem Anteil von weniger als 1 % des Massenanteils in der Zusammensetzung nicht berücksichtigt, was ein Problem darstellen kann, da häufig Rohstoffe mit einem geringen Anteil für die Herstellung des Endmaterials unerlässlich sein können.

Eine weitere Unsicherheit ergibt sich aus der Feststellung, dass, obwohl Reserven in großem Umfang vorhanden sind, mehr Abbaugelände genehmigt werden müssten, um den Bedarf zu decken. Die Verfahren zur Genehmigung von Steinbrüchen sind zeitintensiv und dauern in Deutschland zwischen 10 und 15 Jahren (Bundesverband Baustoffe- Steine und Erden, 2020).

Nach der Literaturrecherche und der vertieften Auseinandersetzung mit dem Thema muss betont werden, dass die Frage der Knappheit im Bausektor nicht einfach und generalisierend beantwortet werden kann. Eine auf Reserven und Förderraten basierende Betrachtung, wie sie z. B. bei ADP, Energy Surplus, DtT und BRAI (siehe Tabelle 2 in Kapitel 3.1) vorgenommen wird, würde aufgrund der weit gefassten Definition von Reserven, die in die Berechnungsformel der Indikatoren einfließen, zu falschen Schlussfolgerungen bezüglich dieser Problematik führen. Eine Bewertung der Erschöpfung ohne Berücksichtigung der Reserven, wie z.B. exergiebasierte Indikatoren wie der CExD (siehe Kapitel 3.2.7), könnte ein sinnvoller Ansatz für Baumineralien sein. Würde man nur eine wirtschaftliche Betrachtung vornehmen, wie bei der EU Critical Raw Materials List, oder sogar eine holistische wie bei SCARCE, ohne die Besonderheiten des lokalen Handels und der Materialbestände in der Bauindustrie zu berücksichtigen, käme man ebenfalls zu falschen Schlussfolgerungen bezüglich des Bauwesens. Die Frage, die beantwortet werden kann, lautet: „Inwiefern gibt es eine Ressourcenknappheit im Bauwesen in der Stadt X?“. Auf diese Weise können die Besonderheiten der Baurohstoffe und -minen und des Baubestandes berücksichtigt werden.

Nach der Analyse vieler Städte oder Regionen der Welt könnte eine allgemeine Antwort auf die Frage gegeben werden, ob es eine Ressourcenknappheit im Bauwesen gibt. Dies ist eine äußerst dynamische Frage, da sie von wirtschaftlichen und techno-

logischen Faktoren abhängt. Aus diesem Grund wird vorgeschlagen, diese Frage regelmäßig zu stellen. Dies würde mit Hilfe aussagekräftiger Bewertungsmethoden, die auf die Besonderheiten des Bausektors konzipiert sind, am besten gelingen. Zum Beispiel könnte es für ein Projekt sehr sinnvoll sein, diese Methode auf die Region anzuwenden, in der gebaut wird. Auf diese Weise könnten Rückschlüsse auf die Knappheit der zu verwendenden Materialien gezogen werden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Frage der Ressourcenknappheit im Bauwesen ein komplexes und vielschichtiges Thema ist, das einer differenzierten Betrachtung erfordert. Eine globale oder pauschale Antwort wäre irreführend und unzureichend. Stattdessen sollte die Frage auf eine geographische Ebene heruntergebrochen werden, um die lokalen Besonderheiten der Bauwirtschaft und der verfügbaren Materialien zu berücksichtigen. Nur eine umfassende Analyse auf regionaler Ebene kann eine genaue Einschätzung der Ressourcenknappheit im Bausektor ermöglichen. Es wird empfohlen, regelmäßige Bewertungen mit spezifischen Methoden durchzuführen, die den sich ändernden wirtschaftlichen und technologischen Bedingungen Rechnung tragen. Auf diese Weise können Bauprojekte besser geplant und Ressourcen effizienter eingesetzt werden, um den Herausforderungen der Ressourcenknappheit im Bauwesen erfolgreich zu begegnen.

4.4. Stellen Gebäude Ressourcen dar?

In den frühen Debatten über die Nutzung natürlicher Ressourcen im Bausektor betrachteten einige Autoren bereits die Nutzung von Gebäuden als eine wichtige Ressource, die es zu berücksichtigen gilt (Lichfield, 1988; Ness & Atkinson, 2001).

In den letzten Jahren wurde das Konzept der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen immer häufiger diskutiert, untersucht und von der Wissenschaft gefördert, um die Umweltauswirkungen und den Verbrauch natürlicher Ressourcen zu verbessern (Akanbi et al., 2018; Benachio et al., 2020; Ghisellini et al., 2018; Nasir et al., 2017; Pomponi & Moncaster, 2017). Die erhöhte Nachfrage nach Materialien und die Bedenken hinsichtlich der Auswirkungen von Abfällen verstärkte das Interesse am Urban Mining, sowohl aus ökologischer als auch wirtschaftlicher Sicht (Koutamanis et al., 2018). Da die Konzentrationen anthropogener Bestände oft gleich oder sogar höher als natürliche Reserven sind (Cossu & Williams, 2015), bietet die Beschaffung von Materialien aus der Anthroposphäre eine Alternative zur Nutzung natürlicher Ressourcen. Dies kompen-

siert nicht nur die hohen Kosten, die mit der Extraktion und dem Transport aus primären Lagerstätten verbunden sind, sondern verringert auch die Abhängigkeit von den Kontrolleuren der Primärquellen. Der Bausektor hat in diesem Kontext erhebliches Potential, da er nicht nur maßgeblich Ressourcen verbraucht, sondern auch als primärer Produzent von Abfall auftritt (Agamuthu, 2008; Li, 2015). Im Zusammenhang mit der Kreislaufwirtschaft, dem Konzept des Urban Mining und den anthropogenen Beständen im Bausektor ist es wichtig, die Betrachtung von Gebäuden und Bauwerken als Ressource und die Einbeziehung dieses Aspekts in die Ressourcenbewertung zu diskutieren. Es werden einige Ansätze vorgestellt, wie Gebäude bei der Bewertung von Erschöpfung, Knappheit und Kritikalität berücksichtigt werden können.

In der Diskussion um das ADP wurde von vielen Autor:innen die Überlegung angestellt, dass die Ressourcenverfügbarkeit auch die Lagerbestände in der Wirtschaft umfassen sollte. Dies sollte bei der Berechnung der Charakterisierungsfaktoren zur Bewertung des Ressourcenverbrauchs berücksichtigt werden (Klinglmair et al., 2014; Schneider et al., 2011, 2015; van Oers & Guinée, 2016; Yellishetty et al., 2011). Diese Debatte hat zu einigen Überarbeitungen des Indikators geführt.

Das Argument, dass es kein Erschöpfungsproblem gibt, wenn Materialien in der Technosphäre verbleiben, führte zu einem Vorschlag für einen ADP, der die Verdünnung von Materialien auf der Erde berücksichtigt. Dieser Vorschlag berücksichtigt die Veränderungen von Materialien, sobald sie von Rohstoffen zu Produkten werden. Diese Überlegung kombiniert das Austreten von Elementen aus der Wirtschaft mit den Gesamtreserven. Für die Anwendung dieser Methode sind Schätzungen der Bestände von Elementen in der Wirtschaft und deren Emissionen in die Umwelt notwendig, wobei bestehende Methoden und Daten von van Oers & Guinée, Schneider und UNEP herangezogen werden könnten (Schneider et al., 2011, 2015; Sleeswijk et al., 2008; van der Voet, 2013b; van Oers & Guinée, 2016; van Oers et al., 2020). Für den Bausektor könnte dies dazu beitragen, die Gewinnung der zu bewertenden Baustoffe kritisch zu hinterfragen, da nur ein Teil der zu Abfall gewordenen Baustoffe wiederverwendet werden kann (X. Yang et al., 2022). Eine Aktualisierung des ADP hinsichtlich der Verdünnung steht jedoch noch aus, so dass in der Ökobilanzpraxis und in Materialdatenplattformen wie ÖKOBAUDAT weiterhin ADPF und ADPE als Indikatoren verwendet werden (ÖKOBAU.DAT, 2023; van Oers & Guinée, 2016).

Der AADP (siehe 3.2.4) war ein Schritt in die Richtung, dass man auch die anthropogenen Lager in Bewertungssystemen berücksichtigt. Um die Anwendbarkeit des Konzepts in der LCA-Praxis zu überprüfen, sind jedoch eine größere Anzahl von CFs und weitere Untersuchungen erforderlich (Schneider et al., 2011, 2015).

Bei der Anpassung von ESSENZ und der Bewertung der lokalen Kritikalität einer deutschen Stadt wird der modifizierte SSDI-Indikator verwendet. Er trägt dazu bei, dass Gebäude genauso wie Bergwerke auch als Materialquelle angesehen werden können. (Ioannidou et al., 2015; Randebrock et al., 2023).

In Anlehnung an Kapitel 3.2.10, haben Struck und Flamme (2023) ein System zur Messung der Recyclingfähigkeit im Bauwesen entwickelt, wobei sie den gesamten Lebenszyklus von Bauelementen berücksichtigen. Diese Methode, speziell für das Bauwesen entworfen, konzentriert sich auf die Wiederverwertbarkeit von Gebäuden und einzelnen Bauteilen. Die Autor:innen betonen, dass dies bei der Diskussion über Ressourceneffizienz im Bausektor unbedingt berücksichtigt werden muss (Struck & Flamme, 2023).

Der Urban Mining Indicator berücksichtigt die Recyclingfähigkeit von Gebäuden und ist dabei ein wichtiges Instrument, um die in Gebäuden verbauten Rohstoffe bereits in der Planungsphase als potenzielle Ressourcen für die Zukunft zu betrachten. Dieses Bewertungssystem berücksichtigt zentrale Aspekte der Wiederverwendbarkeit von Materialien in allen Phasen des Lebenszyklus (Rosen, 2021).

Gebäude werden in Anlehnung an das Konzept „Building as Material Banks“ (BAMB) als wichtige Materiallager betrachtet (Sharp et al., 2019).

Die in Kapitel 4.1.3 dargestellten Informationen zum deutschen Materialbestand können dazu beitragen, die Potenziale hinsichtlich der Einbeziehung von Gebäuden in die Bewertungssysteme zu berücksichtigen. Bereits heute werden in Deutschland eine beträchtliche Menge an Materialien aus Bauabfällen wiederverwendet: In Deutschland stammen ca. 12,5 % der Gesteinskörnungen aus Siedlungsabfällen, mit einer steigenden Tendenz (Kreislaufwirtschaft Bau, 2021).

Das in diesem Kapitel vertiefte Verständnis der Bau- und Bauabfallindustrie als bedeutende Ressource verdeutlicht eine Entwicklung in der Wahrnehmung von Gebäuden: nicht nur als funktionale Strukturen, sondern auch als bedeutende Lagerstätten von

Ressourcen. Letztendlich bestätigt die hier vorgestellte Literatur und Diskussion, dass die Einbeziehung von Bauwerken in die Ressourcenbewertung ein unverzichtbarer Bestandteil zukünftiger Forschungen im Bereich der Ressourceneffizienz sein wird.

5. Zusammenfassung, Fazit, Limitationen und Ausblick

In diesem abschließenden Kapitel wird die Arbeit zusammengefasst, kritisch hinterfragt und im Hinblick auf künftige Forschungen zu diesem Thema in eine Perspektive gestellt.

5.1. Zusammenfassung, Fazit und Limitationen

Im Folgenden werden die Zusammenfassung, das Fazit und die Limitationen der Arbeit dargestellt.

5.1.1. Zusammenfassung

Die vorliegende Bachelorarbeit hatte das Ziel, einen umfassenden Überblick über die Bewertungsmethoden des Ressourcenverbrauchs im Bauwesen zu bieten. Kapitel 3 fokussierte sich auf die Bewertung von Bauprodukten und -materialien, während Kapitel 4 die Ressourcenknappheit in diesem Sektor und deren Bewertung thematisierte.

Um diese Analysen durchzuführen, wurden konzeptionelle und inhaltliche Einschränkungen vorgenommen. Die Entscheidung, biotische und abiotische Rohstoffe zu bewerten, wurde aufgrund ihrer Relevanz für Baustoffe getroffen. Ebenso erfolgte die Auswahl von Massenindikatoren, LCA-Methoden und Ressourceneffizienzbewertungen auf Produktebene aufgrund ihrer Bedeutung für den Bausektor.

Kapitel 3 präsentierte eine Übersichtstabelle verschiedener Methoden zur Ressourcenbewertung. Die Methodik wurde im Anschluss erläutert, und die allgemeinen Vor- und Nachteile der Bewertungsarten wurden zusammengefasst. Die detaillierte Tabelle, inklusive Definitionen und Anwendungsgebieten, befindet sich im Anhang A und dient Planer:innen als Entscheidungshilfe bei der Bewertung des Ressourcenverbrauchs in Projekten.

In Kapitel 4 wurde die Frage der Ressourcenknappheit im Bauwesen diskutiert. Zunächst wurden die Rohstoffe der wichtigsten Baustoffe vorgestellt, um eine Grundlage für die Beurteilung der Ressourcenknappheit zu schaffen. Es wurde festgestellt, dass bestehende Bewertungsmethoden hauptsächlich Metalle und fossile Brennstoffe be-

rücksichtigen, jedoch nicht ausreichend auf Baumineralien eingehen. Dies resultiert aus den spezifischen lokalen Handelspraktiken und Materialquellen in der Baubranche.

Einer der Hauptergebnisse der Arbeit betont die Notwendigkeit einer zielgerichteten Bewertung, die speziell auf das Bauwesen abzielt. Dabei sollten die Bewertungen regional fokussiert und nicht länderübergreifend durchgeführt werden, um belastbare Aussagen zur Ressourcenknappheit treffen zu können. Die Anpassung der ESSENZ-Methode, wie von Randebrock et al. (2023) vorgeschlagen, stellt einen Schritt in diese Richtung dar.

Die Erkenntnisse, die vor Kapitel 4.3 zusammengetragen wurden, waren entscheidend für die Diskussion der Nutzung von Gebäuden als Ressourcen. Moderne Bewertungsmethoden berücksichtigen bereits anthropogene Bestände bei der Indikatorenerstellung, was einen Schritt in Richtung der Integration von Gebäuden als Ressourcen in Bewertungsmethoden darstellt, unter Berücksichtigung ihrer Potenziale und Grenzen.

5.1.2. Fazit

In Bezug auf die Forschungsfragen ergeben sich folgende Antworten:

- **Forschungsfrage 1:** Welche verschiedenen Bewertungsmethoden werden in der Literatur zur Bewertung des Ressourcenverbrauchs im Bauwesen vorgeschlagen und diskutiert?
Antwort: Der Verbrauch von Ressourcen wird im Bauwesen entweder mit massenbasierten Indikatoren (MFA, MIPS) oder mit Erschöpfungsindikatoren in der LCA (ADP, Energy Surplus, Exergie) bewertet. Einige neue Ansätze schlagen eine Bewertung der Ressourceneffizienz auf Produktebene (ESSENZ, BIRD, Struck & Flamme) und eine in der Bewertung der Kreislauffähigkeit von Neubauten vor (UMI).
- **Forschungsfrage 2:** Welche Vor- und Nachteile haben diese Methoden in Bezug auf die Bewertung des Ressourcenverbrauchs?
Antwort: Die Vor- und Nachteile der Methoden beruhen hauptsächlich auf der subjektiven Entscheidung ihrer Erfinder:innen bei der Festlegung der Kriterien, die in Bezug auf den Ressourcenverbrauch am problematischsten sind. Eine

Vereinfachung der Problematik führt zu einer besseren Anwendbarkeit, da mehr Daten zur Verfügung stehen und diese an die Bewertungssysteme angepasst werden können. Komplexere Methoden bieten eine detailliertere und ganzheitlichere Sicht des Problems, sind aber mit methodischen Limitationen und Einschränkungen bei der Datenverfügbarkeit verbunden. Bewertungsansätze, die auf Reserven und Abbauraten basieren, wie sie häufig in der LCA verwendet werden, sind für Baumineralien wenig sinnvoll. Andere Bewertungsansätze, wie z.B. die Exergie, die Adaption der ESSENZ-Methode oder der Urban Mining Index können für Bauprojekte sinnvoller sein. Die Bewertung biotischer Rohstoffe auf Produktebene erfordert mehr Aufmerksamkeit, da auf diesem Gebiet noch wenig Forschung betrieben wird.

- **Forschungsfrage 3:** Welche Ressourcen werden durch das Bauwesen verbraucht und inwiefern besteht eine Ressourcenknappheit im Bauwesen?
Antwort: Bei den Rohstoffen, die im Bausektor zur Herstellung von Baustoffen verwendet werden, handelt es sich hauptsächlich um mineralische Rohstoffe, gefolgt von Metallen, fossilen Brennstoffen und Biomasse. Die Frage „Inwiefern besteht eine Ressourcenknappheit im Bausektor?“ kann in dieser Form nicht beantwortet werden, da die Beurteilung der Knappheit im Zusammenhang mit Baumineralien eine lokale Analyse erfordert. Die Frage, die gestellt werden kann, lautet: "Inwiefern besteht eine Ressourcenknappheit im Bauwesen in der Stadt X?". Es ist ratsam, diese Frage häufig zu untersuchen, da das Problem der Knappheit dynamisch ist. Bei Bauprojekten kann es sinnvoll sein, in der Region, in der sich die Baustelle befindet, eine Knappheitsanalyse durchzuführen, um sinnvolle geografische Grenzen festzulegen.
- **Forschungsfrage 4:** Stellen Gebäude Ressourcen dar? Wie können Gebäude in dieser Hinsicht in die Bewertung von Ressourcen einbezogen werden?
Antwort: Gebäude können eine Quelle für Sekundärrohstoffe sein. In diesem Zusammenhang steht das Konzept von Gebäude als Materiallager im Vordergrund. Sie werden bereits in einigen Indikatoren (AADP, SSDI) und Bewertungsmethoden (ESSENZ, Struck & Flamme) berücksichtigt. Der Urban Mining Index gilt als wichtiges Bewertungssystem, das speziell für den Bausektor entwickelt wurde, um Neubauten hinsichtlich ihrer Kreislauffähigkeit zu planen (Rosen, 2021).

5.1.3. Limitationen

Zu Beginn dieser Arbeit wurde eine gezielte Eingrenzung des Ressourcenbegriffs vorgenommen. Der Fokus wurde auf biotische und abiotische Rohstoffe gelegt und Aspekte wie Energie, Land und Wasser bewusst ausgeklammert. Die Einbeziehung von Indikatoren zur Berechnung des Energieverbrauchs, des Wasserverbrauchs und der Landnutzung wurde vermieden und findet in der tabellarischen Übersicht keine Darstellung. Die Berücksichtigung von Wasser, Energie und Land könnte zu potenziell anderen Ergebnissen für die Beantwortung der Forschungsfrage 3 führen.

Die meisten der in Tabelle 2 in Kapitel 3 aufgeführten Indikatoren zur Messung des Ressourcenverbrauchs stammen aus massenbasierten Analysen, LCA-Praktiken und neu vorgeschlagenen Methoden, die für die LCA adaptiert werden können. Die Bewertungsmethoden außerhalb dieses Rahmens wurden nicht berücksichtigt, z.B. Bewertungssysteme wie der DGNB Gebäuderessourcenpass (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen, 2023).

In Anlehnung an Kapitel 4.1.1, in dem die Schwierigkeiten bei der Erhebung von Daten zum Ressourcenverbrauch dargestellt wurden, sind zwei Einschränkungen zu beachten. Die erste besteht darin, dass im Rahmen des gesamten Lebenszyklus von Gebäuden der Schwerpunkt dieser Arbeit auf dem Verbrauch von Rohstoffen für die Herstellungsphase lag. Der Ressourcenverbrauch in anderen Lebenszyklusphasen wurde nicht direkt berücksichtigt. Da die Verbrauchsdaten in Massen ausgedrückt werden, kann es vorkommen, dass schwere Baustoffe als verbrauchsintensiver angesehen werden als leichte Baustoffe. Darüber hinaus war die Schwierigkeit, Daten über den Verbrauch von Rohstoffen in der Bauindustrie zu sammeln, ein einschränkender Faktor, da die Daten über den Ressourcenverbrauch in verschiedenen Berichten verstreut sind. Die Auswahl der Berichte für die Verbrauchsdaten könnte daher einen gewissen Bias aufweisen.

5.2. Ausblick

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass die Bewertung des Ressourcenverbrauchs, -erschöpfung und -knappheit im Bauwesen unterschiedliche Implikationen haben. Für eine sinnvolle Bewertung dieser Konzepte müssen Modellannahmen vorgenommen werden, die möglicherweise wichtige Aspekte, die mit der Problematik verbunden sind,

ausschließen. Innerhalb der wissenschaftlichen Praxis gibt es keinen Konsensus, was die beste Bewertungsmethode ist.

Der für die Bewertung vom Rohstoffverbrauch in der deutschen LCA benutzte Indikator ist das ADP. In den Debatten anhand des Indikators werden u. A. die Reservendefinitionen diskutiert, wobei die Benutzung der *ultimate reserves* (siehe Kapitel 2.1.3 Reservendefinitionen) als eine Überschätzung der globalen Reserven gesehen wird. Im Zusammenhang mit der Feststellung, dass es sinnvoll für das Bauwesen ist, eine lokale Bewertung der Knappheit vorzunehmen, wird daher eine Revision dieses Indikators für Baumaterialien in der LCA vorgeschlagen. Für Baumaterialien, die Metalle oder fossile Brennstoffe als Rohstoffe beinhalten könnte es sinnvoll sein, weiterhin das ADP (bzw. in anderen Ländern Reserven-Förderraten-Verhältnissen basierende Indikatoren) zu benutzen. Für Baumineralien wurde aber in dieser Arbeit vorgeschlagen, eine regionale Analyse je nach Projektstandort zu machen, statt Verbrauchsindikatoren als Indizien für die Erschöpfung oder Knappheit einer Ressource zu benutzen. Diese Ansicht wurde bisher wenig innerhalb der wissenschaftlichen Praxis debattiert, was Raum für weitere Diskussionen und Forschungen eröffnet.

Die Bewertungsmethoden, die speziell für das Bauwesen konzipiert oder angepasst wurden, wie die Anpassung der ESSENZ Methode von Randebrock et al. (2023) oder die von Struck und Flamme (2023) vorgeschlagene Methodik, sind neu und wurden im Zeitrahmen dieser Literaturrecherche veröffentlicht. Es wird ermutigt, Bewertungsmethoden und -Systemen, die speziell für den Bausektor konzipiert wurden zu untersuchen und zu validieren, und ggf. in zukünftige Projekte mit einzubeziehen.

Die tabellarische Übersicht in Kapitel 3 zeigte außerdem, dass die Anzahl der Methoden zur Bewertung abiotischer Rohstoffe größer ist als die der Methoden für biotische Rohstoffe. Die Bewertungsansätze für biotischen Rohstoffen sollten überprüft, diskutiert und validiert werden, ggf. in die LCA einbezogen werden, damit Baurohstoffe für Holzkonstruktionen oder holzbasierte Dämmstoffe auch sinnvoll bewertet werden können.

Es wurde außerdem veranschaulicht, dass die Datenverfügbarkeit eine zentrale Rolle bei der Bewertung der Indikatorenansätze oder Berechnungssystemen ist. Die Schwierigkeiten der Datenerhebung zum Rohstoffverbrauch im Bauwesen wurde gezeigt. Daher ist es essenziell, dass die Datenerhebung für den Ressourcenverbrauch, Reserven und anthropogenen Bestand mit hoher Qualität und Übersichtlichkeit ge-

schieht. Eine umfassende Datensammlung und Darstellung zum Ressourcenverbrauch, die branchenspezifisch und vollständig ist, wird stark empfohlen.

Literaturverzeichnis

- Agamuthu, P. (2008). Challenges in sustainable management of construction and demolition waste. *Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA*, 26(6), 491–492. <https://doi.org/10.1177/0734242X08100096>
- Akanbi, L. A., Oyedele, L. O., Akinade, O. O., Ajayi, A. O., Davila Delgado, M., Bilal, M. & Bello, S. A. (2018). Salvaging building materials in a circular economy: A BIM-based whole-life performance estimator. *Resources, Conservation and Recycling*, 129, 175–186. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.026>
- Alting, L., Hauschild, M [M.] & Wenzel, H [H.] (1997). Environmental assessment in product development. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 355(1728), 1373–1388. <https://doi.org/10.1098/rsta.1997.0063>
- Ardente, F. & Mathieux, F. (2014). Identification and assessment of product's measures to improve resource efficiency: the case-study of an Energy using Product. *Journal of Cleaner Production*, 83, 126–141. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.07.058>
- Arendt, R., Muhl, M., Bach, V. & Finkbeiner, M. (2020). Criticality assessment of abiotic resource use for Europe– application of the SCARCE method. *Resources Policy*, 67, 101650. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101650>
- Baccini, P. & Bader, H.-P. (1996). *Regionaler Stoffhaushalt: Erfassung, Bewertung und Steuerung*. Spektrum Akad. Verl.
- Baccini, P. & Brunner, P. H [Paul H.]. (1991). *Metabolism of the anthroposphere*. Springer.
- Bach (2014). Methoden und Indikatoren zur Messung von Ressourceneffizienz im Kontext der Nachhaltigkeit, 87.
- Bach, V., Berger, M., Finogenova, N. & Finkbeiner, M. (2017). Assessing the Availability of Terrestrial Biotic Materials in Product Systems (BIRD). *Sustainability*, 9(1), 137. <https://doi.org/10.3390/su9010137>
- Bach, V., Berger, M., Henßler, M., Kirchner, M., Leiser, S., Mohr, L., Rother, E., Ruhland, K., Schneider, L., Tikana, L., Volkhausen, W., Walachowicz, F. & Finkbeiner, M. (2016). Integrated method to assess resource efficiency – ESSENZ. *Journal of Cleaner Production*, 137, 118–130. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.077>
- Bach, V., Finogenova, N., Berger, M., Winter, L. & Finkbeiner, M. (2017). Enhancing the assessment of critical resource use at the country level with the SCARCE method – Case study of Germany. *Resources Policy*, 53, 283–299. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2017.07.003>
- Bähr, C. (2022). Rohstoffsituation der bayerischen Wirtschaft: Eine vbw Studie, erstellt von IW Consult GmbH.
- Benachio, G. L. F., Freitas, Maria do Carmo Duarte & Tavares, S. F. (2020). Circular economy in the construction industry: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 260, 121046. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121046>
- Benoît, C., Norris, G. A., Valdivia, S., Ciroth, A., Moberg, A., Bos, U., Prakash, S., Ugaya, C. & Beck, T. (2010). The guidelines for social life cycle assessment of products: just in time! *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(2), 156–163. <https://doi.org/10.1007/s11367-009-0147-8>
- Beylot, A., Ardente, F., Sala, S. & Zampori, L. (2020). Accounting for the dissipation of abiotic resources in LCA: Status, key challenges and potential way forward.

- Resources, Conservation and Recycling*, 157, 104748.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104748>
- Blengini, G. A., Latunussa, C. E. L., Eynard, U., Torres de Matos, C., Wittmer, D. M. A. G., Georgitzikis, K., Pavel, C. C., Carrara, S., Mancini, L., Unguru, M., Blagoeva, D., Mathieux, F. & Pennington, D. W. (2020). *Study on the EU's list of critical raw materials (2020): Final report*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2873/11619>
- Blonk, T. J. (1996). Feasibility of operationalisation of depletion of Abiotic Resources in LCA. *Key Resources Energy and Land*.
- Bösch, M. E [Michael E.], Hellweg, S [Stefanie], Huijbregts, M. A. J [Mark A. J.] & Frischknecht, R. (2007). Applying cumulative exergy demand (CExD) indicators to the ecoinvent database. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 12(3), 181–190. <https://doi.org/10.1065/lca2006.11.282>
- Brunner, P. H [P. H.], Daxbeck, H., Henseler G., von Steiger B., Beer B. & Piepke G. (1990). *Der Regionale Stoffhaushalt im Unteren Buenzthal. Projekt RESUB. Die Entwicklung einer Methodik zur Erfassung des regionalen Stoffhaushaltes: Projekt RESUB*.
- Bundesinstitut für Bau- & Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (2019). *Zukunft Bauen, Forschung für die Praxis | Band 09, ÖKOBAUDAT Grundlage für die Gebäudeökobilanzierung*.
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung. (2017). *Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)*. https://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/Nutzungsdauer_Bauteile/BNB_Nutzungsdauern_von_Bauteilen_2017-02-24.pdf
- Bundesverband Baustoffe- Steine und Erden. (2020). *Zahlenspiegel*.
- Bundesverband Baustoffe- Steine und Erden e.V (2021a). *bbs- Zahlenspiegel 2021: Daten und Fakten zur Baustoff-Steine-Erden-Industrie*.
- Bundesverband Baustoffe- Steine und Erden e.V. (2021b). *Deckung des Bedarfs an Gesteinskörnungen 2018 (in Mio. t)*. <https://kreislaufwirtschaft-bau.de/#our-story>
- Bundesverband Baustoffe- Steine und Erden e.V (2022). *bbs- Zahlenspiegel 2022: Daten und Fakten zur Baustoff-Steine-Erden-Industrie*.
- Bundesverband Geothermie. (2023). *Erdkruste*. <https://www.geothermie.de/bibliothek/lexikon-der-geothermie/e/erdkruste.html>
- Chapman, P. F. & Roberts, F. (1983). *Metal Resources and Energy. Butterworths Monographs in Materials*.
- Cossu, R. & Williams, I. D. (2015). Urban mining: Concepts, terminology, challenges. *Waste management (New York, N.Y.)*, 45, 1–3. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.09.040>
- Debacker (2016). *Synthesis of the state-of-the-art BAMB report: key barriers and opportunities for Materials Passports and Reversible Building Design in the current system. VITO*.
- Destatis (2014). *Mikrozensus-Zusatzerhebung 2014 - Bestand und Struktur der Wohneinheiten; Wohnsituation der Haushalte - Fachserie 5 Heft 1 - 2014*.
- Destatis (2022). *Bautätigkeit - Fachserie 5 Reihe 1*.
- Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (2018). *DGNB System, Kriterienkatalog Gebäude Neubau*.
- Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen. (2023). *Gebäuderessourcenpass | DGNB*. <https://www.dgnb.de/de/nachhaltiges-bauen/zirkulaeres-bauen/gebäuderessourcenpass>

- Dewulf, J [J.], Bösch, M. E [M. E.], Meester, B. de, van der Vorst, G., van Langenhove, H [H.], Hellweg, S [S.] & Huijbregts, M. A. J [M. A. J.] (2007). Cumulative exergy extraction from the natural environment (CEENE): a comprehensive life cycle impact assessment method for resource accounting. *Environmental Science & Technology*, 41(24), 8477–8483. <https://doi.org/10.1021/es0711415>
- Dewulf, J [J.], van Langenhove, H [Herman], Muys, B., Bruers, S., Bakshi, B. R., Grubb, G. F., Paulus, D. M. & Sciubba, E. (2008). Exergy: its potential and limitations in environmental science and technology. *Environmental Science & Technology*, 42(7), 2221–2232. <https://doi.org/10.1021/es071719a>
- DIN Deutsches Institut für Normung (2020). Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14040:2006 + A1:2020.
- Drielsma, J. A., Russell-Vaccari, A. J., Drnek, T., Brady, T., Weihed, P., Mistry, M. & Simbor, L. P. (2016). Mineral resources in life cycle impact assessment—defining the path forward. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(1), 85–105. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0991-7>
- Ecoinvent Centre. (2013). *ecoinvent data v3.0*.
- Eisenmenger, N., Giljum, S., Lutter, S., Marques, A., Theurl, M., Pereira, H. & Tukker, A. (2016). Towards a Conceptual Framework for Social-Ecological Systems Integrating Biodiversity and Ecosystem Services with Resource Efficiency Indicators. *Sustainability*, 8(3), 201. <https://doi.org/10.3390/su8030201>
- Elsner, H., Homberg-Heumann, D., Huy, D., Lutz, R., Moldenhauer, K., Pein, M., Schauer, M., Schmidt, S., Schmitz, M & Sievers, H. (2019). *Rohstoffsituationsbericht 2018, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)*.
- EPD International. (2023, 7. August). *Environmental Performance Indicators*. <https://www.environdec.com/resources/indicators>
- European Commission (2003). Communication from the Commission to the European Parliament and the council: Towards a thematic strategy on the sustainable use of natural resources. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2003:0572:FIN:EN:PDF>
- European Commission. (2014). *European Commission Report on Critical Raw Materials for the EU*.
- Eurostat. (2023, 10. August). *Glossary: Material flow indicators*. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Material_flow_indicators
- Finnveden, G. & Östlund, P. (1997). Exergies of natural resources in life-cycle assessment and other applications. *Energy*(22).
- Fischer, G., Schulte, D. & Maydl, P. (2014). *Ökoindikatoren-Bau: Neue Indikatoren zur Bewertung der Umweltwirkung von Bauprodukten und Bauweisen*.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2023). *Countries Requiring External Assistance for Food*. <http://www.fao.org/giews/english/hotspots/index.htm>
- Frenzel, M., Kullik, J., Reuter, M. A. & Gutzmer, J. (2017). Raw material ‘criticality’—sense or nonsense? *Journal of Physics D: Applied Physics*, 50(12), 123002. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aa5b64>
- Geibler, J. von, Cordaro, F., Kennedy, K., Lettenmeier, M. & Roche, B. (2016). Integrating resource efficiency in business strategies: a mixed-method approach for environmental life cycle assessment in the single-serve coffee value chain. *Journal of Cleaner Production*, 115, 62–74. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.052>
- Ghisellini, P., Ripa, M. & Ulgiati, S. (2018). Exploring environmental and economic costs and benefits of a circular economy approach to the construction and

- demolition sector. A literature review. *Journal of Cleaner Production*, 178, 618–643. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.207>
- Goedkoop, M., Heijungs, R. & Huijbregts, M. A. J [Mark A. J.] (2008). ReCiPE 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level.
- Goedkoop, M. & Spriensma, R. (2001). The Eco-Indicator 99: A Damage Oriented Method for Life Cycle Impact Assessment.
- Graedel, T. E., Barr, R., Chandler, C., Chase, T., Choi, J., Christoffersen, L., Friedlander, E., Henly, C., Jun, C., Nassar, N. T [Nedal T.], Schechner, D., Warren, S., Yang, M. & Zhu, C. (2012). Methodology of metal criticality determination. *Environmental Science & Technology*, 46(2), 1063–1070. <https://doi.org/10.1021/es203534z>
- Graedel, T. E., Harper, E. M., Nassar, N. T [N. T.], Nuss, P. & Reck, B. K. (2015). Criticality of metals and metalloids. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(14), 4257–4262. <https://doi.org/10.1073/pnas.1500415112>
- Grünewald, A. & Biscopig, M. (2021). *Transportbeton—Festlegung, Bestellung, Lieferung, Abnahme*.
- Guerra, B. C. & Leite, F. (2021). Circular economy in the construction industry: An overview of United States stakeholders' awareness, major challenges, and enablers. *Resources, Conservation and Recycling*, 170, 105617. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105617>
- Guinée, J. B., Bruijn, H. de, van Duin, R., Gorree, M., Heijungs, R., Huijbregts, M. A. J [Mark A. J.], Huppes, G., Kleijn, R., Koenig, A. de, van Oers, L., Sleeswijk, A. W., Suh, S. & Haes, H. A. de. (2001). *Life cycle assessment—an operational guide to the ISO standards, part 2b*.
- Guinée, J. B. & Heijungs, R. (1995). A proposal for the definition of resource equivalency factors for use in product life-cycle assessment. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 14(5), 917–925. <https://doi.org/10.1002/etc.5620140525>
- Habib, K. & Wenzel, H [Henrik] (2016). Reviewing resource criticality assessment from a dynamic and technology specific perspective – using the case of direct-drive wind turbines. *Journal of Cleaner Production*, 112, 3852–3863. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.064>
- Hagelüken, C. & Meskers, C. E. (2010). *Complex life cycles of precious and special metals*. MIT Press.
- Hau, J. L. & Bakshi, B. R. (2004). Expanding exergy analysis to account for ecosystem products and services. *Environmental Science & Technology*, 38(13), 3768–3777. <https://doi.org/10.1021/es034513s>
- Hauschild, M [Michael] & Potting, J. (2005). Spatial differentiation in Life Cycle impact assessment - The EDIP2003 methodology.
- Heinrich, M. A. (2017). *Material Flows of the German Building Sector*. <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1388177/0596339596118.pdf>
- Hertwich, E., Lifset, R., Pauliuk, S., Heeren, N., Ali, S., Tu, Q., Ardente, F., Berrill, P., Fishman, T., Kanaoka, K., Kulczycka, J., Makov, T., Masanet, E. & Wolfram, P. (2020). *Resource Efficiency and Climate Change: Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future*. <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/34351/RECCR.pdf?sequence=1&isAllowed=y> <https://doi.org/10.5281/ZENODO.3542680>
- Hinterberger, F., Luks, F. & Schmidt-Bleek, F. (1997). Material flows vs. 'natural capital'. *Ecological Economics*, 23(1), 1–14. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(96\)00555-1](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(96)00555-1)
- ICF International (2015). Study on energy efficiency and energy saving potential in industry and on possible policy mechanisms.

- International Classification for Standards. (2023, 10. September). *ISO 91.100: Construction materials: Including sustainability of construction materials*.
<https://www.iso.org/ics/91.100/x/>
- International Resource Panel (2016). Global Material Flows and Resource Productivity.
- International Resource Panel, Stefan Bringezu, Anu Ramaswami, Heinz Schandl, Meghan O'Brien, Rylie Pelton, Jean Acquatella, Elias T. Ayuk, Anthony Shun Fung Chiu, Robert Flanegin, Jacob Fry, Stefan Giljum, Seiji Hashimoto, Stefanie Hellweg, Karin Hosking, Yuanchao Hu, Manfred Lenzen, Mirko Lieber, Stephan Lutter, . . . Hala Razian (2017). Assessing Global Resource Use: A systems approach to resource efficiency and pollution reduction.
- International Resource Panel, Stefan Bringezu, Anu Ramaswami, Heinz Schandl, Meghan O'Brien, Rylie Pelton, Jean Acquatella, Elias T. Ayuk, Anthony Shun Fung Chiu, Robert Flanegin, Jacob Fry, Stefan Giljum, Seiji Hashimoto, Stefanie Hellweg, Karin Hosking, Yuanchao Hu, Manfred Lenzen, Mirko Lieber, Stephan Lutter, . . . Hala Razian. (2019). *Global Resources Outlook 2019: Natural Resources for the Future We Want*. United Nations.
<https://doi.org/10.18356/689a1a17-en>
- International Union for Conservation of Nature and Natural Resources (2001). IUCN Red List Categories and Criteria Version 3.1—Categories and Criteria. *International Union for Conservation of Nature IUCN Red List of Threatened Species*.
<http://www.iucnredlist.org/>
- Ioannidou, D., Meylan, G., Sonnemann, G. & Habert, G. (2017). Is gravel becoming scarce? Evaluating the local criticality of construction aggregates. *Resources, Conservation and Recycling*, 126, 25–33.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.07.016>
- Ioannidou, D., Nikias, V., Brière, R., Zerbi, S. & Habert, G. (2015). Land-cover-based indicator to assess the accessibility of resources used in the construction sector. *Resources, Conservation and Recycling*, 94, 80–91.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.11.006>
- Ioannidou, D., Pommier, R., Habert, G. & Sonnemann, G. (2019). Evaluating the risks in the construction wood product system through a criticality assessment framework. *Resources, Conservation and Recycling*, 146, 68–76.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.03.021>
- IÖR-Informationssystem Gebaute Umwelt. (2023, 6. September). *Rohstoffzuordnungen*. <https://ioer-isbe.de/grundlagen/rohstoffzuordnungen>
- Jane, S. (2021). Analysis of the Construction Value Chain: Understanding the value chain & identifying hotspots.
https://www.oneplanetnetwork.org/sites/default/files/value-chain_analysis_-_construction_-_210210.pdf
- Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., Rebitzer, G. & Rosenbaum, R. (2003). IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 8(6).
<https://doi.org/10.1007/BF02978505>
- Kennedy, C., Cuddihy, J. & Engel-Yan, J. (2007). The Changing Metabolism of Cities.
https://www.researchgate.net/publication/227616973_The_Changing_Metabolism_of_Cities
- Kesler, S. E. & Wilkinson, B. (2008). Earth's copper resources estimated from tectonic diffusion of porphyry copper deposits. *Geologica*.
- Kesler, S. E. & Wilkinson, B. (2009). Resources of gold in Phanerozoic epithermal deposits. *Econ Geol*.

- Klinglmair, M., Sala, S. & Brandão, M. (2014). Assessing resource depletion in LCA: a review of methods and methodological issues. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(3), 580–592. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0650-9>
- Koutamanis, A., van Reijn, B. & van Bueren, E. (2018). Urban mining and buildings: A review of possibilities and limitations. *Resources, Conservation and Recycling*, 138, 32–39. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.06.024>
- Krausmann, F., Gingrich, S., Eisenmenger, N., Erb, K.-H., Haberl, H. & Fischer-Kowalski, M. (2009). Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century. *Ecological Economics*, 68(10), 2696–2705. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.05.007>
- Krausmann, F., Lauk, C., Haas, W. & Wiedenhofer, D. (2018). From resource extraction to outflows of wastes and emissions: The socioeconomic metabolism of the global economy, 1900-2015. *Global Environmental Change*, 52, 131–140. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.07.003>
- Kreislaufwirtschaft Bau. (2021). *Mineralische Bauabfälle Monitoring 2018*.
- Lausselet, C., Urrego, J. P. F., Resch, E. & Brattebø, H. (2021). Temporal analysis of the material flows and embodied greenhouse gas emissions of a neighborhood building stock. *Journal of Industrial Ecology*, 25(2), 419–434. <https://doi.org/10.1111/jiec.13049>
- Leisin, M. (2019). Branchensteckbrief der Glasindustrie. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energiewende-in-der-industrie-ap2a-branchensteckbrief-glas.pdf?__blob=publicationFile&v=4
- Li, J. (2015). Wastes could be resources and cities could be mines. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 33(4), 301–302. <https://doi.org/10.1177/0734242X15581268>
- Lichfield, N. (1988). *Economics in urban conservation*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511759574>
- Liedtke, C., Bienge, K., Wiesen, K., Teubler, J., Greiff, K., Lettenmeier, M. & Rohn, H. (2014). Resource Use in the Production and Consumption System—The MIPS Approach. *Resources*, 3(3), 544–574. <https://doi.org/10.3390/resources3030544>
- Lindeijer, E. W., Müller-Wenk, R. & Steen, B. (2002). Impact Assessment Of Resources and Land Use. *SETAC Press*.
- Lippiat, B. C. (2007). BEES 4.0: Building for Environmental and Economic Sustainability: Building for Environmental and Economic Sustainability Technical Manual and User Guide. https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=860108
- Lutter, S., Kreimel, J. & Gijum, S. (2022). Ressourcennutzung in Deutschland – Weiterentwicklung des deutschen Ressourcenberichts. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/117_2023_texte_ressourcennutzung_in_deutschland.pdf
- Mangialardo, A. & Micelli, E. (2018). *Rethinking the Construction Industry Under the Circular Economy: Principles and Case Studies* (Smart and Sustainable Planning for Cities and Regions). Springer International Publishing, S. 333–344.
- Müller-Wenk, R. (1998). Depletion of Abiotic Resources Weighted on the Base of "Virtual" Impacts of Lower Grade Deposits in Future. *IWÖ Diskussionsbeitrag*.
- Müller-Wenk, R. (1999). An approximative calculation of the surplus energy requirement for fossil fuel resources to be used in future. <http://www.iwoe.unisg.ch/service>
- Nasir, M. H. A., Genovese, A., Acquaye, A. A., Koh, S. & Yamoah, F. (2017). Comparing linear and circular supply chains: A case study from the construction indus-

- try. *International Journal of Production Economics*, 183, 443–457.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.06.008>
- Ness, D. & Atkinson, B. (2001). *Re-use/upgrading of existing building stock*.
- Norris, C. B., Norris, G. & Aulisio, D. (2013). Social Hotspots Database.
<http://socialhotspot.org/>
- Nwodo, M. N. & Anumba, C. J. (2020). Exergetic Life Cycle Assessment: A Review. *Energies*, 13(11), 2684. <https://doi.org/10.3390/en13112684>
- OECD (2008). *Measuring Material Flows and Resource Productivity: The OECD Guide*. <https://www.oecd.org/environment/indicators-modelling-outlooks/MFA-Guide.pdf>
- ÖKOBAU.DAT. (2023, 10. September). *Datenbank ÖKOBAUDAT*.
https://www.oekobaudat.de/no_cache/datenbank/suche.html
- Pelzeter, J., Bach, V., Henßler, M., Ruhland, K. & Finkbeiner, M. (2022). Enhancement of the ESSENZ Method and Application in a Case Study on Batteries. *Resources*, 11(6), 52. <https://doi.org/10.3390/resources11060052>
- Peters, J. & Weil, M. (2016). A Critical Assessment of the Resource Depletion Potential of Current and Future Lithium-Ion Batteries. *Resources*, 5(4), 46.
<https://doi.org/10.3390/resources5040046>
- Pommer, K., Bech, P., Wenzel, H [Henrik], Capersen, N. & Olsen, S. I. (2003). *Handbook on Environmental Assessment of Products*.
- Pomponi, F. & Moncaster, A. (2017). Circular economy for the built environment: A research framework. *Journal of Cleaner Production*, 143, 710–718.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.055>
- Randebrock, I., Marinova, S., Bach, V., Arendt, R. & Finkbeiner, M. (2023). Adapting the ESSENZ Method to Assess the Criticality of Construction Materials: Case Study of Herne, Germany. *Resources*, 12(8), 92.
<https://doi.org/10.3390/resources12080092>
- Rankin, W. J. (2011). *Minerals, metals and sustainability: meeting future material needs*. CRSIRO Publishing.
- Rees, W. E. (2009). The ecological crisis and self-delusion: implications for the building sector. *Building Research and Information*, 37(3), 300–311.
<https://doi.org/10.1080/09613210902781470>
- Reuter, M. A., Heiskanen, K., Boin, U., Schaik, A., Verhoef, E., Yang, Y. & Georgalli, G. (2005). *The metrics of material and metal ecology: Developments in mineral processing*. Elsevier.
- Ritthoff, M., Rohn, H. & Liedtke, C. (2002). *MIPS berechnen: Ressourcenproduktivität von Produkten und Dienstleistungen*. Wuppertal spezial: Bd. 27. Wuppertal-Inst. für Klima Umwelt Energie.
- Ros, J. P. (1993). *De aarde als onze provisiekast*, RIVM report. RIVM.
- Rosen, A. (2021). *Urban Mining Index: Entwicklung einer Systematik zur quantitativen Bewertung der Kreislaufkonsistenz von Baukonstruktionen in der Neubauplanung*.
- Sauer, S. & Wohlrabe, K. (2020). *ifo Handbuch der Konjunkturumfragen. ifo Beiträge zur Wirtschaftsforschung: Bd. 88*. Ifo-Institut.
- Schiller, G., Ortlepp, R., Krauß, N., Steger, S., Schütz, H., Fernández, J. A., Reichenbach, J., Wagner, J. & Baumann, J. (2015). Kartierung des Anthropogenen Lagers in Deutschland zur Optimierung der Sekundärrohstoffwirtschaft. *Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2015*.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/exte_83_2015_kartierung_des_anthropogenen_lagers.pdf
- Schneider (2016). *LCA Perspectives for Resource Efficiency Assessment*.

- Schneider, L. (2014). *A comprehensive approach to model abiotic resource provision capability in the context of sustainable development*.
- Schneider, L., Bach, V. & Finkbeiner, M. (2016). LCA Perspectives for Resource Efficiency Assessment. In *Special Types of Life Cycle Assessment* (S. 179–218). Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-017-7610-3_5
- Schneider, L., Berger, M. & Finkbeiner, M. (2011). The anthropogenic stock extended abiotic depletion potential (AADP) as a new parameterisation to model the depletion of abiotic resources. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 16(9), 929–936. <https://doi.org/10.1007/s11367-011-0313-7>
- Schneider, L., Berger, M. & Finkbeiner, M. (2015). Abiotic resource depletion in LCA—background and update of the anthropogenic stock extended abiotic depletion potential (AADP) model. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(5), 709–721. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0864-0>
- Schneider, L., Berger, M., Schüler-Hainsch, E., Knöfel, S., Ruhland, K., Mosig, J., Bach, V. & Finkbeiner, M. (2014). The economic resource scarcity potential (ESP) for evaluating resource use based on life cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(3), 601–610. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0666-1>
- Schrijvers, D., Hool, A., Blengini, G. A., Chen, W.-Q., Dewulf, J [Jo], Eggert, R., van Ellen, L., Gauss, R., Goddin, J., Habib, K., Hagelüken, C., Hirohata, A., Hofmann-Antenbrink, M., Kosmol, J., Le Gleuher, M., Grohol, M., Ku, A., Lee, M.-H., Liu, G., . . . Wäger, P. A. (2020). A review of methods and data to determine raw material criticality. *Resources, Conservation and Recycling*, 155, 104617. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104617>
- Schuh, H. (2001). Entscheidungsverfahren zur Umsetzung einer nachhaltigen Entwicklung. (*Dresdner Beiträge zur Betriebswirtschaftslehre*. <https://core.ac.uk/download/pdf/236363212.pdf>
- Sciubba, E. (2004). From Engineering Economics to Extended Exergy Accounting: A Possible Path from Monetary to Resource-Based Costing. *Journal of Industrial Ecology*, 8(4), 19–40. <https://doi.org/10.1162/1088198043630397>
- Sharp, J., Hobbs, G., Henrotay, C., Steinlage, M., Debacker, W., Regel, S. de & Sjögren, C. (2019). *Buildings as Material Banks: Framework for Policies, Regulations and Standards*. <https://doi.org/10.3030/642384>
- Skinner, B. J. (1976). A second iron age ahead? *Am Sci*.
- Skinner, B. J. (1979). Earth resources. *Proc Natl Acad Sci*.
- Sleeswijk, A. W., van Oers, L. F. C. M., Guinée, J. B., Struijs, J. & Huijbregts, M. A. J [Mark A. J.] (2008). Normalisation in product life cycle assessment: an LCA of the global and European economic systems in the year 2000. *Science of The Total Environment*, 390(1), 227–240. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.09.040>
- Sonderegger, T., Pfister, S. & Hellweg, S [Stefanie] (2015). Criticality of Water: Aligning Water and Mineral Resources Assessment. *Environmental Science & Technology*, 49(20), 12315–12323. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b02982>
- Statistisches Bundesamt. (2023a). *Wald und Holz*. https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Wald-Holz/_inhalt.html#_ssapv9hul
- Statistisches Bundesamt. (2023b, 15. Februar). *Zusammenhang zwischen Materialknappheit und Industrieaktivität*. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Industrie-Verarbeitendes-Gewerbe/materialknappheit-industrieaktivitaet.html>

- Struck, F. & Flamme, S. (2023). Measuring Recyclability – a key factor for resource efficiency evaluation. *Detritus*(22), 27–40. <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2023.17251>
- Szargut, J. (2005). Exergy method: Technical and ecological applications. *WIT Press*.
- Szargut, J., Morris & Steward, F. R. (1988). Exergy analysis of thermal, chemical, and metallurgical processes. *Hemisphere Publishing Corporation*.
- Szargut, J. & Stanek, W. (2007). Thermo-ecological optimization of a solar collector. *Energy*, 32(4), 584–590. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.06.010>
- U.S Geological Survey. (2015a). *Mineral Commodity Summaries, 2015*. Geological Survey (USGS).
- U.S Geological Survey. (2015b). *Mineral Commodity Summaries, 2015. Appendix*.
- Umweltbundesamt (2012). Glossar zum Ressourcenschutz. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4242.pdf>
- Umweltbundesamt (2022). Die Nutzung natürlicher Ressourcen: Ressourcenbericht für Deutschland 2022.
- Umweltbundesamt. (2023). *Welche Menge an Rohstoffen braucht die Bauindustrie und in welchen Mengen werden sie regional abgebaut?* <https://www.umweltbundesamt.de/umweltatlas/bauen-wohnen/wirkungen-bauen/rohstoffentnahme-bauen/welche-menge-an-rohstoffen-braucht-die-bauindustrie>
- Unep. (2011). *Recycling Rates of Metals: A Status Report. A Report of the Working Group on Global Metal Flows to the International Resource Panel*.
- Unep (2017). Glossary. <https://www.resourcepanel.org/glossary>
- Unep (2022). Sand and Sustainability: 10 strategic recommendations to avert a crisis.
- United Nations Environment Programme (2009). Guidelines for Social Life Cycle Assessment of Products.
- United Nations Environment Programme. (2011). *Decoupling Natural Resource Use and Environmental Impacts from Economic Growth (978-92-807-3167-5)*. <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/9816;jsessionid=01A873D4BE20C74201A1751B53F22E8B>
- United Nations Environment Programme (2020). 2020 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emissions, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector.
- USGS. (2014). *Mineral commodity summaries 2014*.
- van der Voet, E. (2013a). *Criticality and abiotic resource depletion in life cycle assessment*.
- van der Voet, E. (2013b). Environmental Risks and Challenges of Anthropogenic Metals Flows and Cycles (Full report).
- van Oers, L. & Guinée, J. (2016). The Abiotic Depletion Potential: Background, Updates, and Future. *Resources*, 5(1), 16. <https://doi.org/10.3390/resources5010016>
- van Oers, L., Guinée, J. B., Heijungs, R., Schulze, R., Alvarenga, R. A. F., Dewulf, J [Jo], Drielsma, J., Sanjuan-Delmás, D., Kampmann, T. C., Bark, G., Uriarte, A. G., Menger, P., Lindblom, M., Alcon, L., Ramos, M. S. & Torres, J. M. E. (2020). Top-down characterization of resource use in LCA: from problem definition of resource use to operational characterization factors for dissipation of elements to the environment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(11), 2255–2273. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01819-4>
- van Oers, L., Koenig, A. de, Guinée, J. & Huppes, G. (2002). Abiotic resource depletion in LCA: Improving characterisation factors for abiotic resource depletion as

- recommended in the new Dutch LCA handbook. *Road and Hydraulic Engineering Institute*.
- VSZ (2022). Zementindustrie im Ueberblick 2021/2022. https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/zementindustrie/zementindustrie_ueberblick/VDZ-Zementindustrie_im_Ueberblick_2021_2022.pdf
- Wall, G. (1993). Exergy, Ecology and Democracy – Concepts of a Vital Society or A Proposal for an Exergy Tax. <http://exergy.se/goran/eed/index.html>
- Weber, F., Kühne, O., Jenal, C., Aschenbrand, E. & Artuković, A. (2018). *Sand im Getriebe: Aushandlungsprozesse um die Gewinnung mineralischer Rohstoffe aus konflikttheoretischer Perspektive nach Ralf Dahrendorf* (RaumFragen). Springer VS.
- Weber, S., Bruy, E. & Schäffler, H. (2016). *Baustoffkunde: Aufbau und Technologie, Arten und Eigenschaften, Anwendung und Verarbeitung* (11., neu bearbeitete Auflage, bearbeitete Ausgabe). *Kamprath-Reihe*. Vogel Business Media.
- Welfens, M. J., Nordmann, J. & Seibt, A. (2016). Drivers and barriers to return and recycling of mobile phones. Case studies of communication and collection campaigns. *Journal of Cleaner Production*, 132, 108–121. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.082>
- Wiedenhofer, D., Steinberger, J. K., Eisenmenger, N. & Haas, W. (2015). Maintenance and Expansion: Modeling Material Stocks and Flows for Residential Buildings and Transportation Networks in the EU25. *Journal of Industrial Ecology*, 19(4), 538–551. <https://doi.org/10.1111/jiec.12216>
- Wirtschaftsvereinigung Stahl. (2022). *Rohstahlproduktion in Deutschland*. <https://www.stahl-online.de/startseite/stahl-in-deutschland/zahlen-und-fakten/>
- World Steel Association (2022). World Steel In Figures. <https://worldsteel.org/steel-topics/statistics/world-steel-in-figures-2022/>
- Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. (2011, 22. November). *MIPS Haus*. <https://www.mipshaus.de/de/mipshaus.html>
- Yang, S [Shiyang], Yang, S [Siyu] & Qian, Y. (2015). The inclusion of economic and environmental factors in the ecological cumulative exergy consumption analysis of industrial processes. *Journal of Cleaner Production*, 108, 1019–1027. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.039>
- Yang, X., Hu, M., Zhang, C. & Steubing, B. (2022). Urban mining potential to reduce primary material use and carbon emissions in the Dutch residential building sector. *Resources, Conservation and Recycling*, 180, 106215. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106215>
- Yellishetty, M., Mudd, G. M. & Ranjith, P. G. (2011). The steel industry, abiotic resource depletion and life cycle assessment: a real or perceived issue? *Journal of Cleaner Production*, 19(1), 78–90. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.08.020>
- Zampori, L. & Pant, R. (2019). Suggestions for updating the Product Environmental Footprint (PEF) method. *Publications Office of the European Union*. Vorab-Onlinepublikation. <https://doi.org/10.2760/424613>
- Zangemeister, C. (1970). *Nutzwertanalyse in der Systemtechnik: Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen*. https://www.zvab.com/servlet/BookDetailsPL?bi=22461374232&searchurl=an%3Dzangemeister%26sortby%3D20%26tn%3Dnutzwertanalyse%2Bin%2Bder&cm_sp=snippet-_srp1-_title1

Abbildungsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildung 1, Veranschaulichung von Konzepten, die zum Ressourcenverbrauch und zur Ressourceneffizienz gehören, eigene Darstellung..... | 18 |
| Abbildung 2, Überblick über die in ESSENZ berücksichtigten Dimensionen und Kategorien, eigene Darstellung nach Bach et al. (2016)..... | 37 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tabelle 1, Definitionen der Reserven, eigene Darstellung nach Drielsma et al. (2016) und van Oers und Guinée (2016) | 16 |
| Tabelle 2, Überblick über Methoden zur Bewertung von Ressourcenverbrauch, Ressourceneffizienz und Kreislauffähigkeit auf Produktebene im Bauwesen, vollständige Darstellung in Anhang A, eigene Darstellung | 20 |
| Tabelle 3, Überblick über die in BIRD bewerteten Dimensionen und Kategorien, eigene Darstellung nach Bach, Berger et al. (2017). | 40 |
| Tabelle 4, Wichtigste Baumaterialien und ihre Rohstoffe, eigene Darstellung nach International Classification for Standards (2023) und S. Weber et al. (2016)..... | 48 |
| Tabelle 5, Rohstoffeinsatz (RMI) nach Gütergruppen nach EU-Standardmethode, eigene Darstellung nach Umweltbundesamt 2022 und Lutter et al. 2022 (Lutter et al., 2022; Umweltbundesamt, 2022)..... | 49 |

Anhang A

Tabelle A, Vollständiger Überblick über Methoden zur Bewertung von Ressourcenverbrauch, Ressourceneffizienz und Kreislauffähigkeit auf Produktebene im Bauwesen, eigene Darstellung

| Was wird bewertet? | Bewertungsmethode/ Entwickelt von | Definition | Einheit | Vorteile | Nachteile oder Limitationen | Einsatzbeispiele |
|---|--|--|------------|---|--|--|
| Eingabe ("Input") von Ressourcen in ein System. | DMI: Direct Material Input Definition aus OECD (2008), MFA System entwickelt von Brunner et al. (1990), Baccini und Brunner (1991), Baccini und Bader (1996) | Materialflussindikator: Massenstrom von Materialien, die in ein Wirtschaftssystem eintreten und darin verarbeitet oder genutzt werden. Es werden inländisch gewonnene und importierte Rohstoffe, Halb- und Fertigprodukte umfasst. | t/a | - Schätzt den Bedarf an Rohstoffen in der Branche für die Instandhaltung und den Neubau von Gebäuden (Heinrich, 2017). - Bietet Möglichkeiten der Systemsteuerung in einer Kreislaufwirtschaft (Heinrich, 2017). - Untersucht die Auswirkungen und das Selbstversorgungspotenzial durch Sekundärmaterialien (Heinrich, 2017). - In verschiedenen Berichten von Regierungen und Organisationen verwendet (International Resource Panel, 2016; Umweltbundesamt, 2022; United Nations Environment Programme, 2011). - Ermöglicht Vergleiche zwischen Branchen, da es sich um eine weit verbreitete Methode zur Erfassung von Ressourcenentnahmen und -strömen handelt (Umweltbundesamt, 2022). | - Bewertung erfolgt i.d.R. nicht auf Produktebene, es müssen Systemgrenzen festgelegt werden (Brunner et al., 1990). - Je nach Material sind Systemgrenzen flexibel und können sich im Laufe der Zeit ändern, insbesondere auf räumlicher Ebene (Heinrich, 2017). - Es werden relevante Aspekte außer dem Masseneinsatz, die mit der Gewinnung und Nutzung von Ressourcen verbunden sind, nicht berücksichtigt (Bach, 2014; Bach et al., 2016; Eisenmenger et al., 2016; Schneider, 2016). | - Studien zu Materialverbrauch und Regierungsberichte (Heinrich, 2017; International Resource Panel, 2016; Umweltbundesamt, 2022; United Nations Environment Programme, 2011). - Für ein Modell verwendet, das LCA und MFA zur Bewertung der Materialeffizienz während der gesamten Lebensdauer eines Gebäudes integriert (Lausset et al., 2021). |
| Eingabe ("Input") von Rohstoffen in ein System | DEU: Domestic Extraction Used Definition aus OECD (2008), MFA System entwickelt von Brunner et al. (1990), Baccini und Brunner (1991), Baccini und Bader (1996) | Materialflussindikator: quantifiziert die Materialströme, die aus der Umwelt stammen und physisch in das Wirtschaftssystem einfließen, entweder zur Weiterverarbeitung oder zum direkten Verbrauch. | t/a | | | |
| Eingabe ("Input") von Materialien in ein System | TMR: Total Material Requirement Definition aus OECD (2008), MFA System entwickelt von Brunner et al. (1990), Baccini und Brunner (1991), Baccini und Bader (1996) | Materialflussindikator: Misst die Gesamtheit der Materialien, die direkt und indirekt in ein System eintreten, einschließlich versteckter Flüsse. | kg, t, t/a | | | |
| Verbrauch von Materialien in einem System | DMC: Domestic Material Consumption Definition aus OECD (2008), MFA System entwickelt von Brunner et al. (1990), Baccini und Brunner (1991), Baccini und Bader (1996) | Materialflussindikator: Gibt den direkten Massenstrom von Materialien in ein System an, die dort verbraucht werden. | t/a | | | |

| Was wird bewertet? | Bewertungsmethode/ Entwickelt von | Definition | Einheit | Vorteile | Nachteile oder Limitationen | Einsatzbeispiele |
|--|---|--|---|--|--|--|
| Verbrauch von Materialien in einem System | RMC: Raw Material Consumption Definition aus OECD (2008), MFA System entwickelt von Brunner et al. (1990), Baccini und Brunner (1991), Baccini und Bader (1996) | Materialflussindikator: Zeigt die Massen in Rohstoffäquivalenten an, die in ein System einfließen. | t/a | | | |
| Verbrauch von Materialien in einem System | TMC: Total Material Consumption Definition aus OECD (2008), MFA System entwickelt von Brunner et al. (1990), Baccini und Brunner (1991), Baccini und Bader (1996) | Materialflussindikator: Gesamtheit aller Materialien, die einem System direkt oder indirekt durch Verbrauch zugeführt werden, einschließlich versteckter Flüsse. | t/a | | | |
| Materialproduktivität von natürlichen Ressourcen in einem System oder Produkt. | MIPS: *Material Input per Service Unit Rithoff et al. (2002) | - Angabe der Menge der für ein Produkt verwendeten Ressourcen. - Berechnet, wie viel Nutzen aus einer bestimmten Menge der Ressource entzogen werden kann. | Abhängig von der gewählten funktionalen Einheit | - Standardisierte Metrik zum Vergleich der Ressourceneffizienz verschiedener Produkte (Liedtke et al., 2014). - Praktische Lösung zur Reduzierung der Komplexität und Unsicherheiten, die mit Bewertungen wie LCA einhergehen (Liedtke et al., 2014). - Grundlage für das Konzept des ökologischen Rucksacks, umgesetzt in den Nachhaltigkeitsstrategien der Regierungen (Liedtke et al., 2014). - MI-Faktoren sind für einige Produkte bereits berechnet. Sie können auf der Website des WI abgerufen werden (Liedtke et al., 2014). | - Es werden außer Masseneinsatz relevante Aspekte, die mit der Gewinnung und Nutzung von Ressourcen verbunden sind nicht berücksichtigt (Bach, 2014; Bach et al., 2016; Eisenmenger et al., 2016; Schneider, 2016). - Mangelnde Berücksichtigung von Qualität und Effizienz: Ein Produkt mit geringem Materialeinsatz pro Serviceeinheit kann erhebliche Umweltauswirkungen haben, wenn es ineffizient hergestellt oder genutzt wird. | - Nachhaltigkeitsstrategien von Regierungen (Liedtke et al., 2014) - Analysen auf Produktebene (Geibler et al., 2016; Hinterberger et al., 1997; Weffens et al., 2016) - MIPS Haus (Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, 2011) |

| Was wird bewertet? | Bewertungsmethode/ Entwickelt von | Definition | Einheit | Vorteile | Nachteile oder Limitationen | Einsatzbeispiele |
|-----------------------------------|---|--|-----------------------------|---|---|---|
| Erschöpfung abiotischer Rohstoffe | ADP: Abiotic Depletion Potential Guinée und Heijungs (1995) ADPE (Abiotic Depletion Potential Elements) und ADPF (Abiotic Depletion Potential Fossil) van Oers et al. (2002) | Erschöpfungspotenzial auf der Basis des Verhältnisses zwischen Fördermenge, Regenerationsrate und Reserve. | ADPE: kg Sb Äq. ADPF: MJ | <ul style="list-style-type: none"> - Wird ständig diskutiert und aktualisiert, um die Abschätzung der Erschöpfung zu verbessern (van Oers & Guinée, 2016). - Akzeptanz von Europäischer Kommission als LCA Indikator für Erschöpfung (Zampori & Pant, 2019). - Wird hinsichtlich EDPS als Indikator verwendet (EPD International, 2023). - ÖKOBAUDAT Indikatoren entsprechen den ILCD-EDP Datenformat, wo ADP erfasst wird (Bundesinstitut für Bau- & Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, 2019). - Trennung von APDE und ADPF ermöglicht stoffspezifische Abschätzung der Erschöpfung (van Oers et al., 2002). | <ul style="list-style-type: none"> - Die ultimativen Reserven überschätzen die nutzbare Materialmenge in der Erde (Schneider et al., 2011; van Oers et al., 2002). - Verweise auf ultimative Reserven sind problematisch, da sie zu falschen Schlussfolgerungen bei der Quantifizierung von verfügbaren Beständen führen (United Nations Environment Programme, 2011). - Die Erfassung von Reserven liefert nur begrenzte Informationen über die geologische Verfügbarkeit, da diese Zahlen einen starken wirtschaftlichen Bezug haben (USGS, 2014). - Erschöpfungsproblem überschreitet ökonomisch-ökologische Grenzen, Reserven sind abhängig von zukünftigen Technologien (van Oers & Guinée, 2016). - Viele Metalle treten nicht einzeln auf, sondern gemeinsam mit Hauptmetallen (Hagelüken & Meskers, 2010). - Anthropogene Lager sind nicht erfasst (van Oers & Guinée, 2016). | <ul style="list-style-type: none"> - LCA-Praktiken in Deutschland und den Niederlanden- CML Methode (Guinée et al., 2001; ÖKOBAU DAT, 2023) - BNB (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, 2017) - DGNB (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen, 2018) - SCARCE Methode (Bach, Finogenova et al., 2017) - ESSENZ Methode (Bach et al., 2016) |
| Erschöpfung abiotischer Rohstoffe | AADP: Anthropogenic Stock Extended Abiotic Depletion Potential Schneider et al. (2011), Schneider et al. (2015) | Anpassung des ADP unter Berücksichtigung der Materialmenge in anthropogenen Beständen. | kg Sb-Äq. | <ul style="list-style-type: none"> - Berücksichtigt nicht nur die Reserven in der Erdkruste, sondern auch anthropogenen Bestand (Schneider et al., 2015) - Ansatz, bei dem Gebäude als Ressource in Bewertungen berücksichtigt werden (Randebrock et al., 2023). - Bewertung mit <i>ultimately extractable reserves</i> führt zu realistischeren Ergebnissen als die derzeit verwendeten Ressourcenzahlen (Schneider et al., 2015). | <ul style="list-style-type: none"> - Die Erfassung von Reserven liefert nur begrenzte Informationen über die geologische Verfügbarkeit, da diese Zahlen einen starken wirtschaftlichen Bezug haben (USGS, 2014). - Begrenzte Datenverfügbarkeit (Randebrock et al., 2023; Schneider et al., 2015). | <ul style="list-style-type: none"> - Fallstudie über Lithium-Batterien (Peters & Weil, 2016) - Versuch der Anwendung in der Kritikalitätsbewertung für die Bauindustrie (Randebrock et al., 2023) |

| Was wird bewertet? | Bewertungsmethode/ Entwickelt von | Definition | Einheit | Vorteile | Nachteile oder Limitationen | Einsatzbeispiele |
|--|--|---|------------|--|---|---|
| Erschöpfung abiotischer Rohstoffe. Fokus auf Metalle und fossile Energieträger | Surplus Energy Goedkoop und Spruiensma (2001) | Erschöpfungspotenzial auf der Grundlage des überschüssigen Energiebedarfs für die Gewinnung des Materials im Verhältnis zu seiner Konzentration. | MJ surplus | <ul style="list-style-type: none"> - Entscheidend ist nicht die Menge, sondern die Qualität einer Ressource (Goedkoop & Spruiensma, 2001). - Modell ist nicht von den öffentlichen Mitteilungen der Bergbauunternehmen über ihre Prospektionsergebnisse abhängig (Goedkoop & Spruiensma, 2001). - Indikatoren für jede Schadensbewertungsperspektive: Egalitaristen, Hierarchisten und Individualisten (Goedkoop & Spruiensma, 2001). | <ul style="list-style-type: none"> - Operativen- oder Datenunsicherheit (Goedkoop & Spruiensma, 2001). - Modellunsicherheiten werden durch unvermeidbare ethische und somit wertbasierte Entscheidungen verursacht (Goedkoop & Spruiensma, 2001). - Modell berücksichtigt zukünftige Technologien und Recyclerraten nicht (Goedkoop & Spruiensma, 2001). | <ul style="list-style-type: none"> - Eco Indicator 99 (Goedkoop & Spruiensma, 2001) - ReCIPE (Goedkoop et al., 2008) - IMPACT 2002+ (Joliet et al., 2003) - BEES+ (Lippiat, 2007) |
| Verbrauch abiotischer Rohstoffe | Distance to target (DT) Alting et al. (1997), Hauschild und Potting (2005) | <ul style="list-style-type: none"> - Verwendet politische Reduktionsziele, um die Gewichtungsfaktoren für die Ressourcenkategorie zu bestimmen. - Faktoren werden berechnet, indem die aktuellen Auswirkungen mit den politischen Reduktionszielen verglichen werden. | mPR | <ul style="list-style-type: none"> - PR gilt als ein verständliches, vergleichendes Maß (Alting et al., 1997). - Liefert leicht interpretierbare Zahlen, indem sie den aktuellen Ressourcenverbrauch mit den Reserven für zukünftige Generationen vergleicht (Alting et al., 1997). | <ul style="list-style-type: none"> - Berücksichtigt nur die Knappheit auf der Grundlage des Verbrauchs im Verhältnis zu den Reserven; schließt andere Faktoren wie Reversibilität, Verwendbarkeit oder Substituierbarkeit aus (Alting et al., 1997). - Berücksichtigt den dynamischen Charakter der Reserven nicht (Alting et al., 1997). | EDIP (Hauschild & Potting, 2005) |
| Exergie, Erschöpfung der acht Ressourcenkategorien: fossile, nukleare, Wasserkraft, Biomasse, andere erneuerbare Energien, Wasser, Mineralien und Metalle. | CExD: The Cumulative Exergy Demand (CExD) Bösch et al. (2007) | Zeigt die Qualität der Ressourcen an und gibt Auskunft über die gesamte Exergie, die der Natur für ein Produkt entnommen wird. | MJ | <ul style="list-style-type: none"> - Bewertet die Qualität der Energie auch bei nicht-energetischen Ressourcen wie Mineralien und Metalle (Bösch et al., 2007). - Da die Exergie eine inhärente Eigenschaft einer Ressource ist, sind weniger Annahmen und subjektive Entscheidungen bei der Festlegung von CFs erforderlich (Bösch et al., 2007). - Kombination des Exergiekonzepts mit den ecoinvent-Daten macht es zu einem wertvollen Werkzeug für LCA-Praktiker:innen (Bösch et al., 2007). - Klassifiziert die Exergie in acht verschiedene Ressourcenkategorien und bietet so eine umfassende Sicht auf den Ressourcenverbrauch (Bösch et al., 2007). | <ul style="list-style-type: none"> - Begrenzt auf Exergieverluste der natürlichen Ressource; schließt die des ökologischen Systems aus (Nwodo & Anumba, 2020). - Schließt erneuerbare primäre Exergieressourcen nicht aus (Nwodo & Anumba, 2020). - Die Berechnungen können komplex sein und erfordern detaillierte Informationen über die thermodynamischen Eigenschaften der Materialien (Bösch et al., 2007). | ecoinvent Datenbank für unterschiedliche LCA Methoden (Ecoinvent Centre, 2013) |

| Was wird bewertet? | Bewertungsmethode/ Entwickelt von | Definition | Einheit | Vorteile | Nachteile oder Limitationen | Einsatzbeispiele |
|--|---|---|--|---|---|--|
| Erschöpfung, physikalische Verfügbarkeit biotischer Rohstoffe | BRAI: Biotic Resource Availability Indicator (Bach, Berger et al., 2017) | Erschöpfungspotenzial auf der Basis des Verhältnisses zwischen Fördermenge, Regenerationsrate und Reserve. | 1/Individuum | <ul style="list-style-type: none"> - Einer der wenigen Ansätze zur Erschöpfung biotischer Ressourcen und schließt damit eine Lücke im Bereich der LCA (Bach, Berger et al., 2017). - Die Einbeziehung des TSI berücksichtigt die relative Bedeutung des Erhalts bedrohter Arten (Bach, Berger et al., 2017). - Der TSI basiert auf der weltweit anerkannten Roten Liste der bedrohten Arten der IUCN; verleiht der Bewertung einen standardisierten Ansatz (Bach, Berger et al., 2017). - Übersetzt qualitative Bedrohungsstufen von Arten in quantitative Werte (Bach, Berger et al., 2017). | <ul style="list-style-type: none"> - Neuer Ansatz, muss noch verfeinert und validiert werden und bedarf einer breiteren Akzeptanz in der Praxis (Bach, Berger et al., 2017). - Bietet nur eine aktuelle Perspektive auf die Erschöpfung von Ressourcen und berücksichtigt keine historischen Erschöpfungstrends (Bach, Berger et al., 2017). - Die Übersetzung von qualitativen Bedrohungsgraden in quantitative Werte führt zu einem Grad an Subjektivität und Diskussionspotenzial über die zugewiesenen Werte (Bach, Berger et al., 2017). - Geringe Datenverfügbarkeit (Bach, Berger et al., 2017). | BIRD Methode zur Bewertung der Verfügbarkeit von terrestrischen biotischen Materialien in Produktsystemen (Bach, Berger et al., 2017) |
| Ressourceneffizienz abiotischer Rohstoffe. Entwickelt für Metalle und fossile Brennstoffe. | ESSENZ TU Berlin, Daimler, Deutsches Kupferinstitut, Evonik, Knauer, Siemens, Thyssen-Krupp, Bach et al. (2016) | <ul style="list-style-type: none"> - Integrierte Methode zur ganzheitlichen Berechnung und Messung von Ressourceneffizienz. - Verfügt über Indikatoren zur ökonomischen, ökologischen und sozialen Dimension der Ressourcenverfügbarkeit. | Vergleichende Methode: Gesamtergebnisse werden in Diagrammen dargestellt | <ul style="list-style-type: none"> - Berücksichtigt 3 Nachhaltigkeitsebenen: ökonomisch, ökologisch, sozial (Bach et al., 2016). - CFs für 36 Metalle und vier fossile Rohstoffe vorhanden, erhöht Anwendbarkeit (Bach et al., 2016). - Framework auf andere Materialien übertragbar (z. B. Holz) (Bach et al., 2016). - Beinhaltet Methodik für Bewertung von Ressourcenverfügbarkeit, Umweltauswirkungen, anthropogenen Bestand (Struck & Flamme, 2023). - Bietet umfassendes Verständnis von Ressourceneffizienz (Struck & Flamme, 2023). - Angepasst an den Bausektor für die Bestimmung von Ressourcenknappheit (Randebröck et al., 2023). | <ul style="list-style-type: none"> - Ansatz mit Unsicherheiten. Ergebnisinterpretation muss beachtet werden (Bach et al., 2016). - Sozioökonomische Verfügbarkeit betrifft nur Primärmaterialien, Sekundärmaterialien sind nicht einbezogen (Bach et al., 2016). - Primär für Elektrogeräte entwickelt, Baumineralien nicht berücksichtigt (Struck & Flamme, 2023). - Mangelnde Datenverfügbarkeit kann zum Ausschluss einer Kategorie führen (Bach et al., 2016; Randebröck et al., 2023). - Recyclingfähigkeit wird nicht bewertet (Struck & Flamme, 2023). - Große Anzahl von Dimensionen kann die Integration in die LCA-Praxis erschweren. | <ul style="list-style-type: none"> - Fallstudie über Batterien (Pelzter et al., 2022) - Angepasst an den Bausektor (Randebröck et al., 2023) |

| Was wird bewertet? | Bewertungsmethode/ Entwickelt von | Definition | Einheit | Vorteile | Nachteile oder Limitationen | Einsatzbeispiele |
|--|---|--|--|---|--|--|
| Ressourceneffizienz von Baustoffen/ Konstruktionselementen | Struck & Flamme Struck und Flamme (2023) | Nutzwertanalyse für die Wiederverwendbarkeit und Recyclingfähigkeit von Bauteilen, die in eine Bewertung der Ressourceneffizienz einfließen kann, um das ressourceneffizienteste Bauteil auszuwählen. | vergleichende Methode: Gesamtergebnisse werden in Diagrammen dargestellt | <ul style="list-style-type: none"> - Nutzwertanalyse gilt als die am besten geeignete Methode innerhalb der multikriteriellen Entscheidungsfindung (Schuh, 2001). - Erste RE-Methode, die die Recyclingfähigkeit von Bauteilen berücksichtigt (Struck & Flamme, 2023). - Durch die Bewertungstabellen transparent und nachvollziehbar (Struck & Flamme, 2023). - Findet auf Bauteilebene statt (Struck & Flamme, 2023). - Ermöglicht einen Vergleich verschiedener Elementdesigns oder Bauweisen für eine bestimmte Anwendung, z.B. in der frühen Entwurfsphase (Struck & Flamme, 2023). | <ul style="list-style-type: none"> - Die Schwächen der Bewertung ergeben sich aus den Schwächen der Nutzwertanalyse. Die Gewichtung der Kriterien wurde durch direkte Wahl festgelegt und unterliegt der Subjektivität (Struck & Flamme, 2023) - Da es sich bei der Charakterisierung nicht um metrische Größen handelt, bleibt immer ein Spielraum für Interpretationen (Struck & Flamme, 2023). - Große Anzahl von Dimensionen kann die Integration in die LCA-Praxis erschweren | Methode wurde kürzlich veröffentlicht (Februar 2023), Fallstudie in Struck und Flamme (2023) |
| Verfügbarkeit biotischer Rohstoffe | BIRD Bach, Berger et al. (2017) | Bewertung der Verfügbarkeit von terrestrischen biotischen Materialien entlang von Lieferketten unter Berücksichtigung von fünf Dimensionen: physisch, sozioökonomisch, abiotisch, sozial und ökologisch. | vergleichende Methode: Gesamtergebnisse werden in Diagrammen dargestellt | <ul style="list-style-type: none"> - Erster Bewertungsrahmen, um die Verfügbarkeit von biotischen Materialien umfassend zu bewerten (Bach, Berger et al., 2017) - Berücksichtigt physische, sozioökonomische, abiotische, sozialer und umweltbedingte Einschränkungen (Bach, Berger et al., 2017) - Entwickelt, um in LCA integriert zu werden, wodurch es für die Bewertung von Produktsystemen relevant wird (Bach, Berger et al., 2017). | <ul style="list-style-type: none"> - Geringe Datenverfügbarkeit für bestimmte Indikatoren (Bach, Berger et al., 2017). - Probleme bei der Umwandlung qualitativer Daten in quantitative Daten, insbesondere wenn sie aus unterschiedlichen Quellen stammen (Bach, Berger et al., 2017). - Die Auswahl der Indikatoren für die Einhaltung von Sozialstandards muss für biotische Materialien überprüft werden (Bach, Berger et al., 2017). - Es fehlt an ausgereiften Methoden zur Bewertung wichtiger Umweltaspekte wie dem Biodiversitätsverlust (Bach, Berger et al., 2017). - Die Qualität und Reife der zugrunde liegenden Daten kann zu Unsicherheiten führen (Bach, Berger et al., 2017). - Die Integration in die LCA ist begrenzt (Bach, Berger et al., 2017). | Fallstudie Biodiesel (Bach, Berger et al., 2017) |

| Was wird bewertet? | Bewertungsmethode/ Entwickelt von | Definition | Einheit | Vorteile | Nachteile oder Limitationen | Einsatzbeispiele |
|--|--|--|---|---|--|--|
| Kreislauffähigkeit von Baukonstruktionen | Urban Mining Index (UMI) Rosen (2021) | Systematik zur Bewertung der Kreislauffähigkeit von Baukonstruktionen und Gebäuden in der Neubauplanung. Bewertung der Materialität, Konstruktion und Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus zur Abschätzung des Potenzials der sortenreinen Wertstoffrückgewinnung. | Zwischenergebnisse werden in Diagrammen und Tabellen dargestellt. Endergebnis in %. | <ul style="list-style-type: none"> - Ganzheitliche und umfassende Bewertung von Kreislauffähigkeit. - Berücksichtigt zentrale Aspekte der Wiederverwendbarkeit von Bauteilen, hauptsächlich das gesamte Lebenszyklus. - Besonders für Baurohstoffe und -materialien, Bauteilschichten und -elementen, Bauteile und Gebäude konzipiert. - Unterscheidet zwischen Pre-Use und Post-Use und orientiert sich an der aktuellen Praxis. - Berücksichtigt sowohl ökologische als auch wirtschaftliche Aspekte. - 100-Punkte-Bewertungssystem ist den deutschen Zertifizierungssystemen anpassbar (Rosen, 2021) | <ul style="list-style-type: none"> - Tatsächliche Nutzungsdauern können von der Nutzungsdauerreferenz-tabelle abweichen. - Technologische Fortschritte bei der Materialentwicklung können zu Unsicherheiten in der Bewertung führen. - Aufgrund des Masseneinsatzes bei der Bewertung können schwere Baustoffe größeren Gewicht der Bewertung haben als leichte. - Darstellung auf Bauteilebene ist für Nutzer etwas schwer nachvollziehbar, hohe Komplexität. (Rosen, 2021) | Neubauten: Planung des Modellprojekts „Rathaus Korbach“ (Rosen, 2021). |