
1. Motivation, Fragestellung und Ziele der Arbeit

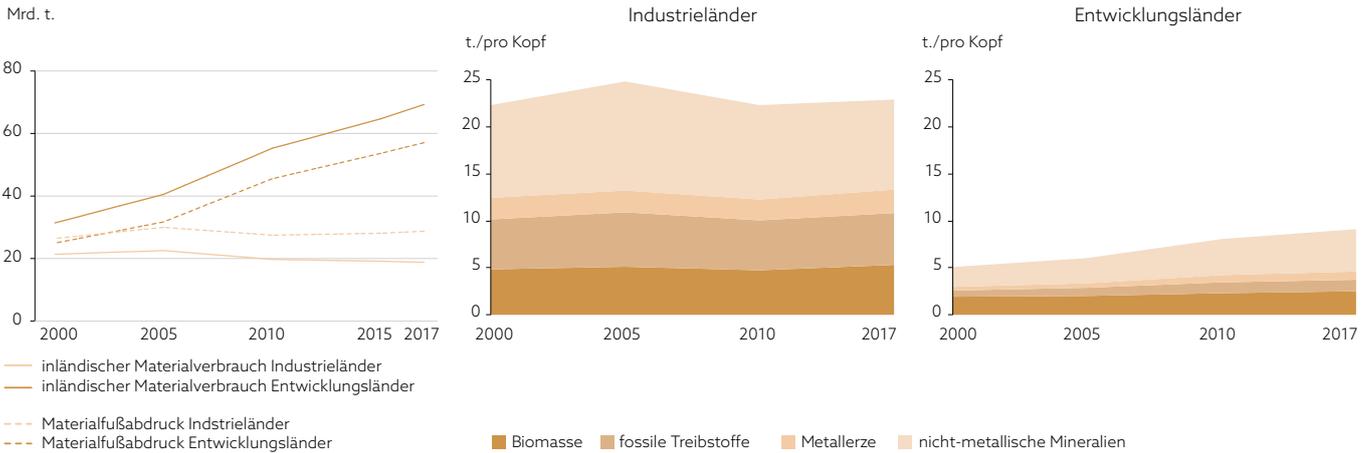
Die Weltwirtschaft steht vor einem gravierenden Wandel. Globale Probleme wie die zunehmend spürbar werdenden Auswirkungen des anthropogen verursachten Klimawandels, schwindende Ressourcen, soziale Ungleichheiten und damit einhergehende Flüchtlingsströme bestimmen die Nachrichten und stellen Politik und Wirtschaft vor immense Herausforderungen.

Unsere gebaute Umwelt trägt zu einem Großteil der klimaschädlichen Emissionen bei: Die Bauwirtschaft verursacht den größten Ressourcenverbrauch und das höchste Abfallaufkommen aller Wirtschaftszweige.

Unter Experten ist das Bewusstsein längst da: Unser lineares Wirtschaftssystem, in dem der Erde Ressourcen entnommen, genutzt und verbrannt oder entsorgt werden, muss einem System weichen, in dem wir verträglich mit unserer Umwelt und den begrenzten planetaren Ressourcen leben können. Begriffe wie Circular Economy, zirkuläre Wertschöpfung und nicht zuletzt Urban Mining stehen für verträgliche Wirtschaftskreisläufe.

Dieses Eingangskapitel geht zunächst auf das Thema Ressourcenverbrauch näher ein und beleuchtet die globalen und nationalen Ziele nachhaltigen Wirtschaftens, um dann zur konkreten Fragestellung zu kommen, wie ein „Urban Mining Index“ (UMI) einen Wandel in der Baubranche unterstützen kann.

1.1.	Motivation	4
1.2.	Übergeordnete Ziele	6
1.3.	Fragestellung	10
1.4.	Ziele dieser Arbeit	12



A 1.2

A 1.3

1.1. Motivation

1.1.1. Ressourcenverbrauch

Entgegen der Weisheit von Hans Carl von Carlowitz [2], wonach dem Wald nicht mehr Holz entnommen werden darf, als nachwachsen kann, verbraucht die Menschheit heute mehr biotische Ressourcen, als die Erde durch natürliche Prozesse erneuern kann (s. „Earth Overshoot Day“ in Kapitel 2, Abb. A 2.7). Noch gravierender ist der Verbrauch biotisch-fossiler Ressourcen wie Kohle, Öl und Gas, die über Jahrtausende entstanden sind und innerhalb relativ kurzer Zeit verbraucht werden – mit weitreichenden negativen Folgen wie Klimawandel und Artensterben. Ebenso gravierend ist der Verbrauch abiotischer Ressourcen wie metallische und mineralische Materialien, da diese – im Gegensatz zu biotischen Ressourcen – im stofflich geschlossenen System Erde nicht erneuerbar sind.

Den größten Ressourcenverbrauch pro Kopf haben gemäß Statistiken der Vereinten Nationen (UN) die Industriestaaten, wobei der überwiegende Teil des Ressourcenverbrauchs sowohl in Industrie- als auch in Entwicklungsländern auf nicht metallische Mineralien entfällt (s. Abb. A 1.3). In den Entwicklungsländern hat deren Verbrauch in den letzten zwei Jahrzehnten stark zugenommen, was die Berichterstatter der UN [4] auf den Ausbau der Infrastruktur und den Bau von Gebäuden zurückführen. Noch stärker ist in den Entwicklungsländern aufgrund der wachsenden Bevölkerung der inländische Materialverbrauch gestiegen (Domestic Material Consumption – DMC; s. Abb. A 1.2).

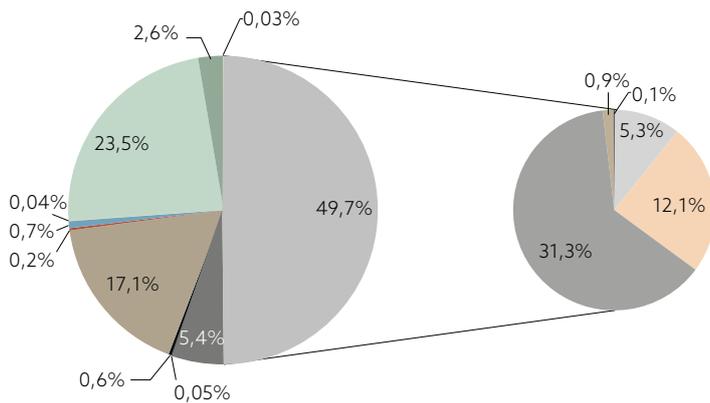
Unter der Annahme, dass die wachsende Bevölkerung vieler Entwicklungsländer den hohen Lebensstandard der industrialisierten Länder anstrebt, ist davon auszugehen, dass die derzeitigen Wirtschaftsmodelle mit ihrem hohen Ressourcenverbrauch nicht mehr funktionieren können. Hinzu kommt, dass die Industriestaaten derzeit auf Kosten der ärmeren Länder wirtschaften, was die Graphen in Abb. A 1.2 erkennen lassen: Der inländische Materialverbrauch der Entwicklungsländer ist höher als der Materialfußabdruck, was bedeutet, dass Rohstoffe exportiert werden. Der inländische Materialverbrauch der Industriestaaten ist dagegen niedriger als ihr Materialfußabdruck, was darauf hindeutet, dass diese Länder Materialien importieren. [3] Durch Weiterverarbeitung und Export von Produkten haben sie eine hohe Wertschöpfung und ein hohes Einkommen.

A 1.2 Inländischer Materialverbrauch (Domestic Material Consumption – DMC) und Materialfußabdruck in Industrie- und Entwicklungsländern, Jahre 2000-2017 [3]

A 1.3 Materialfußabdruck pro Kopf (Raw Material Consumption – RMC) nach Rohstoffart in Industrie- und Entwicklungsländern, Jahre 2000-2017 [4]

„Der materielle Fußabdruck einer Volkswirtschaft bezieht sich auf die Gesamtmenge an Rohstoffen, die weltweit - über die gesamte Lieferkette - gefördert wird, um den Endverbrauch dieser Volkswirtschaft zu decken.“ [4]

A 1.4 Genutzte Inländische Rohstoffentnahme in Deutschland 2015, nach Rohstoffgruppen [5]



	[Mio. t]	[%]
Baumineralien	517,3	49,7
davon		
Natursteine, nicht gebrochen	1,3	0,1
Kalk-, Gipsstein, Anhydrit, Kreide, Dolomit, Schiefer	54,8	5,3
Bausande u.a. natürliche Sande	126,4	12,1
Feldsteine, Kiese, gebroch. Natursteine	325,9	31,3
Tone, Baumineralien a.n.g.	8,9	0,9
Erze	0,5	0,05
Industriemineralien	56,6	5,4
Steinkohle	6,2	0,6
Braunkohle	178,2	17,1
Erdöl	2,4	0,2
Erdgas, Grubengas und Erdölgas	7,6	0,7
sonstige Energieträger	0,5	0,04
Pflanzl. Biomasse, Landwirtschaft	244,2	23,5
Pflanzl. Biomasse, Forstwirtschaft	27,0	2,6
Biomasse von Tieren	0,3	0,03
Gesamt	1.040,8	100,0

A 1.4

Bei Betrachtung der nationalen Rohstoffentnahmen in Deutschland (Abb. A 1.4), ist erkennbar, dass auch hier rund die Hälfte aller Entnahmen auf Baumineralien entfällt. Der Bedarf des Bauwesens insgesamt dürfte noch höher sein, da z.B. Metalle (aus Erzen) vorwiegend importiert werden.

Vor dem Hintergrund einer weiterhin steigenden Weltbevölkerung ist somit ein (Preis-)Kampf um Rohstoffe absehbar, wenn das bisherige Wirtschaftsmodell fortgeführt wird.

Ressourcenschonendes Bauen ist damit eine Notwendigkeit. Alle Akteure der Baubranche stehen in der Verantwortung, den Ressourcenverbrauch im Bauwesen zu minimieren.

Hierzu werden in der öffentlichen Debatte drei Strategien diskutiert:

- Suffizienz (Verzicht),
- Effizienz (Verbesserung) und
- Konsistenz (etwas beständig/verträglich machen).

In Kapitel 2 wird erläutert, dass die Konsistenz zu den wirksamsten Wegen nachhaltigen Handelns gehört. Dies wird auch als „Ökoeffektivität“ bezeichnet: eine Wirtschaftsweise, in der es keine Abfälle gibt. Aus Produkten werden durch Wiederverwendung und -verwertung neue Produkte. Da unser Planet – die Erde – ein zwar energetisch offenes, aber materiell geschlossenes System ist, ist eine zirkuläre Wirtschaft die einzige, die in diesem geschlossenen System, in dem der Mensch immer mehr Raum einnimmt, langfristig funktionieren kann.

1.1.2. Urban Mining

Bezogen auf das Bauen bildet der Begriff „Urban Mining“¹ eine zirkuläre Wirtschaftsweise bildhaft ab. Urban Mining beschreibt unsere Städte und Siedlungen sowie alle darin enthaltenen Gebäude und Güter als riesiges anthropogenes Rohstofflager. Laut Umweltbundesamt [6] sind darin allein in Deutschland rund 28 Mrd. Tonnen mineralische Materialien, Metalle, Kunststoffe, etc. gebunden. Dieses Lager gilt es, wieder aufzuschließen und als Rohstoffquelle zu verwenden. Damit dies künftigen Generationen möglich ist, muss es anders als bisher gestaltet sein.

Für das Urban-Mining-gerechte Bauen hat Hillebrandt [7] den Begriff „Urban Mining Design“ geprägt. Nur wenn die Kreislauffähigkeit von Bau-

1 Englisch, frei übersetzt: Abbau/Bergbau im städtischen Kontext

werken als Entwurfsparameter verstanden wird, kann der enorme Ressourcenverbrauch im Bauwesen auf ein nachhaltiges Maß reduziert werden. Um die Konstruktionsprinzipien des Urban-Mining-gerechten Bauens berücksichtigen zu können, sind auch neue, quantitative Bewertungsmaßstäbe nötig, an denen die Kreislauffähigkeit von Gebäuden und Baukonstruktionen gemessen werden kann. **Das zirkuläre, Urban-Mining-gerechte Bauen muss messbar gemacht werden.**

1.2. Übergeordnete Ziele

Der nachhaltige Umgang mit materiellen Ressourcen ist ein wesentliches Ziel der Vereinten Nationen in ihren Bemühungen um eine gerechtere Welt. Nach Auffassung der Verfasserin ist die nachhaltige Ressourcenverwendung sogar ein Basiskriterium, um die übrigen hohen Ziele wie Bekämpfung von Armut, Hunger und Ungleichheiten, Erhaltung von Frieden, Gesundheit und Wohlergehen sowie den Schutz des Klimas zu erreichen. **Nichts Geringeres als die Ziele der UN können deshalb als übergeordnete Ziele und Motivation für die Wahl des Themas dieser Arbeit bezeichnet werden – zumal sie messbar sind.**

1.2.1. Die Agenda 2030 der Vereinten Nationen

Im September 2015 hat die Generalversammlung der Vereinten Nationen die „Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung“ verabschiedet. Damit strebt die UN eine „Transformation der Welt zum Besseren“ [9] im Sinne einer nachhaltigen Umgestaltung von Gesellschaft, Wirtschaft und Umwelt bis zum Jahr 2030 an.

Auf europäischer Ebene hat die EU-Kommission Strategien und Maßnahmen zur Verwirklichung der Ziele für eine nachhaltige Entwicklung erarbeitet. Konzeptionell setzt die EU die Agenda 2030 gemeinsam mit ihren Mitgliedsstaaten um. Die Bundesregierung hat sich mit der Neuauflage der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie im Januar 2017 zur Umsetzung der Agenda 2030 verpflichtet [10].

Die Sustainable Development Goals

Die Agenda 2030 umfasst 17 globale Ziele, die sogenannten SDGs (Sustainable Development Goals), auf Deutsch: Ziele für nachhaltige Entwicklung, s. Abb. A 1, die in 169 Unterziele unterteilt sind.

Der Umgang mit den begrenzten materiellen Ressourcen unseres Planeten wird vorwiegend in zwei eng miteinander verknüpften Nachhaltigkeitszielen thematisiert:

- *Ziel 8: Menschenwürdige Arbeit und Wirtschaftswachstum*
SDG 8 zielt auf „dauerhaftes, breitenwirksames und nachhaltiges Wirtschaftswachstum, produktive Vollbeschäftigung und menschenwürdige Arbeit für alle“. [11]

Um das angestrebte Wirtschaftswachstum in Einklang mit dem nachfolgenden Ziel 12 zu bringen, wurde in einem Unterziel formuliert, bis 2030 die weltweite Ressourceneffizienz in Konsum und Produktion Schritt für Schritt zu verbessern und die Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Umweltzerstörung voranzutreiben.

Nr.	Ziel	Indikatoren der UN	Indikatoren der EU	Deutsche Indikatoren
8	Menschenwürdige Arbeit und Wirtschaftswachstum			
8.4	Bis 2030 die weltweite Ressourceneffizienz in Konsum und Produktion Schritt für Schritt verbessern und die Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Umweltzerstörung anstreben, im Einklang mit dem Zehnjahres-Programm für nachhaltigen Konsum und Produktion (Ziel 12), wobei die entwickelten Länder die Führung übernehmen	8.4.1 Materialfußabdruck, (absolut, pro Kopf, und pro BIP) 8.4.2 Inlandsmaterialverbrauch (absolut, pro Kopf, und pro BIP)		8.1 Gesamtrohstoffproduktivität (Wert aller an die letzte Verwendung abgegebenen Güter (in Euro) in Relation zur Masse der für ihre Produktion im In- und Ausland eingesetzten Rohstoffe (in Tonnen))
12	Nachhaltiger Konsum und Produktion			
12.2	Bis 2030 die nachhaltige Bewirtschaftung und effiziente Nutzung der natürlichen Ressourcen erreichen	12.2.1 Materialfußabdruck (absolut, pro Kopf, und pro BIP) 12.2.2 Inlandsmaterialverbrauch (absolut, pro Kopf, und pro BIP)	12.20 Ressourcenproduktivität und Inlandsmaterialverbrauch	
12.5	Bis 2030 das Abfallaufkommen durch Vermeidung, Verminderung, Wiederverwertung und Wiederverwendung deutlich verringern	12.5.1 Nationale Recyclingquote, tonnenweise recyceltes Material	12.41 Nutzungsrate wiederverwendbarer Stoffe 12.50 Abfallaufkommen ohne dominante mineralische Abfälle 12.60 Verwertungsquote von Abfällen ohne dominante mineralische Abfälle	

A 1.5

- *Ziel 12: Nachhaltiger Konsum und Produktion*
SDG 12 zielt in Anbetracht der begrenzten Ressourcen der Erde explizit auf die zuvor beschriebene notwendige Veränderung unserer Wirtschaftsweise. In Unterzielen wurde formuliert, bis 2030 die nachhaltige Bewirtschaftung und effiziente Nutzung der natürlichen Ressourcen zu erreichen und das Abfallaufkommen durch Vermeidung, Wiederverwendung und Wiederverwertung deutlich zu verringern.

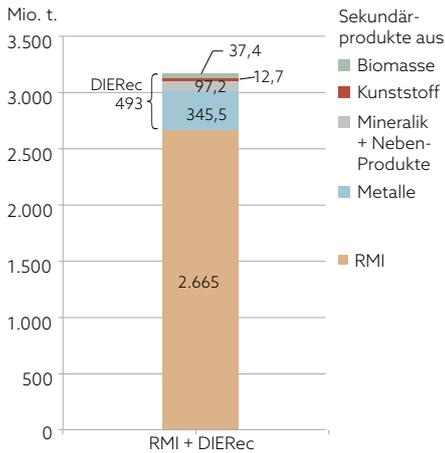
A 1.5 Sustainable Development Goals mit besonderer Relevanz für den Verbrauch stofflicher Ressourcen und Zuordnung relevanter Indikatoren auf den verschiedenen politischen Ebenen

Um die Erreichung der SDGs überprüfen zu können, wurden die Unterziele mit messbaren globalen Indikatoren hinterlegt. Konkrete Ziele für SDG 8 und 12, beispielsweise ein maximaler Primärressourcenverbrauch pro Kopf, wurden jedoch nicht definiert.²

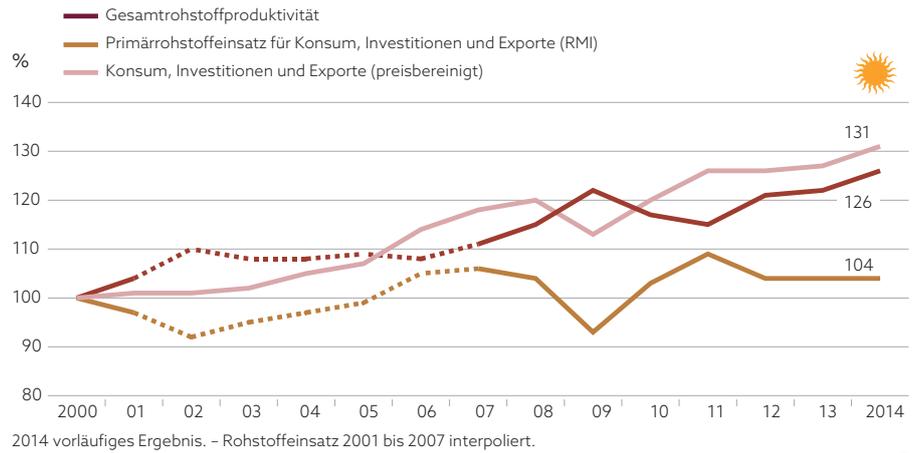
1.2.2. Umsetzung der Agenda 2030 auf deutscher und europäischer Ebene

Auf nationaler Ebene hat Deutschland in seiner Nachhaltigkeitsstrategie 63 relevante Indikatoren definiert. Darüber hinaus wurde von der Europäischen Kommission [12] eine Reihe von Indikatoren zur Überwachung der SDGs (durch Eurostat) auf EU-Ebene veröffentlicht. Abb. A 1.5 zeigt die Zuordnung der Indikatoren zu den Unterzielen der SDGs mit besonderer Relevanz für den Verbrauch stofflicher Ressourcen auf den verschiedenen politischen Ebenen.

² Die Entwicklung der Indikatoren erfolgte durch die Statistische Kommission der Vereinten Nationen in Zusammenarbeit mit Statistischen Ämtern einiger UN-Mitgliedsstaaten (darunter Deutschland), die auch gemeinsam ein Monitoring zur Überprüfung der Fortschritte bei der Umsetzung der SDGs durchführen.



A 1.6



A 1.7

Bewertung der Ziele zum Rohstoffverbrauch auf nationaler Ebene

Deutschland plant, mit dem Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes) [13] die Gesamtrohstoffproduktivität zu steigern, um das Wirtschaftswachstum vom Rohstoffverbrauch zu entkoppeln (vgl. Kapitel 3.1). Abb. A 1.7 zeigt die Entwicklung des Indikators „Gesamtrohstoffproduktivität in Deutschland“. Mit dem Symbol der Sonne deutet das Statistische Bundesamt an, inwiefern das Ziel, die Gesamtrohstoffproduktivität jährlich um 1,5% zu steigern, erreicht wird.

Bei Betrachtung der Entwicklung des Indikators fällt jedoch auf, dass die Erfüllung der angestrebten Ziele bisher hauptsächlich auf die Erhöhung des Konsums (Bruttoinlandsprodukt + Exporte = Zähler der Gleichung) zurückzuführen ist. Der Rohstoffverbrauch, hier abgegrenzt als Primärrohstoffeinsatz (Raw Material Input –RMI³), ist in den letzten Jahren weitgehend gleich geblieben, befindet sich also nach wie vor auf hohem Niveau. Ein „Weiter so“ beim Rohstoffverbrauch ist aber angesichts der begrenzten Ressourcen der Erde nicht möglich. Um es mit Hans Carl von Carlowitz zu sagen: Der Indikator Gesamtrohstoffproduktivität impliziert, dass dem Wald auf Dauer ruhig mehr Holz entnommen werden dürfe, als nachwachsen kann, wenn dadurch die Wirtschaftsleistung und der Wohlstand steigt. Wie aber lässt sich noch Wohlstand erzielen, wenn der Wald gerodet ist und kein zweiter Wald zur Verfügung steht?

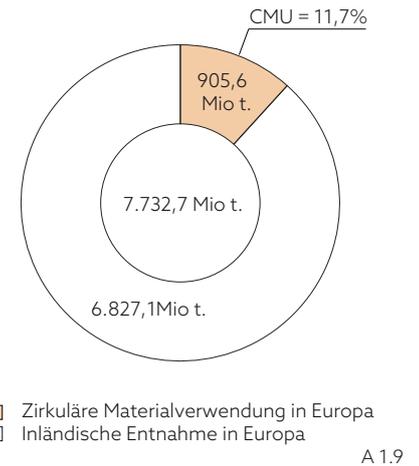
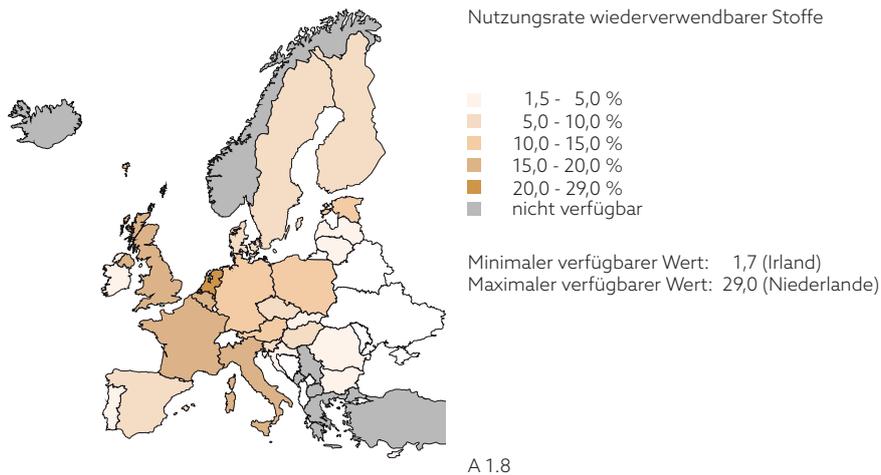
Der Rohstoffverbrauch muss deshalb in den Industrieländern stark gesenkt werden, um die Lebensgrundlagen nachfolgender Generationen nicht einzuschränken.

Bewertung der Ziele zum Rohstoffverbrauch durch die EU

Der Indikator 12.41 der EU-Kommission „Nutzungsrate wiederverwendbarer Stoffe“ [14] (Circular Material Use Rate – CMU) bildet eine nachhaltige Ressourcenverwendung innerhalb der Grenzen des Wachstums am besten ab. Er bestimmt das Verhältnis zurückgewonnener und wieder in die Wirtschaft eingespeister Materialien (zirkuläre Verwendung⁴) zur gesamten Materialverwendung (inländische Entnahme plus zirkuläre Verwendung). Die Abbildungen A 1.8 und A 1.9 zeigen die CMU-Raten der

- A 1.6 Reduzierung des theoretischen Rohstoffbedarfs durch die Sekundärrohstoffwirtschaft – DERec und DERec im Verhältnis zu DMI und RMI für das Jahr 2013, eigene Darstellung, Datenbasis UBA [19]
- A 1.7 Entwicklung der Gesamtrohstoffproduktivität in Deutschland, 2000 = 100% [15]
- A 1.8 Nutzungsrate wiederverwendbarer Stoffe (Circular Material Use Rate – CMU) in % der inländischen Materialverwendung, Europa nach Ländern, 2016 [16]
- A 1.9 Nutzungsrate wiederverwendbarer Stoffe (Circular Material Use Rate – CMU) der 28 EU-Mitgliedsstaaten (gesamt), 2016 [17]

- 3 Der RMI ist definiert als die Gesamtmasse der im Inland gewonnenen Primärrohstoffe und der – in Rohstoffäquivalente umgerechneten – importierten Rohstoffe, Halb- und Fertigwaren. Vgl. UBA 2012: Glossar zum Ressourcenschutz.
- 4 Die zirkuläre Verwendung umfasst dabei die Verwertungsverfahren R2 bis R11 nach Anhang II der Abfallrahmenrichtlinie (s. „Abfallrecht“, Seite 40), d. h. ohne energetische Verwertung und Verfüllung, aber inkl. Kompostierung.



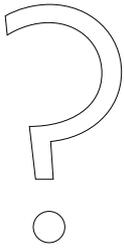
EU-Mitgliedsstaaten im Jahr 2016. Je höher die CMU-Rate, desto mehr werden primäre Rohstoffe durch Sekundärmaterialien ersetzt. Die Rate bildet jedoch noch keine geschlossenen Kreisläufe ab, da das Qualitätsniveau des Recyclings nicht berücksichtigt wird (inkl. Downcycling, vgl. Kapitel 7.2.2).

Ähnliche Effekte zeigen die im Auftrag des Umweltbundesamtes [18] entwickelten Sekundärrohstoffindikatoren „Direct Effects of Recovery“ (DERec) und „Direct and Indirect Effects of Recovery“ (DIERec). Beide Indikatoren stellen die Effekte der Substitution von Primärrohstoffen durch Sekundärrohstoffe und Nebenprodukte dar, wobei der DERec nur die Effekte innerhalb der eigenen Volkswirtschaft abbildet, der DIERec aber die globalen Effekte berücksichtigt, d.h. auch die Vorketten von aus dem Ausland importierten Gütern einbezieht (z.B. Aufbereitung von Erzen im Ausland).

Während der Entstehung der hier vorliegenden Arbeit hat ein Forschungskonsortium unter der Leitung von Steger [19] anhand von 30 untersuchten masserelevanten Materialien aus den Bereichen Metalle, Mineralik, Kunststoffe und Biomasse den Beitrag von Sekundärrohstoffen zur Schonung von Primärrohstoffen für die deutsche Volkswirtschaft quantifiziert. Die in Abb. A 1.6 zusammengefassten Ergebnisse zum Verhältnis DIERec/RMI verdeutlichen, dass durch die inländische Verwertung im Jahr 2013 laut Steger et al. unter Beachtung der ausländischen Vorketten 15,6% Material eingespart werden konnte. Anders formuliert: Ohne die Sekundärrohstoffwirtschaft wäre der Primärrohstoffeinsatz um ca. 18% höher. Sekundärrohstoffe haben damit einen erheblichen Einfluss auf die Gesamtrohstoffproduktivität.

Die Indikatoren bilden ebenfalls keine geschlossenen Kreisläufe ab, da neben einem Downcycling auch Sekundärprodukte zur energetischen Verwertung sowie Nebenprodukte (z.B. REA-Gips) einbezogen werden.

Die beschriebenen Indikatoren und das Monitoring der Nachhaltigkeitsziele können immer nur die Vergangenheit und den Status quo abbilden. Sie dienen sozusagen dem Nachhalten der Nachhaltigkeit. Für eine Transformation der Wirtschaftsweise werden jedoch Indikatoren benötigt, die auch die zukünftigen Potenziale abbilden. Nur wenn diese als Parameter bereits in der Planung berücksichtigt werden, kann die Transformation von der linearen zur zirkulären Bauwirtschaft gelingen.



1.3. Fragestellung

Die zentrale Frage (Leitfrage) dieser Arbeit lautet:

Wie kann das zirkuläre Bauen objektiv messbar gemacht werden?

Das Bauen ist heute sehr komplex. Hohe Ansprüche an die funktionale und technische Qualität von Bauwerken, wie Anforderungen an die Statik und die Dichtigkeit sowie an den Brand-, Wärme- und Schallschutz, haben zu hoch technisierten Baustoffen geführt. Auf der materiellen Ebene wurde die Erfüllung möglichst vieler Anforderungen (in einem Produkt) von der Baustoffindustrie mit der Entwicklung von Verbundwerkstoffen beantwortet, deren Recyclingfähigkeit oft eingeschränkt, wenn nicht gar unmöglich ist.

Termin- und Kostendruck mit Fokus auf die Fertigstellung erfordern einen schnellen Bauablauf. Gestalterische Ansprüche dulden oftmals keine sichtbaren konstruktiven Elemente wie Fugen und Verbindungstechniken. Dies hat zu Konstruktionsweisen mit Verklebungen und Verspachtelungen geführt, die nur schwer wieder lösbar sind.

Dementsprechend ist auch der Rückbau in den letzten Jahrzehnten immer komplexer geworden.

Die Beantwortung der Frage nach der Messbarkeit des zirkulären, Urban-Mining-gerechten Bauens muss deshalb nicht nur die Recyclingfähigkeit sondern auch den Rückbau mit einbeziehen. Die deutschen Zertifizierungssysteme für Nachhaltiges Bauen haben dies in den letzten Jahren versucht. In eigener Praxiserfahrung und in Diskussionen mit den Zertifizierern und anderen Anwendern hat die Verfasserin dieser Arbeit immer wieder festgestellt, dass die Bewertung weitgehend subjektiv durchgeführt wird und zudem wenig anwenderfreundlich ist. Deshalb muss zunächst analysiert werden, welche Instrumente bereits existieren und auf welche Weise die Rückbau- und Recyclingfähigkeit dort bewertet wird (Kapitel 4). Handelt es sich um quantitative oder qualitative Methoden? Qualitative Bewertungsmethoden, z.B. in Form von Checklisten sind zwar einfacher durchzuführen und benötigen keine Datenbasis zur Entwicklung von Maßstäben, doch mit Blick auf die Objektivität sind quantitativ messbare Bewertungen zu bevorzugen.

Weiterhin muss untersucht werden, ob Ergebnisse anderer Forschungsarbeiten aufgegriffen werden können, um diese weiterzuentwickeln oder Teilergebnisse zu nutzen. Aufgrund der Relevanz des Themas für die Bauwirtschaft ist die Entwicklung und Weiterentwicklung von Bewertungssystemen ein laufender Prozess (Kapitel 4.3).

Mit Blick auf die Motivation, messbare Indikatoren für zirkuläres Bauen zu entwickeln, um stoffliche Ressourcen zu schonen, stellen sich folgende untergeordnete Fragen:

- **Wie kann der gesamte Lebenszyklus einbezogen werden?**

Stoffkreisläufe können und sollen über den gesamten Lebenszyklus geschlossen werden, d. h. sowohl in der Herstellungsphase (z. B. durch Einsatz von Sekundärrohstoffen) und in der Nutzungsphase durch austauschbare, möglichst wiederverwendbare Bauelemente

(Re-Use) als auch beim späteren Rückbau durch sortenrein trennbare und wiederverwertbare Baustoffe (Recycling).

- **Was zeichnet ein kreislauffähiges Bauwerk aus und welche quantitativen Parameter gehören dazu?**
Welche Parameter sind geeignet, um Kreislaufpotenziale von Baukonstruktionen zu berechnen, und in welcher Einheit können sie gemessen werden?
- **Auf welcher Ebene können Kreislaufpotenziale gemessen werden?**
Ein Bauwerk setzt sich aus mehreren Bauteilen, Bauelementen, Baustoffen und Materialien zusammen. Deshalb muss untersucht und festgelegt werden, auf welcher Ebene Parameter zur Berechnung von Kreislaufpotenzialen gemessen werden können.
- **Welche Rolle spielt der Rückbau und wie kann er angemessen einbezogen werden?**
Die Rückbaufähigkeit wurde in der Nachhaltigkeitsbewertung bisher eher stiefmütterlich behandelt. Sie ist aber wichtig für die Rückgewinnung sortenreiner Wertstoffe. Für die Bewertung der Rückbaufähigkeit fehlen Grundlagen, mit denen der Einfluss der konstruktiven Ebene auf die Rückgewinnung von Baustoffen in der End-of-Life-Phase beurteilt werden kann.
- **Wie kann die Qualität der Kreislaufpotenziale definiert und abgebildet werden?**
Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der quantitativen Bewertung zur Steigerung des Bauens in geschlossenen Kreisläufen. Es muss deshalb definiert werden, was unter geschlossenen (und offenen) Kreisläufen zu verstehen ist und welche unterschiedlichen Qualitäten der Nachnutzung quantitativ abgebildet werden.
- **Was muss ein Bewertungsinstrument erfüllen, um eine breite Akzeptanz zu erfahren?**
Eine praxistaugliche und anwenderfreundliche Systematik ist Voraussetzung für die Akzeptanz unter Planern. Diese sind die Hauptzielgruppe für den Transfer der Ergebnisse dieser Forschungsarbeit in die Praxis.
- **Und schließlich: Welchen Beitrag kann der Urban Mining Index für die weitere Forschung zum Ressourcen- und Umweltschutz leisten?**
Mit dem Ressourcenverbrauch sind diverse Umweltwirkungen verbunden, z. B. Emissionen, die bei der Herstellung von Baustoffen in die Umwelt gelangen. Da neben dem Ressourcenschutz die Reduzierung von Emissionen, insbesondere von Treibhausgasen, angesichts des anthropogen verursachten Klimawandels höchste Priorität haben sollte, stellt sich die Frage, welchen Beitrag der Urban Mining Index leisten kann, um die Umweltwirkungen des zirkulären Bauens zu messen. Wünschenswert wäre, wenn die Ergebnisse dieser Arbeit dazu beitragen können, die End-of-Life-Phase in der Ökobilanzierung besser abbilden zu können. Hierfür muss der Stand der Forschung zur Ökobilanzierung überprüft und analysiert werden, wie die Promotionsergebnisse in weitere Forschungsarbeiten transferiert werden können.

1.4. Ziele dieser Arbeit

Hauptziel dieser Forschungsarbeit ist die Entwicklung einer Methodik für die objektive Bewertung der zirkulären Eigenschaften von Baukonstruktionen in der Neubauplanung. Aus der Fragestellung ergeben sich folgende Teilziele:

1.4.1. Die Verbindung der Lebenszyklen: Pre-Use-, Use- und Post-Use-Phase

Das Bauen muss in Kreisläufen gedacht werden. In den Baukreislauf kann an jeder Stelle bzw. zu jeder Lebenszyklusphase eingestiegen werden. In dicht besiedelten Gebieten beginnt das Bauen mangels freier Flächen oft mit einem Um- oder Rückbau. Der Bestand kann dann entweder weitergenutzt werden (ggf. nach Sanierung) oder das bestehende Bauwerk wird als urbane Mine genutzt und selektiv zurückbaut, sodass die Baustoffe oder Bauteile für das neue oder andere (regionale) Bauvorhaben nach Aufbereitung wieder eingesetzt werden können.

Die Nutzungszyklen von Bauwerken und ihren Teilen werden aufgrund verschiedener externer Einflüsse immer kürzer. Beispielsweise müssen sich in Großstädten mit hohen Grundstückspreisen Investitionen schnell bezahlt machen. Der Flächendruck führt zu frühzeitigem Abbruch, um Flächen noch effizienter nutzen zu können. Unsere schnelllebige Zeit mit übertriebenen Ansprüchen auf etwas Neues tut ihr Übriges. Je kürzer die Nutzungszeit, desto wichtiger ist es, die Materialien im Kreislauf zu halten.

Bereits in der Planung muss der gesamte Kreislauf gedacht werden. Die Auswahl der Baustoffe und die Art und Weise, wie die einzelnen Komponenten miteinander verbunden werden, spielen eine entscheidende Rolle für den Aufwand mit dem sie am Ende der Nutzungsdauer wieder getrennt werden können.

Die Bewertungsmethode muss somit folgende Aspekte berücksichtigen und damit den aktuell geplanten Lebenszyklus mit dem vorigen und dem anschließenden Lebenszyklus verbinden:

- Pre-Use-Phase
Kreisläufe bereits *vor* der geplanten Nutzung mit der Weiternutzung, Wiederverwendung oder dem Recycling vorhandener, bereits dem Naturkreislauf entnommener Materialien schließen
→ Bewertung des Einsatzes von Sekundär- und Primärmaterial
- Use-Phase
Nutzungsdauer des Bauwerks und seiner Bauteile einbeziehen
→ Austauschhäufigkeiten berücksichtigen
- Post-Use-Phase
Das Schließen von Kreisläufen *nach* der geplanten Nutzung vorausdenken
→ Bewertung der Nachnutzbarkeit von Bauteilen und Baustoffen aus Konstruktionen

1.4.2. Definition von quantitativ messbaren Parametern

Die Grundprinzipien für kreislauffähiges Bauen wurden in den gängigen Instrumenten zur Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden und in der

praxisnahen Literatur, wie dem Atlas Recycling [20], bereits hinreichend beschrieben. Im Wesentlichen zeichnen sich kreislauffähige Bauwerke durch wiederverwendbare Bauteile oder recyclingfähige Baumaterialien sowie leicht demontierbare Konstruktionen und Verbindungstechniken aus.

Für eine objektive Bewertung dieser grundsätzlichen Anforderungen müssen messbare Parameter definiert werden. Dies betrifft sowohl die stoffliche als auch die konstruktive Ebene. Hierfür muss zunächst analysiert werden, wie z.B. Recyclingraten und Recyclingpotenziale von Baustoffen sowie das Rückbaupotenzial von Konstruktionen und Verbindungstechniken abgebildet werden kann. Ziel ist es, messbare Kenngrößen zu definieren, die sich an der Praxis orientieren. Durch empirische Forschung sollen Benchmarks⁵ aus der Rückbau- und Verwertungspraxis erhoben werden, aus denen Indizes entwickelt werden können.

1.4.3. Identifikation, Analyse und Definition geeigneter Bewertungsebenen

„Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile.“ Dieser Satz von Aristoteles trifft seit jeher auch auf Bauwerke zu.

Die Fügung einzelner Komponenten zu einem großen Ganzen kann nicht durch einfache Addition ausgedrückt werden. Einzelne Bauprodukte lassen sich beschreiben, z. B. anhand ihrer Inhaltsstoffe. Hersteller können Sekundärrohstoffanteile angeben und die Recyclingfähigkeit nachweisen. Auf Gebäudeebene haben die Planer und Bauausführenden jedoch aus einzelnen Materialien, Baustoffen, Produkten und Systemen ein Gesamtwerk erstellt. In Kapitel 7.1 wird deshalb analysiert, auf welcher Ebene welche Bewertungen durchgeführt werden können.

1.4.4. Analyse und Bewertung des Rückbaus

Die Bewertung der Rückbaufähigkeit ist ein Kernthema dieser Arbeit. Der Rückbau hat wesentlichen Einfluss auf die Sortenreinheit der zurückzugewinnenden Stoffe. Deshalb sollen unter anderem Rückbauverfahren und -techniken untersucht werden (s. Kapitel 3.3). Bei der Auswahl der Verfahren spielt die Wirtschaftlichkeit des Rückbaus eine entscheidende Rolle. In einer Marktwirtschaft, in der Unternehmen zueinander im Wettbewerb stehen und in der das wirtschaftlichste Angebot in der Regel den Zuschlag erhält, ist die Wirtschaftlichkeit entscheidend für die Durchsetzung des selektiven Rückbaus. Rechtliche Regelungen, die den selektiven Rückbau wirtschaftlich machen könnten, greifen bisher zu kurz. So setzt die Gewerbeabfallverordnung (s. Kapitel 3, Seite 44) an der Stelle der Entsorgung an, und nicht schon beim Rückbau. Da die Verordnung außerdem Ausnahmeregelungen zulässt, wenn die Trennung der Abfälle technisch nicht möglich oder wirtschaftlich unzumutbar ist, wird sich der selektive Rückbau auf Basis dieser Verordnung nur durchsetzen, wenn er

- a) technisch möglich und
- b) wirtschaftlich ist.

⁵ Ein Benchmark (engl.) ist ein Maßstab für den Vergleich von Leistungen, (Quelle: Duden)



A 1.10 Beispiel einer modernen Ruine: seit Jahren leerstehende Tankstelle im Münsterland

Im Extremfall kann ein hoher Rückbau- und Entsorgungsaufwand sogar zu modernen Ruinen führen – sozusagen ungenehmigten Abfalllagern. Gerade in Gebieten mit niedrigen Grundstückspreisen können bei rückläufiger Bautätigkeit (vgl. Kapitel 3.5) solche Problemfälle entstehen, vor allem wenn die Entsorgung aufgrund von Altlasten besonders teuer ist oder die Nutzung vom Flächennutzungsplan eingeschränkt wird (s. Abb. A 1.10).

Der Rückbauaufwand und die Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus müssen für eine objektive Bewertung der Kreislaufkonsistenz genauso messbar gemacht werden wie die Recyclingfähigkeit und etwaige Qualitätsverluste.

Folgende Kernthesen lassen sich festhalten, die bei der Einbeziehung des Rückbauaufwands in die Bewertung zu beachten sind:

- Die sortenreine Trennung ist eine Voraussetzung für ein hochwertiges Recycling.
- Die Wirtschaftlichkeit ist ein entscheidender Faktor für die Durchführung der sortenreinen Trennung.
- Der Wert der zurückzugewinnenden Stoffe spielt eine entscheidende Rolle bei der Ermittlung der Wirtschaftlichkeit.
- Je höher der Aufwand für den Rückbau und die sortenreine Trennung, desto unwirtschaftlicher ist der Rückbau.
- Je wirtschaftlicher der Rückbau und die sortenreine Trennung, desto wahrscheinlicher ist ein hochwertiges Recycling.

Die Parameter zur Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus werden in Kapitel 5.3 definiert. Kapitel 6 beschäftigt sich mit Recherchen und Untersuchungen zur Entwicklung von Benchmarks für die Einordnung der ökonomischen Kriterien.

1.4.5. Abbildung der Kreislaufpotenziale nach Qualitäten

Im Bauwesen ist eine Verwertung von Abbruchmaterialien derzeit meist mit Qualitätseinbußen verbunden. Beispielsweise werden hochwertige mineralische Baustoffe, die den größten Anteil der Abfälle ausmachen (siehe Kapitel 3.2), nach dem Abbruch in Recyclinganlagen gebrochen und vorwiegend als Unterbaumaterial im Straßenbau eingesetzt. Hochwertige Bindemittel wie Ton oder Zement können nicht zurückgewonnen werden, sodass ein Qualitätsverlust eintritt. Der Verwertungsprozess wird dann als Downcycling bezeichnet. Auch Kunststoffe und Holzfasern erleiden bei der stofflichen Verwertung in der Regel Qualitätsverluste. Sortenreine Metalle können dagegen nahezu endlos auf gleicher Qualitätsstufe recycelt werden, und naturbelassene biotische Materialien können seit jeher durch Verrotten im natürlichen Kreislauf zirkulieren. Ziel ist es, die unterschiedlichen Qualitätsstufen in der Bewertungsmethodik abzubilden (s. Kapitel 2.2.3 und 2.2.5). In Kapitel 7 wird die Berechnung der Kreislaufpotenziale nach Qualitätsstufen beschrieben.

1.4.6. Einfache Anwendbarkeit und gut ablesbare Darstellung

Für die Anwendung in der Praxis werden leicht handhabbare Instrumente benötigt. Der Urban Mining Index soll ein Werkzeug werden, das Archi-

tekten und Ingenieuren als praktikables Planungsinstrument zur Bewertung der Kreislauffähigkeit konkreter Gebäudeplanungen dienen kann, z. B. für die Erstellung von Urban-Mining-Konzepten in der Planungsphase.

Die Ergebnisse müssen klar ablesbar sein. Die Gesamtbewertung soll als aussagekräftiges, quantitatives Ergebnis mit grafischer Darstellung ausgegeben werden. Angestrebt wird die Angabe des Anteils an zirkulären Materialien in % der Gesamtmenge aller Materialien.

Das Tool soll auf allen gängigen Betriebssystemen mit einfacher Software anwendbar sein.

1.4.7. Anwendung an Modellprojekten

Anhand von fiktiven Modellprojekten bzw. konstruktiven Entwürfen soll die Anwendbarkeit und die Eignung als Planungsinstrument getestet und verifiziert werden. Anschließend soll an einem realen Bauprojekt die Praxistauglichkeit der Bewertungsmethodik untersucht werden.

1.4.8. Eignung für Zertifizierungssysteme

Letztlich soll der Urban Mining Index von jedem Planer, aber im Besonderen von den Anwendern der deutschen Zertifizierungssysteme für die Bewertung der Kriterien zur Rückbau- und Recyclingfreundlichkeit genutzt werden können.

Zu diesem Zweck werden die Zertifizierungssysteme in Kapitel 4.1 näher untersucht und deren Anforderungen berücksichtigt. Die Ergebnisse sollen beispielsweise leicht auf das 100-Punkte-Bewertungsschema der deutschen Zertifizierungssysteme übertragbar sein.

Recyclinghof
Friedhof

