

---

## 2. Strategie und wissenschaftliches Vorgehen

In diesem Kapitel werden bekannte Strategien für eine nachhaltige Entwicklung erörtert und auf ihre Wirksamkeit untersucht, um daraus die eigene Strategie abzuleiten.

Es wird geprüft, welche Instrumente zur Verfolgung der Ziele, die hinter diesen Strategien stehen, existieren. In diesem Rahmen wird die Methodik der Ökobilanzierung (Life Cycle Assessment – LCA) analysiert, um deren Möglichkeiten und Grenzen zur Bewertung des zirkulären Bauens aufzuzeigen.

Hierdurch wird deutlich, dass neue und ergänzende Instrumente zur Verfolgung wirksamer Strategien für das ressourcenschonende Bauen benötigt werden.

Zur Entwicklung des Urban Mining Index werden im Anschluss die Systemgrenzen (der Bewertungsumfang) festgelegt.

Schließlich wird die wissenschaftliche Vorgehensweise beschrieben: Welche Vorarbeiten/Recherchen sind notwendig? Welche Inhalte müssen erarbeitet werden? Welche Untersuchungen sind hierfür erforderlich? Welche Schritte sind für die Entwicklung eines Bewertungstools notwendig?

2.1.	Strategien für eine nachhaltige Entwicklung	18
2.2.	Ableitung der eigenen Strategie: konsistente Kreisläufe	21
2.3.	Instrumente zur Verfolgung der Strategien für eine nachhaltige Entwicklung	26
2.4.	Systemgrenzen	33
2.5.	Wissenschaftliches Vorgehen	35

## 2.1. Strategien für eine nachhaltige Entwicklung

Wie in Kapitel 1.1 bereits erwähnt, werden in der Debatte um nachhaltige Entwicklung drei grundlegende Strategien diskutiert: Suffizienz, Effizienz und Konsistenz. Über die Bedeutung dieser Strategien für die notwendige Veränderung unserer Wirtschaftsweise wird unter den Akteuren in Politik, Wissenschaft und Wirtschaft leidenschaftlich gestritten. Welche Strategie in dieser Arbeit verfolgt wird und warum, soll durch die folgende Analyse der drei Strategien deutlich werden.

### 2.1.1. Suffizienz

Die Suffizienz-Strategie fordert nach Hauff/Kleine [21] eine Minderung des Ressourcen- und Umweltverbrauchs auf ein Maß, das für ein zufriedenstellendes („suffizientes“) Leben genügt. Dem liegt meist die menschliche Überzeugung und eine veränderte Lebensführung zugrunde, wonach sich die Menschheit mit *weniger* zufrieden geben muss.

Das Prinzip der Suffizienz gilt im Allgemeinen als unbeliebt, weil damit ein Verzicht verbunden ist. In einer Marktwirtschaft funktioniert dieser Weg nur auf freiwilliger Basis. Er ist schwer durchsetzbar, vor allem wenn der freiwillige Verzicht für den Einzelnen eine große Einschränkung bedeutet, aber der Effekt der Handlung des Einzelnen für die Allgemeinheit kaum spürbar ist (Beispiel: Verzicht eines Einzelnen auf das Autofahren).

### 2.1.2. Effizienz

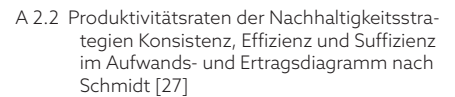
Die Effizienz-Strategie zielt auf eine Erhöhung der Ressourcenproduktivität und ist nach Hauff/Kleine [22] von allen drei Leitstrategien am weitesten operationalisiert <sup>6</sup>. Konkret bedeutet dies, etwas zu *verbessern*. Von der Bundesregierung wird die Effizienz-Strategie mit dem Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess) verfolgt, um die Gesamtrohstoffproduktivität zu steigern (s. Kapitel 1, Abb. A 1.7). In der Wirtschaft ist die Effizienz beliebt, da sie mit höheren Erträgen einhergeht und dem Konsumenten die Möglichkeit suggeriert, den Wohlstand unter Entlastung der Umwelt beibehalten zu können. Die Strategie stößt jedoch an ihre Grenzen, wenn die technischen Möglichkeiten ausgeschöpft sind. Außerdem werden durch Effizienz erzielte Fortschritte oftmals durch Rebound-Effekte kompensiert. Bei steigendem Bevölkerungswachstum kann die Effizienzstrategie trotz individueller Einsparungen einen absoluten höheren Verbrauch kaum verhindern. Im Grunde ignoriert sie damit das Erreichen der Grenzen des Wachstums.

### 2.1.3. Konsistenz

Die Konsistenz-Strategie besagt nach Hauff/Kleine [23], dass die aus menschlichen Aktivitäten resultierenden Stoff- und Energieströme mit den Naturkreisläufen verträglich sein müssen. Hierzu sind Produktions- und Konsummuster langfristig umzustellen. Konkret geht es darum, etwas *anders* zu machen.

Der Ökonom und Sozialwissenschaftler Joseph Huber [24] beschrieb

<sup>6</sup> von lateinisch *operatio* = Verrichtung

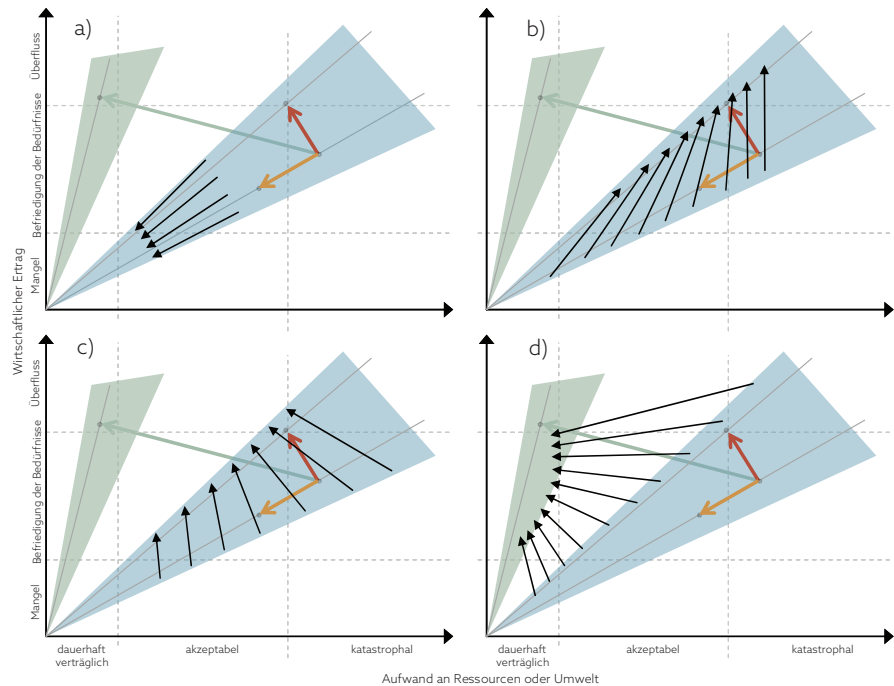


## A 2.2

#### 2.1.4. Produktivität der Strategien

Doch auch die Strategie der Konsistenz oder der „Ökoeffektivität“ ist nicht unumstritten. So ist es z. B. nicht richtig, „intelligent zu verschwenden“, wie Braungart [28] propagiert, denn selbst wenn wir es schaffen, alle Materialien aus erneuerbaren, kompostierbaren oder recycelten und

- A 2.3 „Kraftfelder“ suffizienter Strategien (a), effizienter Strategien ohne Kostenkomponente für Ressourcen- und Umweltaufwand (b), mit Kosten für Ressourcen- und Umweltaufwand (c) und notwendiges Kraftfeld zum Erreichen des nachhaltigen Zielgebiets (d) nach Schmidt [30]
- A 2.4 Natürlicher Kreislauf und gestörter Kreislauf nach Schlichting [31]
- A 2.5 Eingriff des Technischen Kreislaufs in die von Schlichting beschriebenen Naturkreisläufe, eigene Darstellung



A 2.3

recyclingfähigen Stoffen herzustellen, so ist dafür vor allem eine begrenzte Ressource erforderlich: Fläche. Fläche für die Herstellung von (Bau-)Stoffen steht in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion, zur Siedlungsfläche, zum (möglichst ungestörten) Lebensraum für andere Lebewesen – erst recht bei weiterhin steigender Weltbevölkerung.<sup>7</sup> Auch für Recyclingprozesse wird diese Fläche benötigt, solange die dafür notwendige erneuerbare Energie nicht verlustfrei aus Gegenden transportiert werden kann, die biologisch kaum Bedeutung haben (z. B. Wüsten). Taghizadegan [29] begründet seine Kritik am Cradle-to-Cradle-System deshalb mit einem physikalischen Grundsatz: „die Gesetze der Thermodynamik verbieten ewige Kreisläufe ohne Verluste.“

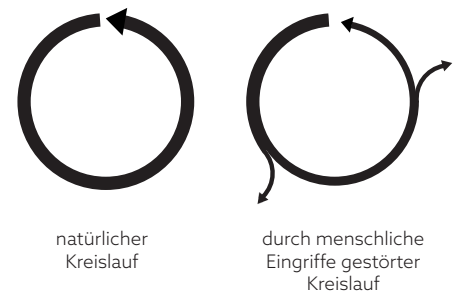
Schmidt kommt in seinen Studien zu dem Schluss, dass keine der Strategien den alleinigen Königsweg darstellt, und sieht die Effizienz „als Mittelweg und als Brücke zur Konsistenz“. Durch Steuerung der Rahmenbedingungen, z.B. über Kosten für Umweltwirkungen, würde „der Qualitätssprung zur Konsistenz nicht nur möglich, sondern auch wirtschaftlich erstrebenswert“, so sein Ansatz, der in Abb. A 2.3 grafisch dargestellt ist.

7

So sprechen sich selbst Holzexperten für eine effiziente Holzskelettbauweise statt für Massivholzbauweise aus, um bei der derzeitigen Bautätigkeit möglichst viele Bauten aus Holz erstellen zu können, ohne dass der Waldbestand dauerhaft abnimmt (persönliches Gespräch mit Dr. Jan Wenker, ehemals Thünen Institut für Holzforschung).

## 2.2. Ableitung der eigenen Strategie: konsistente Kreisläufe

Diese Arbeit greift die Strategie der konsistenten Kreisläufe auf. Der Urban Mining Index soll ein Instrument zur Verfolgung der Ziele konsistenter Kreisläufe sein – nämlich Ressourcen- und Umweltschutz zur Erhaltung der natürlichen Lebensgrundlagen und des Wohlstands. Basierend auf den zuvor dargestellten Erkenntnissen soll die Strategie der konsistenten Kreisläufe von der Strategie der Effizienz und Suffizienz begleitet werden. Hierzu soll ein bestehendes Instrument genutzt werden, das in Kapitel 2.3 vorgestellt und analysiert wird, um den Nutzen des zirkulären Bauens zu überprüfen: die Ökobilanz. Doch zunächst wird genauer beleuchtet, was unter konsistenten Kreisläufen zu verstehen ist. Kreisläufe sind konsistent, wenn sie verträglich mit den Naturkreisläufen sind. Was bedeutet das genau?



A 2.4

### 2.2.1. Einfluss des Menschen auf die natürlichen Kreisläufe

Der technische und der natürliche Kreislauf, wie von Braungart und McDonough im Cradle-to-Cradle-System (s. Kapitel 4.2.2) beschrieben, existieren nicht parallel, sondern der technische wird durch den natürlichen erst möglich. Alles, was wir dieser Erde entnehmen, ist den Naturkreisläufen entnommen. Wir können aus natürlichen Materialien technische Materialien herstellen, z. B. aus Erzen Metalle gewinnen oder aus Erdöl Kunststoff. Da die Erde ein geschlossenes System ist, können technische Materialien nur „verloren“ gehen, wenn sie so verändert werden, dass sie nicht mehr oder nur mit erheblichem Aufwand nutzbar sind, z.B. durch chemische Veränderung oder Verschmutzung oder wenn sie in den gasförmigen Zustand wechseln und in die Atmosphäre emittieren.

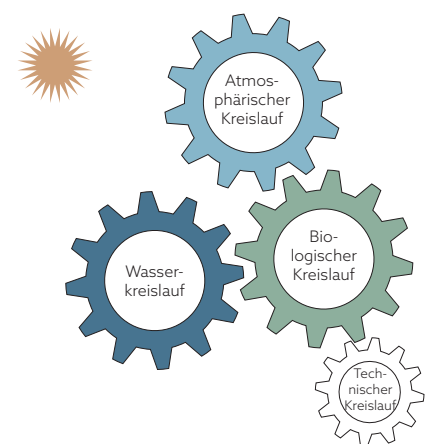
**Diese Veränderungsprozesse sind mit erheblichen Einflüssen auf die natürlichen Kreisläufe verbunden.**

Der Physiker Schlichting [31] spricht in diesem Zusammenhang von gestörten Kreisläufen (s. Abb. A 2.4). Die komplexen Zusammenhänge in der Natur laufen nach seinen Ausführungen im Wesentlichen in drei übergeordneten Kreisläufen ab:

- Atmosphärischer Kreislauf
- Wasserkreislauf
- Biologischer Kreislauf

Diese Kreisläufe sind eng miteinander verzahnt und werden wiederum durch einen höheren Kreislauf in Gang gehalten: den Kreislauf des Sonnensystems.

Die drei Naturkreisläufe gliedern sich in zahlreiche Teilkreisläufe. Zum biologischen Kreislauf gehören unter anderem der Sauerstoff- und der Kohlenstoffkreislauf, die sowohl untereinander als auch mit dem Wasser- und dem atmosphärischen Kreislauf in engem Zusammenhang stehen. Auf dieses gigantische Getriebe, das seit Ewigkeiten konstant nach den physikalischen Gesetzen abläuft, nimmt der Mensch zunehmend einen störenden Einfluss. So wie die Sonne mit ihrer Energie die natürlichen Kreisläufe in Gang hält, treibt der Mensch mit der tief in der Erde gespeicherten Energie, den fossilen Brennstoffen, die technischen Kreisläufe an



A 2.5

---

und greift damit in die natürlichen Kreisläufe ein (s. Abb. A 2.5). Durch die Verbrennung der über Jahrmillionen gespeicherten Energie innerhalb kürzester Zeit werden der Kohlenstoffkreislauf und der atmosphärische Kreislauf spürbar gestört: Die Atmosphäre erwärmt sich durch eine hohe Kohlenstoffdioxidkonzentration.

Aber auch mit dem Abbau von stofflichen Ressourcen greift der Mensch massiv in die natürlichen Kreisläufe ein. Die nicht nachhaltige Nutzung von Wäldern (z. B. durch Kahlschlag) und der großflächige Tagebau (z. B. zur Entnahme von Sand und Kies) oder der Bergbau mit immer größeren Abraumhalden zur Gewinnung von Erzen zerstört Lebensräume und beeinflusst den natürlichen Wasserkreislauf. Der Ressourcenverbrauch geht einher mit hohem Abfallaufkommen. Schädliche Stoffe gelangen über Deponien oder Rauchgase in den Wasserkreislauf und in die Atmosphäre. Artensterben, Bodenerosion und Luftverschmutzung sind einige der Folgen, die gestörte Kreisläufe kennzeichnen und zur Gefahr für die menschliche Existenz werden können.

**Die technischen Kreisläufe müssen deshalb dringend geschlossen und so betrieben werden, dass sie mit den natürlichen Kreisläufen verträglich – konsistent – sind.**

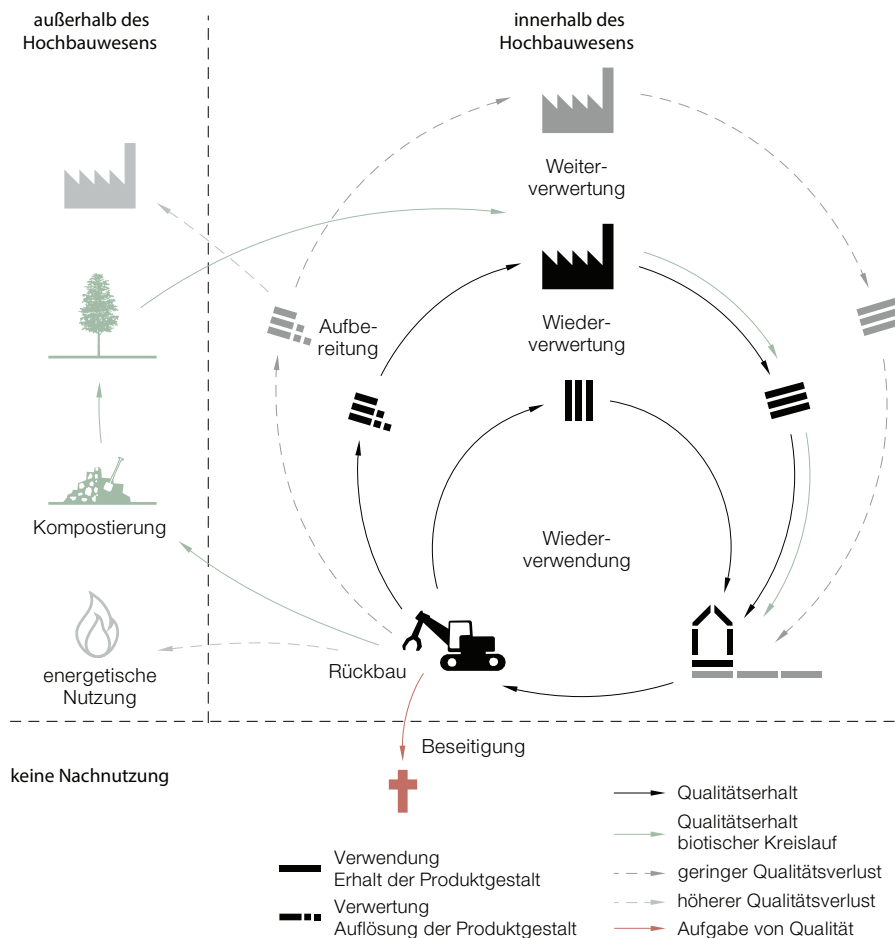
### **2.2.2. Voraussetzungen für konsistente Kreisläufe**

Materialien, die dem natürlichen Kreislauf entnommen werden, müssen entweder so verarbeitet und genutzt werden, dass sie ohne Störstoffe in den natürlichen Kreislauf zurückgeführt werden können (z. B. durch Kompostierung), oder sie müssen dauerhaft in geschlossenen technischen Kreisläufen geführt werden. Das bedeutet, dass sie nach ihrer Nutzung nicht entsorgt, sondern zurückgewonnen und wiederverwendet oder nach Aufbereitung wiederverwertet, d. h. ohne Qualitätsverlust in den Produktionskreislauf zurückgeführt werden.

Dadurch sollen alle Aufwendungen der Primärherstellung ersetzt werden, möglichst inkl. des Energieaufwands, sodass der minimierte, für den Antrieb des Kreislaufs verbleibende Energieaufwand ebenfalls aus zirkulären, erneuerbaren Quellen gedeckt werden kann.

Wenn bei der Aufbereitung ein Qualitätsverlust eintritt, wird der Kreislauf bereits gestört, da die Materialien den Produktionskreislauf verlassen, um in nachgeordneten Produktionskreisläufen (entweder im oder außerhalb des Bauwesens) eingesetzt zu werden. Durch den Qualitätsverlust müssen die Materialien in der Regel nach einem oder mehreren Nutzungszyklen beseitigt werden, ggf. unter Nutzung der im Material gebundenen Energie. Solch eine **Kaskadennutzung** ist nur für biotische Rohstoffe eine Option, da der Kreislauf durch natürliches Nachwachsen geschlossen werden kann. Abb. A 2.6 zeigt die Nutzungs- und Lebenszyklen von Baustoffen nach Hillebrandt [32] mit den im Folgenden beschriebenen Begriffen.

A 2.6 Nutzungs- und Lebenszyklen von Baustoffen nach Hillebrandt [32]



A 2.6

### 2.2.3. Nachnutzungsmöglichkeiten von Baustoffen

Hillebrandt und Seggewies [33] haben im Atlas Recycling verschiedene Strategien zur Ressourcenschonung und Abfallvermeidung beschrieben, die hier als End-of-Life-Szenarien aufgegriffen werden:<sup>8</sup>

#### Wiederverwendung

Von Wiederverwendung wird gesprochen, wenn ein Produkt erneut unter Beibehaltung seiner Produktgestalt entsprechend seinem ursprünglichen Zweck eingesetzt wird (engl.: Re-Use). Die Qualität bleibt dabei weitgehend erhalten oder wird durch einfache Aufbereitung (z. B. Reparatur, Reinigung oder Oberflächenbehandlung) wiederhergestellt.

#### Wiederverwertung

Bei der Wiederverwertung werden gebrauchte (Bau-)Stoffe oder Produkte in einem Aufbereitungsprozess unter Auflösung ihrer Gestalt, aber unter Beibehaltung ihrer inhärenten<sup>9</sup> Eigenschaften zu „Ausgangsstoffen für Werkstoffe derselben Qualitätsstufe“ [33] verarbeitet. Durch vollständige Wiederverwertung entstehen nahezu geschlossene Materialkreis-

<sup>8</sup> Der Verzicht wird hier nicht aufgeführt, da er nicht bemessen werden kann.

<sup>9</sup> Nach der Qualitätsmanagementnorm DIN EN ISO 9000 ist die Qualität als ein Grad definiert, „in dem ein Satz inhärenter Merkmale eines Objekts Anforderungen erfüllt“. Ein Qualitätsmerkmal ist ein „inhärentes Merkmal eines Objekts, das sich auf eine Anforderung bezieht“. „Inhärent bedeutet ‚einer Einheit innewohnend‘, insbesondere als ständiges Merkmal“ (z. B. die Zugfestigkeit von Stahl als physikalische Eigenschaft). [34]

---

läufe<sup>10</sup>. Die Wiederverwertung kann als Recycling (im engeren Sinn) bezeichnet werden.

#### *Weiterverwendung*

Wird ein gebrauchtes Bauteil oder Produkt unter weitgehender Beibehaltung seiner Gestalt für einen anderen Zweck als den ursprünglichen eingesetzt, wird dies als Weiterverwendung (engl.: Further Use) bezeichnet. Die Weiterverwendung ist in der Regel mit einem Qualitätsverlust verbunden, weil die qualitativen Anforderungen dem ursprünglichen Zweck nicht mehr entsprechen bzw. die Leistung des Produkts nicht mehr dem ursprünglichen Zweck genügt.

#### *Weiterverwertung*

Bei der Weiterverwertung ist der Aufbereitungsprozess mit einer qualitätsmindernden Veränderung der inhärenten Eigenschaften verbunden. Im allgemeinen Sprachgebrauch wird dies als Downcycling bezeichnet. Die Nutzung von Materialien in mehreren hintereinander geschalteten Zyklen, die von einem zum anderen Lebenszyklus mit Qualitätsverlust verbunden ist, wird auch Kaskadennutzung genannt. Der Kreislauf ist offen, da die Sekundärmaterialien den Produktkreislauf verlassen.

#### *Energetische Verwertung*

Die Nutzung von Abfällen als Brennstoff zur Energiegewinnung wird als energetische Verwertung bezeichnet. Sie zählt nach Abfallrahmenrichtlinie und Kreislaufwirtschaftsgesetz (s. Kapitel 3.1.2) zur „sonstigen Verwertung“ und ist gegenüber dem Recycling nachrangig eingestuft.

Die vorgenannten End-of-Life-Szenarien können nach ihren Qualitätsstufen im Kreislaufpotenzial differenziert abgebildet werden.

Weitere Entsorgungswege, wie die Verfüllung oder Beseitigung auf Deponien, bieten kein Kreislaufpotenzial.

### **2.2.4. Definition des Kreislaufpotenzials von Baustoffen**

Der Begriff „Kreislaufpotenzial“ wird von einzelnen Experten, die sich mit der Kreislaufwirtschaft beschäftigen, bereits verwendet, ohne dass hierfür eine offizielle Definition (z. B. im Duden) existiert. „Potenzial“ ist gemäß Duden von dem spätlateinischen *potentialis* abgeleitet, was bedeutet „nach Vermögen“. Im allgemeinen Sprachgebrauch wird unter Potenzial eine Möglichkeit oder Fähigkeit verstanden.

#### *Kreislaufpotenzial*<sup>11</sup>

Das Kreislaufpotenzial prognostiziert den Anteil an Materialien und Baustoffen einer Konstruktion, die unter Berücksichtigung definierter Kriterien in mehr oder weniger geschlossenen Materialkreisläufen geführt werden können. Ein Materialkreislauf ist geschlossen, wenn durch Wiederverwendung oder Wiederverwertung kein Qualitätsverlust

---

10 Die Definition lehnt sich an die technische Beschreibung von Produktsystemen und Allokationsverfahren für das Recycling in der DIN EN ISO 14044 [35] an.

11 Die Eigendefinitionen der Verfasserin zum Kreislaufpotenzial sowie zum Closed-Loop-Potenzial und zum Loop-Potenzial wurden bereits im Atlas Recycling [36] veröffentlicht.



entsteht. Ein offener Kreislauf hingegen ist durch Weiterverwendung oder Weiterverwertung gekennzeichnet, womit in der Regel ein Qualitätsverlust einhergeht.

Ein wichtiges Ziel dieser Arbeit ist die differenzierte Abbildung der Kreislaufpotenziale nach Qualitäten (s. Kapitel 1.4.5). Übergeordnetes Ziel einer nachhaltigen Entwicklung muss die Generierung möglichst geschlossener Kreisläufe sein. Das Kreislaufpotenzial wird deshalb danach differenziert, ob es geschlossene oder offene Kreisläufe abbildet.

### **2.2.5. Differenzierung von Closed-Loop- und Loop-Potenzial**

#### *Closed-Loop-Potenzial*

Das Closed-Loop-Potenzial ist der prozentuale Anteil an Materialien und Baustoffen einer Konstruktion, der unter Berücksichtigung definierter Kriterien ohne Qualitätsverlust in geschlossenen Kreisläufen geführt werden kann. Die Wiederverwendung und Wiederverwertung gehören zu den Nachnutzungsstrategien, bei denen kein Qualitätsverlust eintritt.

#### *Loop-Potenzial*

Zum Loop-Potenzial einer Konstruktion zählen über den prozentualen Closed-Loop-Anteil hinaus auch Anteile an Materialien und Baustoffen, die unter Berücksichtigung definierter Kriterien eine stoffliche Verwertung mit Qualitätsverlust (Weiterverwertung/Downcycling) ermöglichen. Das Loop-Potenzial bildet damit über die geschlossenen Kreisläufe hinaus auch offene Kreisläufe ab. Das Closed-Loop-Potenzial ist somit Teil des Loop-Potenzials.

Die Berechnung des Closed-Loop- und Loop-Potenzials wird in Kapitel 7 dargestellt.

---

## 2.3. Instrumente zur Verfolgung der Strategien für eine nachhaltige Entwicklung

Die Strategie der konsistenten Kreisläufe unterstellt, dass das zirkuläre Bauen grundsätzlich nachhaltiger ist als das Bauen nach dem linearen Prinzip. Dies muss jedoch überprüft werden, da z. B. auch Recyclingprozesse mit Aufwendungen verbunden sind.

### 2.3.1. Der utilitaristische Nutzen des zirkulären Bauens

„Die Richtigkeit menschlicher Handlungen bestimmt sich nach deren Folgen. Maßstab für die Beurteilung der Folgen ist der Nutzen (Utilität). Es kommt aber nicht auf den Nutzen für den Handelnden allein an. Ausschlaggebend ist das Wohlergehen aller von der Handlung Betroffenen.“ [37]

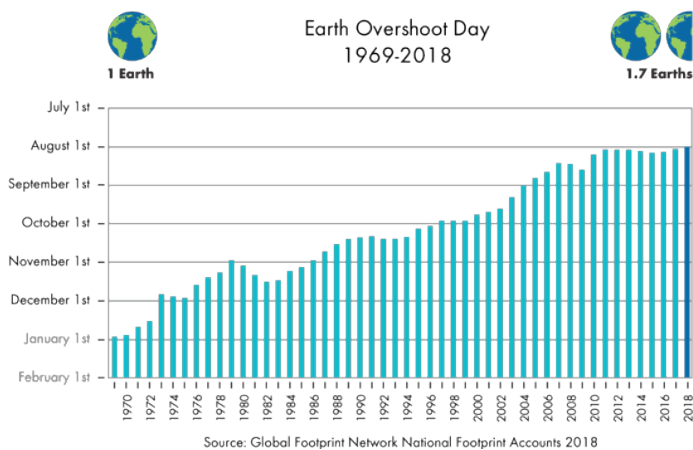
Ausgehend von dieser Definition des Utilitarismus <sup>12</sup> stellt sich bei jeder strategischen Handlung folgende übergeordnete Frage: **Welche Folgen und welchen Nutzen hat die Handlung für die Gesellschaft und für die Umwelt, ohne die eine Gesellschaft nicht existieren kann? Bezogen auf die Inhalte dieser Arbeit lautet die Frage: Welche Folgen und welchen Nutzen hat das zirkuläre Bauen?** Oder im Detail: Welche Folgen hat der einzelne Kreislaufprozess? Es kommt also auf die Wirkungen des Recyclings an.

Ein bewährtes Instrument zur Analyse der Auswirkungen von Produkten und Prozessen auf die Umwelt ist die Ökobilanzierung.

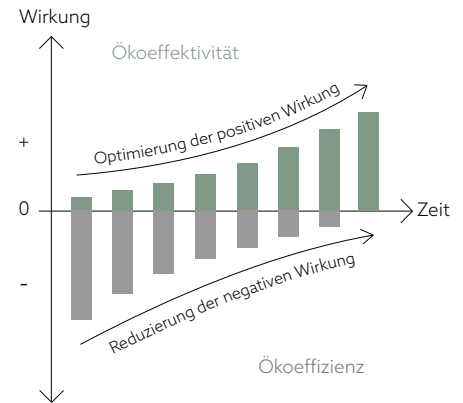
**Ihr wird oft nachgesagt, sie sei ein Instrument der Ökoeffizienzstrategie, da sie auf die Minimierung der negativen Auswirkungen auf die Umwelt abziele.** Doch liegt das nicht nur an unserer bisherigen Sicht- und Wirtschaftsweise? Wir haben erkannt, dass unser bisheriges Handeln eine Belastung für die Umwelt ist, also negative Auswirkungen hervorruft. Diese wollen wir minimieren. Dagegen sollen mit der Ökoeffektivitätsstrategie möglichst positive Effekte erzielt werden (s. Abb. A 2.8). Vorbild hierfür ist die Natur, in der alle organischen Stoffe – lebend oder post mortem – als Nahrung zur Erhaltung und Weiterentwicklung des Ökosystems dienen.

---

12 Der Utilitarismus ist eine von Jeremy Bentham (1748–1832) begründete Denkrichtung der Ethik, die das menschliche Handeln nicht aus sich selbst heraus als richtig oder falsch beurteilt, sondern nach ihrem Nutzen für die Allgemeinheit. [37]



A 2.7



A 2.8

Ist die Ökobilanz deshalb obsolet oder gar hinderlich, weil mit ihr eine „falsche“ Strategie verfolgt wird?

A 2.7 Earth Overshoot Day 1969-2018 [38]

A 2.8 Wirkungsrichtungen der Ökoeffizienz und der Ökoeffektivität nach Braungart/EPEA [39]

### 2.3.2. Die Ökobilanz ist keine Bilanz

Der Begriff „Bilanz“ ist im Grunde nicht passend. „Bilanz“ bedeutet im ursprünglichen Sinn „Gleichgewicht“<sup>13</sup>. In der Betriebswirtschaft, mit der der Begriff im Allgemeinen verbunden wird, ist die Bilanz immer ausgeglichen. Je nachdem, ob im Bilanzjahr ein Gewinn oder Verlust erwirtschaftet wurde, mehrt oder mindert dieser die Rücklagen auf der Passivseite der Bilanz (oder wird als Verlustvortrag auf der Aktivseite eingestellt, sofern keine Rücklagen mehr vorhanden sind) und gleicht so die Bilanz aus. Im übertragenen Sinn stellen die Ressourcen dieser Erde die Rücklagen dar, die auf der Passivseite (Habenseite) der Bilanz stehen (= Mittelherkunft), während die daraus hergestellten Güter (Gebäude, Infrastruktur, Technische Anlagen, langlebige Konsumgüter) auf der Aktivseite stehen müssten (= Mittelverwendung). Momentan mindern wir die Rücklagen dieser Erde, da wir ihr mehr Ressourcen entnehmen, als sie aus sich selbst heraus und mit der einzigen externen Quelle, der durch die Sonne gelieferten Energie, produzieren kann. Dies ist anschaulich ablesbar am Earth Overshoot Day, dem Erdüberlastungstag, den das Global Footprint Network jährlich ermittelt (s. Abb. A 2.7).

Mit der Öko-„Bilanz“ kann eher eine Einnahmen-/Überschussrechnung oder eine Gewinn- und Verlustrechnung als eine Bilanz aufgestellt werden, wie im Folgenden deutlich wird.

### 2.3.3. Die Ökobilanz als Instrument zur Prognose der Wirkungen

Die Ökobilanzierung ist eine etablierte Berechnungsmethode zur Bewertung der Auswirkungen von Produkten, Prozessen und Dienstleistungen auf die Umwelt.

#### Systematik

Nach DIN EN ISO 14044 [41] umfasst eine Ökobilanz vier Phasen:

- a) die Phase der Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen,
- b) die Sachbilanz-Phase,
- c) die Phase der Wirkungsabschätzung und
- d) die Phase der Auswertung.

<sup>13</sup> „Bilanz (lateinisch *bilancia* ‚(Balken-)Waage‘; aus lateinisch *bi* ‚doppelt‘ und *lanx* ‚Schale‘)“. [40]

---

In der Sachbilanz werden die Input- und Outputflüsse über den gesamten Lebenszyklus innerhalb definierter Systemgrenzen nach Massen berechnet. Zum Input gehören die einfließenden Ressourcen, zum Output die Abfälle und Abgabeströme (siehe Abb. A 2.10).

Die „Sachbilanz“ ist also eigentlich keine Bilanz, sondern eine Eingangs-/Ausgangsrechnung.

Die anschließende Wirkungsabschätzung stellt einen funktionalen Zusammenhang zwischen den Stoffströmen und den Auswirkungen auf die Umwelt dar.

#### *Die Gebäude-Ökobilanz*

Ökobilanzen für Gebäude sind in der DIN 15978 [42] geregelt. Die Berechnung schließt „sämtliche verwendeten Bauprodukte, -prozesse und -dienstleistungen im Verlauf des gesamten Lebenszyklus des betreffenden Gebäudes mit ein.“ Die Informationen zur Gebäudebeurteilung sind nach Modulen gegliedert (s. Abb. A 2.9).

Grundlage für die Bilanzierung der Baukonstruktion eines Gebäudes sind die Ökobilanzdaten der verwendeten Baustoffe und -produkte. Produktspezifische Daten werden von den Herstellern in Umweltproduktdeklarationen (Environmental Product Declarations, EPDs) bereitgestellt (s. Kapitel 4.2.1, Typ III). Weitere, generische Daten werden in Deutschland in der ÖkobaDat vom Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) veröffentlicht. Die Grundlagen für die Bilanzierung von Bauprodukten sind in DIN 15804 [43] geregelt.

#### *Indikatoren*

Die Umweltinformationen werden mithilfe verschiedener messbarer Indikatoren bewertet. Abbildung A 2.10 zeigt die Indikatoren nach den Tabellen 2–5 der DIN 15978 [44] mit der jeweiligen Messgröße.

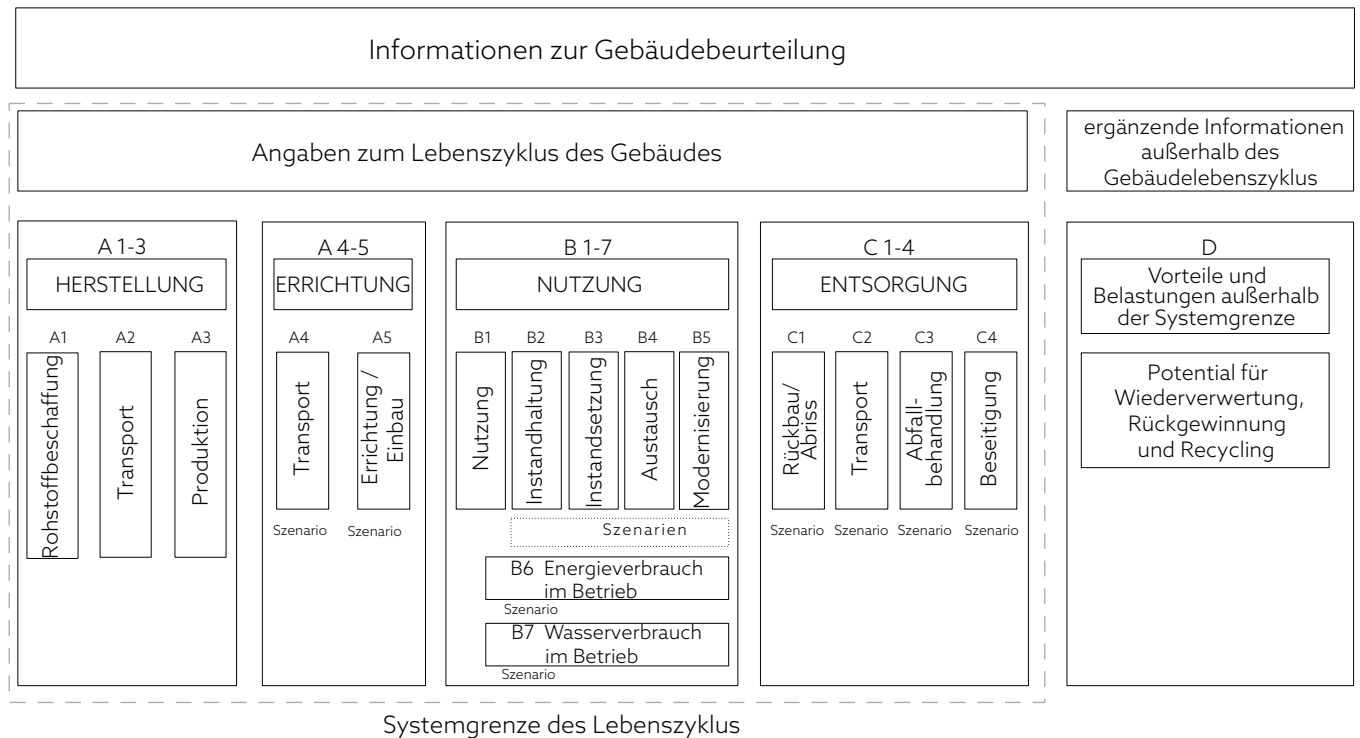
In der Aufstellung ist gekennzeichnet, welche Indikatoren aktuell in den beiden deutschen Gebäudezertifizierungssystemen (s. Kapitel 4.1.1 und 4.1.2) im Rahmen der Ökobilanzierung bewertet werden.

Dabei fällt auf, dass weder der Einsatz von Sekundärmaterialien (SM) noch die Abgabe von Materialien zur Wiederverwendung (CRU) oder zum Recycling (MFR) in der Sachbilanz (In- und Output) direkt bewertet werden, obwohl dies wichtige Indikatoren für den Ressourcenschutz sind, da sie zirkuläre Eigenschaften von Baustoffen abbilden.

Nur ausgewählte Umweltauswirkungen, die aus der Sachbilanz resultieren, werden bewertet. Es fehlen jedoch aussagekräftige Informationen zum Verbrauch stofflicher Ressourcen. Eine Schwierigkeit besteht darin, dass der Ressourceneinsatz oftmals sehr vielfältig ist (verschiedene Metalle, Kies, Sand etc.) und nur schwer in einem einzigen Indikator abgebildet werden kann. Bei Abbildung mehrerer Indikatoren wird die Informationsfülle dagegen so hoch, dass der Adressat mit der Abwägung der Indikatoren überfordert sein könnte, vor allem, wenn die Bedeutung der einzelnen Rohstoffe für die Gesellschaft bzw. Wirtschaft nicht erkennbar ist.

#### *Der Indikator Abiotisches Ressourcenabbaupotenzial für Elemente*

Zur Abbildung von Knappheit dient der Indikator Abiotisches Ressour-



A 2.9

Umweltinformation	Indikator	internationale Abkürzung	Einheit/Messgröße	Bewertung in DGNB und BNB
Ressourcenverwendung (Input)	erneuerbare Primärenergie als Energieträger	PERE	MJ, Heizwert	✓
	erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung	PERM	MJ, Heizwert	✓
	nicht erneuerbare Primärenergie als Energieträger	PENRE	MJ, Heizwert	✓
	nicht erneuerbare Primärenergie zur stofflichen Nutzung	PENRM	MJ, Heizwert	✓
	<b>Sekundärmaterialien</b>	<b>SM</b>	<b>kg</b>	
	erneuerbare Sekundärbrennstoffe	RSF	MJ	
	nicht erneuerbaren Sekundärbrennstoffe	NRSF	MJ	
	Frischwasser	FW	m <sup>3</sup>	
Abfallkategorien (Output)	Entsorgter gefährlicher Abfall	HWD	kg	
	Entsorgter ungefährlicher Abfall	NHWD	kg	
	Entsorgter radioaktiver Abfall	RWD	kg	
Abgabeströme (Output)	<b>Komponenten für die Wiederverwendung</b>	<b>CRU</b>	<b>kg</b>	
	<b>Materialien für das Recycling</b>	<b>MFR</b>	<b>kg</b>	
	Materialien für die Energierückgewinnung (keine Abfallverbrennung)	MER	kg	
	Exportierte Energie	EEE	MJ je Energieträger	
Umweltauswirkungen	Treibhauspotenzial	GWP	kg CO <sub>2</sub> äquiv	✓
	Potenzial in Bezug auf die Zerstörung der stratosphärischen Ozonschicht	ODP	kg FCKW 11 äquiv	✓
	Potenzial in Bezug auf die Versauerung von Wasser- und Boden	AP	kg SO <sub>2</sub> - äquiv	✓
	Eutrophierungspotenzial (Überdüngung)	EP	kg (PO <sub>4</sub> ) <sup>3-</sup> äquiv	✓
	Potenzial zur Bildung von bodennahem Ozon	POCP	kg Ethen äquiv	✓
	Abiotisches Ressourcenabbaupotenzial für Elemente	ADPE	kg Sb äquiv	
	Abiotisches Ressourcenabbaupotenzial für fossile Brennstoffe	ADPF	MJ, Heizwert	

A 2.10

A 2.9 Ökobilanzmodule A – D in Anlehnung an DIN EN 15 978 [42]

A 2.10 Umweltinformationen und zugeordnete Indikatoren in Anlehnung an DIN EN 15 978 [44]

cenabbaupotenzial für Elemente (engl.: abiotic depletion potential for elements, ADPE). Er findet in der Anwendung der Ökobilanzierung jedoch wenig Beachtung. Für eine Gebäudezertifizierung nach DGNB wird er zwar berechnet und ausgewiesen, aber (derzeit) nicht bewertet. In der Zertifizierung nach BNB wird der Indikator gar nicht berücksichtigt. Das ADPE umfasst nach DGNB [45] den Verbrauch und die Knappheit nicht erneuerbarer (abiotischer) Ressourcen, wie z. B. Erze. Dabei wird die Menge der jeweils in der Erdkruste vorkommenden Ressource (ultimative Reserve<sup>14</sup>) und ihre jährliche Extraktionsrate berücksichtigt. Grundsätzlich sind für die Bewertung von Ökobilanzindikatoren Referenzwerte erforderlich, an denen sich ein Ergebnis messen lässt. Solche Referenzwerte wurden in den vergangenen Jahren von den Gebäudezertifizierungssystemen ermittelt. Da der Indikator ADPE erst seit 2015 für DGNB-Zertifizierungen ermittelt wird, liegt die Vernachlässigung der Bewertung an mangelnden Referenzwerten. Darüber hinaus ist die Messgröße für Anwender, die das Instrument der Ökobilanzierung als Planungsinstrument nutzen sollen, nur schwer nachvollziehbar: Das ADPE wird gemessen in Äquivalenten von Antimon (Sb), womit ein seltenes chemisches Element gewählt wurde, um Knappheit zu repräsentieren. Bilanziert man z.B. 1 kg blankes Kupferrohr in der Herstellung (Modul A1–3), entspricht die Knappheit 0,0000154 Sb-Äquivalenten [46]. Auch in der Maßeinheit auf Gebäudeebene liegen die Ergebnisse für das ADPE nach eigenen Praxiserfahrungen im Nachkommabereich<sup>15</sup>. Während der Indikator Treibhauspotenzial mit der Äquivalenz CO<sub>2</sub> und vorstellbaren Größen noch gut nachvollzogen werden kann, ist die Vergleichszahl für knappe abiotische Ressourcen (ADPE) unpraktikabel.

#### *Abbildung der Recyclingeffekte in der Ökobilanz*

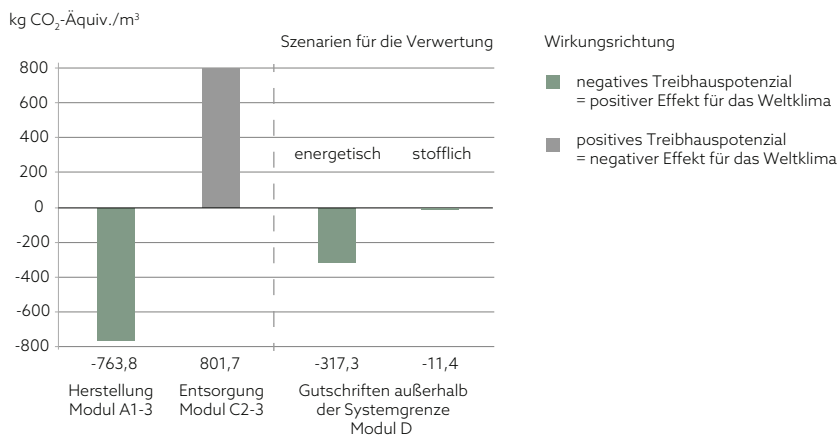
Nach den Normen DIN EN 15978 und 15804 liegen die Vorteile und Belastungen durch das Recycling außerhalb des Lebenszyklus und werden über das Modul D sozusagen in den nächsten Lebenszyklus exportiert (s. Abb. A 2.9 auf Seite 29).

Ausgangspunkt zur Quantifizierung im Modul D ist die Frage: Was wird durch das Rezyklat substituiert? Dabei fließt nicht nur eine Wiederverwertung, sondern auch eine Weiterverwertung und eine energetische Verwertung in die Deklaration der Umweltwirkungen ein, basierend auf der gegenwärtig angewendeten Praxis.

Die große Schwierigkeit ist dabei die Abschätzung der Substitutionsmöglichkeiten über relativ lange Zeiträume. So kann z. B. Altholz derzeit fossile Brennstoffe ersetzen. Beim Rückbau heutiger Neubauten werden jedoch durch die klimapolitisch geplante Umstellung der Energieerzeugung auf 100% erneuerbare Energien in Zukunft keine fossilen Brennstoffe mehr zu ersetzen sein. Trotzdem sind für heute verbaute Holzprodukte im Modul D Vorteile für die Einsparmöglichkeit fossiler Energien und die damit verbundene Vermeidung von Emissionen beziffert (s. Abb. A 2.11).

14 Die ultimative Reserve berücksichtigt nicht die technisch und ökonomisch sinnvolle Verfügbarkeit.

15 Für ein Krankenhaus wurden z.B. 0,046 Sb-Äquiv./m<sup>2</sup> NGF für die Herstellung ermittelt. [47]



A 2.11 Treibhauspotenzial von 1m<sup>3</sup> Nadelschnitt-holz – frisch, Durchschnitt DE [48]

A 2.11

Die Vorteile einer mehrstufigen Kaskadennutzung, wie die verzögerte Freisetzung des in Holzprodukten gespeicherten Kohlenstoffs oder die Schonung von Waldflächen durch die stoffliche Verwertung, bildet die Ökobilanz hingegen nicht ab.

Ein anderer, in der Ökobilanzierung bisher vernachlässigter Aspekt betrifft die Entscheidungen des End-of-Life-Szenarios auf Gebäudeebene. So gehen derzeit rein statistische Verwertungsquoten in die Bilanzierung ein; die Einbausituation im Gebäude und die sortenreine Trennbarkeit bleiben dagegen unberücksichtigt.

**Die Ökobilanz kann die Recyclingpotenziale von Baukonstruktionen deshalb nur sehr eingeschränkt abbilden.**

#### *Positive und negative Wirkungen*

Welche Ergebnisse liefert die Ökobilanz nun? Sind es negative oder positive Wirkungen?

Das hängt in erster Linie von den verwendeten Baustoffen, den im Lebenszyklus eingesetzten Energieträgern und den betrachteten Indikatoren ab. Zum Beispiel kann die Ökobilanz bei einem Plusenergiehaus, also einem Gebäude, das mehr Energie erzeugt, als es selbst verbraucht, und den Überschuss anderen Abnehmern zur Verfügung stellt, diesen positiven Effekt abbilden.

Das Bauen mit Holz z.B. kann einen positiven Effekt auf das Weltklima haben, der ebenfalls durch die Ökobilanz dargestellt werden kann. Abbildung A 2.11 zeigt die Ökobilanz von 1 m<sup>3</sup> Nadelschnittholz. Da Holz im Wachstumsprozess der Atmosphäre CO<sub>2</sub> entzieht und in Form von Kohlenstoff in der Biomasse speichert, ist das Treibhauspotenzial in der Herstellungsphase (Modul A) negativ – was einen positiven Effekt darstellt.

Für einige Datensätze in EPDs oder der Ökobaumat existieren bereits Szenarien für die energetische oder stoffliche Verwertung. Allerdings sehen die Produktkategorieregeln für Holz und Holzwerkstoffe gemäß DIN EN 16485 [49] vor, dass die im Produkt gespeicherte Menge an biogenem Kohlenstoff in Modul C „das System“ verlässt. Das heißt, auch wenn der Kohlenstoff bei der stofflichen Verwertung weiterhin gebunden bleibt, wird er in den nächsten Lebenszyklus exportiert. In einem Datensatz mit

---

Einsatz von Sekundärrohstoffen (z. B. Spanplatten) würde er im Modul A entsprechend importiert. Auf diese Weise ist die Kohlenstoffbilanz innerhalb eines Lebenszyklus immer ausgeglichen.

Dennoch kann die Ökobilanz positive und negative Effekte wiedergeben (und nicht nur die Minimierung negativer Wirkungen). **Da sie Ergebnisse in absoluten Zahlen liefert, kann sie auch einen Suffizienzeffekt abbilden.**

Sie ist ein wichtiges Instrument, mit dem die Folgen der Gebäudeplanung und -umsetzung für verschiedene Umweltaspekte prognostiziert werden können. Mithilfe der Ökobilanzierung kann überprüft werden, wie sich eine kreislaufgerechte Planung auf bestimmte Umweltaspekte auswirkt. Das soll in dieser Arbeit für den Indikator Treibhauspotenzial – über dessen Wichtigkeit in der Gesellschaft sicherlich Konsens herrscht – genutzt werden.

**Zur Verfolgung der Konsistenz-Strategie im Bauwesen sind jedoch neue Instrumente erforderlich, die sowohl die materielle als auch die konstruktive Ebene einbeziehen, die zirkulären Eigenschaften über den Lebenszyklus messen und die Ergebnisse in einem aussagekräftigen Indikator abbilden.**

**Mit dem Urban Mining Index soll ein Instrument zur Verfolgung der Konsistenz-Strategie im Bauwesen geschaffen werden.**



## 2.4. Systemgrenzen

In Kapitel 1.4 wurde das Ziel formuliert, den gesamten Lebenszyklus von Baukonstruktionen in den Urban Mining Index einzubeziehen und sowohl die Vornutzung als auch die Nachnutzbarkeit der Baustoffe zu berücksichtigen. Da die Übergänge im zirkulären Bauen fließend sind, müssen im Folgenden die Systemgrenzen (der Betrachtungsumfang) festgelegt werden.

### 2.4.1. Lebenszyklusphasen

- Pre-Use-Phase

In der Herstellungsphase werden die im Gebäude zu verbauenden Materialien berücksichtigt. Die im Produktionsprozess entstandene, nicht verwendete Entnahme, Nebenprodukte, Hilfsstoffe oder Abfälle liegen außerhalb der Systemgrenze. Diese können zwar zum Teil erheblich sein (z. B. Abraum bei der Gewinnung von Metallen aus Erzen), eine Systemraumerweiterung würde jedoch in andere Kreisläufe eingreifen und ist deshalb nicht vorgesehen. Systemgrenze ist also das fertig eingebaute Produkt oder Material. Verschnitt wird aus Vereinfachungsgründen vernachlässigt.

- Use-Phase

In der Nutzungsphase wird der Austauschbedarf von Bauteilen berücksichtigt. Die technische Nutzungsdauer richtet sich nach der Tabelle „Nutzungsdauern von Bauteilen“ des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) [51]. Die Nutzungsdauer eines Bauwerks hängt von der Nutzungstypologie ab und entspricht derjenigen, die auch in den deutschen Gebäudezertifizierungssystemen angewandt wird. Entsprechend der Austauschhäufigkeit wird sowohl der Materialeinsatz (Systemgrenze wie Pre-Use-Phase) als auch das Wertstoff- oder Abfallaufkommen (Systemgrenze wie Post-Use-Phase) berechnet.

Der Energiebedarf für den Gebäudebetrieb spielt eine große Rolle in Bezug auf den Ressourcenaufwand und den Kohlenstoffkreislauf. Es ist jedoch nicht Aufgabe dieser Arbeit, den Gebäudebetrieb zu optimieren. Er liegt deshalb außerhalb der Systemgrenze. Da die Baukonstruktion den Betriebsenergiebedarf hauptsächlich über den Wärmedurchgang beeinflusst, werden in Variantenvergleichen immer Bauteile mit gleichen Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werten) gegenübergestellt, um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

- Post-Use-Phase

In der Post-Use-Phase werden die direkt das Objekt verlassenden Materialien berücksichtigt und den zu definierenden End-of-Life-Szenarien zugeordnet. Abfälle, die durch den End-of-Life-Prozess zusätzlich entstehen, werden aus Vereinfachungsgründen vernachlässigt.

### 2.4.2. Differenzierung von Materialien nach Ursprung und Verfügbarkeit

Im Bauwesen werden Materialien gemäß Hillebrandt und Seggewies [50] nach ihrem Ursprung und ihrer Verfügbarkeit wie folgt in vier Gruppen eingeteilt:

Materialgruppe	Verfügbarkeit
biotisch	erneuerbar/nachwachsend
fossil	endlich (in menschlichen Zeiträumen)
mineralisch	endlich ( " )
metallisch	endlich ( " )

Folgende Festlegungen werden getroffen:

- Da sich nachwachsende Rohstoffe in menschlichen Zeiträumen in den Naturkreisläufen selbst erneuern können, werden die Kreislaufpotenziale für erneuerbare und für endliche Rohstoffe getrennt ausgewiesen. Dabei wird unterschieden zwischen zertifiziert nachhaltig nachwachsenden Rohstoffen und nicht zertifiziert nachwachsenden Rohstoffen.
- Endliche Rohstoffe werden in Qualitätsstufen nach den Möglichkeiten der Nachnutzung unterschieden (s. Kapitel 2.2.3).

In Abbildung A 2.12 sind die Systemgrenzen grafisch veranschaulicht. Die Systematik des Urban Mining Index wird in Kapitel 7 noch differenzierter dargestellt (s. Abb. A 7.10 auf Seite 175).

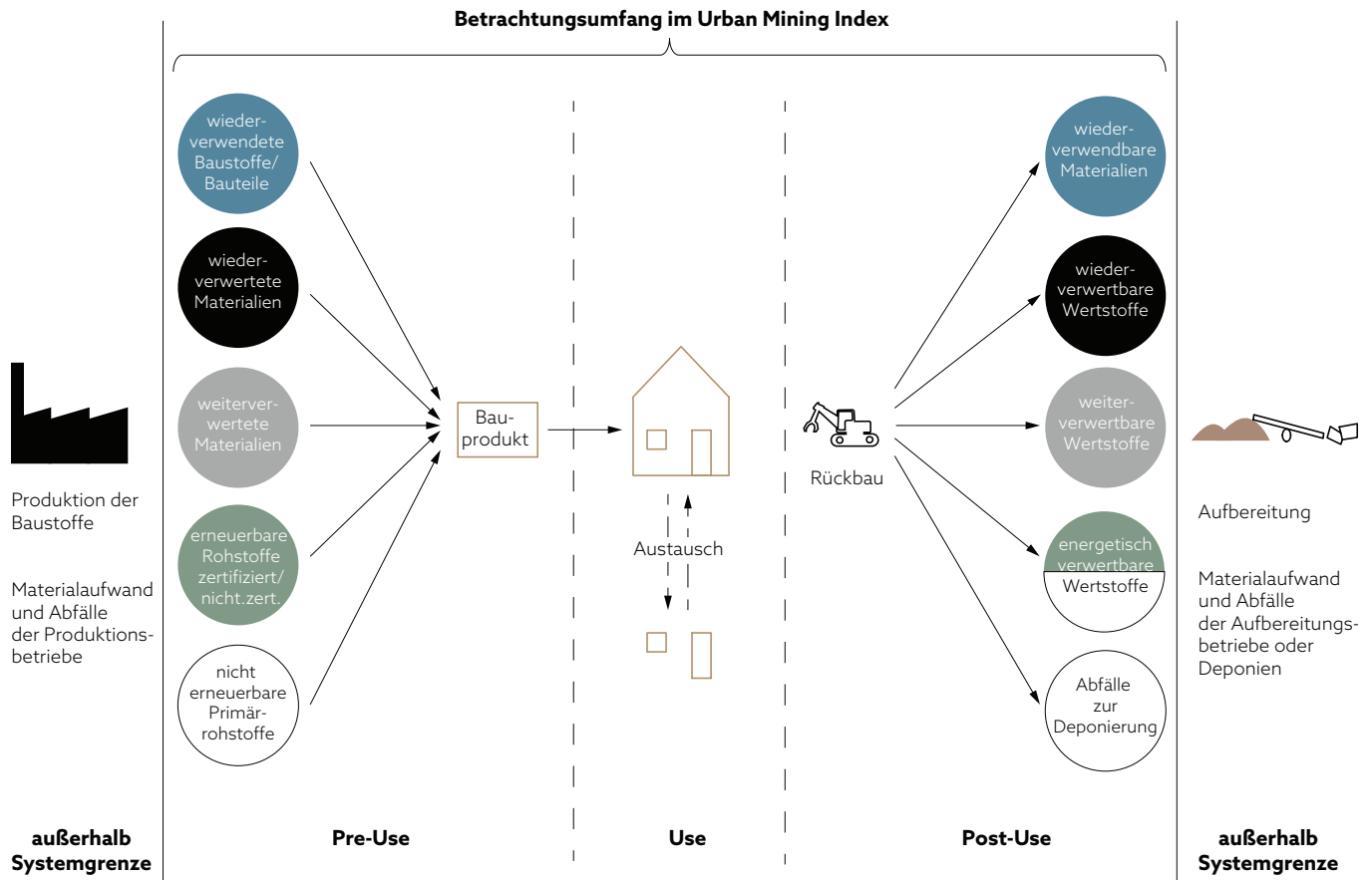
#### 2.4.3. Abschneideregeln

- In der Materialaufstellung werden alle Schichten eines Bauteils erfasst. Geringfügige Massen (<1% der Gesamtmasse eines Bauteils) wie Befestigungsmittel oder Fugenmaterialien können vernachlässigt werden (nicht jedoch die Befestigungsart, da sie einen wesentlichen Einfluss auf die Trennbarkeit der Materialien und damit auf die sortenreine Rückgewinnung hat).
- Der Wert der Materialien, der die Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus und damit die Kreislaufpotenziale beeinflusst, wird mit dem Annahmepreis beim Verwerter/Entsorger kalkuliert (nicht mit dem Verkaufspreis des Verwerter/Entsorgers), s. Kapitel 5.3.2 und 6.1.
- Der Arbeitsaufwand, der ebenfalls die Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus und damit die Kreislaufpotenziale beeinflusst, umfasst den direkten Personenaufwand und den direkten Betrieb von Maschinen (s. Kapitel 5.3.1). Der Aufwand für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung von Maschinen wird vernachlässigt.

#### 2.4.4. Zusätzliche Betrachtung: CO<sub>2</sub>-Footprint

Da in allen vier der oben genannten Materialgruppen entweder direkt im Materialkreislauf (biotisch und fossil) oder indirekt in den Prozessen (mineralisch und metallisch) der Kohlenstoffkreislauf eine große Rolle spielt, wird der CO<sub>2</sub>-Footprint (Indikator Treibhauspotenzial der Ökobilanz) parallel zu den Kreislaufpotenzialen berechnet. Auf diese Weise kann überprüft werden, ob sich eine Steigerung des Kreislaufpotenzials auch positiv auf den Kohlenstoffkreislauf auswirkt.

Die Systemgrenzen zur Berechnung des Treibhauspotenzials entsprechen den Modulen A-D nach DIN 15978 (s. Abb. A 2.9 auf Seite 29), sofern die Daten verfügbar sind.



## 2.5. Wissenschaftliches Vorgehen

A 2.12 Systemgrenzen des Urban Mining Index

Die Vorgehensweise wird anhand eines Ablaufplans auf Seite 36 dargestellt und im Folgenden erläutert.

### Status quo

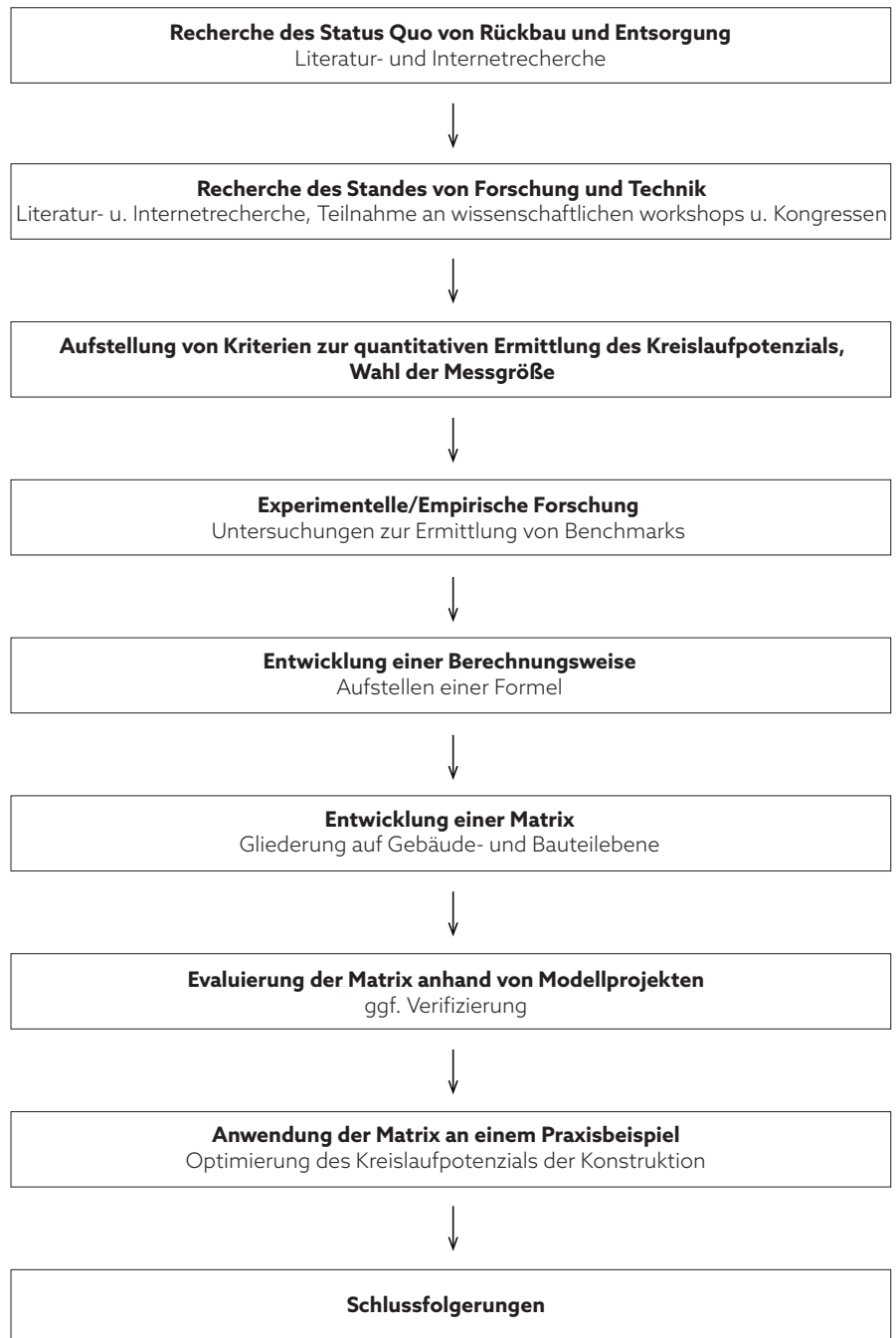
Um den Handlungsbedarf aufzuzeigen, wird zunächst der Status quo zu Rückbau und Entsorgung im Bauwesen recherchiert. Hierzu gehören die rechtlichen Grundlagen, statistische Daten zur Kreislaufwirtschaft und eine Analyse der Rückbaupraxis.

### Stand von Forschung und Technik

Durch eine weiterführende Recherche zu angewandten Bewertungsmethoden werden bestehende Lücken aufgezeigt. Hierzu werden die bedeutenden internationalen und die deutschen Gebäudezertifizierungssysteme in Bezug auf die Berücksichtigung von Rückbau- und Recyclingaspekten beleuchtet. Weiterhin wird der recherchierte Stand der Forschung dargestellt, um zu prüfen, welche Ergebnisse anderer Forscher aufgegriffen und weiterentwickelt werden können, aber auch, um die eigene Forschung abzugrenzen.

### Aufstellen von Kriterien

Aus den Erkenntnissen der Recherche werden im nächsten Schritt messbare Kriterien für die Entwicklung des Urban Mining Index abgeleitet. Die Parameter sollen sich an dem Ziel orientieren, durch eine differenzierte



und quantitative Abbildung der Kreislaufpotenziale das Bauen in geschlossenen Kreisläufen zu fördern (s. Kapitel 5).

#### *Experimentelle/empirische Forschung*

Um die Erfüllung der Kriterien an praxisnahen Skalen messen zu können, werden Benchmarks aufgestellt. Falls notwendige Daten nicht aus bestehenden Quellen recherchiert werden konnten, wie Aufwände für die Demontage verschiedener beispielhafter Konstruktionen, wurden sie durch experimentelle und empirische Forschung in Versuchsständen und in Kooperation mit Herstellern erhoben.

Auf Rückbaustellen wurden in Zusammenarbeit mit Abbruchunternehmern praxisnahe Daten für den Rückbau von Konstruktionen, die in der

Neubauplanung auch heute noch aktuell sind, erhoben. Diese Erhebungen wurden von der Verfasserin selbst durchgeführt.

#### *Entwicklung einer Berechnungsweise/Formel*

Für die quantitative Bewertung wird eine Berechnungsweise definiert, indem die aufgestellten Kriterien in einer Formel zusammengeführt werden.

#### *Entwicklung einer Matrix*

Kernstück der Arbeit ist die Entwicklung einer Matrix, die zur Erfassung der Neubauplanung dient und mit der das Kreislaufpotenzial anhand der hinterlegten Daten und Formeln berechnet und ausgewiesen wird. Die Matrix wird in Form eines Exceltools erstellt. Eine spätere Weiterentwicklung als Online-Anwendung oder Implementierung in das Building Information Modelling (BIM) ist denkbar, aber nicht Inhalt dieser Arbeit. In die Matrix wird der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck für die zu untersuchenden Bauteile integriert, um die Optimierungen des Kreislaufpotenzials mit den Auswirkungen auf den Kohlenstoffkreislauf abgleichen zu können.

#### *Evaluierung*

Anhand von studentischen Modellprojekten wird die Matrix evaluiert und verifiziert. Anschließend werden die wesentlichen Bauteile zweier Modellprojekte, die als Beispiele für Urban Mining Design von Hillebrandt und Riegler-Floors [52] für den Atlas Recycling entworfen und konstruiert worden sind, hinsichtlich ihres Kreislaufpotenzials mit der neu entwickelten Methodik bewertet.

#### *Anwendung an einem Praxisbeispiel*

Auf Gebäudeebene wird die Matrix schließlich an einem realen Praxisbeispiel angewandt. Dabei handelt es sich um das Bauvorhaben „Rathaus Korbach“, das als Modellprojekt für ressourcenschonendes Bauen vom Land Hessen gefördert wird (s. Kapitel 9.1). Das Bewertungstool wird in der Entwurfs- und Ausführungsplanung als Planungsinstrument eingesetzt, um das Kreislaufpotenzial der Gebäudekonstruktion zu optimieren. Anhand des Praxisbeispiels wird außerdem die Anwendbarkeit des Bewertungstools für die Gebäudezertifizierung nach DGNB dargestellt (s. Kapitel 9.3.2 und Kapitel 10, Seite 299).

#### *Schlussfolgerungen*

Anhand der Modellprojekte werden die Ergebnisse der Arbeit mit der ursprünglichen Fragestellung abgeglichen. Es wird überprüft, inwiefern die Ziele der Arbeit mit der entwickelten Bewertungsmethodik erreicht werden. Bleiben Aspekte offen, werden Hinweise auf weitergehenden Forschungsbedarf gegeben.



