

Kapitel III | Nachhaltigkeit

3.1 Verknüpfung der Leitfaktoren mit einem Fokus auf Nachhaltigkeitsaspekte

Aus den vorangehenden Einzelanalysen geht hervor, dass Projekte oft mit einer besonderen Stärke eines Leitfaktors entstehen und in der Projektierung versucht wird, einen weiteren Leitfaktor zu berücksichtigen. Anhand der analysierten Beispiele aus der Betonforschung bestätigt sich, dass die Berücksichtigung aller drei Parameter selten anzutreffen ist. Aus Sicht der Autorin führt aber gerade das Ineinandergreifen aller drei Leitfaktoren zu einem vorwärtstreibenden Effekt, der den eingangs erläuterten Mängeln entgegenwirken kann ([→1.1.2 Darstellung des Zusammenhangs von Mangel, Forschungslücke und Potenzial](#)). Schlüsselaufgabe der Architektur ist es, durch diese Verknüpfung Synergien zu finden. Dazu bedarf es mutiger Experimente in der Architektur, die den Spagat zwischen geltenden Normen im Bauwesen und darüber hinaus gehenden innovativen Forschungsansätzen schaffen. Erst der ganzheitliche Ansatz aus der Verknüpfung von Forschung und Ausführung sowie deren Rückkopplung mit der Produktion verkörpert eine vielversprechende Handlungsweise. Besonderes Nachhaltigkeitspotenzial entsteht an den Schnittstellen der einzelnen Leitfaktoren zueinander. Diese Annahme der Autorin soll im Folgenden belegt werden.

3.1.1 Grundlagenbetrachtung zur Nachhaltigkeitsbewertung

Um eine Verbesserung der Nachhaltigkeit einer Konstruktion nachweisen zu können, ist zunächst eine übergeordnete Einordnung der Systeme von Nachhaltigkeitsbewertungen erforderlich. Die Bewertung der Nachhaltigkeit im Bauwesen und im Speziellen die Bewertung von Bauweisen und Konstruktionen ist aufgrund der vielschichtigen Einflussfaktoren keine leichte Aufgabe. Das Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude (QNG) des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) hat zum Ziel, ein einheitliches Verständnis von Nachhaltigkeit im Bauwesen zu fördern.³³⁴ Grundlegende Vorgehensweisen und Richtlinien werden beispielsweise im registrierten Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) festgeschrieben.³³⁵ Dies regelt die Zertifizierung von Bundesbauten in Bezug auf den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes. Dies wird bewertet anhand der Säulen der ökologischen, ökonomischen und soziokulturellen Qualitäten sowie der technischen Qualität, der Prozessqualität und der Standortmerkmale als Querschnittsparameter.

³³⁴ Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, »Das Qualitätssiegel«, 2024, <https://www.qng.info/qng/> (abgerufen am 18. April 2024).

³³⁵ Dass., »Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)«, 2023, <https://www.bnbnachhaltigesbauen.de/bewertungssystem/> (abgerufen am 18. April 2024).

Die DGNB³³⁶-Zertifizierung ist eine weitere Möglichkeit der Zertifizierung, die sich für Wohn- und Nichtwohngebäude etabliert hat und auf denselben Parametern fußt. So erfolgt eine ganzheitliche, leistungsorientierte Betrachtung über den gesamten Lebenszyklus nach sechs Themenfeldern.³³⁷ „Neben vielen weiteren Nachhaltigkeitsaspekten bewerten beide Systeme auch die Ökobilanz des Gebäudes, womit auch die Emissionen aus Beton bzw. Zement berücksichtigt werden. Allerdings ist festzustellen, dass die Treibhausgas-Emissionen, die mit der Baustoffwahl und damit dem Einsatz von Zement und Beton zusammenhängen, einen verschwindend geringen Anteil (~1 %) am Gesamtergebnis der Zertifizierung haben.“³³⁸ Die Grundsätze zur Durchführung einer Lebenszyklusanalyse (LCA)³³⁹ eines Gebäudes werden in der DIN EN ISO 14040/44 geregelt. Die Bilanzierung erfolgt nach einer Einordnung in die folgenden vier Lebenszyklusphasen wie nach DIN EN 15978:2012-10³⁴⁰ definiert: A 1-3 Herstellung; A 4-5 Errichtung; B 1-7 Nutzung; C 1-4 Entsorgung und die unter D aufgeführten Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenzen. Darin fließt beispielsweise das Potenzial für Wiederverwendung oder Rückgewinnung und Recycling in die Bilanzierung mit ein. Plattformen wie ÖKOBAUDAT liefern die erforderlichen Datensätze zur Erstellung dieser Gebäude-Ökobilanzen.³⁴¹

Kritisch an der Herangehensweise ist der alleinige Fokus auf die Bilanzierung der Treibhausgasemissionen in Form einer Erfassung der Energie- und Stoffströme zu sehen. Wichtige andere Faktoren, wie beispielsweise die Materialverfügbarkeit, die Effizienz des Entwurfs- und Fertigungsprozesses, der Automatisierungsgrad, die Auswirkungen auf die Gesundheit oder ökonomische Aspekte, werden hingegen nicht berücksichtigt. Hier existieren für soziale Aspekte die SLCA (Social Life Cycle Assessment)³⁴² und die LCCA (Life Cycle Cost Analysis).³⁴³ Bei den in Deutschland in der Praxis etablierten Bewertungsansätzen bleiben eine übergeordnete Betrachtung und die Verknüpfung der unterschiedlichen Parameter oftmals aus. Dies rechtfertigt die folgenden Ausführungen unter zur Notwendigkeit einer digitalen Unterstützung, um die Nachhaltigkeitsbewertung ganzheitlich zu verbessern ([→3.1.4 Résumé: Kreislauftigkeit durch digital gestützte Prozesse](#)).

Um eine Einordnung beziehungsweise Nachhaltigkeitsbewertung verschiedener Bausysteme vornehmen zu können, ist es notwendig, die Erfassung auf einer vergleichbaren Ausgangslage zu gründen. Die Zusammenhänge und

³³⁶ Vgl. Abkürzung DGNB steht für Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen.

³³⁷ Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen - DGNB e.V., »Das wichtigste zur DGNB Zertifizierung«, <https://www.dgnb.de/de/zertifizierung/das-wichtigste-zur-dgnb-zertifizierung/ueber-das-dgnb-system> (abgerufen am 17. April 2024).

³³⁸ WWF Deutschland, *Klimaschutz in der Beton- und Zementindustrie. Hintergrund und Handlungsoptionen*, Berlin, 2019, S. 24, https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF_Klimaschutz_in_der_Beton- und_Zementindustrie_WEB.pdf (abgerufen am 5. Mai 2022).

³³⁹ Vgl. Erläuterungen Glossar.

³⁴⁰ Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, »Ökobilanz: 2.4 Lebenszyklusphase«, <https://www.wecobis.de/en/service/sonderthemen-info/gesamttext-oekobilanz-zwischen-den-zeilen-info/grundlage-der-oekobilanz.html> (abgerufen am 21. April 2024).

³⁴¹ Dass., »ÖKOBAUDAT: Informationsportal Nachhaltiges Bauen«, <https://www.oekobaudat.de/> (abgerufen am 18. April 2024).

³⁴² Sheng Yang u. a., »Development and applicability of life cycle impact assessment methodologies«, in: *Life Cycle Sustainability Assessment for Decision-Making 2020*, S. 95–124, hier S. 108.

³⁴³ Ebd., S. 104.

wissenschaftlichen Erkenntnisse in der Nachhaltigkeitsbewertung sind oft komplex und fußen teils auf einer noch wenig erforschten Datengrundlage. Sobek hat hier in seinem Werk „Non nobis – über das Bauen in der Zukunft, Band I. Ausgehen muss man von dem, was ist“ eine differenzierte Betrachtung der Einflussfaktoren und eine weiterreichende Datengrundlage bereitgestellt.³⁴⁴ Die von Sobek dargelegten Zahlen und Verhältnisse stellen daher eindrucksvoll den enormen Handlungsbedarf in den Vordergrund, die Zusammenhänge gesamtheitlich zu betrachten. Dabei geht es nicht darum die Verwendung eines bestimmten Werkstoffs zu forcieren, sondern vielmehr für eine allumfassendere Sichtweise zu sensibilisieren und zu ermöglichen, die richtigen Schlüsse mit Bezug auf die Entnahme verschiedener Rohstoffe aus dem Stoffkreislauf zu ziehen.³⁴⁵ Hierbei ist es relevant zu wissen, woher das jeweilige Material stammt, wie groß der CO₂-Fußabdruck ist und wie man bestmöglich gegensteuern kann, indem man einen Ausgleich für sämtliche Emissionen schafft. Es darf ein Werkstoff nicht aufgrund seines vordergründig schlechten Images oder der dahinterstehenden Lobby, wie es bei den aktuellen Antagonisten Beton und Holz der Fall ist, diskreditiert oder hervorgehoben werden. Sobek plädiert dafür, den Blick zu weiten und mehr Daten in größerem Umfang zu erheben und nicht nur begrenzte Ausschnitte zu betrachten. Er zeigt auf, dass die Bewertung der Nachhaltigkeit nicht erst mit der Entnahme der Ressource (beispielsweise Holzabbau) beginnen solle, sondern darüber hinaus zu berücksichtigen sei, dass für die entsprechende Entnahme ein Ausgleich geschaffen werden müsse.³⁴⁶ Müller wiederum fordert eine gesamtheitliche Berechnungsmethodik und folgert, dass neben dem Energieeinsatz in Herstellung und Betrieb ebenso der Vernichtung von Energie und Rohstoffen bei Abriss ein größerer Fokus zukommen sollte.³⁴⁷

Bei der Nachhaltigkeitsbetrachtung ist es aus Sicht der Autorin essenziell, nicht allein die absoluten Einträge des Treibhauspotenzials in die Bewertung einfließen zu lassen, sondern vielmehr weitere umfassende Faktoren zu berücksichtigen, wie beispielsweise Lebensdauer, Materialverfügbarkeiten, Wiederverwendbarkeit und Umnutzungspotenziale. Zunehmend müssen Konstruktionen auch Flexibilität und Anpassungsstrategien ermöglichen, um die Lebensdauer von Gebäuden zu erhöhen. Diese Parameter können zukünftig mehr ins Gewicht fallen als allein die Bilanzierung von CO₂-Äquivalenten. Einen weiteren Faktor der Bewertung stellen Phänomene wie prognostizierte Temperaturspitzen, erhöhte Brandgefahren und starke Winde dar. In diesem Kontext kann die Erhöhung der Masse eine gesteigerte Nutzersicherheit bieten. Monolithische Systeme adressieren diese Anforderungen und können in besonderem Maße eine langfristige Nutzung und Nachnutzungsmöglichkeiten erlauben.

Diese Effekte finden bisher keine angemessene Berücksichtigung in der Ökobilanzierung von Produkten und der Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden.

³⁴⁴ Vgl. Sobek/Heinlein 2022 (wie Anm. 3), S. 264–265.

³⁴⁵ Vgl. ebd., S. 20.

³⁴⁶ Vgl. ebd., S. 75.

³⁴⁷ Vgl. Kerstin Müller, »Das Lesen und Weiterschreiben der gebauten Umwelt«, in: Felix Heisel und Dirk E. Hebel (Hg.), *Urban Mining und kreislaufgerechtes Bauen. Die Stadt als Rohstofflager*, Stuttgart 2021, S. 65–78, hier S. 66.

An dieser Stelle wird deutlich, dass traditionelle Analysen nicht vollumfänglich wirken und die aktuellen Herausforderungen und Potenziale nicht angemessen gewichtet. Dies zeigt einmal mehr, dass aufgrund der weitgreifenden Änderungen im Bausektor auch die Richtlinien und eben auch Bewertungstools anzupassen sind. Hier besteht grundlegender Handlungsbedarf.

Eine Zielstellung der Dissertation ist es, die Nachhaltigkeit durch die eingeführte Strategie der Individualisierten Standardisierung zu verbessern. Die sich ergebenden Vorteile fallen jedoch angesichts der aktuell zur Verfügung stehenden Bewertungsmethoden und gängigen Zertifizierungssystemen durchs Prüfraster. Weitreichende Potenziale für die Verbesserung der Nachhaltigkeit sind nicht messbar, blieben somit unerkannt und würden entsprechend auch nicht ins Gewicht fallen. Es wird daher im Anschluss eine Möglichkeit zur Erschließung dieser Vorteile konzipiert. Die Autorin prognostiziert, dass sich Potenziale bei der Verknüpfung der Leitfaktoren ergeben, die im Folgenden als neuartige Schnittstellen eingeführt werden.

3.1.2 Etablierung einer aufeinander aufbauenden Pyramidalen Zirkularität

Die These der Individualisierten Standardisierung verlangt im ersten Schritt die Umsetzung der drei eingeführten Leitfaktoren. Unter Kapitel ([→1.2.1 Darstellung der Probleme und Ziele](#)) wurde erläutert, warum unter der Vielzahl der im Bauwesen relevanten und ineinander greifenden Parametern diese drei als wesentliche Leitfaktoren wissenschaftlich betrachtet werden. Die Auswahl setzt eine zeitliche und damit sequentielle Abhängigkeit der Parameter Gestaltung, Konstruktion und Technik voraus ([Abb. 37](#)).

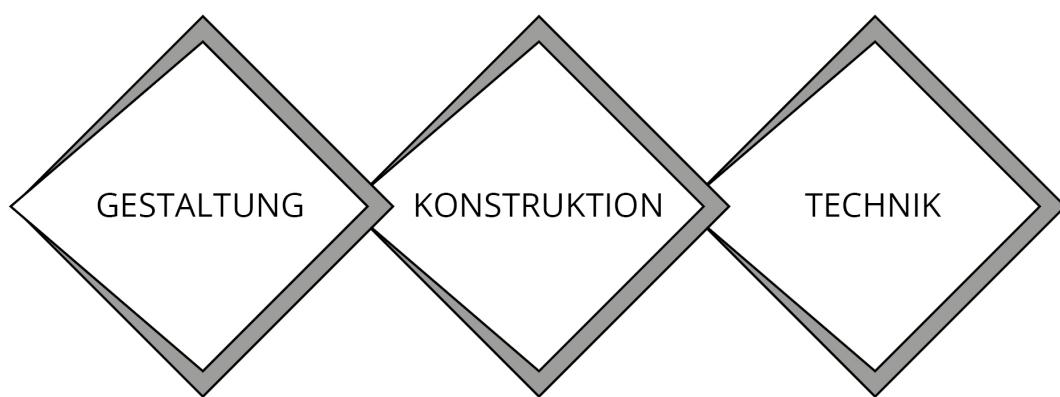


Abb. 37: Leitfaktoren in zeitlicher Abhängigkeit. Eigene Darstellung

Darüber hinaus geht es jedoch nicht nur um eine lückenlose Verknüpfung dieser Parameter, sondern vielmehr um eine zirkuläre Bindung. Durch eine Erweiterung der (digitalen) Prozesskette, vorwärts gewandt in Richtung des zirkulären Entwerfens und rückwärts gewandt in Richtung des Urban Mining³⁴⁸, kann die kreislaufgerechte Bauwirtschaft auf eine höhere Stufe gehoben werden. Diese beiden Erweiterungen der Systemgrenzen zum zirkulären Entwerfen und der Einführung von Rückbauregelungen erfahren nach Einschätzung der Autorin bisher keine angemessene Gewichtung ([Abb. 38](#)). Die folgende Betrachtung bietet einen Lösungsansatz, der die Strategie der Individualisierten Standardisierung in den Kontext der Kreislaufwirtschaft überleitet.

³⁴⁸ Vgl. Erläuterungen Glossar.

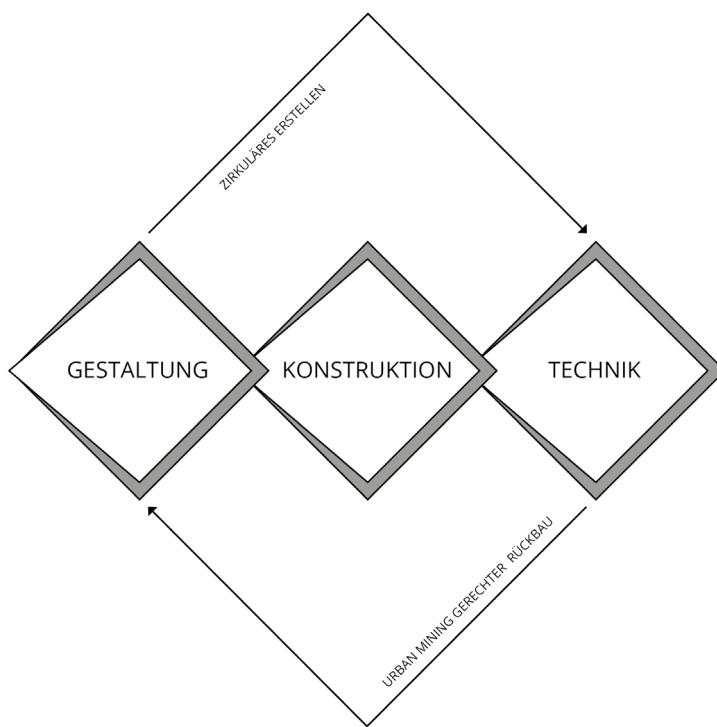


Abb. 38: Systemerweiterung zirkuläres Entwerfen – Urban Mining-gerechter Rückbau.
Eigene Darstellung

Die Welt und damit auch der Bausektor befinden sich durch den aktuellen Klimanotstand ebenso wie durch politische Unsicherheiten im Wandel. Aufgrund der damit verbundenen Veränderungen werden die Begriffe Digitalisierung, Automatisierung und Recycling um neue Schlagworte wie urbanes Rohstofflager (Urban Mining) und Kreislaufwirtschaft (circularity) erweitert.

In der Vergangenheit wurden vorrangig Vermeidungsstrategien angewandt. So wurde mittels Recycling ein verringelter Einsatz von Rohstoffen („downcycling“) und mittels Vermeidung ein reduzierter Ausstoß von Emissionen („incremental reduction“) forciert (Abb. 39). Diese Herangehensweise ist aktuell nicht mehr ausreichend zielführend. Laut Cradle to Cradle®-Pionier Braungart und der Gruppe EPEA der Drees & Sommer SE besteht das Potenzial, durch die Faktoren „rethink“, „reuse“ und „upcycle“ die Effektivität zu steigern und somit eine erhöhte Qualität und Leistungsfähigkeit auf dem Weg zur Reduktion des CO₂-Fußabdrucks zu generieren.³⁴⁹

³⁴⁹ Vgl. EPEA GmbH - Part of Drees & Sommer, »Gemeinsam die Welt von morgen gestalten Mit dem Cradle to Cradle-Pionier und Gemeinsam die Welt von Morgen gestalten mit dem Innovationspartner _EPEA« (abgerufen am 19. April 2024).

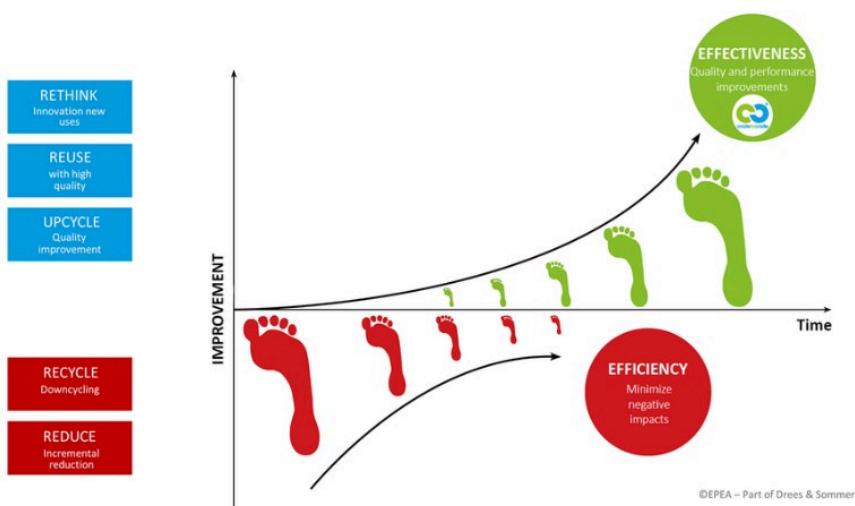


Abb. 39: Verbesserung der Nachhaltigkeit aus Effizienz- und Effektivitätsansprüchen

© EPEA GmbH, Drees und Sommer

Cradle to Cradle® ist ein Designprinzip, das bereits in den 1990er Jahren von Braungart, McDonough und EPEA GmbH Hamburg entwickelt wurde.³⁵⁰ Übersetzt heißt es „Von der Wiege zur Wiege“ und beschreibt die sichere und potenziell unendliche Zirkulation von Materialien und Nährstoffen in Kreisläufen. Alle Inhaltsstoffe von Materialien müssen chemisch unbedenklich und kreislauffähig sein. Müll im heutigen Sinne, wie er durch das bisherige „Take-Make-Waste“-Modell³⁵¹ entsteht, gibt es in diesem Konzept nicht mehr, sondern nur noch nutzbare Nährstoffe. Die Implementierung des Cradle to Cradle® (C2C) Designprinzips konkurriert dabei nicht mit Gebäudezertifizierungen nach DGNB, LEED, BREEAM oder HQE. Die Umsetzung der C2C Prinzipien baut vielmehr auf ganzheitlichen Nachhaltigkeitsstandards auf, um Gebäude mit einem größtmöglichen positiven Fußabdruck zu schaffen. Es geht entsprechend der Vision von C2C nicht nur darum eine Klimaneutralität anzustreben, sondern darum eine positive Wirkung zu erzielen. Diese Haltung impliziert eine aktive Herangehensweise.

Auf Basis einer ähnlichen Zielstellung hat sich in den vergangenen Jahren der Begriff Urban-Mining-Design gefestigt. „Urban Mining“ bezeichnet die gezielte Rohstoffgewinnung im städtischen und kommunalen Raum.³⁵² „Die übliche Methode zur Einordnung von Produkten in Bezug auf deren ökologischen Fußabdruck ist wie zuvor beschrieben die Ökobilanzierung. Dabei wird eine systematische Analyse der Umwelteinwirkungen von Produkten während des gesamten Lebensweges vorgenommen. Über diese reine analytische Feststellung hinaus fordert Urban-Mining-gerechtes Bauen eine verstärkte Aktivität auf der Ebene der

³⁵⁰ William McDonough und Michael Braungart, *Cradle to cradle. Remaking the way we make things*, New York, NY 2002, S. 179.

³⁵¹ Thibaut Wautelet, »Exploring the role of independent retailers in the circular economy: a case study approach« Unpublished 2018.

³⁵² Martin Ittershagen, *Urban Mining. Rohstoffquellen direkt vor der Haustür*, unter Mitw. von Martin Ittershagen 2017, S. 1.

Planenden und setzt durch eine kreislaufgerechte Planung und Verwendung von Baustoffen ein Umdenken in Gang. Diese Notwendigkeit beschreibt Hillebrandt wie folgt: „Der Paradigmenwechsel Urban-Mining-Design (UMD) basiert auf kreislaufwirtschaftlicher Planung und Kostenbetrachtung über den gesamten Lebenszyklus einer Immobilie einschließlich ihrer Umwelteinwirkungen. [...]. Die Strategie Urban-Mining-Design setzt auf vielen Maßstabsebenen des Bauens an, fördert die nachhaltige Ressourcennutzung, senkt den primären Ressourcenverbrauch durch Einsatz von Sekundärrohstoffen und schützt so unsere Lebensgrundlagen Boden, Luft und Wasser.“³⁵³ Hillebrandt unterteilt in die Bereiche Städtebau, Gebäudekubatur, Gebäudestruktur, Haustechnik, Fügung und Material, und gibt Ausblicke, wie durch Umdenken nachhaltiges Bauen ermöglicht werden kann. Als ein Faktor wird die Nachhaltigkeit der Gebäudestruktur wesentlich durch seine ursprüngliche Auslegung definiert. Raumprogramm und Nutzungsarten ändern sich erfahrungsgemäß immer schneller. Um eine langfristige Nutzbarkeit auch unter gewandelten Anforderungen zu ermöglichen, muss eine Gebäudestruktur diesem Wandel standhalten können. Durch eine gewisse Überdimensionierung, zum Beispiel der Raumhöhe, kann ein Gebäude hinsichtlich seiner Typologie auf zukünftige Nutzungsarten flexibel reagieren. Es gilt, altbekannte Herangehensweisen vor dem Hintergrund einer geschlossenen Kreislaufwirtschaft bereits im Entwurf zu hinterfragen. Ähnliches trifft zu bei der statischen Dimensionierung der Tragwerke. „Erst ausreichende Lastreserven ermöglichen die gewünschte Nutzungsflexibilität und eine Anpassung des Gebäudes an zukünftige statische Anforderungen.“³⁵⁴ Dabei ist für zukunftsfähige Planungskonzepte die Balance zwischen Reduktion auf der einen und Überdimensionierung auf der anderen Seite maßgebend.“³⁵⁵

Die Umsetzung des Urban-Mining Ansatzes auf Materialebene wird an aktuellen Forschungsinhalten zum kreislaufgerechten Bauen verfolgt. Rosen liefert mit den Beiträgen zum Urban-Mining und kreislaufgerechten Bauen eine wichtige Diskussionsgrundlage.³⁵⁶ Am Rathaus Korbach zeigt sich anschaulich, wie Stoffkreisläufe beim Bauen geschlossen werden können. Heisel und Hebel sehen die Herausforderung darin, Technologien und Konzepte bereitzustellen, die Baumaterialien dazu befähigen, überhaupt kreislauffähig einsatzfähig zu sein.³⁵⁷ Heisel betont die Notwendigkeit, von einer „linearen Ressourcenverwendung hin zu einer kreislaufgerechten Bauwirtschaft“ überzugehen und bezeichnet diesen Schritt als Paradigmenwechsel.³⁵⁸ Dieser Wandel erscheint nur möglich, wenn der Gedanke des Urban-Mining-Designs ganzheitlich umgesetzt wird. Heinlein formuliert das Ziel für den Bausektor wie folgt: „Benötigte Materialien werden nicht mehr aus einer endlichen Ressource gewonnen und nach Gebrauch entsorgt, sondern nur für eine bestimmte Zeit aus einem Kreislauf entnommen und dann wieder in diesen

³⁵³ Annette Hillebrandt u. a. (Hg.), *Atlas Recycling. Gebäude als Materialressource*, München 2018 (*Edition Detail*), S. 10, <https://doi.org/10.11129/9783955534165>.

³⁵⁴ Ebd., S. 12.

³⁵⁵ Hollmann-Schröter 2021 (wie Anm. 15), S. 178.

³⁵⁶ Vgl. Anja Rosen, »Die Ökonomie des Urban Mining: Das Modellprojekt Rathaus Korbach«, in: Dirk Hebel, Felix Heisel und Ken Webster (Hg.), *Besser - Weniger - Anders Bauen. Kreislaufgerechtes Bauen und Kreislaufwirtschaft*, Basel 2022, S. 80–91, hier S. 89.

³⁵⁷ Vgl. Heisel/Hebel 2021 (wie Anm. 35), S. 12.

³⁵⁸ Frank Heinlein, *Recyclable by Werner Sobek. German/ English edition*, Stuttgart 2019, S. 130.

zurückgegeben. Das Gebäude ist ein Materialspeicher, den es zu systematisieren und verlässlich und dauerhaft zu katalogisieren gilt – da er nur so am Ende seines Lebenszyklus einer sinnvollen Weiterverwendung zugeführt werden kann.“³⁵⁹ Dies erfordert auf vielerlei Ebenen eine völlig neue Denkweise. McDonough und Braungart haben schon 2002 mit dem Werk „Cradle to Cradle Remaking the way we make things“ grundlegende Veränderungen gefordert, getreu dem Motto „Ändere nicht das Rezept, ändere das Menu.“³⁶⁰ Im Status quo liegt das zirkuläre Entwerfen jedoch im Ermessen der Planer, eine Umsetzungsbinding existiert bisher nicht. Die Rückbaubarkeit wird marginal als Gutschrift bei der Ökobilanzierung gewertet. An dieser Stelle sind laut Meinung der Autorin gravierende Veränderungen, durch gesetzliche Vorgaben oder wirtschaftliche Anreize, erforderlich.

Konkrete Handlungsempfehlungen zur Umsetzung eines Kreislaufansatzes für das Bauwesen bietet Hillebrandt mit den Herangehensweisen „Urban-Mining Design“³⁶¹ und „Urban-Loop Design“³⁶². Auf Basis dieser allgemeinen Darlegung liegt der Lösungsweg zu einer kreislaufgerechten Bauwirtschaft im ersten Schritt im bewussten Verwenden (Erkennen). Im zweiten Schritt geht es vorrangig darum weniger Material zu verwenden. Der Fokus liegt also auf der Reduktion der Masse (Vermeiden), so dass weniger Primärmaterial zum Einsatz kommt. Ein folgerichtiger dritter Schritt besteht in der Rückführung der Materialien nach der Nutzungsdauer in den Stoffkreislauf (Wiederverwenden). Im vierten Schritt stehen so bereits eingesetzte Materialien dem Bauwesen wieder neu zur Verfügung (Rückführen).³⁶³

³⁵⁹ *Ebd.*, S. 8.

³⁶⁰ McDonough/Braungart 2002 (wie Anm. 365), S. 179.

³⁶¹ Hillebrandt 2021 (wie Anm. 69), S. 51.

³⁶² *Ebd.*, S. 58.

³⁶³ Vgl. *ebd.*, S. 49–59.

Die Dissertation folgt der von Hillebrandt aufgestellten Forderung nach dem abgebildeten Vierschritt aus Erkennen, Vermeiden, Wiederverwenden, Rückführen zur Umsetzung einer kreislaufgerechten Bauwirtschaft und schneidet diesen auf den Anwendungsfall der Individualisierten Standardisierung zu. In dem Sinne können die vier Begrifflichkeiten wie folgt in einen ganzheitlichen Zusammenhang transferiert werden:

1. Erkennen: Durch digitale Planungswerzeuge können Konstruktionen und Materialien bewusster zum Einsatz kommen.
2. Vermeiden: Aus der Kombination eines Systemgedankens und der Fertigungstechnologie lässt sich Material einsparen.
3. Wiederverwenden: Die Systematisierung vereinfacht eine Rückführung signifikant. Die Nachbearbeitung oder Wiederaufarbeitung ist durch konstruktive Vorgaben und automatisierte Maschinentechnologie möglich.
4. Rückführung: Im letzten Schritt steht einem neuen Einsatz nichts im Wege und schließt damit den Kreislauf.

Von der Autorin werden aufbauend auf den Ansätzen Hillebrandts durch die vorangehende detaillierte Betrachtung der Leitfaktoren und deren Zusammenführung tiefergehende Zusammenhänge gesehen, die anschließend dargelegt werden. Um die Kreislaufwirtschaft für das Bauwesen umzusetzen, erfolgt nun die Überführung der Strategie der Individualisierten Standardisierung in einen zirkulären Zusammenhang. Das dafür entwickelte Prinzip der Pyramidalen Zirkularität soll einen Mehrwert für die am Bau beteiligten Akteure aufzeigen.

3.1.3 Erweiterung der Leitfaktoren um neuartige Schnittstellen

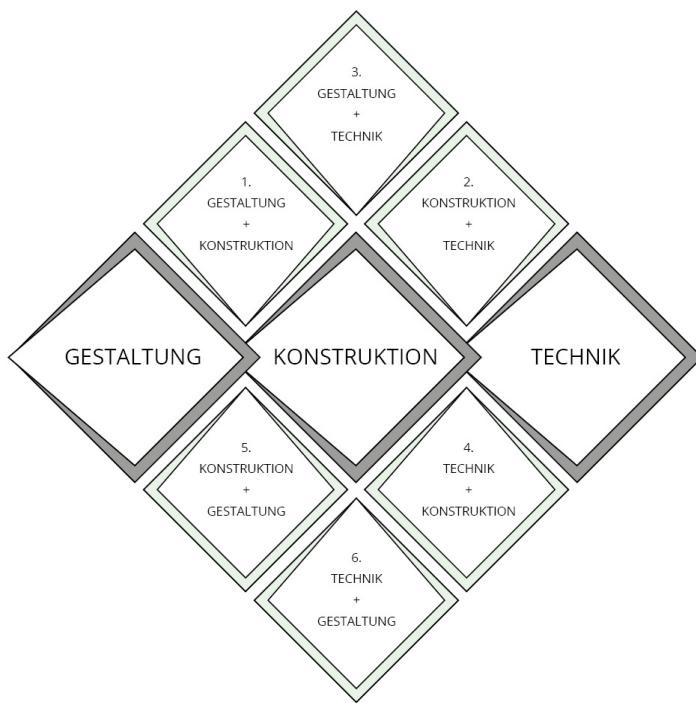


Abb. 40: Zusammenschau der Einflussfaktoren zur Umsetzung einer digital gestützten Nachhaltigkeit. Eigene Darstellung

Die primäre Prozesskette aus den sequenziell angeordneten drei Leitfaktoren wird durch neuartige Ansätze zu einem pyramidal aufeinander aufbauenden zirkulären Prozess erweitert, um eine Kreislauffähigkeit für das Bauwesen zu etablieren. Dies erfolgt in der Verknüpfung von 1. Gestaltung und Konstruktion, aber auch 2. Konstruktion und Technik sowie 3. Gestaltung und Technik, und vice versa von 4. Technik und Konstruktion 5. Konstruktion und Gestaltung und 6. Technik und Gestaltung (Abb. 40). Die sechs Verknüpfungen werden im Folgenden als die sich ergebenden Schnittstellen bezeichnet. Diese können aufgrund der deutlichen Komplexität erst durch die Anwendung eines Systemansatzes und mithilfe digitaler Werkzeuge gewinnbringend zusammengeführt werden. Mit dem dargestellten Prinzip der Pyramidalen Zirkularität wird ein Lösungsvorschlag für die konstatierte Kreislauffähigkeit im Bauwesen geliefert, die auf einer kontinuierlichen Digitalisierungsstrategie fußt (→ 1.1.1 Relevanz). Im Folgenden werden die sechs definierten Schnittstellen nacheinander beleuchtet, Überlegungen zur Ausgestaltung der Schnittstellen angestellt und diese in Bezug auf eine sich einstellende Verbesserung der Nachhaltigkeit untersucht. Hierbei ist es maßgebend, dass die Schnittstellen konsistent über eine digitale Komponente verfügen. Die Betrachtung erfolgt anhand der Parameter Ressource (R), Emission (E), Prozessebene (P), Mensch (M), Zeit (Z), Dauerhaftigkeit (D) und Abfallaufkommen (A). Die folgende Abhandlung fokussiert im Kern auf die sich in der jeweiligen Schnittstelle ergebenden Zusammenhänge. Darüber hinaus wirken sich Entscheidungen an den Schnittstellen

jedoch über die jeweils nicht fokussierten Leitfaktoren aus, da sie im zirkulären Setting miteinander in Beziehung stehen.

3.1.3.1 Schnittstelle Gestaltung – Konstruktion: digitales Planungswerkzeug

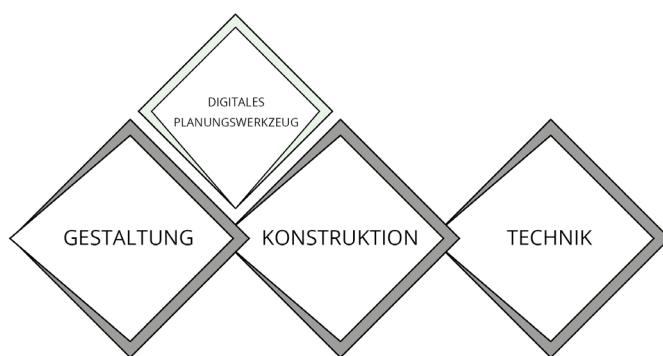


Abb. 41: Nachhaltigkeitspotenzial durch digitales Planungswerkzeug. Eigene Darstellung

Die Abbildung 41 zeigt die erste Ebene der Betrachtung bei der Konzeption von Gebäuden. Sie bezieht sich auf die Anwendung digitaler Werkzeuge an der Schnittstelle von Gestaltung und Konstruktion, mit der Zielsetzung, dass Technik und Materialeinsatz bewusster miteinander verbunden werden. Darauf aufbauend könnte ein digitales Bewertungswerkzeug die zirkulären Entwurfseigenschaften verbessern, indem es standardisierte und dennoch anpassungsfähige Konstruktionen bereits in der frühen Entwurfsphase bis hin zu Szenarien für die zweite Nutzungsphase nach ihren Nachhaltigkeitsauswirkungen bewertet.

Die Bewertung der Nachhaltigkeit von geplanten Konstruktionen und deren Rückkopplung spielt bisweilen im Entwurfsprozess noch keine ausreichend bindende Rolle. Durch die Schaffung der digitalen Schnittstelle zur Nachhaltigkeitsbewertung von Konstruktionen im frühen Planungsstadium können folgerichtig Ressourcen (R) gespart und Emissionen vermindernd (E) werden. Darüber hinaus könnten diese assoziativen Planungstools bereits den Rückbau mit einbeziehen und so auf die Dauerhaftigkeit und auch Nutzungsflexibilität einwirken (D). Helmus und Kesting weisen auf den Mangel hin, dass aktuelle BIM Methoden auf keine ausreichende Datengrundlage zurückgreifen können und somit auch nicht angemessen in die Nachhaltigkeitsbewertung einfließen. „Für ein BIM-basiertes Urban Mining bedeutet dies, dass auf das Recycling hin optimierte zusätzliche Informationsgrundlagen zu schaffen sind und diese mit in die digitalen Standards einfließen müssen.“³⁶⁴ Mit direktem Bezug zum vorangehenden Kapitel der Bewertung der Nachhaltigkeit erfordert der Kreislaufgedanke mit den zuvor erläuterten Inhalten eine spezifische Bewertungsgrundlage (→3.1.1). Hillebrandt hat dafür eine Systematik zur Materialbewertung geliefert.³⁶⁵ Der „Material-Cycle-Status“ bildet ein Gesamtbild für die Einschätzung der Recyclingfähigkeit eines Materials ab.³⁶⁶ Ferner kann bei der

³⁶⁴ Manfred Helmus und Holger Kesting, »BIM zur Optimierung von Stoffkreisläufen im Bauwesen«, in: Annette Hillebrandt u. a. (Hg.), *Atlas Recycling. Gebäude als Materialressource*, München 2021 (Edition Detail), S. 32–33, hier S. 33.

³⁶⁵ Vgl. Annette Hillebrandt und Johanna-Katharina Seggewies, »Recyclingpotenziale von Baustoffen«, in: Annette Hillebrandt u. a. (Hg.), *Atlas Recycling. Gebäude als Materialressource*, München 2021 (Edition Detail), S. 58–101, hier S. 58.

³⁶⁶ Vgl. Hillebrandt 2021 (wie Anm. 69), S. 54.

Erfassung von Kreislaufpotenzialen der von Rosen entwickelte Urban Mining Index (UMI)³⁶⁷ herangezogen werden.³⁶⁸ Sie differenziert in das „Loop-Potenzial“ von Materialien, die ohne Qualitätsverlust in den Kreislauf zurückgeführt werden können und in das „Closed-Loop-Potenzial“ von Materialien, die mit Qualitätsverlusten wiederverwendet werden können.³⁶⁹ Diese wertvollen Herangehensweisen zur Kreislaufbewertung wurden in die Eco-Pass Software überführt. Sie sind bisher analoge Betrachtungen zur ökologischen Bilanzierung mit einer Schnittstelle zu CAD-Anwendungen. Es besteht jedoch noch keine direkte digitale Anbindung an den Entwurfsprozess. Wenn eine frühe Bereitstellung der Datengrundlage, wie sie beispielsweise in den zuvor erläuterten Ansätzen zur Kreislaufwirtschaft von Hillebrandt und Rosen geschaffen wird, digital eingebunden würde und diese Informationen fortwährend miteinander verknüpft würden (→2.4.1.5 **Paradigmenwechsel durch Prozesskontinuität**), dann könnte ein großer Mehrwert entstehen. Dafür ist es zielführend, die digitale Planungsumgebung als assoziative Werkzeuge (**Gestaltung**) einzusetzen, um Fehler- und Schnittstellenprobleme auf ein absolutes Minimum zu reduzieren und eine kontinuierliche Digitalisierung des Planungs- und anschließenden Ausführungsablaufs zu gewährleisten. Durch assoziative Planungswerkzeuge können Bauweisen (**Konstruktion**) bereits in früher Planungsphase einem Assessment unterworfen werden, indem diese Werkzeuge mit digitalen Daten, die beispielsweise die Ökobilanz abbilden, befüllt werden. Dadurch könnte eine Nachhaltigkeitsbewertung durch digitale Werkzeuge schon früher als bisher unmittelbar in der Entwurfsphase ermöglicht werden. Deren Einbindung muss von den Planerinnen und Planern aktiv vorangebracht werden.

³⁶⁷ Vgl. Erläuterung im Glossar.

³⁶⁸ Vgl. Anja Rosen, *Urban Mining Index. Entwicklung einer Systematik zur quantitativen Bewertung der Kreislaufkonsistenz von Baukonstruktionen in der Neubauplanung*, Stuttgart 2021.

³⁶⁹ Vgl. ebd., S. 25.

3.1.3.2 Schnittstelle Konstruktion – Technik: digitales Bauteil

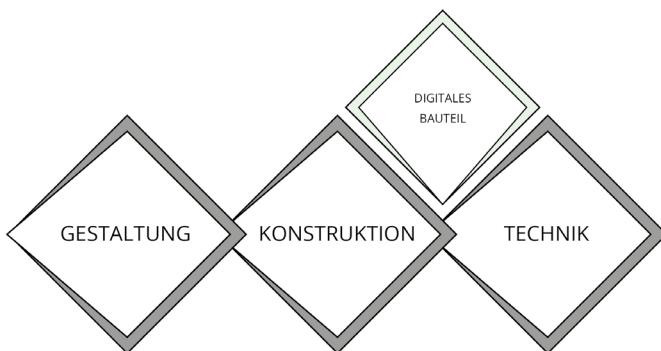


Abb. 42: Nachhaltigkeitspotenziale durch digitales Bauteil. Eigene Darstellung

Abbildung 42 verdeutlicht mit dem „digitalen Bauteil“ an der Schnittstelle von Konstruktion und Technik das Konzept digital simulierter Bauteile. Diese werden zunächst digital unter konsequenter Einbindung eines Systemansatzes und der Fertigungstechnologie geplant und simuliert. Daraufhin werden die digitalen Daten an die Fertigung übergeben und schließlich teil-adaptive Bauteile physisch umgesetzt. Eine automatisierte Ansteuerung dieser Systeme innerhalb des Fertigungsprozesses ist die Voraussetzung für die individuelle Anpassbarkeit. Entsprechend werden die in Kapitel 2.3. beleuchteten Vorteile adaptiver Bauteile erst durch eine Kombination eines Systemgedankens (**Konstruktion**) mit der automatisierten Fertigung (**Technik**) ermöglicht.

Digitale Bauteile simulieren zu Beginn zahlreiche Aspekte, die durch eine wechselseitige Abwägung zueinander in Beziehung gesetzt und optimiert werden. Die digitale Simulation im Vorfeld der Fertigung berücksichtigt diverse Aspekte, die durch eine iterative in-Beziehung-Setzung optimiert werden können. „Unterschiedliche Formen der Füge- beziehungsweise Verbindungstechniken haben sich in Abhängigkeit von den technischen Möglichkeiten und dem verwendeten Material entwickelt. Bauteile können reversibel mechanisch miteinander befestigt oder dauerhaft durch flüssige Baustoffe miteinander verbunden werden. Im aktuellen Diskurs um nachhaltige Konstruktionen wird [aber auch] insbesondere die Möglichkeit relevant, diese Verbindungen zur Weiter- oder Wiederverwendung wieder aufzulösen. Damit wird eine zeitliche Komponente eingefügt und der Rückbau der Konstruktion in den Lebenszyklus eines Gebäudes implementiert. Jean Prouvé hat diesen Gedanken der flexiblen, nicht dauerhaften Konstruktion bereits 1944 mit dem Konzept für die Maison démontable vorgedacht.³⁷⁰ Seine damals neuartige Idee sah ein Gebäude aus demontierbaren Stahlbauteilen vor, wodurch ein flexibler Auf- und Abbau losgelöst vom jeweiligen Ort ermöglicht wurde. Die Forderung, Elemente entsprechend ihrer Nutzung oder Nutzungsdauer wieder voneinander zu trennen, ist

³⁷⁰ Vgl. Peter Sulzer, *Jean Prouvé œuvre complète = Jean Prouvé complete works*, Bd. 3, Basel 2005, S. 48–49.

wie oben ausgeführt von höchster Aktualität. „Sortenrein rückbaubare Konstruktionsdetails“, wie sie von Heisel und Hebel beschrieben werden, bieten die Grundlage für kreislaufgerechte Bauten.“³⁷¹,³⁷² Die Verbindungstechnik hat also maßgeblich Einfluss auf die Kreislauffähigkeit von Konstruktionen.

Die individuellen Anpassungen über die Maschine fordern keine komplexe Konstruktion mit erhöhtem Aufwand. Dies führt zu effizienteren Prozessen (P) und damit zu einer Einsparung von Zeit (Z) und Arbeitskraft (M).³⁷³ Weitere nachweisliche Verbesserungen stellen beispielsweise variable Schalungssysteme dar, bei denen Ressourcen (R) und Emissionen (E) signifikant eingespart werden.³⁷⁴ Innovative Technologien verzichten durch eine voll-robotische Ansteuerung komplett auf eine Schalung. „Digitale Fertigungsverfahren können durch Strukturoptimierung und Bauen ohne Schalung materialschonend sein, was zur Reduzierung des Materialbedarfs und der damit verbundenen CO₂-Emission beitragen und damit den Klimawandel entgegenwirken kann.“³⁷⁵

Die Erschließung der beschriebenen Schnittstellen 1. Gestaltung - Konstruktion und 2. Konstruktion - Technik ist ein wesentlicher Schritt zur Umsetzung der Digitalisierung und Automatisierung im Bauwesen. Bedeutend wird deren Nutzbarmachung auf der darauf aufbauenden Ebene als Schnittmenge aus 3. Gestaltung und Technik, die im Folgenden Kapitel erläutert wird.

³⁷¹ Vgl. Heisel/Hebel 2021 (wie Anm. 35), S. 115.

³⁷² Hollmann-Schröter 2024 (wie Anm. 162), S. 224.

³⁷³ Vgl. Vasilic 2023 (wie Anm. 82), S. 45.

³⁷⁴ Vgl. ebd., S. 46.

³⁷⁵ Ebd., S. 45.

3.1.3.3 Schnittstelle Gestaltung – Technik: digitales Material

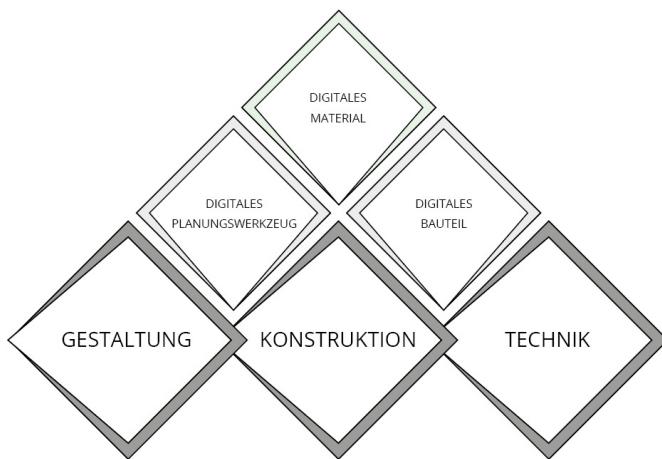


Abb. 43: Nachhaltigkeitspotenziale durch digitales Material. Eigene Darstellung

Im nächsten Schritt werden, wie in Abbildung 43 dargestellt, die Leitfaktoren Gestaltung und Technik auf Grundlage der zuvor erläuterten zwei Schnittstellen zusammengeführt. Dies resultiert in der Schnittstelle des digitalen Materials, das zunächst als digitale Simulation konzipiert wird, um als funktionsoptimierte Struktur weitergedacht zu werden. Durch die konsequente Bindung digitaler Planungswerzeuge an die automatisierte Umsetzung digitaler Details können Materialien iterativ entwickelt, optimiert und auf die jeweiligen Anwendungsfälle hin angepasst werden. Digitalisierte und automatisierte Produktionsprozesse ermöglichen die konsequente und gezielte Verwendung von Materialien entsprechend ihrer Leistungsfähigkeit. Vor diesem Hintergrund bekommt der Begriff der funktionsoptimierten Bauteile eine besondere Bedeutung. „Auch materialreduzierte Strukturen durch funktionale Hybridisierung oder Strukturoptimierung stellen wesentliche Bausteine des kreislaufgerechten Bauens mit Beton dar.“³⁷⁶

Im Bauwesen kommt es häufig durch die Anwendung klassischer Verfahren und die Verwendung von vordimensionierten Bauprodukten zu einer Überdimensionierung von Bauteilen und somit einem erhöhten Materialeinsatz.³⁷⁷ Dabei erfolgt dies nicht gezielt, um mittels erhöhter Nutzungsflexibilität langfristig nutzbare Strukturen zu generieren. Vielmehr sind aufgrund geringer prozessualer Flexibilität und fehlender Adoptionsmöglichkeiten Überdimensionierungen üblich. Dies liegt auch darin begründet, dass wegen vergleichsweise hoher Lohnkosten arbeitsintensive Anpassungen vermieden werden und vorrangig auf uniforme Bauteile zurückgegriffen wird. Durch die neuen technischen Möglichkeiten ändern sich jedoch die Rahmenbedingungen. So können nun mittels einer digital

³⁷⁶ Thiel u. a. 2023 (wie Anm. 285), S. 272.

³⁷⁷ Vgl. Originalzitat:

“In the construction industry, the application of conventional processes and the use of pre-dimensioned building products often lead to oversized components and, thus, excessive material use.”
Albus/Hollmann-Schröter 2022 (wie Anm. 156), S. 6.

gesteuerten, automatisierten Fertigung Anpassungen ohne teure manuelle Arbeit erfolgen und Bauteile damit auf Leistungsfähigkeit hin optimiert werden. Somit können aktiv Ressourcen (R) und in der Folge Emissionen (E) gespart werden. „Durch den bewussten Materialeinsatz, sei es durch ein Monomaterial, oder in der Kombination hybrider Bauteile werden Konstruktionen zukünftig funktionsoptimiert erstellt. Diese Funktionsoptimierung kann erweitert werden, indem methodisch eine Planung forciert wird, die auf die Verwendung vorgefundener Ressourcen abzielt. So kann gegebenenfalls trotz einer Überdimensionierung die Wiederverwendung von Materialien oder Bauteilen nachhaltiger sein als die Schaffung neuer Elemente. Material als Ressource sollte nur noch dort eingesetzt werden, wo es wirklich erforderlich ist.“³⁷⁸ „As a result, it is expected that for structures with the same functionality, DFC³⁷⁹ will environmentally perform better over the entire service life in comparison with conventionally produced concrete structures.“³⁸⁰ Als zielführend wird eine digitale Ansteuerung des Materials erachtet, die Ressourcen nur dort eingesetzt, wo sie wirklich erforderlich sind (Prozessebene). Ermöglicht wird dieser gezielte Materialeinsatz durch die Kombination multipler automatisierter Fertigungstechnologien, zuvor unter dem Begriff der komplementären Fertigung detailliert betrachtet (→2.2.4 Résumé: Forderung einer komplementären Fertigungsstrategie). Der Stand der Technik zeigt dafür erfolgversprechende Beispiele in der Betonforschung, wie beispielsweise die Ansätze zur Gradierung von Betonbauteilen, die am ILEK der Universität Stuttgart unter Sobek, Blandini et al. entwickelt werden.³⁸¹ Als weiterer positiver Beitrag werden die an der ETH Zürich um Dillenburger et al. durchgeföhrten Forschungen zum Thema „Foamwork“³⁸² und „Fast Complexity“³⁸³ eingeordnet. Hier wird die automatisierte Fertigung durch 3-D-Druck Technologie in Kombination mit einer spezifischen Materialmatrix zur Reduzierung des Ressourcenverbrauchs eingesetzt.

Bis zu dieser Stelle wurde die pyramidale Abfolge der Prozesse bei der Erstellung von Konstruktionen erläutert, welche im Diagramm oberhalb der Leitfaktoren ablesbar sind (Abb. 4). Der gleiche Weg ist auch beim Rückbau von Konstruktionen zu gehen und damit bei der Rückführung der Bauteile und Materialien in das zirkuläre System. Diese Prozessabfolge wird in den folgenden drei Unterpunkten erläutert.

³⁷⁸ Hollmann-Schröter 2024 (wie Anm. 162), S. 225.

³⁷⁹ DFC ist die Abkürzung für Digitally Fabricated Concrete.

³⁸⁰ Schutter u. a. 2018 (wie Anm. 107), S. 34.

³⁸¹ Vgl. Daniel Schmeer u. a., *Entwicklung einer ökologischen und ökonomischen Bauweise durch den Einsatz vorgefertigter multifunktionaler Wandbauteile aus gradiertem Beton*, Stuttgart 2020 (Forschungsinitiative Zukunft Bau F 3194).

³⁸² Patrick Bedarf u. a., »Foamwork: Challenges and strategies in using mineral foam 3D printing for a lightweight composite concrete slab«, in: *International Journal of Architectural Computing*, 21 (2023), Nr. 3, S. 388–403.

³⁸³ Ana Anton u. a., »Fast Complexity: Additive Manufacturing for Prefabricated Concrete Slabs«, in: Freek P. Bos u. a. (Hg.), *Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication. Digital Concrete 2020*, Cham 2020 (RILEM bookseries Volume 28), S. 1067–1077.

3.1.3.4 Schnittstelle Technik – Konstruktion: digitale Zerlegung

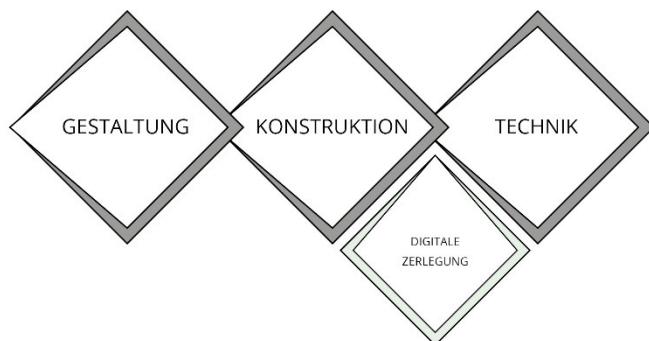


Abb. 44: Nachhaltigkeitspotenziale durch digitale Zerlegung. Eigene Darstellung

Die erste Stufe der Rückführung entsprechend der Abbildung 44 an der Schnittstelle zwischen Technik und Konstruktion ist die digitale Zerlegung, also eine bereits im Entwurfsprozess integral berücksichtigte Rückbaubarkeit. Die in der digitalen Prozesskette abgestimmte systematisierte Konstruktion und Fügung vereinfacht automatisierte Rückbauprozesse. Ein bereits in der Konstruktionsphase umgesetztes Systemkonzept hat somit einen wesentlichen Einfluss auf effiziente Demontageprozesse.

Ziel einer kreislauffähigen Bauwirtschaft sollte es sein, dass Materialien oder sogar ganze Bauteile in den Stoffkreislauf rückgeführt, beziehungsweise für neue Konstruktionen zur Verfügung gestellt werden.³⁸⁴ Laut Müller ist zwar zu berücksichtigen, dass durch Umformungsprozesse bei einer Wieder- oder Weiterverwendung von Bauteilen ebenfalls ein energetischer Aufwand entsteht. „Die für den zusätzlichen Kreislauf mit den Schritten Demontage, Transport, Lagerung, Anpassung und RE-Montage benötigte Energiemenge ist jedoch im Vergleich zum Energieaufwand für die Herstellung eines neuen Bauteils gering.“³⁸⁵ Daraus resultiert die Forderung, dass Bauteile wieder als Konstruktion nutzbar sein müssen oder in den Ursprungszustand des Materials zurückgeführt werden können. Der Aspekt des Recyclings wird aktuell selten durch eine integrale Planung berücksichtigt. Um dem entgegen zu wirken liefern Hillebrandt und andere dafür mit dem Urban Mining Index einen ersten Ansatz für eine funktionierende Recycling-Strategie. Diese wird bisher jedoch nur sehr vereinzelt bereits umgesetzt. Entsprechend existiert zum jetzigen Zeitpunkt keine durchgehende Infrastruktur für den verlustfreien Rückbau und die Weiterverarbeitung bereits verwendeter Materialien. Darüber hinaus wird dieser Ansatz nur von einer begrenzten Anzahl von Planern getragen, aufgrund seiner Komplexität. Hier würde eine digitale, automatisierte Einbindung dieses Parameters in Planungswerzeuge die Akzeptanz und Nutzung deutlich erhöhen können. Vorwiegend wird eine stärkere Automatisierung und damit die Schonung der Ressource Mensch im Bauwesen

³⁸⁴ Vgl. Thiel u. a. 2023 (wie Anm. 285), S. 272.

³⁸⁵ Müller 2021 (wie Anm. 347), S. 69.

gefordert. Bei der Wiederverwendung jedoch vollzieht sich eine Umkehrung. Material wiederzugewinnen ist oftmals ein höchst individueller Prozess, der wenig automatisiert ist. Gebunden werden hier abermals Ressourcen in Form von Arbeitskraft, die für diesen Rückbau erforderlich ist. Dahingehend kann ein zuvor implementierter systematischer Ansatz eine automatisierte Demontage unterstützen und somit ressourcenschonend wirken. Darüber hinaus wird eine Infrastruktur, die einen verlustfreien Rückbau und die Weiterverarbeitung entsprechender Materialien ermöglicht, benötigt. Dieser Ansatz kann auf unterschiedliche Weise konkretisiert werden. Das Konstruieren in lösbarer Verbindungen, auch als Prinzip der Zerlegung bezeichnet, stellt dabei eine Form der Umsetzung dar. Dies bedeutet explizit, dass die verwendeten Materialien sortenrein zerlegt werden können. Dabei ist grundlegend, dass eine Wiederverwendung bevorzugt nicht als Downcycling³⁸⁶, sondern auf gleicher Ebene stattfinden. Ein recyclinggerechtes Konstruieren und Bauen reduziert zum einen den Ressourcenverbrauch (R) für die Erstellung neuer Materialien. Zum anderen reduziert es die Menge an Abfall (A) durch eine zirkuläre Rückführung ([→4.1.2.9 Abfallreduktion](#)). Konventionelle Bauweisen, Konstruktionen und Materialwahl, die oft als additive Systeme ausgebildet werden und irreversibel gefügt sind, werden durch diese Forderung maßgeblich infrage gestellt. Dagegen können automatisiert gefertigte und auf den Rückbau bereits während der Fertigung vorbereitete Konstruktionen durch systemisierte Konzepte leichter demontiert und in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden. Eine „intelligente Segmentierung“ zu Planungsbeginn erlaubt in diesem Sinne eine „zerstörungsfreie Demontage.“³⁸⁷ „Die [...] Entwicklung neuer Konstruktionsprinzipien versteht sich dabei als Grundlage, um die kreislaufgerechte Entnahme der Rohstoffe auch technisch zu ermöglichen.“³⁸⁸

Im Bauteil hinterlegte RFID-Markierungen könnten eine Sortierung hinsichtlich einer späteren Logistik unterstützen. Automatisierte Re-Montage³⁸⁹ könnte durch die Einbindung von künstlicher Intelligenz zukunftsfähig sein (Dauerhaftigkeit). So haben die Konstruktion und Fügetechnik einen entscheidenden Einfluss auf die Rückbaubarkeit und im nächsten Schritt die Vermittelbarkeit von Bauteilen. Heisel und Hebel heben in diesem Zusammenhang die Relevanz hervor, durch einen kreislaufgerechten Entwurf bereits auf die Abfallvermeidung Einfluss zu nehmen. „Die daraus entstehende Definition einer vollständigen Kreislaufwirtschaft (Circular Economy) greift insofern auch entschieden weiter als das in Deutschland übliche Verständnis des Begriffs als Teil der Abfallwirtschaft. Anstatt darauf abzuzielen, am Ende der Nutzungsphase den Kreislauf zu schließen und dadurch Abfall zu reduzieren, sollte eine Kreislaufwirtschaft die Entstehung von Abfall durch Innovation und Gestaltung bereits am Anfang des Lebenszyklus verhindern.“³⁹⁰ Diese

³⁸⁶ Vgl. Erläuterungen im Glossar.

³⁸⁷ Thiel u. a. 2023 (wie Anm. 285), S. 272.

³⁸⁸ Felix Heisel und Dirk Hebel, *Urban Mining und kreislaufgerechtes Bauen. Die Stadt als Rohstofflager*, Stuttgart 2021, S. 13.

³⁸⁹ Auch als Re-Assembly bezeichnet.

³⁹⁰ Heisel/Hebel 2021 (wie Anm. 388), S. 13.

Anforderung, dass echte Kreislaufwirtschaft Abfall schon von Beginn an im Entwurfsprozess reduziert, könnten assoziative Planungstools zukünftig abbilden.

Übertragungspotenzial auf die innerhalb der Dissertation im Fokus stehenden monolithischen Konstruktionen bietet Schneider wie folgt: „Die Optimierung von Konstruktionsmethoden im Hinblick auf ihre Kreislaufgerechtigkeit könnte dazu beitragen, dass einzelne Komponenten in hochwertiger Qualität vorgesehen wurden und zusätzliche Materialschichten entfallen konnten. Dieser Schritt führt letztendlich auch dazu, dass zahlreiche Investitions- und Folgekosten eingespart wurden. Es wurde deutlich, dass Bauteilanalysen hinsichtlich ihrer Wertbeständigkeit und der Konstruktionsweisen und Fügungsmittel der Planungsphase sehr wichtig sind.“³⁹¹ Dies stellt den Zusammenhang her zu den betrachteten monolithischen Betonkonstruktionen und bekräftigt den sich ergebenden Vorteil beim Rückbau.

³⁹¹ Daniela Schneider, »Einfach intelligent konstruieren: Kreislaufgerechte Konstruktionen zur Ressourcenschonung und langfristigen Kostenersparnis.«, in: Felix Heisel und Dirk E. Hebel (Hg.), Urban Mining und kreislaufgerechtes Bauen. Die Stadt als Rohstofflager, Stuttgart 2021, S. 124–132, hier S. 131.

3.1.3.5 Schnittstelle Konstruktion – Gestaltung: digital gestützter Neuentwurf

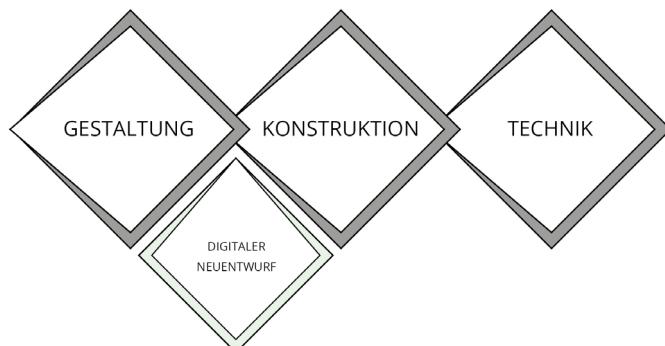


Abb. 45: Nachhaltigkeitspotenziale durch digital gestützten Neuentwurf. Eigene Darstellung

Die in Abbildung 45 dargestellte Kombination von Konstruktion und Design würde folglich zu einem digitalen Neuentwurf führen. Dies impliziert, dass assoziative Planungswerzeuge den Entwurfsprozess mit der konsequenten Berücksichtigung systematisierter, bereits verwendeter Bauteile und Materialien unterstützen.

Mit dem Fokus auf kreislaufgerechtes Bauen muss auch der gestalterische Umgang damit durch die Planenden vorangetrieben werden. Das Werk „*Bauteile Wiederverwenden – Ein Kompendium zum zirkulären Bauen*“ liefert dazu detaillierte Einblicke. Sonderegger formuliert in seinem Ausblick Folgendes: „Während noch vor wenigen Jahren das Wiederverwenden von Bauteilen an der Realität scheiterte, scheint die noch ungewohnte neue Praktik heute plötzlich im Rahmen des Möglichen zu liegen. Sie passt zum Zeitalter der Digitalisierung. Denn diese macht es erst möglich, Baubestände rasch und detailliert aufzunehmen, zu katalogisieren und die daraus resultierenden gewaltigen Datenmengen effizient zu verwalten und nutzbar zu machen. Dazu braucht es die passenden Akteurinnen und Akteure: Künftige Planergenerationen sind Digital Natives, die es gewöhnt sind, diese Daten zu bewirtschaften, kreativ zu verwenden und in 3D-Modelle umzusetzen.“³⁹²

Einen interessanten Ansatz des nachhaltigen Entwerfens erforscht das Baubüro „*in situ*“ indem nicht mehr verwendete Bauprodukte aus einem vorhandenen Setting herausgenommen und zu einem neuen Ganzen gefügt werden. Diese Art der Wiederverwendung und Aufwertung verfolgt die Geschäftsführerin Barbara Buser unter dem Begriff „*ReUse&UpCycling*“. Durch diese Herangehensweise wird eine komplett neue Planungsstrategie in Gang gesetzt, die auf der einen Seite Kreativitätspotenziale freisetzt und auf der anderen Seite dem Fügen einen völlig neuen Schwerpunkt mit besonderen Herausforderungen beimisst. Das Wirkungsgefüge aus Struktur und Material muss neu interpretiert werden. Es ist zu erwarten, dass dies neue Berufs- und Geschäftsfelder erschließen, und sich die Profession der Architektinnen und Architekten hinsichtlich ihrer Tätigkeit zukünftig anpassen wird. Dieses Verhalten äußert sich in einem strategischen Wandel in der

³⁹² Andreas Sonderegger, »*Bauteile wiederverwenden - ein Ausblick*«, in: Eva Stricker u. a. (Hg.), *Bauteile wiederverwenden. Ein Kompendium zum zirkulären Bauen*, Zürich 2021, S. 283–288, hier S. 284.

Entwurfsmethode. Die Wortkombination „Bottom-Up-Design“ in Bezug auf das Entwerfen mit wiederverwendeten Bauteilen beschreibt einen Prozess, der von vorhandenen Ressourcen ausgeht und diese zu einem neuen Ganzen fügt (Prozessebene).

„Die Herangehensweise bezieht sich auf Claude Levi-Strauss' ethnologisch-methodische Beschreibung der Arbeitsweise des Bricoleurs. Innerhalb dieser neuen Verwendungsprozesse ergeben sich Chancen für den Fortbestand handwerklicher Kompetenzen. Begriffe wie Materialjäger und Spurenfinder verdeutlichen den Wandel.“³⁹³ Laut Müller erfordert „diese Art der Gestaltfindung, neue Planungswerzeuge, hohe Bauvorleistungen und eine sorgfältige „Bauteilernte.“³⁹⁴ Durch die Vermittlung von bereits benutzen Bauteilen und deren Integration in eine neue Konstruktion können signifikant Ressourcen (R) und Emissionen (E) eingespart werden.

Die Universität von Sheffiled hat in diesem Kontext ein digitales Werkzeug mit der Bezeichnung „regenerate“³⁹⁵ bereitgestellt, das sich mit der Definition der Kreislauffähigkeit von Gebäuden auseinandersetzt. Von den Forschenden wurde die folgenden vier Kriterien für die Definition von Zirkularität aufgestellt: 1. Anpassungsfähiges Entwerfen 2. Entwerfen um rückzubauen, 3. kreislauffähige Materialien, 4. Ressourceneffizienz. „Regenerate is a circular economy engagement tool for all those involved in the design and construction of buildings. It can be applied to all building types, retrofits and new builds. It explores, just how circular is your building?“³⁹⁶ Damit diese Art des neuen Entwurfsprozesses effizient funktionieren kann, werden digitale Datenbanken als Zwischenlager notwendig. Diese bilden eine Grundlage für das Prinzip des systematisierten, zirkulären Entwerfens.

So wird der Übergang zur nächsten Schnittstelle gegeben. Die Erschließung der beiden Schnittstellen Technik - Konstruktion und Konstruktion - Gestaltung ist ein wichtiger Schritt für den erfolgreichen Rückbau. Bedeutender wird, wie zuvor bei der Herstellung, die Nutzbarmachung der darauf aufbauenden Ebene als Schnittmenge aus Technik und Gestaltung.

³⁹³ Hollmann-Schröter 2024 (wie Anm. 162), S. 224.

³⁹⁴ Müller 2021 (wie Anm. 347), S. 72.

³⁹⁵ Charles Gillott u. a., »Developing Regenerate: A circular economy engagement tool for the assessment of new and existing buildings«, in: *Journal of Industrial Ecology*, 27 (2023), Nr. 2, S. 423–435.

³⁹⁶ Ebd.

3.1.3.6 Schnittstelle Technik – Gestaltung: digitales Kataster

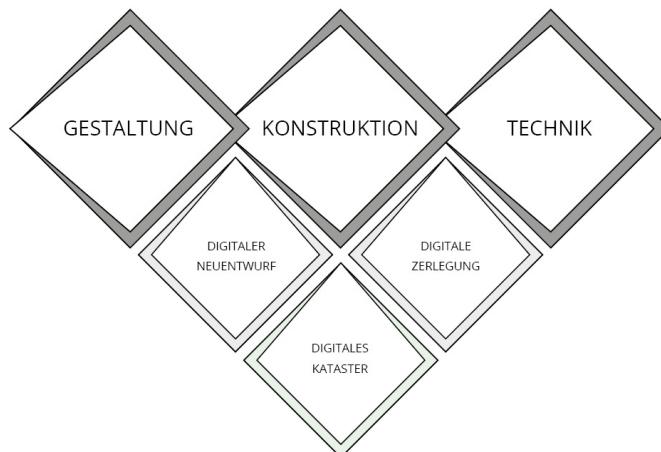


Abb. 46: Nachhaltigkeitspotenzial digitales Kataster. Eigene Darstellung

Am Dreh- und Angelpunkt von Gestaltung und Technik, entsprechend des in Abbildung 46 dargestellten umgekehrten pyramidalen Aufbaus, erfordern eine digital gesteuerte Zerlegung und digitaler Neuentwurf eine systematisierte Sammlung und Bereitstellung von Bauteilen und Materialien. Dies hier als digitales Kataster bezeichnete Herangehensweise ermöglicht eine zielgerichtete Wiederverwendung recycelter Bauteile. Vorgefertigte, standardisierte Bauteile haben dabei aufgrund ihrer inhärenten Systematik und Dokumentation erhebliche Vorteile bei der Wiederverwendung, Zertifizierung und Weitergabe.

Es geht hier primär um eine digitale Vorhaltung des vorhandenen Materials und dessen Distribution für einen zweiten Lebenszyklus (Prozessebene). Als eine Pionierin für diesen Ansatz stellte Buser eine der ersten Bauteildatenbanken online zur Verfügung. Damit prägt sie den Ausdruck „Form follows availability“³⁹⁷. Mittlerweile existieren auf nationaler Ebene unterschiedliche Material-Plattformen mit leicht unterschiedlichen Schwerpunkten. Bauteilclick (Schweiz)³⁹⁸, Materialnomaden (Österreich)³⁹⁹, Rotor (Belgien)⁴⁰⁰, Madaster (Niederlande, Deutschland)⁴⁰¹ und Concular (Deutschland)⁴⁰² sind eine Auswahl. Building Material Scout⁴⁰³ ist exemplarisch eine weitere Plattform, die Baumaterialien bewertet und

³⁹⁷ Vgl. Ákos Moravánsky, »Der Kreislauf der Bausteine - Stichworte zu einer Ökologie des Bauens«, in: Eva Stricker u. a. (Hg.), *Bauteile wiederverwenden. Ein Kompendium zum zirkulären Bauen*, Zürich 2021, S. 17–31, hier S. 20.

³⁹⁸ Vgl. Nott Caviezel, »www.bauteilclick.ch : nachhaltige Bauteilbörsen« (2009).

³⁹⁹ Vgl. materialnomaden gmbh, »Materialnomaden: circular design & architecture«, <https://www.materialnomaden.at/about/> (abgerufen am 21. April 2024).

⁴⁰⁰ Rotor asbl-vzw, »Rotor is a cooperative design practice that Rotor is a cooperative design practice that investigates the organisation of the material environment.«, <https://www.rotordb.org/en> (abgerufen am 21. April 2024).

⁴⁰¹ Madaster Germany GmbH, »madaster – die Plattform: für Bestandserhalt, nachhaltige Planung und Industrial ReUse«, <https://madaster.de/> (abgerufen am 21. April 2024).

⁴⁰² Concular GmbH, »Concular: Messbar kreislaufgerecht in die Zukunft«, <https://concular.de/> (abgerufen am 21. April 2024).

⁴⁰³ Building Material Scout GmbH, »Building Material Scout: Ihre Service-Plattform für nachhaltige Bauprodukte«, <https://building-material-scout.com/> (abgerufen am 21. April 2024).

strukturiert abrufbar macht. Die Datenbank Madaster versucht beispielsweise einen umfassenden Materialpass für Gebäude zu erstellen. Dabei werden eine vollumfängliche Registrierung und Dokumentation aller Materialien, Produkte und Elemente, die im Objekt verwendet werden, erforderlich. Die damit verbundenen Datenmengen können nur in einer digitalen Umgebung effizient genutzt werden. Der Ansatz setzt bereits bei der Planung neuer Gebäude an und vereinfacht somit einen Rückbau und die Vermittlung der Bauteile wesentlich (Z). Zudem kann das digitale Kataster einen Überblick zur Bewertung vielseitiger Parameter zur Bewertung der Nachhaltigkeit geben. Die Plattform Concular stellt die Schließung von Materialkreisläufen in den Vordergrund und setzt bei der Inventarisierung von Bauteilen und Materialien in Gebäuden an, die rückgebaut werden sollen. Diese werden in Materiallagern aufgenommen und an neue Bauvorhaben direkt vermittelt (Prozessebene).

3.1.4 Résumé: Kreislauffähigkeit durch digital gestützte Prozesse

Es kann geschlussfolgert werden, dass durch das Streben nach einer Kreislaufwirtschaft der Gedanke des Systemkonzepts erheblich erweitert wird. Durch die Verknüpfung der Leitfaktoren entstehen neue Schnittstellen, die doppelseitig pyramidal aufeinander aufbauen. Diese sind alle an die digitale Ebene gekoppelt und werden durch eine systematische Herangehensweise optimiert. Die Vorfertigung hat an jeder der aufgezeigten Schnittstellen eine besondere Bedeutung für die Verbesserung der Nachhaltigkeit, die untenstehend in der Aufzählung herausgestellt wird. Es konnte belegt werden, dass gerade durch eine iterative Digitalisierungsstrategie bedeutende, bisher nicht ausreichend gewichtete Nachhaltigkeitspotenziale entstehen. Es ist damit eine drastische Anpassung notwendig, die sich in allen Bereichen des Bauwesens vollziehen muss. Dabei reicht es nicht aus, diese Schnittstellen nur zu identifizieren. Es ist wichtig, sie zu einem kontinuierlichen Prozess in Beziehung zu setzen. Im Wesentlichen kann die Verquickung aus Systemansatz und digital gestützten Werkzeugen verkürzt in folgendem Kreislauf der sechs Schnittstellen hervorgehoben werden:

Die ersten drei Schnittstellen beziehen sich auf die Herstellung von Gebäuden.

1. Schnittstelle Gestaltung – Konstruktion: digitales Planungswerkzeug
Durch die Einbindung digitaler Entwurfs- und Planungswerzeuge in einer frühen Planungsphase können Ressourcen, Konstruktion und Technik optimiert in Beziehung gesetzt werden. Diese befähigen den Entwurf standardisierter und zugleich adaptiver Konstruktionen.
2. Schnittstelle Konstruktion – Technik: digitales Bauteil
Durch die Simulation digitaler Bauteile können diese bereits im automatisierten Fertigungsprozess innerhalb des Systemansatzes optimiert und individualisiert werden und dadurch eine hocheffiziente Produktion adaptiver Komponenten bieten.
3. Schnittstelle Gestaltung – Technik: digitales Material
Durch die Kombination digitaler Planungswerzeuge und Konstruktionsprozesse wird es möglich, das Material innerhalb automatisierter Produktionsprozesse entsprechend zu einer funktionsoptimierten Struktur zu führen.

Anschließend und im Gegenzug ist der Weg des Rückbaus dargestellt.

4. Schnittstelle Technik – Konstruktion: digitale Zerlegung

Durch bereits in der Konstruktionsphase umgesetzte Systematisierungsansätze werden automatisierte Demontageprozesse möglich, die einen effizienten Rückbau gewährleisten.

5. Schnittstelle Konstruktion – Gestaltung: digital gestützter Neuentwurf

Der Neuentwurf mit systematisierten, wiederverwendeten Komponenten kann durch digitale Werkzeuge zu hochwertigen Konstruktionen führen.

6. Schnittstelle Technik – Gestaltung: digitales Kataster

Die Etablierung digitaler Kästerteile ermöglicht die Wiederverwendung von Bauteilen. Vorgefertigte, standardisierte Bauteile haben erhebliche Vorteile bei der Vermittlung.

Erweiterte Abbildung der Nachhaltigkeitspotenziale im zirkulären Setting

Rückblickend auf die einleitenden Betrachtungen unter [Kapitel →3.1.1](#) Grundlagenbetrachtung zur Nachhaltigkeitsbewertung ist zum jetzigen Zeitpunkt die Nachhaltigkeitsbewertung auf Grundlage einer Bilanzierung oftmals fragmentiert und bindet die aufgezeigten Vorteile nur teilweise ein.

Daher werden in der folgenden [Abbildung 47](#) die zuvor beschriebenen Nachhaltigkeitspotenziale in der Zusammenschau dargestellt. Die Untersuchungen belegen, dass eine pyramidal aufeinander aufbauende, zirkuläre Kombination der ursprünglichen drei Haupttreiber eine zielgerichtete Handlungsstrategie zur Verbesserung der Nachhaltigkeit darstellt. Hierbei fokussiert der Begriff der Nachhaltigkeit auf den Schutz von Ressourcen und die Eindämmung von Risiken. Die Abbildung fasst nur die wesentlichen (ersten drei) Vorteile zusammen und vernachlässigt weitere Querbezüge, die vorhanden sind, jedoch in diesem Umfang verkürzt dargestellt werden.

Um die aufgezeigten möglichen Potenziale, die sich an den Schnittstellen ergeben können, mit Blick auf eine zahlenbasierte Bilanzierung zu erfassen und zu vergleichen, sind weitergehende Forschungstätigkeiten erforderlich. Diese werden im Rahmen dieser Dissertation nicht abgebildet, können jedoch für die Autorin einen auf die Arbeitsthese aufbauenden, vertiefenden Forschungsschritt darstellen ([→6.3 Ausblick eines ganzheitlichen Szenarios](#)).

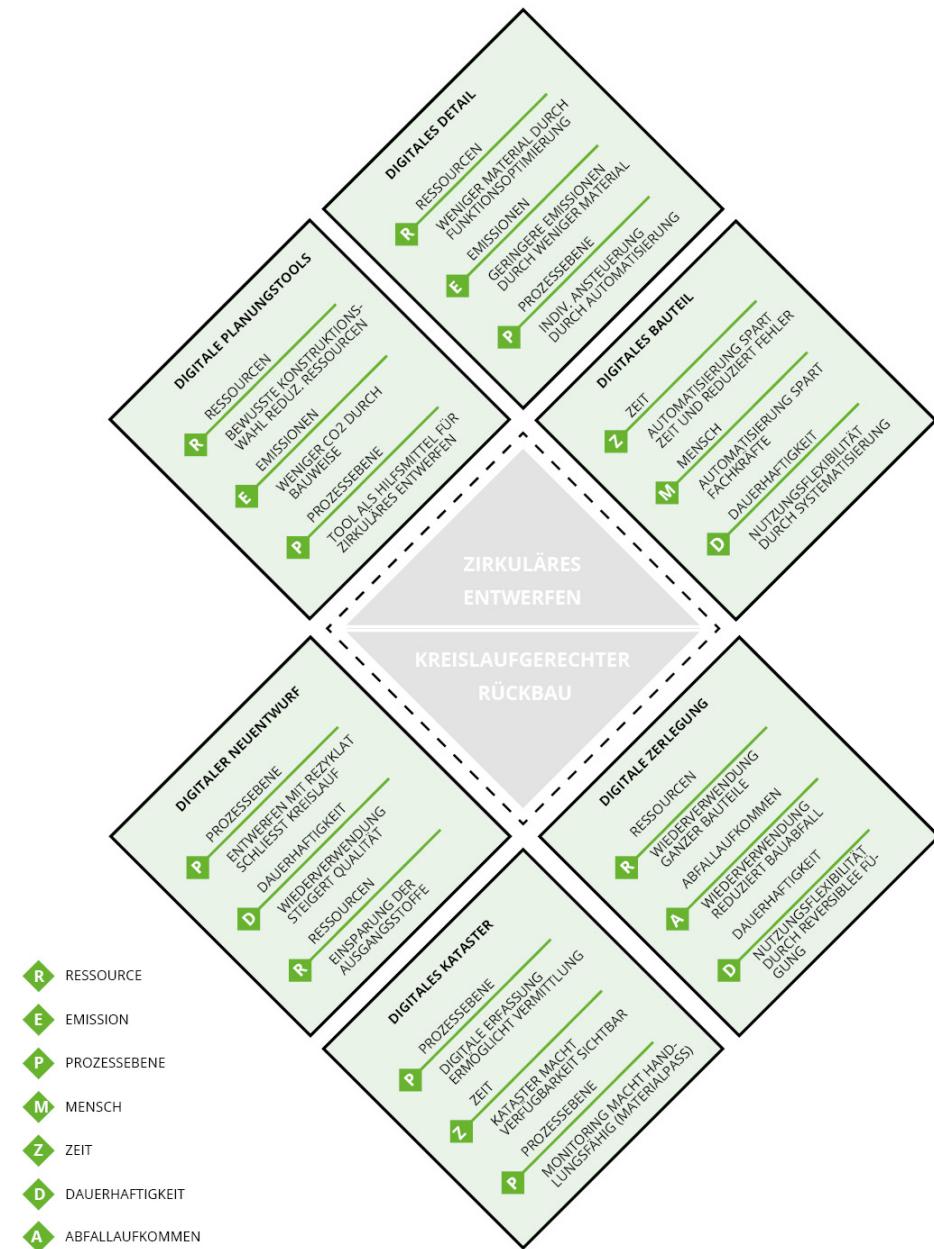


Abb. 47: Zusammenschau Nachhaltigkeitspotenziale. Eigene Darstellung

Übertragbarkeit der Theorie der Pyramidalen Zirkularität

Die bis hierher materialoffene Betrachtung des Prinzips der Pyramidalen Zirkularität wird im anschließenden Kapitel mit der Synopse dreier Betonbautechnologien auf den Betonsektor zugeschnitten. Ferner erfolgt im [Kapitel VI Forschungstransfer](#) die Anwendung der Methodik der aufgezeigten Pyramidalen Zirkularität am Forschungsprojekt „MZD“ ([→6.1.1 Forschungsprojekt: hybride Systembaukonstruktion „Modular – Zirkulär - Digital \(MZD\)“](#)). Dabei zeigt sich, dass das Prinzip maßgeblich durch die Umsetzung eines Systemkonzepts über alle Phasen hinweg unterstützt wird. In diesem Fall wird ein zirkuläres Designkonzept vorangetrieben und in Richtung eines ganzheitlichen Urban-Mining-Ansatzes weiterentwickelt.

