

Kapitel I | Forschungsrahmen

1.1 Einleitung

1.1.1 Relevanz

Das Bauwesen und der innerhalb der Dissertation im Mittelpunkt stehende Betonsektor haben aufgrund multifaktorieller² Anforderungen mit enormen Herausforderungen zu kämpfen. Darunter werden unter anderen die folgenden diametral wirkenden Parameter verstanden: Senkung der hohen CO₂-Emissionen, insbesondere im Betonsektor, Minimierung des Ressourceneinsatzes, Steigerung der Produktivität sowie auf das Wirken entgegen des sich abzeichnenden Fachkräftemangels durch Erhöhung der Automatisierung. Sobek liefert mit dem ersten und zweiten Band seiner Trilogie eine prägnante Bestandsaufnahme der aktuellen Ressourcenverbräuche und -verfügbarkeiten, aber auch der Emissionen³ und zeichnet darüber hinaus „Handlungskorridore“ ab.⁴ Um den sich abzeichnenden Defiziten bei der Erreichung der Klimaziele progressiv entgegenzuwirken, müssen Strategien mit Breitenwirkung entwickelt werden, die die gesamte Prozess- und Wertschöpfungskette Bau mitdenken und kurzfristig umsetzen.⁵ Dabei sind die Einbindung „systemischer Rahmenbedingungen“ und ein „integrativer Ansatz“ gefordert.⁶ Aus Sicht der Autorin gibt es für den Bereich Bauwesen hinsichtlich einer Steigerung der Effizienz von Prozessstrukturen erheblichen Nachholbedarf.⁷ Oesterreich und Teuteberg gehen vor dem Hintergrund der Umsetzung einer Industrie 4.0 für die Bauindustrie der Frage nach „warum ein solches Anwendungsszenario in der Realität noch nicht vorzufinden ist.“^{8,9} „Sowohl aus wissenschaftlicher als auch aus praktischer Sicht ist die angestrebte Integration von Basistechnologien und Einzellösungen zu einer Gesamtlösung aus vielen Gründen eine zentrale Herausforderung.“¹⁰ Dies resultiert unter anderem auch aus einem Mangel an vorgezeichneten Digitalisierungsstrategien und deren Umsetzung, die den Betonsektor maßgeblich transformieren könnten. Das System der Bauplanung und -

² Vgl. Def. Duden: „durch viele Einflüsse bedingt“, Cornelsen Verlag GmbH, »Duden: System« <https://www.duden.de/hilfe/bedeutungen>, (abgerufen am 30. September 2024).

³ Vgl. Werner Sobek und Frank Heinlein, *Ausgehen muss man von dem, was ist*, Stuttgart 2022 (*Non nobis – über das Bauen in der Zukunft* / Werner Sobek Buch 1).

⁴ Werner Sobek, *Non nobis – über das Bauen in der Zukunft--Band 2. Über die Randbedingungen des Zukünftigen*, Stuttgart 2023 (Sobek, Werner. *Non nobis – über das Bauen in der Zukunft* Band 2).

⁵ In der Vereinbarung der europäischen Union „Green Deal“ wird die Reduktion der CO₂-Emissionen um 55% im Bezugszeitraum von 1990-2030 festgeschrieben mit dem übergeordneten Ziel die Klimaneutralität bis 2050 zu erlangen.

⁶ Christoph Kehl, Matthias Achternbosch und Christoph Revermann, *Innovative Technologien, Prozesse und Produkte in der Bauwirtschaft. Endbericht zum TA-Projekt*, Berlin 2022 (*Arbeitsbericht / TAB, Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag* Nr. 199), S. 31.

⁷ Vgl. Irene Bertschek, Thomas Niebel und Jörg Ohnemus, *Beitrag der Digitalisierung zur Produktivität in der Baubranche*, 2019, S. 11.

⁸ Thuy Duong Oesterreich und Frank Teuteberg, »Industrie 4.0 in der Wertschöpfungskette Bau – Ferne Vision oder greifbare Realität?«, in: Stefan Reinheimer (Hg.), *Industrie 4.0. Herausforderungen, Konzepte und Praxisbeispiele*, Wiesbaden 2017 (*Edition HMD Ser*), S. 71–89, hier S. 73.

⁹ Oesterreich und Teuteberg liefern eine Übersicht der Komponenten und Basistechnologien die, die Industrie 4.0 für die Bauindustrie ausmachen. (ebd., S. 74).

¹⁰ Ebd., S. 87.

ausführung ist ein komplexes Geflecht aus Beteiligten und Prozessen.¹¹ Dies bedingt, dass bei Einzelanstrengungen teilweise das große Ganze aus dem Blick verloren wird. Zu dem Schluss kommt auch Glock: „Es gibt aktuell viele innovative Entwicklungen in jedem Teilbereich. Während in der Vergangenheit erhebliche Anstrengungen unternommen wurden, einzelne Produkte oder Teilprozesse des Planens und Bauens zu optimieren, wurden die Gesamtoptimierung der Wertschöpfungskette sowie der Fokus auf den Nutzer eher vernachlässigt.“¹² In diesem Kontext ist festzustellen, dass zum aktuellen Zeitpunkt in einzelnen Teilbereichen und Prozessen des Bauwesens die Automatisierung (→2.2 Leitfaktor Technik – komplexe Fertigungstechnologien) und Digitalisierung (→2.4 Leitfaktor Gestaltung – digital gestütztes Entwerfen und Produzieren) zwar angekommen sind¹³, die übergreifende Umsetzung der integralen Planung über die gesamten Leistungsphasen der HOAI¹⁴ aber noch nicht ausreichend erfolgt ist.¹⁵ Um eine „digitale Wertschöpfungskette“ zu generieren wird gerade eine „digitale Durchgängigkeit aller Prozessschritte“ vorausgesetzt.¹⁶ Eine solche Kontinuität stellt jedoch gleichzeitig die zentrale Herausforderung im Status quo dar (→2.4.4 Résumé: Auswirkungen digitaler Werkzeuge auf Prozesskontinuität und Nachhaltigkeit). „Es zeichnet sich ein erheblicher Widerspruch zwischen prognostiziertem Potenzial für tiefgreifende Veränderungen“¹⁷, um durch die Digitalisierung Nachhaltigkeitspotenziale zu erschließen, und der anzutreffenden Realität ab. Der „Vernetzungsgrad der Baubranche“ wird als noch gering und die Schnittstelle zwischen den vorhandenen digitalen Planungswerkzeugen und automatisierten Fertigungswerkzeugen als unterentwickelt gewertet.¹⁸ Die Vorteile durchgängiger Planungsprozesse werden durch die wissenschaftlichen Untersuchungen in dem Buch „Systematisierte Planungs- und Bauprozesse – Hintergründe, Strategien und Potenziale industrieller Vorfertigungstechnologien“ bestätigt.^{19,20} Darin werden diese zudem mit einer Implementierung von Systemisierungsmethoden bei gleichzeitiger Vielfalt in der architektonischen Gestaltung verknüpft. „Der Umschwung vollzieht sich offensichtlich nicht von selbst, sondern muss aktiv forciert werden.“²¹

¹¹ Vgl. Jutta Albus u. a., *Systematisierte Planungs- und Bauprozesse. Hintergründe, Strategien und Potenziale industrieller Vorfertigungstechnologien*, Stuttgart 2021, S. 47–51.

¹² Christian Glock, »Digitalisierung im konstruktiven Bauwesen«, in: *Beton- und Stahlbetonbau*, 113 (2018), Nr. 8, S. 614–622, hier S. 621.

¹³ Oesterreich/Teuteberg 2017 (wie Anm. 8), S. 71.

¹⁴ HOAI bezeichnet die Honorarordnung für Architekten. In ihr sind die neun Leistungsphasen mit jeweils neun Leistungsbildern definiert.

¹⁵ Vgl. Kirsten Hollmann-Schröter, »Innovation durch neue Planungswerkzeuge und Vorfertigungstechnologien«, in: Jutta Albus u. a. (Hg.), *Systematisierte Planungs- und Bauprozesse. Hintergründe, Strategien und Potenziale industrieller Vorfertigungstechnologien*, Stuttgart 2021, S. 161–196, hier S. 161.

¹⁶ Vgl. Oesterreich/Teuteberg 2017 (wie Anm. 8), S. 78.

¹⁷ Hollmann-Schröter 2021 (wie Anm. 15), S. 161.

¹⁸ Vgl. Kehl/Achternbosch/Revermann 2022 (wie Anm. 6), S. 227.

¹⁹ Albus u. a. 2021 (wie Anm. 11), S. 177.

²⁰ Durch die eigenständige wissenschaftliche Erarbeitung des Kapitels „Innovation durch neue Planungswerkzeuge“ in der Publikation „Systematisierte Bau- und Planungsprozesse – Hintergründe, Strategien und Potenziale industrieller Vorfertigungstechnologien“ habe ich bereits die Potenziale kontinuierlicher Prozessketten erläutert und die Relevanz von Systemgedanke und Gestaltungsvielfalt in Beziehung gesetzt (Hollmann-Schröter 2021 (wie Anm. 15), S. 177).

²¹ Ebd., S. 161.

Mit der vorliegenden Dissertation wird eine Strategie zur Verbesserung der Nachhaltigkeit von Betonkonstruktionen aufgezeigt, die Schlüsselimpulse geben soll, um eine tatsächliche Transformation für den Betonsektor in Gang zu setzen. Dabei fokussiert die Arbeit auf die Festsetzung von drei Leitfaktoren und deren gezielter In-Beziehung-Setzung (→1.2.1 Darstellung der Probleme und Ziele).

1.1.2 Darstellung des Zusammenhangs von Mangel, Forschungslücke und Potenzial

Der Blick auf den Ist-Zustand im Bauwesen zeigt aus Sicht der Autorin drei wesentliche Mängel (Abb.1 links):

- 1.) Mangelnde (Arbeits-) Produktivität;
- 2.) Fehlende Kanalisierung der Komplexität im Bauprozess in systemische²² Lösungsansätze;
- 3.) Hoher Ressourcenverbrauch.

Diese äußern sich bezogen auf den Betonsektor in den drei Bereichen mit den spezifischen Forschungslücken, die mit der Zielstellung der Arbeit adressiert werden (Abb.1 rechts):

- 1.) zu geringe Automatisierung und Ausnutzung des Potenzials einer maßgeschneiderten Fertigung;
- 2.) zu starre Umsetzung eines Systemansatzes für adaptive Betonkonstruktionen;
- 3.) rudimentäre Etablierung zirkulärer Betonkonstruktionen und Rückführung in den Kreislauf.

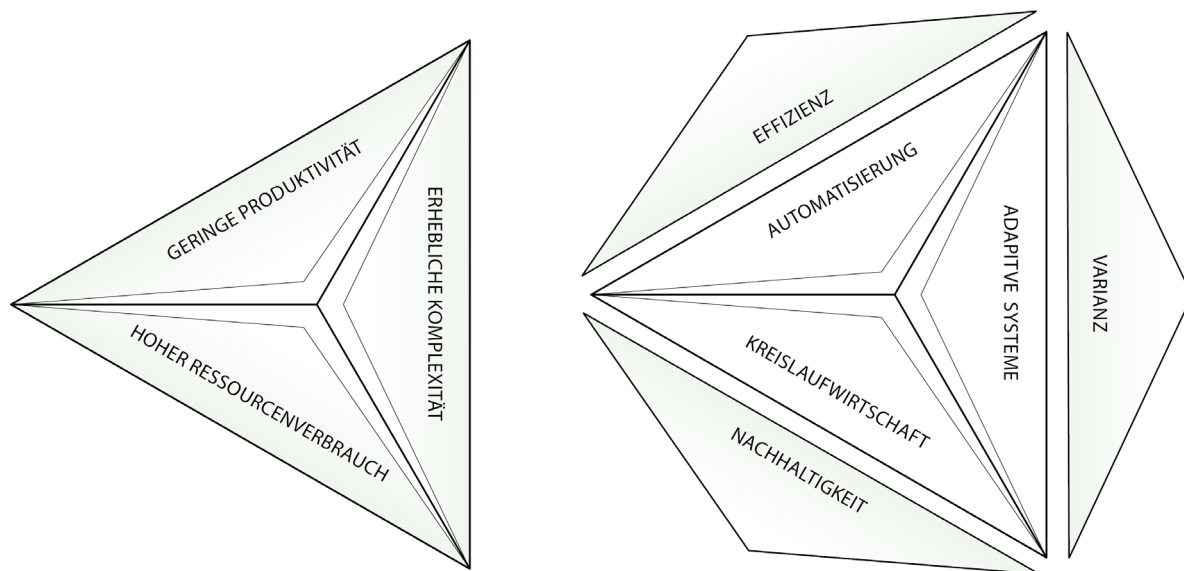


Abb. 1: Mängel im Bauwesen (links) und sich daraus ergebende Forschungslücken (rechts). Eigene Darstellung

²² Vgl. Erläuterung im Glossar.

1. Mangelnde (Arbeits-)Produktivität (aufgrund traditionsgeprägter Abläufe)

„Aus dem Endbericht der Forschungsinitiative Zukunft Bau zum Thema ‚Beitrag der Digitalisierung zur Produktivität in der Baubranche‘²³ geht hervor, dass die Produktivität in der deutschen Bauwirtschaft in den letzten Jahren im Vergleich zu anderen Branchen unterdurchschnittlich gewachsen sei.²⁴ Noch deutlicher fällt das Urteil zu den Auswirkungen der Digitalisierungsmaßnahmen aus: „Der gemessene Produktivitätsbeitrag der Digitalisierung ist im deutschen Baugewerbe mit 0,07 Prozentpunkten im Gegensatz zu anderen Branchen in Deutschland eher gering.“²⁵ Im Bauwesen wird bislang stark an traditionsgeprägten Abläufen im Bauwesen festgehalten, die durch ein hohes Maß an manueller Tätigkeit gekennzeichnet sind.²⁶ Der sich abzeichnende Fachkräftemangel im Bauhauptgewerbe verstärkt diese Fehlentwicklung^{27,28} (→Kapitel I). Kocijan differenziert hingegen Arbeitsproduktivität unter Zuhilfenahme der Bruttoumsätze und kommt seit Anfang der 1990er-Jahre auf eine deutliche Steigerung, was dieser auf einen gesteigerten Maschineneinsatz rückführt. „So weisen gerade die Teilsegmente mit einem größeren Anteil an Maschinenleistungen und Vorfertigung, [...] einen hohen Zuwachs auf.“²⁹

Die **Forschungslücke** besteht in großen Bereichen in einer fehlenden Automatisierung (Abb.1) der Betonvorfertigung und Ausnutzung des Potenzials einer maßgeschneiderten maschinellen Fertigung. Zukünftig können arbeitsintensive Prozesse durch eine Steigerung des Maßes der Vorfertigung und einer Implementierung automatisierter Fertigungstechnologien optimiert werden. Es besteht weiterer Forschungsbedarf zur Übernahme manueller Leistungen durch Robotik, die über serielle Fertigung hinaus eine maßgeschneiderte Herstellung ermöglicht und zu einer gesteigerten Effizienz im Betonsektor führen kann (→2.2.4 Résumé: Forderung einer komplementären Fertigungsstrategie).

²³ Vgl. Endbericht „Beitrag der Digitalisierung zur Produktivität in der Baubranche“; Forschungsprogramm Forschungsinitiative Zukunft Bau im Auftrag des BBSR; Projektlaufzeit: 01.12.2017-31.10.2019; Aktenzeichen: 10.08.17.7-17.48.

²⁴ Hollmann-Schröter 2021 (wie Anm. 15), S. 161.

²⁵ Bertschek/Niebel/Ohnemus 2019 (wie Anm. 7), S. 93.

²⁶ Vgl. Oesterreich/Teuteberg 2017 (wie Anm. 8), S. 88.

²⁷ Vgl. Martin Müller, *Fachkräfteengpässe im Bauhandwerk beeinträchtigen zunehmend den Wohnungsbau*, Nr. 221, 12. August 2018, S. 2, <https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/Konzernthemen/Research/PDF-Dokumente-Fokus-Volkswirtschaft/Fokus-2018/Fokus-Nr.-221-August-2018-Fachkraefteengpaesse-im-Bauhandwerk.pdf> (abgerufen am 17. Mai 2023).

²⁸ Vgl. <https://www.ifo.de/publikationen/2021/aufsatz-zeitschrift/das-kfw-ifo-fachkraeftebarometer-jedes-fuenfte-deutsche>

²⁹ Matijas Kocijan, »Digitalisierung im Bauwesen«, in: *ifo Schnelldienst*, 71 (2018), Nr. 01, S. 42–45, hier S. 43, <https://www.ifo.de/publikationen/2018/aufsatz-zeitschrift/digitalisierung-im-bausektor> (abgerufen am 18. Januar 2024).

2. Fehlende Kanalisierung der Komplexität im Bauprozess in systemische³⁰ Lösungsansätze

Das Bauwesen ist geprägt durch eine hohe Komplexität der Prozesse und eine Vielzahl an Beteiligten.³¹ Die Vorfertigung und das Modulare Bauen versuchen durch eine Standardisierung (von Planungsprozess und konstruktiver Umsetzung) diese vielschichtigen und differenzierten Anforderungen zusammenzuführen. Die prognostizierte Erhöhung der Wirtschaftlichkeit dieser standardisierten Systeme bleibt bisher jedoch aus.³² Aktuell mangelt es an Lösungsansätzen, die für stets individuelle Bauaufgaben mit unterschiedlichen Einflussfaktoren eine systemische Herangehensweise im Planungs- und Konstruktionsprozess liefern und gleichzeitig eine Varianz abbilden. Dabei wird deutlich, dass keine Planungsmethode uneingeschränkt umgesetzt und kein Baumaterial ohne Einschränkungen eingesetzt werden kann. „Im Planungs- und Ausführungsprozess lassen sich aber viele gemeinsame Nenner finden, die sich bei jeder Planung wiederholen. Bei der Erstellung eines Gebäudes als ein sehr komplexes Geflecht an technischen, sozialen, ökologischen, ökonomischen und architektonischen Faktoren liegt jedoch gerade in der Zusammenführung dieser wechselseitigen Beziehungen in eine Systematik die größte Herausforderung und zugleich eine Chance, um qualitativ hochwertige Architektur zu generieren (→Kapitel II)“.³³

Eine dezidierte **Forschungslücke** besteht in der fehlenden Umsetzung eines Systemansatzes für adaptive³⁴ Betonkonstruktionen (Abb.1). Es bedarf dafür explizit neuartiger digitaler Planungsstrategien und automatisierter Werkzeuge, die in der Lage sind, eine Systematisierung mit der notwendigen Flexibilität der Anpassungsplanung vorzunehmen. Der Forschungsbedarf liegt in diesem Sinne auch darin Planer zu überzeugen, Prinzipien der Systematisierung zu forcieren und die zur Verfügung stehenden Werkzeuge der Umsetzung auf den Weg zu einer durchgängigen Systematik zu führen (→2.3.4 Résumé: Adaptive Konstruktionssysteme als Mittelweg aus Standardisierung und Individualisierung).

³⁰ Die Baubranche wird durch die systemischen Rahmenbedingungen geprägt. Vgl. Differenzierung der Begriffe systemisch und systematisch in (→2.3.1.2 Differenzierung des Systembegriffs und Vorgehens zur Umsetzung eines Systemansatzes).

³¹ Bertschek/Niebel/Ohnemus 2019 (wie Anm. 7), S. 13.

³² Nick Bertram u. a., *Modular construction: From projects to products*, New York, 2019, S. 5, <https://www.mckinsey.com/~/media/mckinsey/business%20functions/operations/our%20insights/modular%20construction%20from%20projects%20to%20products%20new/modular-construction-from-projects-to-products-full-report-new.pdf> (abgerufen am 27. Dezember 2023).

³³ Hollmann-Schröter 2021 (wie Anm. 15), S. 194.

³⁴ Vgl. Erläuterungen im Glossar, adaptiv bedeutet hier anpassungsfähig.

3. Hoher Ressourcenverbrauch im Bauwesen

Das Bauwesen ist wesentlich für einen hohen Ausstoß an Emissionen und einen großen Einsatz vorwiegend endlicher Ressourcen mitverantwortlich. „In Europa steht das Bauwesen für mehr als 50 % des Primärenergieverbrauchs. 36 % des Müllaufkommens werden durch das Bauwesen induziert.“³⁵ Vor dem Hintergrund Ressourcen und Emissionen zu reduzieren wird ein bewusstes In-Beziehung-Setzen von Leistungsfähigkeit und Materialeinsatz nicht ausreichend berücksichtigt. Es mangelt an einem grundlegenden Wandel hin zu einer kreislauffähigen Bauwirtschaft, die neben der Erstellung von Konstruktionen auch den Rückbau dieser impliziert.³⁶

Die **Forschungslücke** zur Realisierung kreislauffähiger Konstruktionen ([Abb.1](#)) macht sich im Betonbau exponentiell bemerkbar. Dies resultiert aus der verhältnismäßig langen Lebensdauer des Materials, so dass die Diskussion über eine Kreislauffähigkeit von Betonbauteilen bisher als nicht notwendig erachtet wurde. Aber gerade der im Vergleich zu anderen Baustoffen bei der Betonherstellung vergleichsweise hohe Ressourceneinsatz der Zuschlagstoffe und die verhältnismäßig vielen Emissionen, die bei der Produktion der Ausgangsstoffe wie beispielsweise Zement entstehen, erfordern eine aktive Auseinandersetzung mit einer Zirkularität im Betonsektor. Die abnehmende Verfügbarkeit der Zuschlagstoffe gibt zudem bereits bestehenden gebauten Betonkonstruktionen eine andere Wertigkeit ([→4.1.2 Kriterien zur Nachhaltigkeitsbewertung von Betonkonstruktionen](#)). In diesem Zusammenhang besteht ein dringender Forschungsbedarf für die Entwicklung zirkulärer Betonkonstruktionen und zur Rückführung bereits verwendeter Bauteile in den Kreislauf ([→3.1.4 Résumé: Kreislauffähigkeit durch digital gestützte Prozesse](#)). Dabei bietet die Applikation eines Systemansatzes Potenziale auf dem Weg zur Umsetzung kreislauffähiger Betonkonstruktionen.

³⁵ Felix Heisel und Dirk E. Hebel (Hg.), *Urban Mining und kreislaufgerechtes Bauen. Die Stadt als Rohstofflager*, Stuttgart 2021, S. 25.

³⁶ Ken Webster, »Prinzipien der Kreislaufwirtschaft«, in: Dirk Hebel, Felix Heisel und Ken Webster (Hg.), *Besser - Weniger - Anders Bauen. Kreislaufgerechtes Bauen und Kreislaufwirtschaft*, Basel 2022, S. 24–27.

1.2 Zielvorstellung und Eingrenzung des Untersuchungsfeldes

1.2.1 Darstellung der Probleme und Ziele

Probleme

Die für den Betonsektor dargelegten drei relevanten Forschungslücken, fehlende Automatisierung³⁷, fehlende Umsetzung eines Systemansatzes³⁸ sowie fehlende Etablierung zirkulärer Betonkonstruktionen³⁹, werden aktuell in der Branche oftmals nicht zusammenhängend betrachtet. Es mangelt an Standards und Handlungsstrategien, die diese Forschungslücken übergreifend adressieren und einen ganzheitlichen Lösungsweg aufzeigen.

Ziele

Ziel der Dissertation ist die Konzeption einer Nachhaltigkeitsstrategie für den Betonsektor, die Übertragungspotenzial für das Bauwesen allgemein hat. Denn um den Baustoff Beton zukunftsfähig auszurichten, bedarf es neben materialtechnologischen Entwicklungen vor allem auch einer übergeordneten Planungsstrategie zur Entwicklung anpassungs- und kreislauffähiger Konstruktionen. Diese Strategie fußt auf der Einführung der Leitidee einer synchronen Umsetzung der drei Parameter⁴⁰ Technik, Konstruktion und Gestaltung, im Folgenden als Leitfaktoren bezeichnet (Abb.2). Die Leitfaktoren adressieren unmittelbar die drei identifizierten Forschungslücken. Den wesentlichen Unterschied zu bisherigen Herangehensweisen macht das austarierte ins-Verhältnis-Setzen dieser Leitfaktoren zusammen mit der Bildung eines Mittelwegs aus Standardisierung und Individualisierung. Dies ist die Grundlage der **Strategie der Individualisierten Standardisierung**, die im folgenden Kapitel eingeführt wird (→1.2.2 Einführung der Strategie der Individualisierten Standardisierung).

³⁷ und Ausnutzung des Potenzials maßgeschneiderter Betonfertigung

³⁸ für adaptive Betonkonstruktionen

³⁹ und Rückführung von Betonbauteilen in den Kreislauf

⁴⁰ Die drei Parameter spiegelt die bewusste Selektion der Autorin vor dem Dissertationsthema dar.

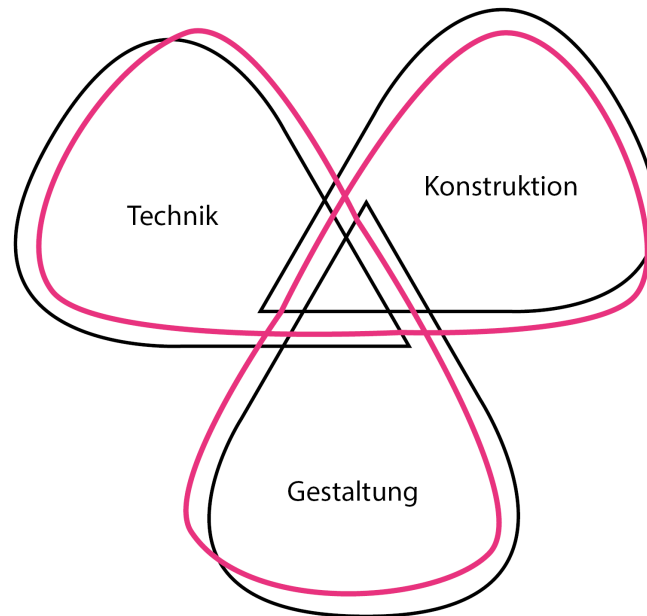


Abb. 2: drei Leitfaktoren. Eigene Darstellung

Die Hinführung zu einer Kreislauffähigkeit ist ein weiteres Ziel neben dem Austarieren der Leitfaktoren. Daher erfolgt die Überführung der drei Leitfaktoren in ein kreislauffähiges Gefüge – das **Prinzip der Pyramidalen Zirkularität** (→3.1.2 Etablierung einer aufeinander aufbauenden Pyramidalen Zirkularität). Damit wird am Beispiel monolithischer Betonkonstruktionen eine systemische Herangehensweise zur Umsetzung einer Kreislauffähigkeit bereitgestellt. Diese soll Planerinnen und Planer bei dem Prozess der qualitativen Abwägung und austarierten Gewichtung der Leitfaktoren unterstützen.

1.2.2 Einführung der Strategie der Individualisierten Standardisierung

Das bewusste Austarieren der Leitfaktoren und die Kombination eines Systematisierungsansatzes auf der einen und einer Individualisierung auf der anderen Seite verkörpern die Grundgedanken des Prinzips der Individualisierten Standardisierung. Erst der aufzuzeigende Mittelweg aus Systemgedanke und Sonderlösung führt zu einer neuartigen Varianz, Effizienz und Nachhaltigkeit. Dies geschieht unter Zuhilfenahme der aktuell zur Verfügung stehenden Werkzeuge⁴¹, die durch Digitalisierung, Automatisierung und Systematisierung eine Kreislauffähigkeit von Betonkonstruktionen maßgeblich verbessern können.

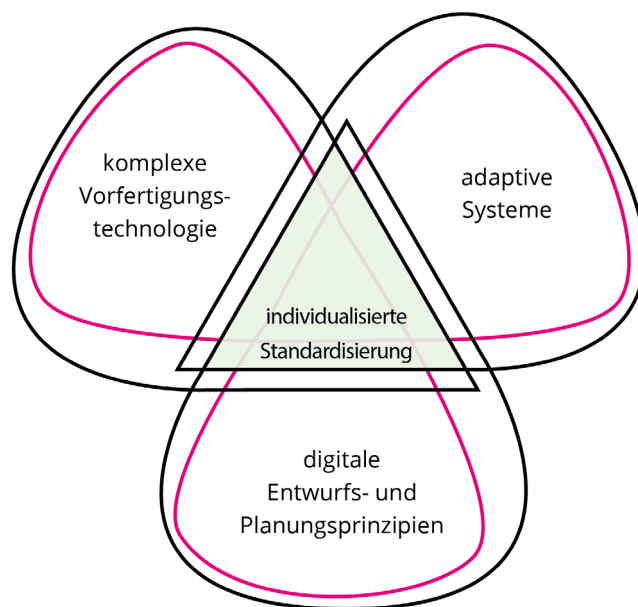


Abb. 3: Definition der Leitfaktoren, die eine Individualisierte Standardisierung ausmachen.
Eigene Darstellung

Die Leitfaktoren werden, wie in **Abbildung 3** dargestellt, wie folgt als komplexe Vorfertigungstechnologien (Technik), adaptive Systeme (Konstruktion) und digitale Entwurfs- und Planungswerkzeuge (Gestaltung) näher spezifiziert.

Im Leitfaktor Gestaltung spiegelt sich der Bedarf nach einer Anpassungsplanung⁴² und mehr Varianz wider. Diese gestalterische Varianz kann durch neue Entwurfs- und Planungsprinzipien auf Grundlage digital gestützter Werkzeuge umgesetzt werden. Hinter dem Leitfaktor Technik verbirgt sich die Ansteuerbarkeit komplexer, automatisierter Vorfertigungstechnologien, die eine maßgeschneiderte maschinelle Fertigung ermöglichen. Der Leitfaktor Konstruktion ist weiterzudenken in die Umsetzung eines anpassungsfähigen Systemansatzes. Er impliziert eine notwendige Adaptivität und Flexibilität von Betonkonstruktionen.

⁴¹ Unter Werkzeugen werden an dieser Stelle, digitale Werkzeuge sowie physikalische Werkzeuge zur Erstellung und zum Rückbau von Konstruktionen verstanden.

⁴² Vgl. Erläuterung im Glossar.

Die gemeinsame Betrachtung dieser drei Leitfaktoren zielt auf den kombinierten Einsatz digitalisierter Entwurfs- und Produktionsprozesse und die Entwicklung neuer Maschinentechнологien, so dass eine Verknüpfung von serieller Fertigung und projektspezifischen Anforderungen ermöglicht wird. Dadurch kann ein echter ökonomischer, ökologischer und in Bezug auf die herkömmliche Vorfertigung im Betonsektor auch gestalterischer Fortschritt erreicht werden (Abb. 4).

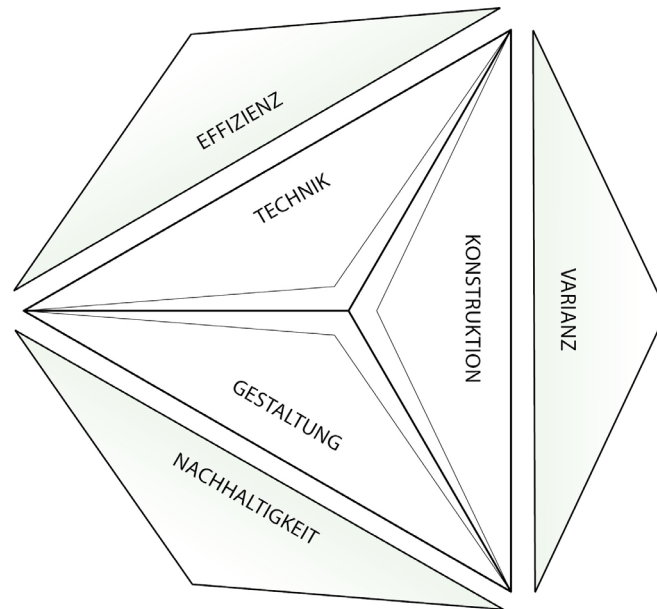


Abb. 4: Zusammenhang aus Leitfaktoren und sich durch die synchrone Umsetzung ergebender Fortschritt. Eigene Darstellung

Herleitung und Übertragung auf das Bauwesen

In anderen Disziplinen wie beispielsweise der Medizintechnik oder der Bekleidungsindustrie werden bereits Methoden ähnlich dem Prinzip der Individualisierten Standardisierung angewandt, die eine bedarfsgerechte Anpassung von Standardprodukten erlauben. Durch additive Fertigungstechnologien⁴³ und deren Anbindung an ein digitales Entwurfswerkzeug können selbstgestaltete Ideen in gewissem Rahmen auf standardisierte Grundformen oder Fertigungsprinzipien appliziert werden. Designinteraktivität erlaubt dem Nutzer, individuelle Entwürfe beziehungsweise maßgeschneiderte Produkte zu generieren.

Mit Blick auf die Geschichte der Standardisierung im Bauwesen sind die Schwächen der nach heutiger Einschätzung extremen Tendenzen wie beispielsweise der Typisierungsprozesse der Sechzigerjahre⁴⁴ hinlänglich bekannt. Das entstandene monotone Erscheinungsbild der Großtafelbauweise war in seiner gestalterischen Qualität stark begrenzt (→2.3.2.2 Systematisierung des Wohnungsbaus durch die

⁴³ „Prozess, der durch Verbinden von Material Bauteile aus 3D-Modelldaten, üblicherweise Schicht für Schicht herstellt im Gegensatz zu subtraktiven und umformenden Fertigungsmethoden.“ (Vasilic 2023 (wie Anm. 87), S. 11).

⁴⁴ Matthäus Johann Nowak, »Monotonie und Maßstab von Großwohnsiedlungen – Nachwirkungen«, in: Jutta Albus u. a. (Hg.), *Systematisierte Planungs- und Bauprozesse. Hintergründe, Strategien und Potenziale industrieller Vorfertigungstechnologien*, Stuttgart 2021, S. 34–36, hier S. 34.

Großtafelbauweise). Die vorliegende Arbeit zeigt auf, dass dieser Mangel gegenwärtig trotz Anwendung einer effizienten standardisierten Herstellung durch die eingangs erläuterten, neu zur Verfügung stehenden Mittel überwunden werden kann.

Die Notwendigkeit dafür ergibt sich dadurch, dass im Bauwesen ein zunehmender Anspruch im Wohnstandard zu verzeichnen ist. Dieser äußert sich in einer verstärkten Nachfrage nach individuellen Wohnformen und dem Verlangen nach erhöhter gestalterischer Qualität. Diese Nachfrage nach einer steigenden Individualisierung wird nach Horx als Trend der kommenden Jahre prognostiziert. „Der Grund dafür liegt zunächst darin, dass der Megatrend Individualisierung zu einer steigenden Vielfalt an Lebensstilen, Familienmodellen, Konsummustern – und auch Wohnformen geführt hat.“^{45,46} Einige Anbieter im Bauwesen haben den Bedarf bereits erkannt und reagieren auf die Nachfrage nach höherer gestalterischer Qualität auch bei standardisierten Wohnformen.⁴⁷ Das Interesse an einer bedarfsgerechten Standardisierung kann demnach großmaßstäblich auch auf den Bausektor skaliert werden (→2.2 Leitfaktor Technik – komplexe Fertigungstechnologien). Dabei steht an zentraler Stelle, die architektonische Vielfalt beim standardisierten Bauen zu erweitern, und dies bei gleichzeitiger Optimierung der Wirtschaftlichkeit.

Im folgenden Kapitel wird zunächst eine bewusste Eingrenzung auf monolithische Betonkonstruktionen vorgenommen. Es wird herausgestellt, warum sich gerade diese zur Umsetzung der Strategie der Individualisierten Standardisierung besonders eignen.

⁴⁵ Matthias Horx, Oona Horx-Strathern und Christiane Varga (Hg.), *50 Insights. Zukunft des Wohnens*, unter Mitw. von Matthias Horx, Oona Horx-Strathern und Christiane Varga, Frankfurt 2017 (*Trendstudie*), S. 68.

⁴⁶ „Diesem Bedarf entgegengesetzt entsteht aktuell eine Vielzahl von Gebäuden auf Basis serieller Fertigungsverfahren, deren architektonische sowie städtebauliche Qualitäten häufig defizitär erscheinen. Dies resultiert aus einer konstant hohen Nachfrage nach Wohnraum im urbanen Umfeld, unter anderem begründet in Migrationsbewegungen aufgrund politisch wie klimatisch bedingter Notstände, in Verbindung mit begrenzten finanziellen Ressourcen.“ (Gemeinsamer Textbaustein für die Antragstellung eines Forschungsprojektes mit Jutta Albus).

⁴⁷ Vgl. Originalzitat: „Prefabricated housing has achieved a sustainable foothold in only a few places, including Scandinavia and Japan. It has been in and out of favor in markets such as the United States and the United Kingdom since the post-war era. Yet there is reason to believe the current revival could be different. The industry is adopting new materials as well as digital technologies that enhance design capabilities and variability, improve precision and productivity in manufacturing, and facilitate logistics. Countering the old reputation of prefabricated housing as an ugly, cheap, poor-quality option, some builders are focusing on sustainability, aesthetics, and the higher end of the market.“ (Bertram u. a. 2019 (wie Anm. 32), S. 1).

1.2.3 Eingrenzung monolithische Betonbauweisen

Zum Erreichen der Klimaziele werden in den kommenden Jahren enorme Anstrengungen auf die Betonwirtschaft zukommen, was in dem Beitrag „Green means lean – der Weg zur ‚Klimaneutralen Betonbaustelle‘ – Nachhaltiges Bauen mit Beton heißt auch konsequent Lean Construction“ detailliert herausgearbeitet wird.⁴⁸

Die eingangs beschriebene materialunabhängige Betrachtung zu den drei Leitfaktoren wird im Folgenden auf monolithische Betonkonstruktionen eingegrenzt und mit zwei Grundüberlegungen verknüpft. Leitend für die Dissertation ist die These, dass eine automatisierte Fertigungstechnik von Betonbauteilen als monolithische Konstruktion mit Dämmwirkung bei gleichzeitiger Umsetzung eines Systemansatzes positiven Einfluss auf die Nachhaltigkeit nehmen kann. Zudem wird architektonische Qualität bei vorgefertigten Betonkonstruktionen durch die Erhöhung der Varianz auf Grundlager adaptiver Systeme unter Anwendung digitaler Planungsprinzipien sichergestellt.

Herleitung monolithischer Konstruktionen

Monolithische Konstruktionen haben eine lange Entstehungsgeschichte. Die Ursprünge liegen bei den ersten Steinhäusern. Die Herkunft und Begriffsdefinition zu „Monolith“ lässt sich zurückführen auf die griechischen Begriffe „μονο (mono-)“ mit der Bedeutung „einzel-“ und „λίθος (lithos)“ mit der Bedeutung „der Stein.“⁴⁹ Eine monolithische Bauweise⁵⁰ kennzeichnet somit eine Konstruktion, die „aus einem Stein“⁵¹ beziehungsweise einem Stück und damit im übertragenen Sinne aus einem Material besteht. Monolithische Betonkonstruktionen bezeichnen Strukturen eines einheitlichen Materialquerschnitts, die jedoch variabel in ihrem Materialgefüge und damit der Kombination der Ausgangsstoffe sind. Es wird damit die Übernahme mehrerer Funktionen innerhalb dieses Materialquerschnitts impliziert.

⁴⁸ Meyer, Lars, »Green means lean – der Weg zur „Klimaneutralen Betonbaustelle“ – Nachhaltiges Bauen mit Beton heißt auch konsequent Lean Construction«, in: Beton- und Stahlbetonbau, 117, Nr. 5 (2022), S. 366–374, hier S. 370–371.

⁴⁹ Vgl. Definition:

„Der Monolith (griechisch μονόλιθος, monólithos, „der Einstein“, „einheitlicher Stein“, aus μονο-, mono-, „einzel-“ und λίθος, líthos, „der Stein“) bedeutet so viel wie „Stein aus einem Guss“. Allgemein bezeichnet man Objekte, die aus einem Stück bestehen, als monolithisch.“ (<https://www.fremdwort.de/suchen/bedeutung/monolith>).

⁵⁰ Eigene Definition vor der forschungsleitenden These.

⁵¹ Vgl. Tim Lüking (Hg.), *Monolithisch bauen. Eine Bestandsaufnahme*, Graz 2017, S. 11.

Definition monolithischer Betonkonstruktionen vor dem Forschungsrahmen

Innerhalb dieser Dissertation wird ein Aufbau auf Basis verschiedener Zuschlagstoffe ebenso wie die Integration von Bewehrung als monolithischer Querschnitt gewertet, auch wenn es sich in der reinen Definition um eine Materialkombination handelt und in diesem Sinne kein Monomaterial im eigentlichen Sinne darstellt. Die Entwicklung um die Dämmbetone⁵² wurde bereits Ende der 90er-Jahre vorangetrieben.⁵³ Diese Bauweisen wurden bevorzugt in der Schweiz umgesetzt.⁵⁴ Exemplarisch dafür ist das Wohnhaus Meuli in Fläsch in der Schweiz von Bearth & Deplazes Architekten, welches bereits 2002 in Dämmbeton mit einer Wandstärke von 50 Zentimetern realisiert wurde.

Mehrschichtige Wandkonstruktionen

In den letzten Jahrzehnten haben aufgrund erhöhter Anforderungen an Dämmwirkung neben einstofflichen Bauweisen vorrangig mehrschichtige Wandkonstruktionen, bestehend aus einer Tragstruktur und einer vorgelagerten Dämm- und Wetterschutzschicht, Anwendung gefunden. Aktuell häufig zum Einsatz kommende Dämmsysteme auf Erdölbasis zeichnen sich durch einen hohen Ressourcenverbrauch aus, sind brennbar, erfordern einen intensiven Installationsaufwand und können bisher größtenteils nicht in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden.⁵⁵ Vielfach entstehen im Fügeprozess Verbundkonstruktionen, die zu einem späteren Zeitpunkt nicht mehr sortenrein getrennt werden können und so in erheblichem Maße das Abfallaufkommen erhöhen.⁵⁶

⁵² Betone lassen sich in unterschiedlichen Betonarten klassifizieren je nach Zusammensetzung, Erhärungsgrad oder besonderen Eigenschaften. Der Zusatz Dämmbeton impliziert die dämmende Eigenschaft des Betons. Diese kann durch die Variation der Rohdichte beispielsweise von Leichtbeton mit einer Trockenrohddichte von bis zu 2,0 kg/dm³ im Vergleich zu Normalbeton mit einer Trockenrohddichte von über 2,6 kg/dm³ definiert werden. Zudem kann die dämmende Wirkung durch die Betonzusammensetzung und damit die Zuschlagstoffe beeinflusst werden.

Vgl. Kapitel 1.3 Klassifizierung von Beton im Betonkalender 2022 (Frank Dehn und Udo Wiens, »Beton«, in: Konrad Bergmeister (Hg.), *Beton-Kalender 2022. Schwerpunkte: Instandsetzung, Beton und Digitalisierung*, unter Mitw. von Frank Fingerloos und Johann-Dietrich Wörner, Newark 2022 (*Beton-Kalender Ser.*), S. 2–156, hier S. 7).

⁵³ An dieser Stelle wird explizit darauf hingewiesen, dass diese Dämmbetone ausschließlich als Ortbetonkonstruktionen zum Einsatz kamen. Standardisierte Herstellungsmethoden existierten bis dahin nicht.

⁵⁴ Vgl. Bearth & Deplazes Architekten et al.

⁵⁵ Im Jahr 2024 kann in Deutschland von einer prognostizierten Wanddämmfläche für WDVS von 36,8 Mio. m² ausgegangen werden. Die Herstellung, Nutzung und Entsorgung von WDVS auf gesamtwirtschaftlicher Ebene verursacht somit hochgerechnet jährlich Treibhausgasemissionen in einer Größenordnung von ca. 1 Mio. Tonnen CO₂. (Verband für Dämmsysteme, Putz und Mörtel e.V., <https://www.vdpm.info>).

⁵⁶ Sobek/Heinlein 2022 (wie Anm. 3), S. 174.

Daseinsberechtigung monolithischer Systeme

Vor diesem Hintergrund hat das Interesse am monolithischen Bauen in den letzten fünf bis zehn Jahren auf internationaler Ebene wieder deutlich zugenommen. In diesem Zusammenhang steht das Forschungsprojekt „Einfach Bauen“, welches sich an der Technischen Universität München unter Florian Nagler etablierte⁵⁷. Haselsteiner und Lenzen schlussfolgern, ein alternativer Weg zum nachhaltigen Bauen biete sich in der Herangehensweise, möglichst einfach, suffizient⁵⁸ und robust zu bauen.⁵⁹ Auch hier liefern die monolithischen Konstruktionen eine Grundlage. Unter dem Buchtitel „Robuste Architektur. Lowtech Design“ wird eine Abkehr von heutigen Standards forciert.⁶⁰ Gefordert werden neben der Reduktion des Materialeinsatzes beziehungsweise des Ressourcenverbrauchs und der Emissionen, eine Verringerung der Komplexität der Projekte und eine Optimierung auf der Prozessebene. An diese beiden Aspekte knüpft die Dissertation an. Aufgrund der aktuellen Ressourcenknappheit sollte aus Sicht der Autorin oberste Prämisse sein, den Materialeinsatz und damit die Masse auf ein Minimum zu reduzieren. Dies unterscheidet sich grundlegend von den in der Vergangenheit realisierten monolithischen Konstruktionen, die das Prinzip verfolgten, durch die Erhöhung der Masse beispielsweise eine geringere Technisierung⁶¹ zu ermöglichen. Exemplarisch kann hier das im Jahr 2014 fertiggestellte Gebäude „2226“ von Baumschlager Eberle Architekten in Lustenau (Österreich) angeführt werden, das mit einer aus Ziegeln hergestellten Wandstärke von 76 Zentimetern⁶² ohne Heiztechnik auskommt und entsprechend das Low-Tech-Prinzip⁶³ umsetzt, dafür aber auf einen enormen Wandquerschnitt und damit Ressourcen zurückgreift. Sobek kritisiert in dem Zusammenhang folgendes: „Viele denken, dass das Heil im Verzicht auf Technik liegt. Bis zu einem Meter dicke Außenwände sind eine jetzt propagierte Lösung. Was die meisten dabei vergessen, ist: Bei der Herstellung [...] werden so viele Emissionen erzeugt, dass diese über die Lebensdauer des Gebäudes kaum durch Einsparungen im Betrieb kompensiert werden können.“⁶⁴ Der Verzicht auf Haustechnik sollte daher aus Sicht der Autorin nicht zu einem übermäßigen Material- und damit Ressourceneinsatz führen. Vielmehr bedarf es der entsprechenden Weiterentwicklung monolithischer Konstruktionen auf Materialebene, um die Leistungsfähigkeit zu erhöhen.

⁵⁷ Florian Nagler (Hg.), *Einfach Bauen. Ein Leitfaden*, Basel 2022.

⁵⁸ Hillebrandt unterscheidet generell in „Effizienz-Strategien“, „Suffizienz-Strategien“ und „Konsistenz-Strategien“. Der Begriff Suffizienz bezeichnet in diesem Zusammenhang eine neue Genügsamkeit und Wertschätzung für zur Verfügung stehende Ressourcen (Annette Hillebrandt, »Kreisläufe schließen«, in: Felix Heisel und Dirk E. Hebel (Hg.), *Urban Mining und kreislaufgerechtes Bauen. Die Stadt als Rohstofflager*, Stuttgart 2021, S. 49–64, hier S. 51; Nagler 2022 (wie Anm. 57)).

⁵⁹ Edeltraud Haselsteiner (Hg.), *Robuste Architektur Lowtech Design*, München 2022, S. 4.

⁶⁰ Ebd., S. 5.

⁶¹ Darunter wird in diesem Kontext die Einbindung von Haustechnikkomponenten verstanden.

⁶² Zur Ausführung kam eine monolithische Konstruktion aus Ziegelmauerwerk, die sich aus 38 Zentimeter tragenden Hochlochziegeln und 38 Zentimeter Dämmziegeln zusammensetzt.

⁶³ Das Gebäude ist so konzipiert, dass es ohne gebäudetechnische Anlagen zum Heizen, Kühlen und Lüften auskommt und dennoch eine konstante Raumtemperatur zwischen 22 und 26 Grad bereitstellt.

⁶⁴ Werner Sobek, »Für mehr Menschen mit weniger Material bauen«, in: Felix Heisel und Dirk E. Hebel (Hg.), *Urban Mining und kreislaufgerechtes Bauen. Die Stadt als Rohstofflager*, Stuttgart 2021, S. 23–32, hier S. 27.

Monolithische Konstruktionen vor dem Hintergrund der Kreislauffähigkeit

Gegenwärtig gestaltet sich das monolithische Bauen indessen durch neue Entwicklungen auf Materialebene als zukunftsfähig. Zudem ergeben sich Vorteile aus der Reduktion der Materialvielfalt für eine spätere sortenreine Trennung. Bei dieser Betrachtung wird davon ausgegangen, dass die monolithische Betonmatrix zerkleinert werden kann und Zusatzstoffe, beispielsweise Leichtzuschläge mit anderer Dichte, wieder getrennt werden können. Wie kaum ein anderes Material ermöglicht Beton die automatisierte Variation der physikalischen und mechanischen Eigenschaften durch die Anpassung der Materialmatrix – wodurch sich Verarbeitung und technische Eigenschaften einstellen lassen. Hinzu kommt neben der Verarbeitbarkeit die Besonderheit in der Gestaltungsfreiheit. Durch die besonderen Materialeigenschaften kann eine materialspezifische Plastizität geschaffen werden. So kann beispielsweise ein Leichtbeton mit einem hohen Anteil an Recycling-Rohstoffen hergestellt werden, der wärmedämmende Eigenschaften besitzt, fließfähig ist und doch auch schnell erhärtend sein kann. Durch innovative Materialzusammensetzungen wurde der Wärmedurchgang der Konstruktion in dem Maße verbessert, dass deutlich schlankere Konstruktion realisiert werden können. Das zeigt die Forschung zum Aeroleichtbeton, der mit einer Wandstärke von 37 cm deutlich geringer dimensioniert ist als die im Abschnitt zuvor genannten monolithischen Konstruktionen, jedoch trotzdem die Anforderungen an die geltenden Baunormen einhält (→4.4 Betontechnologie: Aeroleichtbeton).

„Ein wesentlicher Vorteil der optimierten monolithischen Bauweise ist nach wie vor die gleichzeitige Übernahme verschiedener grundlegender Funktionen wie Lastabtrag und Dämmung in einer Schicht.“⁶⁵ An der TU Delft sind ferner bio-adaptierende Betonzusammensetzungen in der Entwicklung, die die Leistungsfähigkeit von Beton durch den Zusatz von Bakterien optimieren.⁶⁶

Darüber hinaus wird bei einer Monomaterialität das Recycling vereinfacht. „Monolithische Bauprodukte und Bauweisen punkten in diesem Kontext mit geringer Materialvielfalt, Vermeidung von Stoffverbunden und verbesserter Rezyklierbarkeit.“⁶⁷ Nach Hillebrandt ist der Baustoff Beton durch die Einstofflichkeit⁶⁸ für ein Entwerfen in geschlossenen Kreisläufen („Closed-Loop-Design“) einsatzfähig, obschon er mit Blick auf die Nachhaltigkeit große Schwächen aufweist, die sich besonders auf den hohen Ressourceneinsatz in der Anfangsphase sowie die CO₂-Emissionen bei der Herstellung beziehen.⁶⁹ Wird ein Betonbauteil rückgebaut, findet in dem Sinne ein Recycling auf zweiter Stufe in der Rückführungskaskade statt, was auch als „Downcycling“ bezeichnet wird, da sich der Baustoff nicht, wie zum Beispiel metallische Rohstoffe zu 100 % verwerten lässt. Hillebrandt beschreibt dieses Phänomen bei mineralischen Produkten als

⁶⁵ Hollmann-Schröter 2021 (wie Anm. 15), S. 179.

⁶⁶ Forschungsgebiet an der TU Delft, Prof. Henk Jonkers „Bio-adapted and Sustainable Building Materials“, Entwicklungen zu „bacteria-based self-healing concrete“ und „moss-receptive concrete“.

⁶⁷ Marcus Stevens, »Die unerwartete Leichtigkeit des S[t]eins«, in: Tim Lüking (Hg.), *Monolithisch bauen. Eine Bestandsaufnahme*, Graz 2017, S. 144–153, hier S. 150.

⁶⁸ Vgl. Erläuterungen Glossar.

⁶⁹ Hillebrandt, Annette, »Kreisläufe schließen«, in: Felix Heisel und Dirk E. Hebel (Hg.), *Urban Mining und kreislaugerechtes Bauen. Die Stadt als Rohstofflager*, Stuttgart 2021, S. 49–64, hier S. 52.

unumgänglich, da der Formgebungsprozess nicht reversibel ist.⁷⁰ Diese Gegebenheit kann jedoch signifikant abgeschwächt werden, indem ganze Betonfertigteile wiederverwendet werden. Die Standardisierung kann in dem Fall durch die Schaffung anschlussfähiger Komponenten die Lösung für eine verlustfreie Wiedereinführung in den Stoffkreislauf bieten. Die Dauerhaftigkeit des Materials Beton ermöglicht ohne Weiteres eine Wiederverwendung ganzer Bauteile und lässt somit eine mehrstufige Kaskadennutzung⁷¹ zu (→4.1.2.7 Wiederverwendung von vorgefertigten Komponenten). Darin liegt eine Schlüsselfunktion, da somit in der Gesamtheit eine vielversprechende Ökobilanz im Vergleich zu Verbundbaustoffen entstehen kann. Der Baustoff Beton kann sich durch konstruktive, wirtschaftliche sowie ökologische Vorteile von der traditionellen, additiven Bauweise in einem mehrschaligen System absetzen. Tersluisen et al. erforschten in einem Forschungsprojekt⁷² den Zusammenhang aus bauphysikalischen, ökologischen und ökonomischen Eigenschaften bei monolithischen Wandaufbauten.⁷³

Verknüpfung zum Forschungsprojekt

Grundlage der Dissertation mit dem Schwerpunkt auf monolithischen Betonkonstruktionen bietet die vorangegangene Forschungstätigkeit an der TU Dortmund, am Lehrstuhl Baukonstruktion und der Juniorprofessur Ressourceneffizientes Bauen REB⁷⁴, die in weiten Teilen selbstständig durch die Autorin initiiert wurde und eng mit dem vorliegenden Dissertationsthema verknüpft ist. Um die definierten Ziele innerhalb des Forschungsrahmens zu erreichen, wird die Arbeitsthese daher an der Forschungsleistung zum Thema „Hybridbeton-Elemente mit Aerogel-Schaumbeton Kern“⁷⁵ verifiziert. Die kooperative Forschung mit dem Industriepartner G.tecz Engineering GmbH konnte weitestgehend erfolgreich abgeschlossen werden. Aus diesem Forschungsprojekt, welches die Autorin projektleitend begleitet hat, konnte das Potenzial der synchronen Umsetzung der drei Leitfaktoren bestätigt werden (→4.4 Betontechnologie: Aeroleichtbeton).

⁷⁰ Ebd., S. 54.

⁷¹ Definition Kaskadennutzung: „Strategie, Rohstoffe oder daraus hergestellte Produkte in zeitlich aufeinander folgenden Schritten so lange, so häufig und so effizient wie möglich stofflich zu nutzen und erst am Ende des Produktlebenszyklus energetisch zu verwerten. Dabei werden sogenannte Nutzungskaskaden durchlaufen, die von höheren Wertschöpfungsniveaus in tiefere Niveaus fließen. Hierdurch wird die Rohstoffproduktivität gesteigert.“ (Umweltbundesamt (2012): Glossar zum Ressourcenschutz) <https://sns.uba.de/umthes/en/concepts/00656218.html>

⁷² Forschungsprojekt „Untersuchung zeitgemäßer, monolithischer Wandaufbauten hinsichtlich bauphysikalischer, ökologischer und ökonomischer Eigenschaften“; BBSR, Forschungsinitiative Zukunft Bau (Förderkennziffer SWD-10.08.18.7-15.34).

⁷³ Angèle Tersluisen u. a., *Untersuchung zeitgemäßer, monolithischer Wandaufbauten hinsichtlich bauphysikalischer, ökologischer und ökonomischer Eigenschaften. Abschlussbericht*, Stuttgart 2018 (Forschungsinitiative Zukunft Bau F 3064).

⁷⁴ Seit Oktober 2023 ist Frau Prof. Dr.-Ing. Jutta Albus an die Hochschule Bochum, Lehrstuhl ENKB - Entwerfen und Konstruieren. Nachhaltiges Bauen berufen.

⁷⁵ Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand - Projekt. Heute gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Zur Zeit der Antragstellung gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Laufzeit 11/2017-03/2020.



Abb. 5: Anforderungen an die monolithischen Konstruktionen. Eigene Darstellung

Vorteile monolithischer Wandkonstruktionen

Es werden folgende Vorteile gesehen, die im **Kapitel IV** anhand der Synopse dreier monolithischer Betontechnologien belegt werden (Abb. 5):

- schlankere Bauteildimensionen durch innovative Materialzusammensetzungen als Monomaterial und dadurch auch ein geringerer Einsatz von Ressourcen bei gleichzeitiger Übernahme der Tragfunktion
- bessere U-Werte der Konstruktion und somit GEG-Konformität durch Zusatzstoffe wie Aerogel oder die Verwendung von Leichtzuschlägen, die die Dämmwirkung unterstützen
- gleichzeitige Übernahme verschiedener grundlegender Funktionen in einer Schicht
- reduzierter Gewerkebedarf und dadurch Kostenersparnis (Vgl. Fachkräftemangel)
- vereinfachtes Recycling durch Einstofflichkeit
- geringerer Wartungsaufwand durch Sichtbetonoberfläche
- Plastizität des Materials erlaubt automatisierte Vorfertigung und impliziert eine Gestaltungsfreiheit

Die Erarbeitung erfolgt, wie in **Abbildung 6** visualisiert, chronologisch innerhalb der sechs Kapitel. Die Herangehensweise ist in zwei Lesarten, vertikal und horizontal, konzipiert. Jedes Kapitel startet mit einer Bestandsaufnahme mithilfe der Aufstellung von Kriterien (**obere, grüne horizontale Ebene „Kriterien“ in Abb. 6**). Als Hauptbestandteil der Arbeit werden spezifische Betonkonstruktionen anhand von gewählten kriteriengeleiteten Fallanalysen untersucht, die die Theorie der Individualisierten Standardisierung bestätigen (**mittlere, graue horizontale Ebene „Schwerpunkt“ in Abb. 6**). Abschließend werden in jedem Kapitel die Vor- und Nachteile innerhalb eines Résumés für Betonkonstruktionen zusammengefasst und in das nächste Kapitel überführt. Die Synthesen haben oftmals allgemeingültige Bedeutung mit hohem Übertragungspotenzial (**untere, grüne horizontale Ebene „Synthese“ in Abb. 6**).

Ein wesentlicher Bestandteil der Dissertation ist die Verknüpfung der Leitfaktoren mit einem Fokus auf die Verbesserung der Nachhaltigkeit. Es erfolgt die Erweiterung des theoretischen Modells der Strategie der Individualisierten Standardisierung vor dem Hintergrund der Kreislaufwirtschaft. Aus dem Modell wird ein weiteres theoretisches Konstrukt, das Prinzip der Pyramidalen Zirkularität, entwickelt, welches wiederum an der Betonforschung validiert wird.

Die aufgestellten Theorien, die Strategie der Individualisierten Standardisierung und das Prinzip der pyramidalen Zirkularität, werden anhand der Synopse von drei Technologien der Betonverarbeitung mittels einer kriteriengeleiteten Fallanalyse verglichen. Dabei handelt es sich um den Infraleichtbeton, den Gradientenbeton und den Aeroleichtbeton. Die dann definierten zwölf Kriterien zur Nachhaltigkeitsbewertung von Betonkonstruktionen werden in den gegenübergestellten Betonsystemen vollumfänglich impliziert und weisen durch ihre ausbalancierte Verknüpfung die prognostizierten Potenziale der aufgestellten Theorien auf.

1.4 Methodik

Methodisch setzt sich die Arbeit aus drei Säulen zusammen. Innerhalb der Dissertation wird ein theoriebildender Ansatz vorangestellt, dessen Teilaspekte⁷⁶ nacheinander eingeführt werden und aufeinander aufbauen. Der anvisierte Erkenntnisgewinn wird nach einer Analysestrategie über die Durchführung von kriteriengeleiteten Fallanalysen gewonnen und bestätigt. Das Format der Synopse dreier Betontechnologien ermöglicht deren kriteriengeleitete Wertung. Des Weiteren stützt sich die Dissertation maßgeblich auf Forschungsergebnisse, die in Kooperation der Juniorprofessur Ressourceneffizientes Bauen und des Lehrstuhls Baukonstruktion unter maßgeblicher Beteiligung der Autorin erzielt wurden. Dieses profunde Wissen aus der angewandten Bauforschung fungiert als Motor zum Aufwerfen notwendiger Fragestellungen, ebenso wie als Vergleichsbasis für den Erkenntnisgewinn.

Einleitend erfolgt in **Kapitel I** die Aufstellung der Arbeitsthese. Die Definition der drei Leitfaktoren und deren In-Beziehung-Setzung mündet in der Entwicklung des theoretischen Modells der Strategie der Individualisierten Standardisierung. Daraufhin werden die Relevanz und Zielvorstellung der aufgestellten Arbeitsthese vor dem Hintergrund multifaktorieller Anforderungen im Bauwesen beleuchtet. Es werden die bestehenden Mängel aufgeführt (Relevanz) und diese Einflussfaktoren bewusst in ein Beziehungsgeflecht gesetzt.

In **Kapitel II** erfolgt daraufhin eine kriteriengeleitete Fallanalyse für jeden der drei Leitfaktoren auf Basis einer systematischen Literaturanalyse (Dokumentenanalyse und Literatursichtung). Zuerst erfolgt die allgemeine materialoffene Herleitung des jeweiligen Leitfaktors. Daraufhin schließt sich die spezifische Analyse der Forschung mit Blick auf monolithische Betonkonstruktionen an. Gewählte Fallbeispiele dienen zur Verifikation der Umsetzung des im Vordergrund stehenden Leitfaktors an realisierten Projekten beziehungsweise durchgeführten Forschungsvorhaben. Eine tragende Rolle bei dieser Herangehensweise nimmt demnach die Analysestrategie ein. Dabei wird offengelegt, nach welcher Systematik die Fallbeispiele untersucht werden. Mit einer begrenzten Anzahl von Fallbeispielen werden der Erkenntnisgewinn der verknüpften Leitfaktoren vor dem Hintergrund der Individualisierten Standardisierung beschrieben und Rückschlüsse auf die Arbeitsthese gezogen.

In **Kapitel III** erfolgt eingehend eine weitere systematische Datenerhebung zur Definition des Nachhaltigkeitsbegriffs im Allgemeinen. Anschließend werden die erarbeiteten drei Leitfaktoren hinsichtlich ihrer Relevanz zur Verbesserung der Nachhaltigkeit zusammengeführt. Methodisch wird die Theorie der Strategie der Individualisierten Standardisierung in ein tiefergehendes theoretisches Konstrukt, das Prinzip der pyramidalen Zirkularität, überführt. Dabei geht es vorrangig darum, die zuerst aufgestellte Theorie in Relation zu einer geforderten Kreislaufwirtschaft für das Bauwesen zu setzen, die einen weiteren Baustein in der Arbeitsthese

⁷⁶ Hierunter wird die Entwicklung des theoretischen Modells der Strategie der Individualisierten Standardisierung und deren Überführung in das Prinzip der Pyramidalen Zirkularität verstanden.

ausmacht. Auch hier erfolgt im ersten Schritt eine theoriebedingte Festsetzung der Vorbedingungen. Der Erkenntnisgewinn ergibt sich durch die bewusste Definition von sechs Schnittstellen zwischen den drei Leitfaktoren, die zum einen sequenziell positioniert sind, zum anderen aufeinander aufbauen und schließlich in einer zirkulären Konstellation münden. Die Theorie des Prinzips der pyramidalen Zirkularität wird anhand des Betonsektors untersucht. Abschließend wird die These durch die aufgezeigten Potenziale bestätigt.

Die Forschungserkenntnisse aus den aufgestellten Theorien und der zusammengetragenen systematischen Datenanalyse aus Kapitel II und III dienen als Grundlage für die in **Kapitel IV** erarbeitete Synopse, die sich zu großen Teilen auf Ergebnissen eigener Forschungsleistungen zur Aeroleichtbetontechnologie sowie der Dokumentationsanalyse wissenschaftlicher Texte stützt. Auch in diesem Kapitel wird eine Analyseraster aufgestellt und methodisch auf die kriteriengeleitete Fallanalyse zurückgegriffen. Als Untersuchung wird eine synoptische Gegenüberstellung gewählt, um die drei monolithischen Betontechnologien mit Dämmwirkung vertiefend zu betrachten. Die Berichte zu diesen Technologien bilden einen wissenschaftlichen Beitrag für eine vergleichende Forschung. Eingangs erfolgt die Festsetzung der Kriterien zur Verbesserung der Nachhaltigkeit von Betonkonstruktionen im Allgemeinen. Die drei Technologien werden anhand der Kriterien verglichen und es wird ein Bezug zur Umsetzung der Pyramidalen Zirkularität hergestellt. Darüber hinaus werden die Betonsystemen auf die Verknüpfung der drei Leitfaktoren hin untersucht. Unter Einbeziehung eigener Forschungsergebnisse der Bauforschung am Objekt besteht Expertenwissen, um die Leitfaktoren zu differenzieren und deren Relation zu untersuchen. Die Bewertungsgrundlage fußt auf einer Nachhaltigkeitsbewertung⁷⁷, die im Rahmen des Forschungsprojektes zur Aeroleichtbetontechnologie durchgeführt wurde.

Die Ergebnisse der Theorien werden im **Kapitel V** zusammengeführt und bewertet. Das Fazit schließt mit der Einordnung der aufgestellten Theorie und der Darstellung des Mehrwerts der Vorgehensweise für das Bauwesen und im Speziellen für den Betonsektor.

Als weiterer Baustein der Dissertation steht im **Kapitel VI** der Forschungstransfer an zentraler Stelle. Entsprechend des Forschungsdesigns ergeben sich zwei Ansatzpunkte von dem der eine aus der Betonforschung abgeleitet ist und der andere ein materialoffener Ansatz ist. Beide werden im Ausblick dezidiert erläutert. Zum einen wird das Übertragungspotenzial der beiden Theorien auf Materialebene betrachtet. Tiefergehende Erkenntnisse zur Übertragbarkeit der aufgestellten These auf eine hybride Bauweise werden an dem aktuell laufenden Forschungsprojekt zum Thema „Modular. Zirkulär. Digital.“⁷⁸ beleuchtet. Zum anderen besteht weitergehender Forschungsbedarf bei der Übertragung der Arbeitsthese zur Individualisierten Standardisierung monolithischer Konstruktionen

⁷⁷ Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde eine vergleichende Ökobilanzierung durchgeführt sowie bauphysikalische Messungen zur Bewertung der Betontechnologie.

⁷⁸ Laufendes Forschungsprojekt „Modular. Zirkulär. Digital. Individualisierbare Standardisierung – Ganzheitlicher Modulbaukasten zum Erreichen nachhaltiger Planungskonzepte und hoher planerischer Flexibilität“, Projektträger DBU, Laufzeit 01.10.22-31.03.25.

von Neubau- auf Bestandskonstruktionen. Dabei steht die Weiterentwicklung der Aeroleichtbetontechnologie im Fokus der Anschlussforschung.⁷⁹ Forschungsleitend ist die Entwicklung eines automatisierten Applikationsverfahrens für ein mineralisches Dämmsystem, welches maßgeschneidert auf den Gebäudebestand zugeschnitten werden kann.

⁷⁹ Projektiertes Forschungskonzept zum Thema „Re-Activate – automatisiert, adaptiv, kreislaufgerecht, Sanierungsverfahren für den Gebäudebestand mit RC-Aeroleichtbeton“, was von einem Projektträger abgelehnt wurde.

