

## Kapitel V | Ergebniszusammenführung

### 5.1 Potenziale anpassungsfähiger Betonkonstruktionen

Im Folgenden wird dargelegt, warum sich insbesondere Betonkonstruktionen für die Umsetzung der Individualisierten Standardisierung eignen. Dazu wird das Verhältnis aus Anpassungsfähigkeit und eingesetzter Masse differenziert und vor dem Hintergrund der Lebensdauer untersucht.

#### 5.1.1 Dauerhaftigkeit durch Flexibilität

Vor dem Hintergrund der pyramidalen Zirkularität erscheint es sinnvoll, durch ein gewisses Maß an Flexibilität die Lebenszeit von baulichen Strukturen zu verlängern und damit Emissionen länger im Kreislauf zu binden. Es wird der Zusammenhang gesehen, dass eine implizierte Nutzerflexibilität eine längere Nutzungsdauer bewirken kann, da Änderungsbedarfe von vorneherein berücksichtigt sind und somit ein Abriss redundant werden kann. Die dafür erforderliche Flexibilität stellt im erweiterten Sinne eine Form der Individualisierung und Anpassungsplanung dar. Aus diesem Grund wurde die Strategie der Individualisierten Standardisierung um das Prinzip der Pyramidalen Zirkularität erweitert. Es kann dargelegt werden, dass durch das Maß der Flexibilität die Lebensdauer von Gebäuden beeinflusst wird. "The building systems should be designed with the capacity to cope with future changes with minimum demolition, cost and waste and with maximum robustness, mutability and efficiency."<sup>574</sup> Betonkonstruktionen bieten dafür ein wertvolles strukturelles Gerüst.

Die Anpassungsfähigkeit von Bauteilen wurde umfassend unter dem Leitfaktor Konstruktion im Zusammenhang der adaptiven Konstruktionen erörtert (2.2 Leitfaktor Technik – komplexe Fertigungstechnologien). Im Folgenden geht es nun um die verhältnismäßige Umsetzung von Systemansatz und Anpassungsplanung auf Gebäudeebene. Heidrich et al. definieren eine Liste adaptiver Merkmale für Schlüsselstrategien, um anpassungsfähigere Gebäude zu erreichen. Beispielhaft fließen Faktoren wie die Erschließung und Grundrissflexibilität, Raumhöhe, das Maß der Vorfertigung, Reversibilität der Verbindungstechnik, Ordnungssystem, statische Auslegung in die Betrachtung mit ein. Zeitpunkt und Häufigkeit einer Anpassung kann dabei sehr unterschiedlich sein. Der Aspekt der Flexibilität von Bauwerken und dem damit verbundenen Potenzial einer Nutzungsänderung ist schwer quantitativ zu fassen, da bei dieser Betrachtung immer unterschiedliche projektspezifische Faktoren gegeneinander abgewogen werden müssen. Es besteht jedoch eine Forschungsgrundlage, auf die im Folgenden zurückgegriffen wird. Zur Kategorisierung der Flexibilität von Gebäuden wurde von Geraedts et al. die Applikation „flexibility key performance generator (FLEX4.0)“<sup>575</sup> konzipiert und frei verfügbar gemacht. Das Werkzeug definiert den Flexibilitätsgrad eines Gebäudes

<sup>574</sup> Brian R. Sinclair, Somayeh Mousazadeh und Ghazaleh Safarzadeh, »Agility, Adaptability + Appropriateness: Conceiving, Crafting & Constructing an Architecture of the 21st Century«, in: *Enquiry The ARCC Journal for Architectural Research*, 9 (2012), Nr. 1, S. 35–42, hier S. 40.

<sup>575</sup> Vgl. Geraedts 2016 (wie Anm. 198).

durch die Eingrenzung auf wesentliche Faktoren und verknüpft diese mit einer Bedarfsabfrage.<sup>576</sup> Solche Werkzeuge können helfen, um die Nachhaltigkeit und das Maß der Flexibilität in Beziehung zu setzen und zu bewerten.

### 5.1.2 Emissionen im Zusammenhang zwischen Masse und Flexibilität

Folgend wird die Flexibilität von Gebäuden in Beziehung gesetzt zur eingebrachten konstruktiven Masse. Gosling und Tingley differenzieren vor dem Ziel einer Reduktion von Emissionen zwischen einem Gleichgewicht von Masse der Konstruktion und Flexibilität der Struktur. Sie unterscheiden dabei zwei Strategien, die kurzfristige sowie die langfristige Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen: Bei der kurzfristigen Reduktion der Emissionen wird die Masse reduziert und Material mit geringerem CO<sub>2</sub>-Fußabdruck verwendet. Bei der langfristigen Reduktion der Emissionen wird die Lebensdauer durch eine gesteigerte Flexibilität erhöht.<sup>577</sup> „The results show that the short-term embodied carbon emissions can be reduced by limiting structural mass, rejecting rationalisation, and selecting materials with a lower embodied carbon content. They also show that the long-term embodied carbon emissions can be reduced by potentially extending the building’s lifespan through nearly doubling its flexibility. Most importantly, the results show that it is possible to reduce both the short- and long-term embodied carbon emissions of the structure simultaneously, so long as structural efficiency and flexibility are considered simultaneously at the primary design stage.“<sup>578</sup>

Viele der innerhalb der Dissertation vorgeschlagenen zwölf Kriterien zur Verbesserung der Nachhaltigkeit von Betonkonstruktionen beziehen sich vorrangig auf eine kurzfristige CO<sub>2</sub>-Reduktion (→4.1.2 Kriterien zur Nachhaltigkeitsbewertung von Betonkonstruktionen). Beton hat darüber hinaus in Abgrenzung zu den meisten der im Bauwesen verfügbaren Materialien durch seine überdurchschnittlich lange Lebensdauer das Potenzial, bei entsprechender Planung Gebäudestrukturen generieren zu können, die flexibel auf Nutzungsänderungen eingehen können. Dieser Ansatz spiegelt sich entsprechend in den zwei Kriterien (→4.1.2.7 Wiederverwendung von vorgefertigten Komponenten) und (→4.1.2.8 Rückbaubarkeit und reversible Fügechnik) wider. Eine Berücksichtigung dieser Kriterien kann die dargelegte langfristige Reduktion von Emissionen bewirken.

Es kann geschlussfolgert werden, dass der Zusammenhang aus konstruktiver Masse und Flexibilität der Konstruktion die Lebensdauer von Konstruktionen beeinflusst und dadurch Auswirkungen auf das Maß der Nachhaltigkeit hat. Dieser Schlussfolgerung erweitert die Betrachtung zur Individualisierten Standardisierung und hebt den wesentlichen Nutzen monolithischer Betonkonstruktionen in Abgrenzung zu anderen Werkstoffen hervor.<sup>579</sup>

<sup>576</sup> Vgl. Heidrich u. a. 2017 (wie Anm. 196), S. 296.

<sup>577</sup> Vgl. S. Gosling und D. D. Tingley, »Optimising the Balance Between Flexibility and Structural Mass for Lower Short- and Long-Term Embodied Carbon Emissions in Mass Housing«, in: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1078 (2022), Nr. 1, S. 1–11, hier S. 9.

<sup>578</sup> Ebd.

<sup>579</sup> Vgl. weitergehende Information: „Es wird offensichtlich, dass die Forderung massive Baustoffe aufgrund ihrer vermeintlich schlechten Ökobilanz durch leichtere Bauweisen, wie Holzkonstruktionen und/oder Hybridbauweisen mit WDVS zu ersetzen, nicht immer zielführend ist. Die genannten leichteren

### 5.1.3 Planerische Umsetzung der Strategie der Individualisierten Standardisierung

Die Tatsache, dass sich die aktuell angesetzten Maßnahmen zur Verbesserung der Nachhaltigkeit von Betonkonstruktionen oftmals auf die kurzfristige Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen beziehen, resultiert aus der Notwendigkeit, eine schnelle Umweltwirkung herbei zu führen. Die entsprechenden Effekte sind zudem bilanzierbar und somit in Werten abbildbar. Überdies zeigen die eingangs in diesem Kapitel aufgezeigten Zusammenhänge von Gebäudeflexibilität, dass eine langfristige Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen vergleichsweise schwierig umzusetzen ist und eine Ablesbarkeit der Wirksamkeit nicht rational und umgehend erfolgen kann. Jedoch sind gerade langfristige Maßnahmen vor dem Hintergrund der Kreislauffähigkeit bereits in der Planung von Betonkonstruktionen notwendig um diese dauerhaft und nutzungsflexibel auszulegen. Diesen Aspekt adressiert die Dissertation mit der Einführung des Prinzips der Pyramidalen Zirkularität und gibt eine Handlungsempfehlung zur Umsetzung der Kreislauffähigkeit. Tiel et al. fassen die Herausforderungen an die Entwurfsstrategie wie folgt zusammen: „Um Beton [darüber hinaus] möglichst lange im Kreislauf zu halten, muss die Designstrategie Langlebigkeit durch den Entwurf dauerhafter, nutzerflexibler und resilienter Bauwerke umgesetzt werden. Diese Designstrategien lassen sich nicht immer gemeinsam konfliktfrei umsetzen. So sind zerlegbare, standardisierte Bauprodukte häufig mit einer redundanten Materialnutzung verbunden, während materialeffiziente Strukturen nicht immer wiederverwendbar sind.“<sup>580</sup> Auch wenn die Schaffung einer Flexibilität einen größeren Planungsaufwand, Überdimensionierung, erhöhte Kosten oder größeren Materialeinsatz – und damit verbunden eine Erhöhung der kurzfristigen Emissionen – mit sich bringen kann, kann sich die Auslegung über den gesamten Lebenszyklus gewinnbringend darstellen. „‘Over-designing’ was identified in 8/11 of the research papers analysed for the Flexibility Strategy Spreadsheet. This suggests that increasing the up-front embodied carbon cost of the case study design can be outweighed by the potenzial long-term benefits if the in-built flexibility is exploited during the building’s life.“<sup>581</sup>

Dies verdeutlicht, dass generell zwischen zwei konzeptionell konträren Herangehensweisen zum Erreichen einer Verbesserung der Nachhaltigkeit abzuwägen ist. Projektbezogen wird dies zu unterschiedlichen baulichen Ergebnissen führen.

1. Maßnahmen mit langfristigen Wirkungen zur Emissionsreduktion, mit größerem Planungsaufwand und Überdimensionierung zur Erhöhung der Flexibilität.
2. Kurzfristige reduktive Maßnahmen mit schlanken Bauteilen, die wiederum im Sinne der Kreislauffähigkeit demontierbar zu planen sind.

---

Baustoffe und Konstruktionsweisen weisen nicht die gleiche Lebensdauer auf und erfordern zusätzliche Brandschutz- und Schallschutzmaßnahmen. Somit werden eine Vielzahl an Problemen (höhere Fehleranfälligkeit, höhere Schadenanfälligkeit, höherer Sanierungsaufwand, wie z. B. Austausch von Wärmedämmungen) auf zukünftige Generationen verschoben.“ Mendgen/Schlaich 2021 (wie Anm. 424), S. 345.

<sup>580</sup> Thiel u. a. 2023 (wie Anm. 295), S. 266.

<sup>581</sup> Gosling/Tingley 2022 (wie Anm. 595), S. 9.

Im folgenden Kapitel wird dargelegt, welche Defizite sich noch bei der Umsetzung dieser Herangehensweisen im Zusammenhang der eingeführten Theorien auftun.

5.2 Defizite in Bezug auf die Umsetzung der Leitstrategie

Ziel der Dissertation ist es, einen Weg aufzuzeigen wie das Verhältnis von Individualisierung und Standardisierung bezogen auf die jeweilige Bauaufgabe auszutarieren ist, so dass es eine angemessene Gewichtung hinsichtlich Nachhaltigkeit, Kosten und Gestaltung abbildet. Im Folgenden werden die Defizite aufgeführt, die bisher eine gewinnbringende Umsetzung dieser Leitidee erschweren. Zunächst wird daher das vorherrschende Ungleichgewicht bei der Berücksichtigung der Leitfaktoren betrachtet. Daraufhin wird die Notwendigkeit von Standards dargelegt, mit denen erst eine umfassende und ausgewogene Gewichtung vorgenommen werden kann. Abschließend wird eine Einschätzung gegeben, wo das Bauwesen bei der Umsetzung der Individualisierten Standardisierung aktuell steht und inwiefern die Forschungslandschaft auf eine positive Transformation einwirken kann.

5.2.1 Dysbalancen durch gegeneinander wirkende Parameter

Ein offensichtliches Defizit besteht in der bisher unzulänglichen Verknüpfung der ausgemachten Leitfaktoren Technik, Konstruktion und Gestaltung in der Umsetzungspraxis. Das liegt mitunter darin begründet, dass sich die eingangs dargestellten multiplen Einflussfaktoren nicht vollständig vereinen lassen, sondern oftmals diametral gegeneinander wirken. Häufig werden Betonbauweisen zunächst schwerpunktmäßig unter lediglich einem Gesichtspunkt der Technik, der Konstruktion oder der Gestaltung entwickelt, und es wird versucht, einen weiteren Faktor einzubinden (Abb. 91).

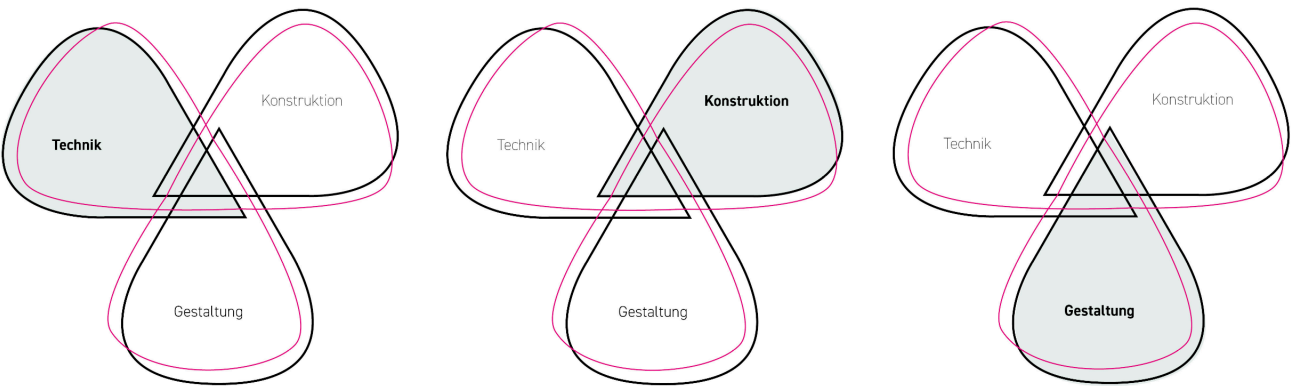


Abb. 91: Darlegung der Dominanz eines Leitfaktors im Gesamtgefüge. Eigene Darstellung

Es konnte abgebildet werden, dass es im Betonsektor bereits eine Vielzahl innovativer Nachhaltigkeitsentwicklungen bezogen auf jeden einzelnen Leitfaktor gibt, ein ganzheitlicher, zusammenführender Ansatz aber bisher nicht gegeben scheint. Eine entsprechende übergeordnete Herangehensweise, die die Faktoren

Konstruktion, Technik und Gestaltung unter Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen einer Bauaufgabe oder eines Planungsansatzes in einem austarierten Verhältnis zusammenführt, wird bisher selten angewandt. Eine solche existiert vorrangig in der Betonforschung, teils mit ersten Realisierungen in der Baupraxis. Diese wurden als Referenzprojekte in den jeweiligen Leitfaktoren angeführt (→2.2.3 Aufstellung von Verfahrensprinzipien am Beispiel der Betonforschung, 2.3.3 Aufstellung von Konstruktionsprinzipien am Beispiel der Betonforschung, 2.4.3 Aufstellung von Entwurfs- und Planungsprinzipien am Beispiel der Betonforschung). Dem gegenüber wird in der tatsächlichen Umsetzung zu einem Großteil auf Konzepte zurückgegriffen, die entweder stark systematisiert die gestalterische Qualität vermissen lassen oder ausgeprägt individualisiert die ökonomischen wie ökologischen Aspekte vernachlässigen (→2.3.1.4 Statusbericht serielles und modulares Bauen). Diesbezüglich wurde dargelegt, warum der Individualisierte Systembau im Gegensatz zum rein modularen Bauen zum jetzigen Zeitpunkt aussichtsreich erscheint (→2.3.4 Résumé: Adaptive Konstruktionssysteme als Mittelweg aus Standardisierung und Individualisierung). Die dargestellten Forschungsentwicklungen des Betonsektors sind daher im positiven Sinne wegweisend. Dabei sind besonders die in Kapitel IV erläuterten Betontechnologien – der Infraleichtbeton, der Gradientenbeton und der Aeroleichtbeton – hervorzuheben, die den Leitgedanken der Individualisierten Standardisierung bereits in vielen Aspekten abbilden.

## 5.2.2 Fehlende Standards aufgrund der Notwendigkeit einer relatierten Gewichtung

Das Austarieren der Leitfaktoren, das stete Ins-Verhältnis-Setzen von kurzfristigen und langfristigen Maßnahmen zur CO<sub>2</sub>-Einsparung und die Entscheidungsfindung zur Anwendung eines Maßes der Anpassungsfähigkeit bei der Umsetzung eines Systemansatzes stellen einen komplexen Prozess dar, der den Planerinnen und Planern bereits in der Entwurfsphase abverlangt wird (→5.1 Potenziale anpassungsfähiger Betonkonstruktionen). Dafür gibt es bisher jedoch kein standardisiertes Vorgehen. Geraedts fordert in einem vergleichbaren Zusammenhang einen einheitlichen Standard zur Bewertung der Flexibilität ein, ähnlich bestehender Verfahren zur Bewertung der Nachhaltigkeit und stellt dazu folgende Frage: “Would it be possible to develop a similar standard for the adaptive capacity of buildings?”<sup>582</sup>

Die Autorin unterstützt diese Forderung nach einer systematisierten Herangehensweise und empfiehlt, entsprechend Parameter wie die Leitfaktoren und die Kriterien zur Verbesserung der Nachhaltigkeit für den Entwurfsprozess festzulegen. Die Dissertation verfolgt mit der Erstellung eines kriteriengeleiteten Prüfrasters genau diesen Ansatz zur Bewertung. Entscheidend bei dem Vorgehen ist jedoch, dass es weder darum geht, ein absolutes Gleichgewicht der Faktoren umzusetzen, noch darum, die Kriterien aufzusummieren. Entscheidend ist deren

<sup>582</sup> Geraedts 2016 (wie Anm. 198), S. 579.

relatierte Gewichtung (→4.5 Zusammenfassung Synopse), die nicht quantitativ erfolgen kann, sondern abhängig ist von der jeweiligen Zielsetzung des Planungsprozesses. Die Abwägung beziehungsweise die Definition der Gewichtung ist somit ein personengebundener Prozess, der von den Planerinnen und Planern stets neu und in Abhängigkeit von der Bauaufgabe verfolgt werden muss.

Die Defizite zeigen sich dabei in dem Maße, als dass es für diesen Abwägungsprozess in der Entwurfsphase bisher wenige Standards oder Hilfestellungen für Planerinnen und Planer gibt. Die Strategie der Individualisierten Standardisierung sowie das Prinzip der Pyramidalen Zirkularität sollen genau diese Unterstützung geben, um die komplexe Aufgabe der Abwägung leisten zu können. Dafür werden Werkzeuge benötigt, die ein adaptives Entwerfen zur Optimierung der Bauteile und Verbesserung der Nachhaltigkeit erst erlauben. Die von der Autorin selbst begleitete, aktuell laufende Forschung MZD soll mit einem digitalen Tool zur Nachhaltigkeitsbewertung einen Lösungsansatz aufzeigen (→6.1.1 Forschungsprojekt: hybride Systembaukonstruktion „Modular – Zirkulär - Digital (MZD)“). Das digitale Werkzeug ist so konzipiert, dass es den Entwurfsprozess deutlich vereinfachen kann, indem es Hilfestellung für den beschriebenen Abwägungsprozess liefert.

Dem Vorgehen der Dissertation entsprechend gilt es, weitere gute Beispiele zu entwickeln, die die Strategie der Individualisierten Standardisierung abbilden und diese transparent ausweisen. In einem nächsten Schritt sollte es darum gehen, anhand der Erkenntnisse der Dissertation gemeinsame Standards zu entwickeln. Zu einem ähnlichen Schluss kommen auch Thiel et al. Sie fordern in Ihrem Bericht „Strategien zur Implementierung der Kreislaufwirtschaft beim Bauen mit Beton“ Standards auf den vielschichtigen Ebenen wie „BIM, BIM-to-Robot, zirkuläres Bauen und Automatisierung und Robotik im Bauwesen“ ein. „Digitale Fertigung für zirkuläre Stoffströme braucht Standards als Grundlage, um Qualität, Akzeptanz und Skalierung erreichen zu können.“<sup>583</sup>

### 5.2.3 Status der Anwendung einer Individualisierten Standardisierung

Bezogen auf das Betonvolumen, das in Deutschland jährlich verbaut wird, stellen die vielfältigen, innerhalb der Dissertation dargestellten Innovationen im Umgang mit Betonkonstruktionen bisher nur einen geringen Anteil dar. Ein Blick in die Betonvorfertigung zeigt, dass der Ablauf zur Herstellung von Betonfertigteilen mehrere Arbeitsschritte umfasst, die in unterschiedlichem Maße automatisiert sind. Beispielsweise sind die metallverarbeitenden Prozesse zur Erstellung der Bewehrungselemente bereits oftmals vollautomatisiert. Das Flechten der Drahtkörbe hingegen wird durch manuelle Arbeitskraft erledigt.<sup>584</sup> Es mangelt an

<sup>583</sup> Thiel u. a. 2023 (wie Anm. 285), S. 272.

<sup>584</sup> Basierend auf einem Gespräch mit Werksführung bei der Fa. Bremer SE mit Herrn Dr. Molter im Mai 2022 in Paderborn. (Matthias Molter, Assessment Betonforschung, Interview von Kirsten E. Hollmann-Schröter, Paderborn, 11. Mai 2022.

Des Weiteren sorgen Plattenumlaufanlagen für einen effizienten Ablauf mit einem hohen Maß an Genauigkeit. Die Herstellung der Schalung und das Einlegen der Bewehrung erfolgen jedoch oftmals noch manuell. Es wird beispielsweise eine spezifische Schalung für ein Element hergestellt, welches damit vervielfältigt werden kann, aber in seiner Beschaffenheit und Geometrie fixiert ist. Auch wenn die

einer großmaßstäblichen Implementierung und Transformation des Betonsektors, dem die Branche generell offen gegenübersteht.<sup>585</sup> Es ist ablesbar, dass die Möglichkeiten der komplementären Fertigung noch nicht in die klassische Betonvorfertigung eingeflossen sind (→2.2.4 *Résumé: Forderung einer komplementären Fertigungsstrategie*). Des Weiteren sind die Ansätze anpassungsfähiger Konstruktionen und Prozesse noch nicht aus der Forschung in die industrielle Fertigung übertragen (→2.3.4 *Résumé: Adaptive Konstruktionssysteme als Mittelweg aus Standardisierung und Individualisierung*). Ein ähnlicher Status der Umsetzung kann bei der digitalen Gestaltung konstatiert werden. Es mangelt an einer vollständigen parametrischen Verknüpfung (→2.4.4 *Résumé: Auswirkungen digitaler Werkzeuge auf Prozesskontinuität und Nachhaltigkeit*). Es gibt vielfältige Forschungsaktivitäten, aber nur einige wenige Akteure, die genau die Schnittstelle zwischen digitaler Gestaltung und Ausführung angehen und verknüpfen.<sup>586</sup> „Alles in allem ist der digitale Vernetzungsgrad der Baubranche noch gering und gerade die Schnittstellen zwischen den bereits vorhandenen Werkzeugen der digitalen Bauplanung und den Werkzeugen der digitalen, automatisierten Produktion sind noch unterentwickelt.“<sup>587</sup> Diese Entwicklung bietet bisher keine flächendeckende Lösung für eine erfolgreiche Transformation. Und so wird deutlich, dass in Bezug auf eine konsequente Umsetzung der Individualisierten Standardisierung weitere Schritte gegangen werden müssen.

## 5.2.4 Forschungsförderung als Weichensteller

Gründe für eine zögerliche Transformation liegen mitunter an der unterschiedlichen Triebkraft der wesentlichen Akteurinnen und Akteure - der Industriepartner auf der einen Seite und der Forschungseinrichtungen auf der anderen Seite. Diese Brücke könnte geschlossen werden, indem auch Förderprogramme beide Seiten konsequent zusammenführen. „Angesichts des enormen, breitgefächert Forschungsbedarfs erscheint neben einer Erhöhung der Fördermittel die Entwicklung einer ressortübergreifenden Forschungsstrategie sinnvoll, um die Ressourcen möglichst zielgerichtet einsetzen und Synergien nutzen zu können. Benötigt werden insbesondere langfristig orientierte Programme, die Folgeprojekte ermöglichen und ausreichende Sachmittel umfassen, damit Demonstratoren und Prototypen realisiert werden können.“<sup>588</sup> Aktuell sind in der Förderlandschaft in dem Sinne Mängel zu verzeichnen, als dass Förderprogramme, wie beispielsweise die Bundesförderung Serielle Sanierung<sup>589</sup>, explizit nur mittelständische Unternehmen fördern und auf die

---

Schalung wiederverwendet und das Bauteil reproduziert werden kann, birgt das Verfahren oftmals Kosten für den Einsatz von Personal und Einschränkungen in der Flexibilität.

<sup>585</sup> Die Annahme, dass die Betonbranche in vielfältige Richtungen auf der Suche nach einer Transformationsstrategie ist konnte u.a. innerhalb eines Interviews mit Herrn Kainz der Fa Schwenk und Herrn Dr. Zimmermann der Firma G.tecz Engineering GmbH und einem weiteren Interview mit Herrn Dr. Molter der Fa. Bremer eruiert werden. (Kainz, Joachim, Zimmermann, Gregor, Die Zukunft des Bauens, Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft, Interview von Hollmann-Schröter, Kirsten E., Albus, Jutta, digital, 7. Februar 2024), (Molter 2022 (wie Anm. 602)).

<sup>586</sup> Vgl. Voit 2023 (wie Anm. 302), S. 22.

<sup>587</sup> Kehl/Achternbosch/Revermann 2022 (wie Anm. 6), S. 24.

<sup>588</sup> Ebd.

<sup>589</sup> Das Förderprogramm wurde aufgrund finanzieller Defizite aktuell von der Bundesregierung pausiert.



Automatisierung des produzierenden Gewerbes fokussieren. Kooperationen mit Hochschulen und Forschungseinrichtungen werden nicht forciert, obwohl diese Verknüpfung beider Partner angesichts der Komplexität der Herausforderungen zielführend wäre, um eine übergeordnete Betrachtungsweise und Innovationen zu ermöglichen. Aufgrund der Dringlichkeit, Lösungen für den Klimanotstand zu entwickeln und einen hohen Innovationsgehalt anzustreben, sollten Förderverfahren, die eine Kooperation zwischen Wirtschaft und Forschung im Blick haben, wie beispielsweise Zukunft Bau<sup>590</sup>, daher durch höhere Fördervolumen forciert werden. Durch kürzere Bearbeitungszeiten bei der Bewilligung könnte die Umsetzung der Forschungsprojekte darüber hinaus beschleunigt werden.

---

<sup>590</sup> Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, »Zukunft Bau: Fördern Fordern Entwickeln«, 2024, <https://www.zukunftbau.de/> (abgerufen am 18. Mai 2024).

### 5.3 Fazit

Das Fazit adressiert die innerhalb der Dissertation zentral stehenden Bausteine wie folgt: Einleitend werden die aufgestellten Theorien nochmals ins Verhältnis gesetzt und dargelegt, was diese für das Bauwesen, den Betonsektor sowie die Planenden im Allgemeinen leisten können. Daraufhin werden die Alleinstellungsmerkmale monolithischer Betonkonstruktionen vor der Arbeitsthese hervorgehoben. Abschließend erfolgt die Zusammenführung von Systematisierungsansätzen mit der Kreislauffähigkeit. Dies resultiert in der Neuordnung des Schemas zur Entwurfsmethodik.

#### 5.3.1 Synthese der aufgestellten Theorien

Das formulierte Ziel, eine Nachhaltigkeitsstrategie für den Betonsektor zu schaffen, mit Übertragungspotenzial auf das Bauwesen im Allgemeinen, kann innerhalb der Dissertation anhand der zwei aufgestellten Theorien erreicht werden. Entsprechend der durchgeführten Methodik können die übergeordneten Betrachtungen stets anhand der Fallanalysen monolithischer Konstruktionen aus der Betonforschung belegt werden (→2.2.3, →2.3.3, →2.4.3). Die Prüfung der Referenzen in Bezug auf die Vorteile der Strategie der Individualisierten Standardisierung ist entsprechend im Erkenntnisgewinn abgebildet. Im Folgenden werden die wesentlichen drei Schritte zur Umsetzung der Strategie der Individualisierten Standardisierung und deren Überführung in das Prinzip der Pyramidalen Zirkularität nachvollzogen.

##### 1. Schritt: Erkennen der Leitfaktoren

Die Strategie der Individualisierten Standardisierung fordert vor dem Hintergrund multipler Einflussfaktoren im ersten Schritt ein Erkennen der drei Leitfaktoren Technik, Konstruktion und Gestaltung ein. In der differenzierten Einzelbetrachtung der Leitfaktoren im Kapitel II wurden innerhalb der Résumés folgende Potenziale synthetisiert:

**Résumé Leitfaktor Technik:** Forderung einer komplementären Fertigungsstrategie (→2.2.4)

Aus Sicht der Autorin ermöglicht zum einen eine komplementäre Fertigung die Kombination verschiedener Maschinent Technologien und Verfahrensschritte innerhalb eines Prozesses. Zum anderen erlaubt diese eine teiladaptive Fertigung, die eine Individualisierung eines systematisierten Konstruktionsprinzips innerhalb der automatisierten Fertigung ermöglicht. Darüber hinaus kann die komplementäre Fertigung durch den gezielten und differenzierten Materialeinsatz einen wesentlichen Einfluss zur Verbesserung der Nachhaltigkeit haben.

**Résumé Leitfaktor Konstruktion:** Adaptive Konstruktionssysteme als Mittelweg aus Standardisierung und Individualisierung (→2.3.4)

Auch wenn eine vollindividualisierte Fertigung theoretisch möglich wäre, rechtfertigt sich aus dem ebenfalls geforderten Effizienzan spruch (Produktivitätssteigerung) die

Umsetzung eines Systemansatzes. An dieser Stelle sind das Maß der Vorfertigung und die Vor-Ort Montage an die Bauteilgrößen und Transportbedingungen aufeinander abzustimmen. Als gewinnbringend wird laut Einschätzung der Autorin die Anwendung automatisierter Fertigungstechnologien im Werk erachtet, wie beispielsweise die Erstellung 3-D-gedruckter Komponenten und deren Fügung auf der Baustelle. Ferner wurde dargelegt, dass eine rein effizienzgetriebene Systematisierung den heutigen Anforderungen einer Bauaufgabe nicht mehr gerecht wird. Die Stärke liegt vielmehr in einer gezielten Anpassungsplanung eines Systemansatzes beziehungsweise der Realisierung teiladaptiver Systeme, die eine geforderte gestalterische Varianz mit einer wirtschaftlichen Fertigung vereinen. Ziel sollte es sein, Komponenten zu erstellen, die bereits innerhalb des Fertigungsprozesses sowohl auf den Markt als auch auf geänderte funktionelle Anforderungen reagieren können. Darüber hinaus hat das systematisierte Konstruieren wesentliche Vorteile für die Rückführung von Bauteilen in den Kreislauf.

**Résumé Leitfaktor Gestaltung:** Auswirkungen digitaler Werkzeuge auf Prozesskontinuität und Nachhaltigkeit (→2.4.4)

Die neuartige gestalterische Varianz, die zuvor unter den Begriffen Adaptivität und Flexibilität thematisiert wurde, wird maßgeblich durch die Implementierung digitaler Werkzeuge ermöglicht. Um die Nachhaltigkeit von Konstruktionen und Prozessen zu verbessern, muss diese bereits integraler Bestandteil im Entwurfsprozess werden. Die Einbindung digitaler Werkzeuge kann eine Kreislauffähigkeit im Bauwesen bewirken, indem „Datenkreislaufketten“ etabliert werden. Zum einen können assoziative Werkzeuge Daten miteinander in Beziehung setzen und zu einem Gesamtsystem führen. Zum anderen können durch digitale Werkzeuge Materialien und Bauteile simuliert, und so Ressourceneinsatz, Leistungsfähigkeit von Konstruktionen sowie die Lebensdauer ins Verhältnis gesetzt werden. Darüber hinaus kann die Entwicklung neuartiger digitaler Werkzeuge die notwendige Überführung der Daten aus der Planung in die Produktion leisten, im Sinne einer ganzheitlichen Verknüpfung der drei Leitfaktoren.

## 2. Schritt: Zusammenführung der Leitfaktoren unter einer geeigneten Gewichtung

In der vorliegenden Ausarbeitung wird immer wieder der Zusammenhang von System und Varianz verdeutlicht, der sich maßgeblich in dem kontrastierenden Wortpaar **Individualisierte Standardisierung** spiegelt. Eine zentrale Erkenntnis der Dissertation liegt darin, dass für jede Bauaufgabe das geeignete Verhältnis von Systematisierung zu projektspezifischer Anpassung, also einer Flexibilisierung, gefunden werden muss.

Die Arbeit differenziert methodisch in ein kriteriengeleitetes, quantitatives Vorgehen und ein gewichtendes, qualitatives Vorgehen. Ersteres inkludiert das Erkennen der Leitfaktoren sowie die Erstellung kriterienbasierter Prüfraster. Dabei ist es das Ziel, aufzuzeigen, dass durch die Einführung systematischer Prozesse die Komplexität der Bauaufgaben zunächst gebündelt werden kann und durch die Einbindung der zur Verfügung stehenden digitalen und automatisierten Werkzeuge

die Tätigkeiten der Planerinnen und Planer wesentlich unterstützt werden können. Durch die Unterstützung ebendieser Werkzeuge können für die Planenden Kapazitäten freigesetzt werden, um zweiteres, die notwendigen qualitativen Abwägungsprozesse, durchführen zu können. Die Werkzeuge bereiten die Entscheidungsgrundlagen in dem Sinne optimal vor, die Entscheidung oder Gewichtung selbst erfolgt jedoch noch stets durch den Menschen.

In Abgrenzung zu früheren, autoritären Standardisierungsprozessen<sup>591</sup> ergibt sich durch die Umsetzung einer Individualisierten Standardisierung für die Planenden aktuell wieder die Chance, als selbstbestimmte Schlüsselfiguren innerhalb eines demokratischen Prozesses fungieren zu können. Die damit verbundene zusammenführende Rolle muss erkannt und angenommen werden. Erst dadurch können die prognostizierten Ziele, erhöhte Effizienz (ökonomischer Fortschritt), architektonische Varianz (gestalterischer Fortschritt) und Kreislauffähigkeit (ökologischer Fortschritt), für das Bauwesen und insbesondere für Betonkonstruktionen erreicht werden (Abb. 2).

### 3. Schritt: Überführung der Leitfaktoren in den Kreislauf

Für eine erfolgreiche Verankerung und ein Ineinandergreifen der drei Leitfaktoren wird die Strategie der Individualisierten Standardisierung in Kapitel III in einen kreislaufgerechten Rahmen, das **Prinzip der Pyramidalen Zirkularität**, überführt (→3.1.2 Etablierung einer aufeinander aufbauenden Pyramidalen Zirkularität). Damit wird den Planerinnen und Planern eine Methodik an die Hand gegeben, die sie befähigt, kreislauffähige Prozesse zu etablieren bei simultaner Berücksichtigung der zentralen drei Leitfaktoren. Die Dissertationsergebnisse belegen, dass die vorgelegte Methodik der pyramidalen, zirkulären Kombination der ursprünglichen drei Leitfaktoren und deren Erweiterung zu den sechs Schnittstellen zu einer zielgerichteten Handlungsstrategie für die Verbesserung der Nachhaltigkeit im Bauwesen allgemein und mit direktem Bezug auf den Betonsektor leitet. Der Mehrwert ergibt sich aus der durchgängigen Digitalisierung und Automatisierung unter Anwendung eines Systemansatzes (→3.1.4 Résumé: Kreislauffähigkeit durch digital gestützte Prozesse). Eine exemplarische Darstellung der Anwendung des Prinzips der Pyramidalen Zirkularität unter Abbildung der sechs Schnittstellen liefert das Forschungsprojekt MZD, welches im Forschungstransfer detailliert betrachtet wird (→6.1.1 Forschungsprojekt: hybride Systembaukonstruktion „Modular – Zirkulär - Digital (MZD)“). An diesem Projekt können anhand des Prüfrasters aus den sechs Schnittstellen die prognostizierten Nachhaltigkeitspotenziale an einem realen Projekt belegt werden.

<sup>591</sup> Autoritäre Standardisierungsprozesse beziehen sich auf die Anwendung typisierter Systeme, die den Planerinnen und Planern keine Gestaltungsfreiheit bieten.

### 5.3.2 Wertschätzung monolithischer Betonkonstruktionen

Forschungsleitendes Ziel der Arbeit ist es, Nachhaltigkeitspotenziale von Betonkonstruktionen zu identifizieren und zu bewerten, um schlussendlich eine Strategie zur Verbesserung der Nachhaltigkeit aufzuzeigen. Die sich ergebenden Vorteile bei der Umsetzung der Individualisierten Standardisierung können im [Kapitel IV](#) anhand von Betonkonstruktionen dargelegt werden. Untersuchungsgegenstand sind monolithische Wandkonstruktionen mit Dämmwirkung, die automatisiert gefertigt werden, eine konstruktive Anpassungsfähigkeit abbilden und eine gestalterische Varianz bereitstellen. Die zuvor resümierten Inhalte der Einbindung der Leitfaktoren in Form komplementärer Fertigung, adaptiver Komponenten sowie digitaler Planungswerkzeuge können im Vergleich der drei monolithischen Betontechnologien Infraleichtbeton, Gradientenbeton und Aeroleichtbeton abgebildet und Rückschlüsse auf die Notwendigkeit einer Gewichtung abgeleitet werden. Zudem werden anhand der aufgezeigten Verfahrens-, Konstruktions- und Entwurfsprinzipien am Beispiel der Betonforschung weitere Stärken hervorgehoben. Die Qualitäten des Wertstoffs Betons aufgrund seiner Dauerhaftigkeit und Tragfähigkeit rechtfertigen, gepaart mit dem richtigen Maß an Flexibilität, weiterhin dessen gezielte Verwendung. Im Gegenzug wird die klare Forderung gestellt, Materialien auf Basis ihres Nachhaltigkeitspotenzials einzusetzen ([→4.1.2.1 Nutzungsdauer](#)). Aus diesem Grund wurden die zwölf Kriterien zur Nachhaltigkeitsbewertung von Betonkonstruktionen aufgestellt ([→4.1.2 Kriterien zur Nachhaltigkeitsbewertung von Betonkonstruktionen](#)). Bei der Anwendung des Prüfrasters ist es relevant, besonders die langfristigen wie kurzfristigen Maßnahmen zur CO<sub>2</sub>-Reduktion gegeneinander abzuwägen ([→5.1 Potenziale anpassungsfähiger Betonkonstruktionen](#)). Neben der Anpassung des Werkstoffes an sich und damit der Umsetzung kurzfristiger Verbesserungsmaßnahmen stellt der Baustoff Beton bezogen auf eine mögliche Lebenszyklusverlängerung und Wiederverwendung von Bauteilen und damit der Umsetzung langfristiger Verbesserungsmaßnahmen einen erheblichen Wert dar. Diesen gilt es durch optimierte Prozesse zu schützen und zu reaktivieren. Der synoptische Vergleich der drei Betontechnologien legt die Unterschiede und Schwerpunkte offen und zeigt an den zentralen Stellen Optimierungspotenziale auf. Dabei werden wesentliche Ansatzpunkte und Schlüsselfaktoren aufgezeigt, und es wird empfohlen, diese innerhalb einer Expertenkommission aus den drei Forschungsteams weiter zu erarbeiten ([→4.5 Zusammenfassung Synopse](#)). Die Arbeit befürwortet diese monolithischen Bauweisen und stellt klar heraus, welche Vorteile ihre Verwendung haben kann ([→1.2.3 Eingrenzung monolithische Betonbauweisen](#)). An dieser Stelle wird jedoch auch darauf hingewiesen, dass aus Sicht der Autorin darüber hinaus weitere Materialien und Bauweisen erforscht werden müssen, um eine umfassende Nachhaltigkeitsstrategie zu verfolgen. Im anschließenden [Kapitel VI](#) wird daher das Übertragungspotenzial der aufgestellten Theorien aufgezeigt.

### 5.3.3 Neuordnung der Entwurfsmethodik durch konstruktive und prozessuale Systematisierungsansätze

Schlussfolgernd wird an dieser Stelle die Synthese konstruktiver wie prozessualer Systematisierungsansätze beleuchtet. Unter dem Leitfaktor Konstruktion konnte herausgestellt werden, was eine konstruktive Systematisierung zur Realisierung nachhaltiger Konstruktionen beitragen kann. Darüber hinaus zeigt sich, wie unter Zuhilfenahme der zur Verfügung stehenden Werkzeuge die Komplexität durch eine prozessuale Systematisierung kanalisiert werden kann (→2.3.4 *Résumé: Adaptive Konstruktionssysteme als Mittelweg aus Standardisierung und Individualisierung*). Dies ist erforderlich, um die eingangs differenzierten multiplen Einflussfaktoren zu sortieren und in einen kreislauffähigen Kontext einzubinden (→2.1 *Multifaktorielle Systemdarstellung vor dem Hintergrund kontinuierlicher Prozesse*).

Folgendes Zitat von Angst et al. hebt die innerhalb der Dissertation zentral stehenden zwei Ebenen, die Prozessebene sowie die baulich konstruktive Ebene hervor und macht den Zusammenhang deutlich: „Die Wiederverwendung von Bauteilen verändert die Art wie wir entwerfen und konstruieren – prozessual und resultativ.“<sup>592</sup> Aus dem Erkenntnisgewinn zur Pyramidalen Zirkularität zeigt sich, dass Kreislauffähigkeit durch das Zusammenspiel von System und Digitalisierung erheblich gefördert werden kann. Diese Verknüpfung ermöglicht, dass Bauteile möglichst lange im Kreislauf gehalten und im Falle eines Nutzungsendes einfacher rückgebaut und wiederverwendet werden können. Dadurch ergibt sich eine geänderte Materialverfügbarkeit, die als Folge einen neuartigen Entwurfsprozess mit bereits verwendeten Bauteilen erlaubt. Die Ergebniszusammenführung schließt daher mit der Neuordnung der eingangs visualisierten Abbildung (Abb. 7), welche die Einflussfaktoren bei Bauaufgaben auf Prozessebene abbildet. Daran wird ablesbar, dass zukünftige Entwurfsprozesse mit dem Rückbau und damit der wertvollen Materialernte starten (Abb.92). Die Dissertation verfolgt das Ziel, diesen wesentlichen Schritt vor dem Hintergrund endlicher Ressourcen anzustoßen.

---

<sup>592</sup> Marc Angst, Guido Brandi und Eva Stricker, »Fallstudie K.118: Entwurf und Konstruktion«, in: Eva Stricker u. a. (Hg.), *Bauteile wiederverwenden. Ein Kompendium zum zirkulären Bauen*, Zürich 2021, S. 213–264, hier S. 233.

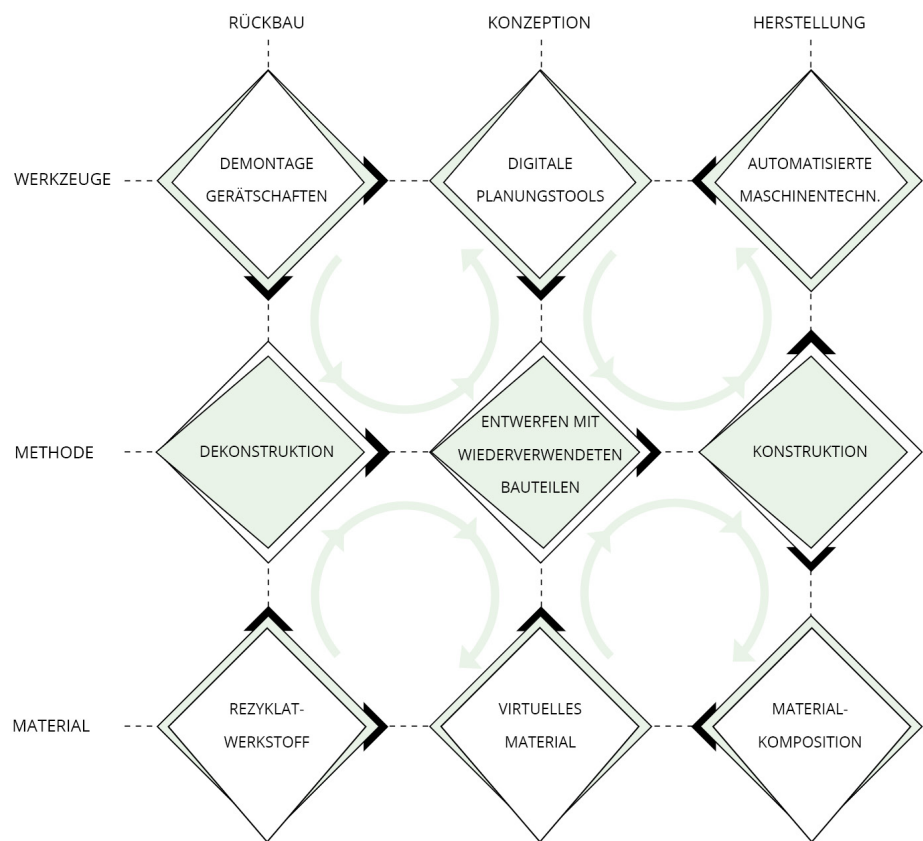


Abb. 92: Angepasste Entwurfsmethodik durch neue Rahmenbedingungen in der Materialverfügbarkeit. Eigene Darstellung

Experimentelle Forschung für konstruktiven Fortschritt

Die Kultur des Fortschritts lebt primär von der Qualität der Idee, die einen zukunftsorientierten Lösungsansatz für das konstatierte Problem bereitstellt. Ein solcher wird mit der vorgelegten Dissertation und den zwei gebildeten Theorien vorgestellt. Essenziell bei der Vielzahl der zusammengetragenen Aspekte ist, dass die aufgezeigten Forschungsergebnisse alsbald angewendet werden. Um dies zu erreichen, ist eine kooperative Forschung<sup>593</sup> zwingend erforderlich. Durch die zentrale Stellung der Planerinnen und Planer als Inkubatoren für sozio-kulturelle, ökonomische und ökologische Herausforderungen kann die Architekturproduktion durch die dargelegte experimentelle Forschung konstruktiven Fortschritt generieren und bisher unbekannte Tätigkeitsfelder erschließen.

Im Folgenden schließen sich im Forschungstransfer zwei Betrachtungsebenen an, die eine vollumfängliche Umsetzung des Ansatzes der Individualisierten Standardisierung wagen. Es handelt sich dabei um die Übertragung auf hybride Bauweisen sowie Bestandsstrukturen.

<sup>593</sup> Unter kooperativer Forschung wird die Zusammenarbeit von Experten aus den unterschiedlichen tangierten Forschungsfeldern verstanden. Diese sind projektspezifisch zu definieren. Es geht bei der Zusammensetzung jedoch nicht allein um die inhaltliche Diversität, sondern auch um die Zusammenführung von u.a. Forschungsinstitutionen, Industriepartnern, Verbänden.

