

Kapitel II | Differenzierung der Leitfaktoren

2.1 Multifaktorielle Systemdarstellung vor dem Hintergrund kontinuierlicher Prozesse

Die von der Autorin vorgenommene Kategorisierung und Verbindung der drei Leitfaktoren in einen ganzheitlichen Planungsprozess erlaubt eine bewusste Gewichtung und Fokussierung auf wesentliche bautechnische, konstruktive sowie gestalterische Einflussfaktoren. Diese können zusammengeführt unter dem Prinzip der Individualisierten Standardisierung zu einem neuen Paradigma im Sinne einer grundsätzlichen Denkweise leiten (→1.2.2 Einführung der Strategie der Individualisierten Standardisierung).

Bereits im Kapitel I wird ausgeführt, dass das Bauwesen ein komplexes Geflecht an Prozessen, Methoden, Technologien, Werkstoffen und Akteuren⁸⁰ ist, welches rahmengebend für den Forschungsgegenstand dieser Dissertation ist. Innerhalb dieses Gliederungspunktes erfolgt zuerst eine Kategorisierung der vielschichtigen Abhängigkeiten mittels einer Visualisierung (Abb. 7) und eine sich daran anschließende differenzierte Betrachtung des Gefüges. Daraufhin wird in der Folge des Kapitels eine Einordnung des Forschungsgegenstandes und damit im Wesentlichen die Umsetzung der drei Leitfaktoren in das System Bauwesen vorgenommen. Entscheidend bei der Visualisierung der Abhängigkeiten der Prozesse und Zielgruppen ist, dass eine erfolgreiche Umsetzung eines kontinuierlichen Prozesses von den Akteurinnen und Akteuren abhängig ist, die diesen Kommunikations- und Wissenstransfer der vorgestellten Strategie der Individualisierten Standardisierung erst bedingen.

⁸⁰ Unter Akteuren werden die unterschiedlichen Beteiligten im Bausektor verstanden: Forscher und Entwickler, Planende, Ausführende in Industrie und Handwerk, Auftraggeber, Behörden etc.

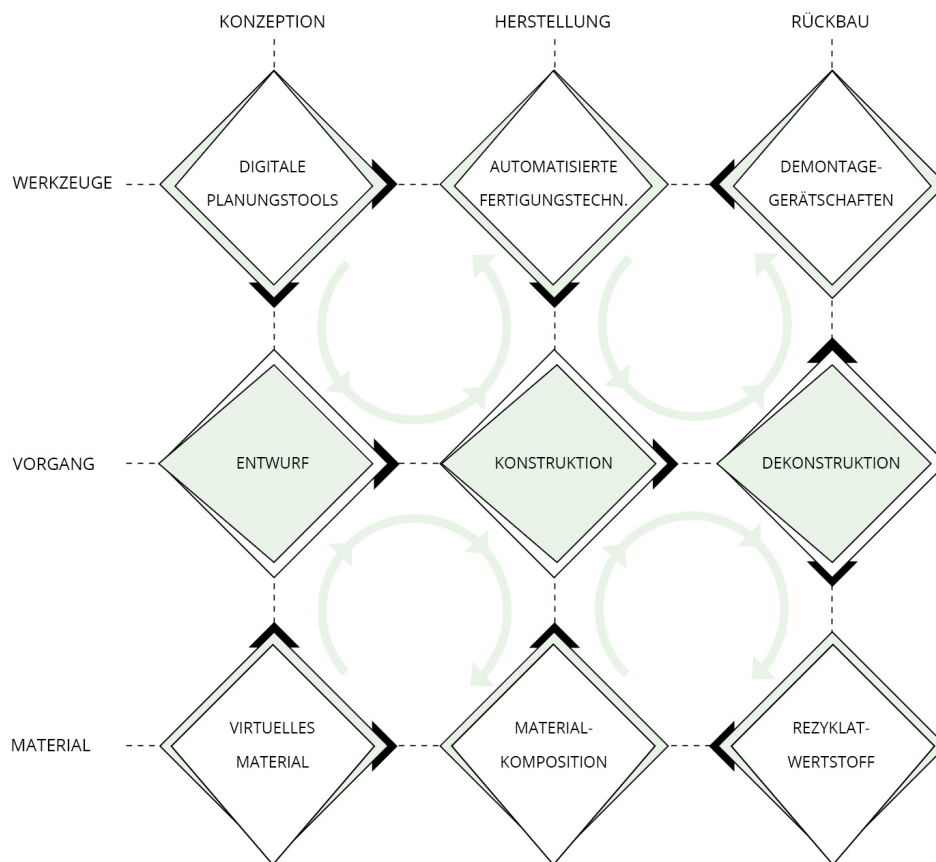


Abb. 7: Verflechtung von Hilfsmitteln, Vorgang und Material in Korrelation zum Lebenszyklus.
Eigene Darstellung

Die innerhalb der Dissertation zentral stehende Fokussierung auf die drei Leitfaktoren (Abb. 2) bezieht sich jeweils auf ein zuvor definiertes, spezifisches Material. Abbildung 7 visualisiert nun eine erweiterte, materialoffene Sichtweise der Verflechtung multipler Einflussfaktoren⁸¹. Das Schaubild ist in horizontaler und vertikaler Richtung zu lesen. So wird in der Betrachtung der vertikalen Achse jeweils die Relation von Werkzeugen, Vorgang und Material differenziert. Diese Einflussfaktoren werden auf horizontaler Achse in den unterschiedlichen Phasen des Lebenszyklus von Strukturen von der Konzeption über die Herstellung sowie den Rückbau in Beziehung gesetzt.

Bei der Darlegung der vertikal angeordneten Einflussfaktoren stehen die Vorgänge an zentraler Stelle. Im Rahmen dieser Dissertation wird als Methode das Paradigma der Individualisierten Standardisierung gesetzt. Sie gilt als Hintergrund, vor dem Entwurf, Konstruktion und Dekonstruktion erfolgen. Der Vorgang bedient sich der oberhalb angelagerten Werkzeuge. Hier wird deutlich, dass Werkzeuge nicht

⁸¹ Zur Bewertung multipler Einflussfaktoren stehen spezifische Untersuchungsmethoden in der Wissenschaft zur Verfügung, wie beispielsweise „multi-criteria-decision-making (MCDM), die auch in Architektur und Bauingenieurwesen bereits Anwendung finden. Vgl. Kathrin Theilig u. a., »Life cycle assessment and multi-criteria decision-making for sustainable building parts: criteria, methods, and application«, in: *The International Journal of Life Cycle Assessment* (2024). Diese Bewertungsmethoden sind jedoch nicht Gegenstand der vorgelegten Dissertation.

nur in der Herstellung und im Rückbau (Leitfaktor Technik) zur Anwendung kommen, sondern bereits in der Planungsphase, dann in Form von digitalen Planungswerkzeugen. Für den Entwurfsprozess (Leitfaktor Gestaltung) stehen auf der Ebene der Werkzeuge digitale Entwurfs- und Planungstools zur Verfügung (→2.3 Leitfaktor Konstruktion – Umsetzung einer anpassungsfähigen Systematisierung). Für die Konstruktion beziehungsweise Dekonstruktion (zusammengefasst unter dem Leitfaktor Konstruktion) stehen auf der Ebene der Werkzeuge automatisierte Fertigungstechnologien zur Verfügung, beziehungsweise Gerätschaften, die die gesteuerte Demontage ermöglichen (→2.2 Leitfaktor Technik – komplexe Fertigungstechnologien). Nach dem Prinzip der Individualisierten Standardisierung sind die entsprechenden Möglichkeiten und Anforderungen der beiden letztgenannten Werkzeuge ebenfalls bereits im Entwurfsprozess zu berücksichtigen. Gleichzeitig bedingen diese Werkzeuge die gestalterischen Möglichkeiten.

Unterhalb der Methode angelagert befindet sich das Material, welches an den Konzeptionsprozess gekoppelt wird. Materialien können in der Planungsphase bereits digital konzeptioniert und simuliert werden, in der Abbildung als virtuelles Material bezeichnet (→3.1.3.3 Schnittstelle Gestaltung – Technik: digitales Material). Die realen Materialien werden dann im Herstellungsprozess zur geeigneten Materialkomposition für die gewünschte Konstruktion geführt, die eine Dekomposition bereits im Blick hat. Der Entwurf und später die Konstruktion sollten eine kreislaufgerechte Rückführbarkeit des Materials in den Wertstoffkreislauf ermöglichen. Dies ist möglich als Rezyklat oder im besten Fall als gebundenes Material innerhalb wiederverwendbarer Bauteile. In Abhängigkeit von Material und Konstruktion wird das Fertigungswerkzeug gewählt. Der Leitfaktor Konstruktion impliziert den Anspruch, die Dekonstruktion bereits im Entwurf (Leitfaktor Gestaltung) zu berücksichtigen.

Über die Analyse und In-Beziehung-Setzung der komplexen Zusammenhänge und der spezifischen Anforderungen einer Planungsaufgabe werden die Einflussfaktoren identifizierbar, um Prozesse zu etablieren und zu steuern, die zu einer zukunftsorientierten Gebäudestruktur führen. Die Abbildung unterteilt in vier Prozessketten (grüne Kreise), die teils parallel ablaufen beziehungsweise sich nacheinander bedingen. Die vielfältigen Abhängigkeiten sind diagrammatisch fast nicht vollumfänglich abbildbar. Vielmehr wird an dieser Stelle eine Forderung nach einer tiefergehenden Zirkularität platziert. Fortschritt kann nur entstehen, wenn gewagt wird, neue Zusammenhänge zu denken. Daher wird eine konsequente Digitalisierungsstrategie eingefordert, die durch eine zirkuläre Haltung erst befähigt wird. Wie diese Prozesskontinuität auf Grundlage einer digital gestützten Nachhaltigkeit erlangt werden kann, wird im Anschluss an die Einzelbetrachtung der Leitfaktoren unter der Einführung des Prinzips der pyramidalen Zirkularität detailliert erläutert (→3.1.4 Résumé: Kreislauffähigkeit durch digital gestützte Prozesse).

Die Realität im Bauwesen macht deutlich, dass keine Planungsmethode uneingeschränkt umgesetzt und kein Baumaterial ohne Einschränkungen verbaut werden kann. Zu komplex sind die Abhängigkeiten, zu individuell die Anforderungen.

Die Zusammensetzung der dargelegten multiplen Einflussfaktoren erfolgt stets mit einer anderen Gewichtung. Doch durch sorgfältige Abwägung der drei Leitfaktoren miteinander kann eine Bebauung bedarfsgerecht und umweltverträglich weiterentwickelt werden. Vor diesem komplexen Rahmen an Einflussfaktoren schließt sich im Folgenden die Fokussierung auf die separate Betrachtung eines jeden Leitfaktors an. Dadurch wird eine differenzierte Wissensgrundlage geschaffen, die auf jeden einzelnen Leitfaktor bezogen ist. Hierbei wird ein einheitlicher Aufbau gewählt: Einleitend wird die historische Entwicklung abgebildet. Daraufhin wird der Stand der Technik mit Blick auf den Parameter materialoffen diskutiert. Im Weiteren schließt sich die wissenschaftliche Recherche zum Status quo, zugeschnitten auf die Betonkonstruktion eines jeden Leitfaktors, an.

2.2 Leitfaktor Technik – komplexe Fertigungstechnologien

Im Folgenden wird der Leitfaktor Technik im Bauwesen eingeführt (Abb. 8). Darunter wird im Rahmen der Dissertation die Anwendung automatisierter Fertigungstechnologien zur Realisierung von baulichen Konstruktionen verstanden. Hierbei geht es speziell um die Abbildung eines Verfahrens, das eine gesteigerte Automation umsetzt. Durch die Einbindung einer ineinandergreifenden Komplexität an Maschinenteknik kann der Fertigungsprozess in besonderem Maße optimiert werden. Die Betrachtung startet mit der materialoffenen historischen Herleitung der automatisierten Fertigung. Anschließend wird der Stand der Technik mit Blick auf die automatisierte Fertigung von monolithischen Betonkonstruktionen analysiert. Anhand von gewählten Referenzen werden Fertigungsverfahren von Betonkonstruktionen exemplarisch herangezogen, die den Erkenntnisgewinn vor dem Forschungsinteresse der Individualisierten Standardisierung deutlich machen. Im Résumé erfolgt die Zusammenführung der Erkenntnisse vor dem Hintergrund der komplementären Fertigungsstrategie.

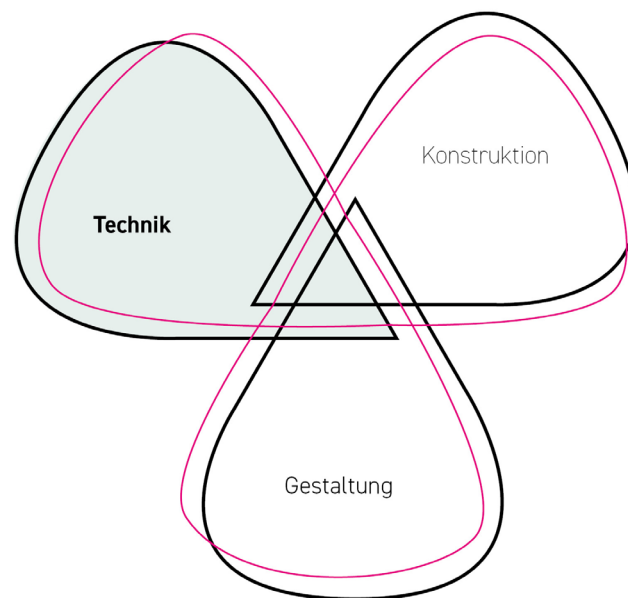


Abb. 8: Bedeutung des Leitfaktors Technik innerhalb des Dreiecks. Eigene Darstellung

2.2.1 Herleitung automatisierter Fertigungsprozesse

Im Folgenden werden nach einer differenzierten Einführung relevanter Terminologien die wesentlichen Entwicklungsschritte der computergestützten Fertigung (CAM) dargelegt. Zudem werden die heutigen geänderten Anforderungen beleuchtet.

2.2.1.1 Differenzierung der Begrifflichkeiten

Im DVB-Heft „Digitale Fertigung im Betonbau“ definiert Vasilčić die digitale Fertigung oder auch digitale Fabrikation wie folgt: „Hierbei wird ein Materialobjekt virtuell modelliert und anschließend eine von Computern gesteuerte Maschine verwendet, um das Objekt herzustellen.“⁸² Die Additive Fertigung (AF) wird von Vasilčić als Unterkategorie der digitalen Fertigung eingeordnet und als „Fertigungsprozesse, bei denen auf Basis von 3D-Konstruktionsdaten durch das Ablagern von Material schichtenweise ein Bauteil aufgebaut wird“ differenziert.⁸³

2.2.1.2 Technische Entwicklung der computergestützten automatisierten Fertigung

Aufgrund der Entwicklung von digitalen Entwurfs- und Planungsmethoden und den sich daraus ergebenden Möglichkeiten der kontinuierlichen Überführung digitaler Daten in die Produktion wird unter anderem der Ausbau der computergestützten automatisierten Fertigung⁸⁴ forciert. „In der ersten Phase der ‚Automatisierung‘ hat sich der Grad der Wirtschaftlichkeit von Elementen an der Häufigkeit der verwendeten identischen Matrizen gemessen. Durch die Weiterentwicklung der digitalen Fertigungstechniken hin zum Einsatz zuerst subtraktiver und dann additiver Fertigungsmethoden erübrigt sich nun der Zusammenhang zwischen identischer Kopie und dem Maß der Wirtschaftlichkeit. Der Einsatz der Maschine macht jedes gefertigte Objekt zu einem Unikat, und es ergeben sich durch die Verwendung gleicher Elemente nicht mehr notwendigerweise Kostenvorteile. Carpo beschreibt dies im Vorwort der Publikation ‚robotic building wie folgt: ‚[...] When digitally made, any copy is a new original and making more of the same will not make any of them cheaper. This is what we call mass customisation: one of the most revolutionary ideas that architects ever came up with; one that will change – and has already deeply changed the world in which we live.‘⁸⁵ Es kann sich demnach ein Wechsel von der Massenproduktion zur individuellen Massenfertigung vollziehen. Carpo unterscheidet zwischen aktuellen Prozessen und denen der 1990er-Jahre und beschreibt die Funktion der Computer in vorangehender Zeit vorrangig als ‚tools for

⁸² Ksenija Vasilčić (Hg.), *Digitale Fertigung im Betonbau. Grundsätze, Definitionen und mögliche Anwendungsfelder = Digital fabrication with concrete : principles, definitions and possible applications*, 2023. Aufl., Berlin 2023 (DBV-Heft / Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V Heft 53), S. 15.

⁸³ Ebd.

⁸⁴ Im englischen abgekürzt als „CAM - computer-aided-manufacturing“.

⁸⁵ Mario Carpo, »Foreword: The Age of Computational Brutalism«, in: Mollie Claypool u. a. (Hg.), *Robotic building. Architecture in the age of automation*, Munich 2019 (Edition Detail), S. 8–9, hier S. 8.

making', also als digitale Werkzeuge zur Erstellung von Zeichnungen und physischen Objekten. Heute hingegen transformieren nach Carpo Computer zu 'tools for thinking'.⁸⁶ Dieser Einsatz des Computers als denkende Maschine und damit der vermehrte Einsatz künstlicher Intelligenz löse einen Paradigmenwechsel aus. „Er spricht hier vom zweiten digitalen Wandel: '[...] Unlike its hapless predecessors, however, today's AI often seems to work, sometimes even surprisingly well, and in architectural design this revival of the computer as a thinking machine has been the springboard for what we now call the second digital turn, based on discretisation, excessive resolution and particlization – the visual display of logics of notation, calculation and fabrication beyond the scope and compass of human understanding.'"^{87,88} Einen aktuellen Beitrag zur Bedeutung der additiven Fertigung und deren Entwicklung liefert das Werk "Print architecture!" von Tessmann, Knaack et al.⁸⁹ Erste Entwicklungen gehen bereits zurück auf die 1930er-Jahre.⁹⁰ Es wird hervorgehoben, dass die additive Fertigung den Prototypstatus überwunden hat und sich mit ersten wettbewerbsfähigen Lösungsansätzen global im Bausektor etabliert.⁹¹ Rosendahl schlussfolgert in diesem Kontext wie folgt: „Although multiple challenges need to be addressed in order to make Additive Manufacturing the universally applicable technology that allows for complete freedom of design that it promises to be, rapid developments have pushed it to a stage where industrial application is feasible and being explored across all sectors. It is up to engineers in research and application to equip the technology with appropriate knowledge, design guidelines and standardizations to make its use simple, safe and profitable."⁹²

⁸⁶ Albus u. a. 2021 (wie Anm. 11), S. 169.

⁸⁷ Carpo 2019 (wie Anm. 85), S. 8.

⁸⁸ Albus u. a. 2021 (wie Anm. 11), S. 169.

⁸⁹ Vgl. Oliver Tessmann u. a. (Hg.), *Print architecture!*, Baunach, Germany 2022, <https://permalink.obvsg.at/AC16722645>.

⁹⁰ Vgl. Chris Borg Constanzi, »History – The development of additive manufacturing in construction«, in: dies. (Hg.), *Print architecture!*, Baunach, Germany 2022, S. 29–50.

⁹¹ Vgl. Oliver Tessman u. a., »Einleitung: You cannot resist an idea whose time has come«, in: Oliver Tessmann u. a. (Hg.), *Print architecture!*, Baunach, Germany 2022, S. 7–10, hier S. 10.

⁹² Philipp L. Rosendahl, »Engineering: Structural design for Additive Manufacturing«, in: Oliver Tessmann u. a. (Hg.), *Print architecture!*, Baunach, Germany 2022, S. 81–91, hier S. 91.

2.2.1.3 Neuartige Anforderungen an komplexe Fertigungsstrategien

Die von Rosendahl thematisierte flächendeckende Anwendbarkeit additiver Fertigungstechnologien hat sich bisher im Bauwesen noch nicht vollzogen. Die Vorfertigung ist in Teilprozessen und besonders im Betonsektor zwar etabliert. Nach Albus ist aber ein begrenzender Faktor in der Applikation der Vorfertigung, dass gegenwärtige Vorfertigungstechnologien die hohe Komplexität der Anforderungen nicht ausreichend abbilden. Um die Produkte des digitalen Gestaltens adäquat umzusetzen, sei eine lineare Vorfertigung nicht ausreichend zielführend. Es würden neue Vorfertigungsstrategien benötigt, die insbesondere die Differenziertheit heutiger Planungsprozesse und Bauabläufe in ihrer Gesamtheit darstellen.⁹³ „Das verwendete Material, aber auch der Herstellungsprozess werden bisher vorrangig analog betrachtet und diese Herangehensweise weist relativ schnell Grenzen auf. Die robotische Fertigung kann hier zukunftsfähige Konzepte für Produktion und Montage bereitstellen. Durch die technischen Entwicklungen der bis zu sechs Achsen des Roboterarms kommt die automatisierte robotische Produktion an (die) menschliche Dimension(en) heran. Durch die Verknüpfung von Big Data⁹⁴ und KI⁹⁵ geht die Entwicklung noch weiter hin zur Anwendung multipler Roboter bei der Montage. Diese werden nicht mehr nur an die Fertigung in der Fabrik gebunden, sondern ermöglichen wie beim ‚Swarm Robot Ecosystem for Autonomous Construction‘ eine objektbezogene autonome Fertigung vor Ort.“^{96,97} In dem Beitrag *Perspektiven der Digitalisierung und Automatisierung im Baumaschinenbereich* wird der Zusammenhang aus Automatisierungsgrad und steigenden Anforderungen an die Baumaschinen erläutert, die die Einbindung von künstlicher Intelligenz in Form maschinellen Lernens erforderlich macht.⁹⁸ Es zeichnet sich somit auf der Ebene der Technik ein Interagieren digitaler Planungswerkzeuge und automatisierter Fertigungswerkzeuge bis hin zu Werkzeugen des Rückbaus ab, entsprechend des Schaubildes in Kapitel II Abb. 8. Die Entwicklung der Technologie hat in diesem Sinne maßgeblich Einfluss auf den Prozess der Fertigung einerseits und auf die Gestaltung beziehungsweise Konzeption andererseits. „Die konstruktive Machart konfiguriert sich vor diesem Hintergrund neu. Je nachdem, welche Wirkung erzeugt werden soll, kann durch den Einsatz digitaler Werkzeuge die traditionelle Handwerksleistung eins zu eins imitiert oder aber eine neue Ästhetik entwickelt werden. Die Einbindung digitaler Prozesse wird in diesem Sinne bisher unbekannte Wirkungen hervorbringen.“⁹⁹

⁹³ Vgl. Jutta Albus und Hans Drexler, »Prefab MAX - Die Potentiale vorgefertigter Konstruktionssysteme im kostengünstigen Wohnungsbau«, in: Barbara Schöning, Justin Kadi und Sebastian Schipper (Hg.), *Wohnraum für alle?!*, Bielefeld 2017, S. 298–332, hier S. 327.

⁹⁴ Bezeichnet die große Masse an Daten, die sich durch den Wandel der Einbindung digitaler Technologien vollzieht.

⁹⁵ Gängige Abkürzung für Künstliche Intelligenz.

⁹⁶ Vgl. Nathan Melenbrink und Justin Werfel, »A Swarm Robot Ecosystem for A Swarm Robot Ecosystem for Autonomous Construction«, in: Mollie Claypool u. a. (Hg.), *Robotic building. Architecture in the age of automation*, Munich 2019 (Edition Detail), S. 88–90, hier S. 88.

⁹⁷ Albus u. a. 2021 (wie Anm. 11), S. 170.

⁹⁸ Vgl. Kehl/Achternbosch/Revermann 2022 (wie Anm. 6), S. 20.

⁹⁹ Kirsten E. Hollmann-Schröter, »Gefügte Räume«, in: Piet Eckert und Wim Eckert (Hg.), *Ontologie der Konstruktion. Raumwirkung in der Architektur*, Zürich 2024, S. 214–239, hier S. 219.

2.2.2 Eingrenzung: automatisierte Fertigung monolithischer Konstruktionen

Folgend wird der Frage nachgegangen, ob durch die Entwicklung komplexer Fertigungsstrategien bei monolithischen Konstruktionen¹⁰⁰ das Maß der Standardisierung erhöht, die architektonische Qualität optimiert und die Nachhaltigkeit verbessert werden kann.

2.2.2.1 Neuartige Standardisierungsverfahren durch Automatisierung im Betonsektor

Im Fachartikel der BiBM-News „Herausforderung 2050 – Mehr Betonfertigteilebauten für einen Bestand mit reduzierten CO₂-Emissionen“ wird erläutert, welches Potenzial im stärkeren Einsatz der Vorfertigung im Betonsektor liegt¹⁰¹. Durch ein erhöhtes Maß an Vorfertigung können energieintensive Anwendungsverfahren abgelöst werden. Zudem werde eine Herangehensweise für den wertschätzenden Umgang mit der Arbeitskraft geliefert. Die Studie der KfW „Fachkräfteengpässe im Bauhandwerk beeinträchtigen zunehmend den Wohnungsbau“ bekräftigt die dringende Notwendigkeit Lösungen für einen reduzierten Einsatz von Fachkräften zu finden.¹⁰² Die Entwicklung neuartiger Maschinentechнологien (→2.2.1 Herleitung automatisierter Fertigungsprozesse) macht es nun möglich das Maß der Vorfertigung zu erhöhen und zugleich die Ressource Mensch zu entlasten. Daran anknüpfend stellt sich heraus, dass automatisierte Fertigungsmethoden momentan in der monolithischen Bauweise in Beton nur in speziellen Fällen wie beispielsweise der 3-D-Druck-Technologie Anwendung finden. Dies belegen die gewählten Referenzen im anschließenden Kapitel (→2.2.3 Aufstellung von Verfahrensprinzipien am Beispiel der Betonforschung). Dagegen ist im Holzbau bereits ein erhöhter Einsatz von digital gesteuerten Produktionswerkzeugen zu verzeichnen. Kyjanek et al. streben vor diesem Hintergrund ein Forschungsprojekt an, bei dem auch die additive Fügung der Bauteile in vorgefertigte Baugruppen aus Holz unterstützt wird. Dabei wird beabsichtigt, durch die Mensch-Roboter-Kooperation manuelle und voll automatisierte Vorgänge zu kombinieren, um so Prozesse zu optimieren und neuartige Fertigungsmethoden zu etablieren¹⁰³. Beton eignet sich als Fließwerkstoff aufgrund seiner zuvor beschriebenen stofflichen (→1.2.3 Eingrenzung monolithische Betonbauweisen) und herstellungstechnischen Eigenschaften hervorragend für ein automatisiertes Herstellungsverfahren und kann eine Produktivitätssteigerung in der Bauindustrie begünstigen. Als neuartig sehen Claypool et al., dass beim 3-D-Druck unterschiedliche Funktionen innerhalb eines Prozesses zusammengefasst würden

¹⁰⁰ Unter komplexen Fertigungsstrategien monolithischer Konstruktionen wird im Folgenden das Ineinandergreifen verschiedener automatisierter Fertigungstechnologien zur Herstellung monolithischer Betonkonstruktionen verstanden.

¹⁰¹ Alessia Rimoldi, Zsuzsa Amina Koubaa und BiBM, »Herausforderung 2050: Mehr Betonfertigteilebauten für einen Bestand mit reduzierten CO₂-Emissionen«, in: *BWI - BetonWerk International*, 4 (2018), S. 8, hier S. 8, <https://www.cpi-worldwide.com/de/journals/artikel/54207> (abgerufen am 16. Mai 2024).

¹⁰² Vgl. Müller 2018 (wie Anm. 27), S. 1–2.

¹⁰³ Vgl. Ondrej Kyjanek u. a., *Mensch-Roboter-Kooperation im Holzbau: Potentiale für die Vorfertigung*, Stuttgart 2020 (*Forschungsinitiative Zukunft Bau* F 3180), S. 10.

und damit ohne einen erhöhten Aufwand eine Komplexität abbilden könne: “This is perhaps the most important and relevant debate that we can have in relation to 3D printing and additive manufacturing. These technologies were embedded with an utopian idea of getting rid of the notion of the ›part‹ in architecture as well as the notion of assembly: you should be able to print a building in one go. [...] With 3D printing, one could design with as little or as much complexity or resolution as required or wanted in terms of material and geometry, within the overall constraints of the material or geometric behavior. And whether it was complex or simple would add very little, if not zero, cost to its production (which is itself very low).”¹⁰⁴ Die 3-D-Druck Technologie ist nur ein mögliches Beispiel für die Umsetzung einer automatisierten Fertigung im Bauwesen. Albus und Drexler betonen die Relevanz der Einbindung neuartiger Technologie in der Produktion wie folgt: „Für eine Steigerung von industriellen Bauweisen und deren Einsatz im Wohnungsbau bedeutet die Digitalisierung der Produktion eine wichtige Entwicklung und muss zum elementaren Bestandteil für die Zukunft des Bauens werden.“¹⁰⁵

2.2.2.2 Zusammenspiel von Materialtechnologie und Fertigungsverfahren

Aktuelle Konstruktionen aus einer Monomaterialmatrix bieten aufgrund neuer Entwicklungen auf der Materialebene ein großes Potenzial hinsichtlich Nachhaltigkeitsanforderungen sowie Rezyklierbarkeit. Die mögliche sortenreine Trennung am Ende des Lebenszyklus führt zu einem optimierten und ressourceneffizienten Produkt. So können innovative Materialzusammensetzungen die Wärmeübertragungseigenschaften von Bauteilen deutlich verbessern, was schlankere Elementquerschnitte und damit eine Gewichtsreduzierung zulässt. Im **Kapitel IV** werden in diesem Zusammenhang die Querschnitte und damit verbundenen Eigenschaften von drei monolithischen Betontechnologien detailliert gegenübergestellt. Zudem macht dieser Bauteilaufbau grundsätzlich eine zusätzliche Dämmschicht inhärent. Mehrerer Funktionen werden in einer Schicht gebündelt. Additive Fertigungsverfahren für die Herstellung solcher dämmenden Betonkonstruktionen existieren jedoch kaum und sind bisher nur vereinzelt erforscht worden. Die Vorteile, die sich in der Materialzusammensetzung einiger neu entwickelter Betone zeigen ist nicht automatisch bei der Additiven Fertigung von Betonbauteilen gegeben. „Der 3-D-Druck [hingegen] ist aus derzeitiger Sicht ökologisch eher ungünstig zu bewerten. Da der 3-D-Druck auf der Bindemittelgrundkonzeption des konventionellen Betons und damit auf Zementklinker aufbaut, übernimmt er als Rucksack dessen klimaschädliche Wirkungen und kreislaufwirtschaftlichen Probleme. [...] Somit besteht beim 3-D-Druck gegenüber dem herkömmlichen Beton noch größerer Druck nach klima- und ressourcenfreundlichen Lösungen zu suchen.“¹⁰⁶ Schutter et al. beschreiben die Begrenzung auf technische Aspekte wie beispielsweise den des Aufbringens in

¹⁰⁴ Mollie Claypool u. a., »Print«, in: dies. (Hg.), *Robotic building. Architecture in the age of automation*, Munich 2019 (*Edition Detail*), S. 38–47, hier S. 44.

¹⁰⁵ Albus/Drexler 2017 (wie Anm. 93), S. 330.

¹⁰⁶ Kehl/Achternbosch/Revermann 2022 (wie Anm. 6), S. 222.

Schichten.¹⁰⁷ Vor diesem Hintergrund gilt es, Fertigungsverfahren zu identifizieren, die eine effiziente Materialzusammensetzung sowie Materialanordnung ermöglichen.

Vasilić führt in diesem Zusammenhang die Anwendung neuer Bemessungsmethoden wie beispielsweise Form-Follows-Force an, durch die Strukturen unter minimalem Materialeinsatz optimiert werden können.¹⁰⁸ „As 3D printing offers the possibility of depositing material where it is really needed, the high geometrical flexibility topology-optimized structures according to the principle „form follows force“ can be produced by 3D printing which are well load bearing yet not massive.“¹⁰⁹

Aus Sicht der Autorin ist es entscheidend, wie die Möglichkeiten der digitalen Fertigung mit den Nachhaltigkeitsanforderungen an das Material zusammengebracht werden. Daher wird weder die ausschließliche Anwendung digitaler Fertigungsverfahren mit Materialien, die aufgrund der Anforderungen an die Maschinenteknologie einen größeren ökologischen Fußabdruck haben, noch die alleinige Verwendung von klimaeffizienten Betonen in herkömmlichen Betonfertigteilen als zielführend erachtet. Die Erkenntnisse rechtfertigen dagegen die funktionsoptimierte Anpassung von Betonkonstruktionen innerhalb des Bauteilquerschnitts. Die unterschiedlichen Kraftflüsse innerhalb eines Bauteils können dabei durch die Kombination verschiedener Verfahrenstechnologien wie beispielsweise dem 3-D-Druck von ultrahochfestem Beton in den hohen Lastbereichen, sowie einer Schüttung leichterer Betone in den Zwischenbereichen abgebildet werden. Erst durch solche Beispiele für eine komplementäre Fertigung, die digital gesteuert ist und ineinandergreift, werden die Vorteile der automatisierten Fertigung komplett ausgeschöpft und die Ressourcen zielgerichtet eingesetzt. Nach Witt und Anton „[...] verspricht die nachhaltige Herstellung individualisierter Produkte mit integrierter Funktionalisierung eine umweltverträglichere, kosteneffizientere und sichere Bauweise.“¹¹⁰

2.2.2.3 Erhöhte Varianz durch automatisierte Fertigungsverfahren

Eine individuelle Vorfertigung und damit ein Mittelweg aus einer Standardisierung und Anpassungsplanung fanden in der Vergangenheit aufgrund fehlender Wirtschaftlichkeit und begrenzter technologischer Möglichkeiten nicht statt.¹¹¹ Heute hingegen stehen Technologien zur Verfügung, durch die der Werkstoff Beton automatisiert gesteuert werden kann. Dadurch ergibt sich eine neuartige gestalterische Komplexität. Schutter et al. differenzieren in einen funktionellen oder rein ästhetischen Nutzen wie folgt: „Nevertheless, it is essential to differentiate

¹⁰⁷ Geert de Schutter u. a., »Vision of 3D printing with concrete — Technical, economic and environmental potentials«, in: *Cement and Concrete Research*, 112 (2018), S. 25–36, hier S. 26.

¹⁰⁸ Vasilić 2023 (wie Anm. 82), S. 29.

¹⁰⁹ Schutter u. a. 2018 (wie Anm. 107), S. 29.

¹¹⁰ Elke Witt und Christian Anton (Hg.), *Additive Fertigung. Entwicklungen, Möglichkeiten und Herausforderungen : Stellungnahme*, Halle (Saale)/Mainz/München 2020 (*Stellungnahme / Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina*), S. 8, <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:3:2-118786>.

¹¹¹ Vgl. Hollmann-Schröter 2021 (wie Anm. 15), S. 170.

whether the shape complexity is used as a design strategy to reduce material or whether it has only an aesthetic purpose, which would demand more material. In order to bring environmental benefits, the shape complexity facilitated by digital fabrication techniques should be the result of an intention to optimize material use in the structure. This is usually achieved with two design strategies: structural optimization or functional hybridization.”¹¹² Die Optimierung der Strukturleistung sowie die Vorteile der Schaffung funktionsoptimierter Bauteile werden im Rahmen der Nachhaltigkeitsbetrachtung weiter vertieft (→3.1.3.1 Schnittstelle Gestaltung – Konstruktion: digitales Planungswerkzeug). Neben diesen beiden Herangehensweisen hat das Maß der Varianz eine wesentliche Bedeutung bei der Schaffung nachhaltiger Konstruktionen. Der Einfluss der Nutzungsflexibilität auf die Lebensdauer wird unter dem Leitfaktor Konstruktion weiter ausgeführt (→5.1 Potenziale anpassungsfähiger Betonkonstruktionen). An dieser Stelle wird das Potenzial der automatisierten Fertigung teiladaptiver Konstruktionen weiter ausgeführt. Das interdisziplinäre Forschungsprogramm im Sonderforschungsbereich der DFG "SPP 2187 Adaptive Modulbauweisen mit Fließfertigungsmethoden - Präzisionsschnellbau der Zukunft"¹¹³ beschäftigt sich mit der Entwicklung von teiladaptiven Modulen, die in einen automatisierten Fließfertigungsprozess integriert werden. Ziel des DFG-Programms ist es, die wissenschaftlichen Grundlagen für die Herstellung von teiladaptiven Modulen aus Hochleistungsbeton in der industriellen Fließfertigung zu erarbeiten. In dem Sonderforschungsprogramm werden die Aspekte der automatisierten Fließfertigung (Leitfaktor Technik) mit der Entwicklung teiladaptiver Module (Leitfaktor Konstruktion) zusammengeführt. Dieses Forschungsprojekt antizipiert, dass die Forderung nach einer Anpassungsfähigkeit von Bauteilen zunehmend an Bedeutung gewinnt.

Das Transregio Projekt TRR 277 "Additive manufacturing in construction (AMC) – The challenges of large scale"¹¹⁴ stützt die aufgestellte These des Potenzials der Individualisierten Standardisierung an Betonkonstruktionen wie folgt: "The advantages of additive manufacturing (AM) technologies are that automation and individualization are not contradictory. Furthermore, a new design strategy is embedded in 3D printing, namely to build up material only where it is structurally or functionally needed. AM is, therefore, both economical and resource-efficient."¹¹⁵ Das Zitat verdeutlicht den aufgestellten Zusammenhang aus Produktivität, Varianz und Nachhaltigkeit. Es wird geschlussfolgert, dass durch die Anwendung additiver Fertigungstechnologien das Maß der Vorfertigung erhöht werden kann bei einer

¹¹² Schutter u. a. 2018 (wie Anm. 107), S. 33.

¹¹³ Vgl. Das DFG Sonderforschungsprojekt SPP 2187 Adaptive Modulbauweisen mit Fließfertigungsmethoden bündelt 15 Beteiligte von 5 verschiedenen Universitäten, der RWTH Aachen, der TU Berlin, der Ruhr-Universität Bochum, der TU Dresden, dem Karlsruher Institut für Technologie, der TU München und der Universität Stuttgart. Ruhr Universität Bochum, »SPP 2187: Adaptive Modulbauweisen mit Fließfertigungsmethoden - Präzisionsschnellbau der Zukunft«, <https://www.ruhr-uni-bochum.de/spp2187/index.html.de> (abgerufen am 23. April 2024).

¹¹⁴ Das Transregio Projekt der DFG bündelt 18 Forschungsprojekte an 3 verschiedenen Universitäten, der TU München, der TU Braunschweig und der Leibniz Universität Hannover. Technische Universität Braunschweig, Institut für Tragwerksentwurf, »AMC TRR 277: Additive Manufacturing in Construction«, <https://amc-trr277.de/> (abgerufen am 23. April 2024).

¹¹⁵ Harald Kloft u. a., »TRR 277: Additive manufacturing in construction«, in: *Civil Engineering Design*, 3 (2021), Nr. 4, S. 113–122, hier S. 113.

gleichzeitigen Sicherstellung einer gestalterischen Varianz durch eine individualisierte Produktion. „Digital fabrication can facilitate the production of elements with higher shape complexity without increasing the environmental costs.“¹¹⁶

2.2.2.4 Kombination verschiedener Verfahren innerhalb eines Fertigungsprozesses

Einen Ansatz zur Kombination verschiedener Fertigungsverfahren wird am DBFL (Digital Building Fabrication Laboratory)¹¹⁷ an der TU Braunschweig erprobt. Im Forschungsprojekt wird Betonvorfertigung mit der additiven Fertigung innerhalb eines Prozesses zusammengeführt. Hierbei wurde zunächst eine Deckenplatte im klassischen vorgefertigten Verfahren hergestellt. Der 3D-Druck des kompletten horizontalen Bauteils wurde ausgeschlossen, da sich diese Art der Fertigung als nicht wirtschaftlich darstellen würde. Es wurde jedoch innerhalb des Vorfertigungsprozesses zusätzlich eine partielle Verstärkung durch die Einbindung der additiven Fertigungstechnologie, dem SC3DP¹¹⁸ Verfahren, vorgesehen. „The ribs were printed onto the freshly concreted slab using the SC3DP process. Reinforcing bars were routed up from the slab near the supports to achieve a better bond with the ribs. Each rib consists of several sprayed layers printed on top of each other.“¹¹⁹ Eine solch integrale Herangehensweise spiegelt aus Sicht der Autorin den Ansatz der Individualisierten Standardisierung in dem Maße wieder als das die drei Leitfaktoren bewusst ineinandergreifen. Auf Grundlage digitaler Planungswerkzeuge kombiniert das konstruktive Prinzip des Deckenbauteils einen Systemansatz mit der automatisierten Fertigungstechnologie. Die **Abbildung 9** stellt das digitale Modell dem physischen Prototypen gegenüber.

¹¹⁶ Schutter u. a. 2018 (wie Anm. 107), S. 33.

¹¹⁷ Institut für Tragwerkskonstruktion, Technische Universität Braunschweig, »Digital Building Fabrication Laboratory - DBFL Robotergesteuerte Fertigung von großformatigen Bauteilen und Elementen im Bauwesen«, 4. Mai 2024, <https://www.tu-braunschweig.de/ite/forschung/dbfl>.

¹¹⁸ Die Abkürzung SC3DP steht für Shotcrete 3D Printing.

¹¹⁹ Harald Kloft u. a., »Reinforcement strategies for 3D-concrete-printing«, in: *Civil Engineering Design*, 2 (2020), Nr. 4, S. 131–139, hier S. 136.

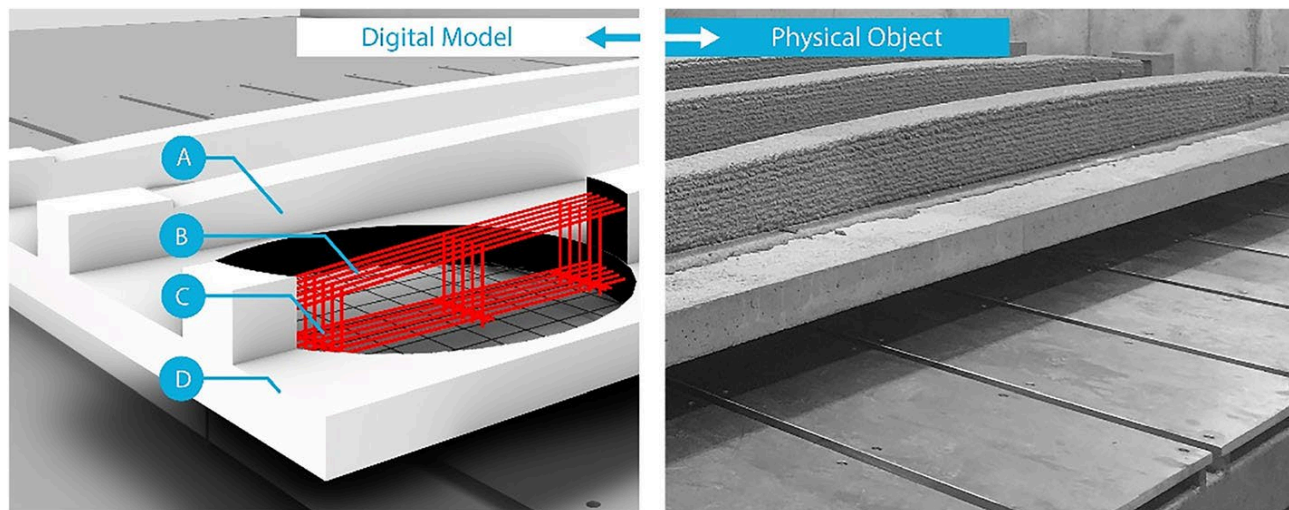


Abb. 9: Kombiniertes Fertigungsverfahren einer Betonfertigdecke mit dem SC3DP Verfahren

© ITE Institut für Tragwerksentwurf, TU Braunschweig¹²⁰

¹²⁰ Originalquelle in: ebd., S. 137.

2.2.3 Aufstellung von Verfahrensprinzipien am Beispiel der Betonforschung

Einen detaillierten Überblick über die digitale Fertigung in der Architektur- und Bauindustrie mit besonderem Fokus auf den Betonbau liefert der Betonkalender 2022¹²¹. Generell stehen unterschiedliche Verfahrensabläufe für automatisierte Betonkonstruktionen zur Verfügung. Im Folgenden werden ausgewählte Referenzprojekte näher erläutert, die eine Individualisierte Standardisierung von Betonstrukturen forcieren. Diese werden entsprechend des von Buswell et al. entwickelten Klassifizierungssystem der unterschiedlichen verfügbaren Fertigungsverfahren eingeordnet. Dieses wurde ursprünglich aufgestellt mit dem Ziel die Zertifizierung von Prozessen bei der digitalen Fertigung mit Beton weiter voranzutreiben.¹²² Dabei differenziert „RILEM process classification framework for DFC technologies“ in additive, formative sowie subtraktive Verfahren.¹²³ Gegenstand der folgenden Betrachtung sind die additiven Verfahren. Es werden extrusionsbasierte 3-D-Druck-Technologien (Prinzip 1), die Spritzbeton-Applikation (Prinzip 2) sowie die eigene Forschungsleistung zum Co-Extrusions-Verfahren (Prinzip 3) herangezogen. Dabei werden unterschiedliche automatisierte Produktionstechniken exemplarisch dargestellt, die gleichermaßen eine Zusammenführung verschiedenster Funktionen innerhalb eines Produktionsprozesses vereinen. Zudem setzten sie Bauteile auf Basis einer Einstofflichkeit um. Die Projekte bilden nicht zwangsläufig Lösungsansätze für ein komplett automatisiert gefertigtes Gebäude ab, da es sich partiell um Teilsysteme eines Gebäudes handelt. Die Beispiele liefern jedoch den Nachweis, dass eine Überführung automatisierter Architektur in den realen Maßstab unter Einhaltung der aktuellen Normen bereits möglich ist. Es werden Ansätze geliefert, die digitale Entwurfsprinzipien und automatisierte Fertigung vereinen. Bei der Betrachtung wird vorrangig die Verfahrenstechnologie im Umgang mit Betonkonstruktionen erläutert. Dieser Betrachtungsfokus bereitet den wissenschaftlich geführten Vergleich von automatisiert gefertigten Wandbauteilen mit Dämmwirkung in Kapitel IV vor.

Die gewählten Referenzen werden dabei nach einem einheitlichen Aufbau dargestellt. Zuerst wird die Konstellation der Projektbeteiligten beziehungsweise das Forschungsprojekt benannt. Daraufhin wird die angewendete Verfahrenstechnologie beschrieben und abschließend wird der Erkenntnisgewinn in Bezug auf das Forschungsinteresse dargestellt.

¹²¹ Vgl. Konrad Bergmeister, Frank Fingerloos und Johann-Dietrich Wörner (Hg.), *Beton-Kalender. Nachhaltigkeit, Digitalisierung, Instandhaltung.*, unter Mitw. von Frank Dehn und Udo Wiens, Berlin/München/Düsseldorf 2022.

¹²² R. A. Buswell u. a., »A process classification framework for defining and describing Digital Fabrication with Concrete«, in: *Cement and Concrete Research*, 134 (2020), S. 106068, hier S. 10.

¹²³ Ebd., S. 7.

2.2.3.1 Prinzip 1: Extrusionsbasiertes 3-D-Druckverfahren

Der aktuelle Stand der additiven Fertigung, im Besonderen der 3-D-Druck-Technologie unterschiedlichster Werkstoffe, und deren Bedeutung für den Bausektor wird umfassend in dem Werk „Print Architecture!“¹²⁴ von Tessmann, Knaack et al. abgebildet. Der Betrachtungsschwerpunkt liegt nachfolgend auf vier Beispielen, die den 3-D-Druck mit dem Werkstoff Beton auf sehr verschiedenartige Weise und in jeweils unterschiedlichen Maßstäben entscheidend voranbringen.

Referenz 1: Soliquid

Soliquid ist eine französische Firma der Gründer J. Rhoné und A. Thomas, die sich dem 3-D-Druck im liquiden Umfeld widmet.

Technologischer Verfahrensablauf:

Es handelt sich bei dem Versuchsaufbau um eine spezifische 3-D-Druck-Technologie, bei der Beton in einer Suspension gedruckt wird. So erlaubt die Applikation in Gel ganz andere freie Geometrien in Abgrenzung zu dem klassischen Aufbringen in Schichten, was den 3-Druck oftmals charakterisiert. „Durch die Verwendung einer Gelmatrix, die das Druckmaterial in der Schwebe hält, benötigt unsere Druckstrategie keine Trägermaterialien oder Schalungen. So kann das Material kontinuierlich eingespritzt werden, ohne dass seine fortschreitende Verfestigung während des Druckens erforderlich ist, was den Druckprozess extrem schnell macht.“¹²⁵

Erkenntnisgewinn in Bezug auf das Forschungsinteresse:

Durch die Anwendung der neuen Technik wird die Schnittstelle zwischen Planung und Produktion gewinnbringend geschlossen. Die Gründer setzen die additive Fertigung mit der Vorfertigung in Zusammenhang und beschreiben die Innovation wie folgt: „We are making possible optimized design and prefabrication of freeform systems for the construction industry through an innovative, patented large-scale additive manufacturing process combined with a generative design approach enabling a fully integrated design-to-production workflow.“¹²⁶

Die Freiheiten in der Formfindung werden aktuell noch durch die Größe des zur Verfügung stehenden Fertigungsbeckens begrenzt. Die Skalierbarkeit der Technologie ist in Entwicklung. Das Beispiel verdeutlicht, wie bereits erprobte Technologien durch ein neuartiges Zusammenbringen mehrerer Faktoren, in diesem Fall Technik und Gestaltung, neue konstruktive Möglichkeiten bieten.

¹²⁴ Vgl. Tessmann u. a. 2022 (wie Anm. 89).

¹²⁵ Soliquid, großformatiger 3D-Druck in Flüssigkeit, Interview von Ann-Katrin L., 27. Juni 2019.

¹²⁶ Jim Rhoné, »SOLILQUID: Large 3D printing in suspension«, <https://soliday.io/> (abgerufen am 23. April 2024).

Referenz 2: LC3D

Der 3-D-Druck mit Leichtbeton wurde an der TU München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter und Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen, Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen im Forschungsprojekt „Additive Fertigung von multifunktionalen, monolithischen Wandelementen durch Extrusion von Leichtbeton (LC3D) TUM“¹²⁷ erprobt. Das Forschungsprojekt wurde im Rahmen der Zukunft Bau Förderung in der Zeit von 07.2017–11.2019 durchgeführt.

Technologischer Verfahrensablauf:

In dieser Forschung werden eine optimierte Materialtechnologie mit Dämmwirkung und die Herstellung komplexer Geometrien innerhalb eines automatisierten Fertigungsprozesses, der Extrusion von Leichtbeton, kombiniert. Durch die Erstellung von Strukturen mit geschlossenen, luftgefüllten Hohlräumen (Abb. 10) wird den geltenden Anforderungen an Wandbauteile mit Dämmwirkung innerhalb eines einzelnen Materials und Herstellungsprozesses entsprochen.



Abb. 10: Wandkonstruktion aus spezifischen 3-D gedruckten Geometrien mit geschlossenen Hohlräumen © Klaudius Henke

Erkenntnisgewinn in Bezug auf das Forschungsinteresse:

Die Maschinenteknologie wird genutzt, um Geometrien herzustellen, die das Dämmverhalten der Wand unterstützen. Die Leitfaktoren Technologie, Konstruktion und Gestaltung werden in dem Verfahren komplementär zueinander entwickelt.

¹²⁷Forschungsprojekt Zukunft Bau, Aktenzeichen: 10.08.18.7-17.14, Projektlaufzeit: 07.2017–11.2019
https://mediatum.ub.tum.de/doc/1647529/6t5tzzbda7qt3nhjtd70xtja0.Matthaeus_et_al_BBSR_LC3D_2021.pdf

Referenz 3: CONPrint3D-Ultralight®

An der TU Dresden Institut für Baubetrieb wurde unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine innerhalb der Zukunft Bau Förderung das Forschungsprojekt „CONPrint3D-Ultralight® Herstellung monolithischer, tragender Wandkonstruktionen mit sehr hoher Wärmedämmung durch schalungsfreie Formung von Schaumbeton“¹²⁸ im Zeitraum von 01.06.2017 – 01.06.2019 durchgeführt.

Technologischer Verfahrensablauf:

Es wurde ein horizontales Extrusionsverfahren, basierend auf einer robotisierten Betonpumpe, für die 3-D-Druck-Technik entwickelt.¹²⁹ Dabei entstehen großformatige massive Materialschichten für Wandkonstruktionen (Abb. 11). Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde das Potenzial der schalungsfreien Betonherstellung einer spezifischen Materialmatrix mit Dämmwirkung im Werk nachgewiesen.

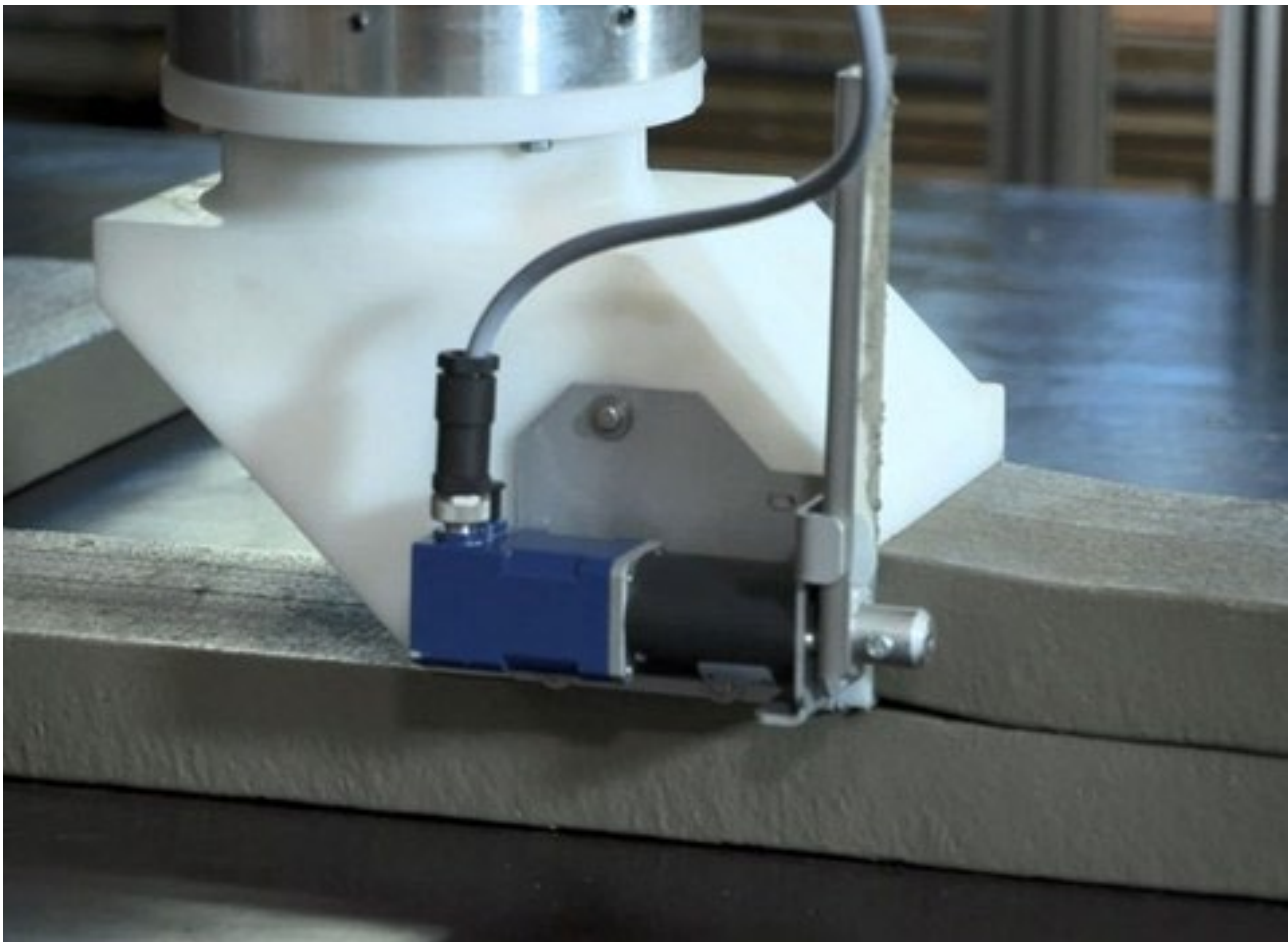


Abb. 11: CONPrint3D®-Druckkopf © TU Dresden

¹²⁸Vgl. Viktor Mechtcherine u. a., *CONPrint3D-Ultralight - Herstellung monolithischer, tragender Wandkonstruktionen mit sehr hoher Wärmedämmung durch schalungsfreie Formung von Schaumbeton*, Stuttgart 2020 (Forschungsinitiative Zukunft Bau F 3181).

¹²⁹ Vgl. Freek P. Bos u. a. (Hg.), *Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication. Digital Concrete 2020*, Cham 2020 (RILEM bookseries Volume 28), S. 301–332.

Erkenntnisgewinn in Bezug auf das Forschungsinteresse:

Additive Fertigungstechnologien für die Herstellung von dämmenden Betonkonstruktionen existieren kaum und sind bisher nur vereinzelt erforscht worden. Dieses Forschungsprojekt kombiniert die Fertigungstechnologie des 3-D-Drucks mit dämmenden Materialeigenschaften. Es ergeben sich durch die Übernahme der Dämmfunktion innerhalb des Materialquerschnitts Vorteile im Prozessablauf eines Gesamtprojekts ebenso wie im reduzierten Einsatz von Ressourcen bei gleichzeitiger Gestaltungsfreiheit.

Referenz 4: Peri Haus

Das im Jahr 2020 fertiggestellte 3-D gedruckte Haus in Beckum welches vom Land NRW mitfinanziert wurde, ist in Kooperation der Peri 3D Construction GmbH, dem planenden Ingenieur- und Architektenbüro Mense-Korte GmbH und Heidelberg Cement realisiert worden.^{130,131}

Technologischer Verfahrensablauf:

Bei dem Projekt werden die Feldforschungen zum 3-D-Druck in den realen Maßstab skaliert. Erstmals wurde ein komplettes Gebäude in Deutschland vor Ort gedruckt (Abb. 12). Es zeigt sich dabei, dass die technischen Möglichkeiten dafür vorhanden sind. Es wurde der Druckmörtel "i.tech 3D" von Heidelberg Cement verwendet. Die Druckgeschwindigkeit des Druckroboters Typ BOD2 wird mit 25 cm/s angegeben.¹³² Ein Quadratmeter Hohlwand wird in circa fünf Minuten gedruckt. Der aufgezeigte Versuchsaufbau zeigt, dass diese Art und Weise der Fertigung neben dem effizienten Druckverfahren einen erhöhten Aufwand der Maschinenteknologie vor Ort mit sich bringt. Die Wirtschaftlichkeit muss daher in Relation gesetzt werden.

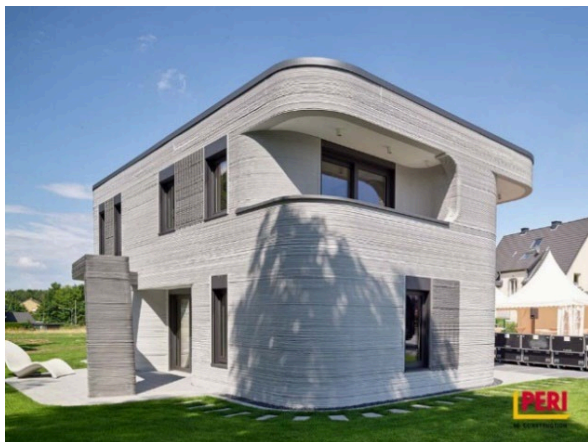


Abb. 12: Herstellungsaufbau des ersten 3-D gedruckten Hauses in Deutschland, Beckum

© Guido Kirchner, Peri 3D Construction GmbH

Erkenntnisgewinn in Bezug auf das Forschungsinteresse:

Bei dem Projekt wurde der Prototypstatus des 3-D-Drucks abgelöst und in ein industrielles Verfahren gewandelt. Die Technologie verbindet die Faktoren Technik und Gestaltung innerhalb eines kontinuierlichen Fertigungsprozesses. Die Gebäudegeometrie bildet eine maximale Individualisierung der Konstruktion ab.

¹³⁰ Vgl. Marion Goldmann, »Betondruck: Deutschlands erstes Wohnhaus aus dem 3D-Drucker«, in: *DAB Deutsches Architektenblatt*.

¹³¹ Vgl. Daniel Weger u. a., »Approval for the Construction of the First 3D Printed Detached House in Germany—Significance of Large Scale Element Testing«, in: Scott Z. Jones und Eric L. Kreiger (Hg.), *Standards Development for Cement and Concrete for Use in Additive Construction* 2021, S. 144–169, hier S. 144.

¹³² Vgl. 3Druck.com, »PERI verkauft ersten 3D-Betondrucker von COBOD«, 2020, <https://3druck.com/industrie/peri-verkauft-ersten-3d-betondrucker-von-cobod-3795713/> (abgerufen am 26. April 2024).

Referenz 5: Striatus-Brücke

Die Striatus-Brücke wurde 2021 im Zuge der Architekturbieniale in Venedig errichtet. Die Komponenten wurden von der Block Research Group (BRG) der ETH Zürich und Zaha Hadid Architects Computation and Design Group (ZHACODE) in Zusammenarbeit mit incremental3D (in3D) konzipiert und durch die Firma Holcim ausgeführt.

Technologischer Verfahrensablauf:

Die Brücke besteht aus vorgefertigten, dreidimensional gedruckten, jedoch nicht-standardisierten Elementen, die vor Ort gefügt (Abb. 13) und nach der Nutzungsdauer demontiert und an anderer Stelle wiederaufgebaut werden können.¹³³



Abb. 13: Modulare Fügung der 3D gedruckten Elemente, Striatus-Brücke, Venedig

© Block Research Group (BRG) der ETH Zürich und Zaha Hadid Architects Computation und Design Group (ZHACODE) mit incremental3D (in3D), ermöglicht durch Holcim; Foto: Tom van Mele

Erkenntnisgewinn in Bezug auf das Forschungsinteresse:

Dieses gewählte Beispiel kombiniert die Faktoren Technik, Konstruktion und Gestaltung durch den 3-D-Druck von Betonfertigteilen. Für den in der Dissertation angestrebten Vergleich von Wandbauteilen mit Dämmwirkung kann das Beispiel nicht herangezogen werden. Es handelt sich allein um die Erstellung tragfähiger Bauteile. Das Projekt liefert jedoch einen wesentlichen Beitrag mit Blick auf das Entwerfen individualisierter und zugleich vorgefertigter Komponenten. Block beschreibt, dass durch die Herangehensweise des „proaktiven Entwerfens mit und

¹³³ Vgl. Shajay Bhooshan u. a., »The Striatus bridge«, in: *Architecture, Structures and Construction*, 2 (2022), Nr. 4, S. 521–543, hier S. 521.

für die Wiederverwendung“ ganzer Komponenten Nachhaltigkeitspotenziale erschlossen werden können. Er definiert das Wiederverwenden von Komponenten wie folgt: „[...] Proaktives Entwerfen mit und für die Wiederverwendung, Entwicklung von Details und Verbindungen, die ohne chemische Verfahren (z. B. Kleben) zusammengefügt werden können und damit volle Reversibilität und Demontierbarkeit gewährleisten, was die zukünftige Wiederverwendung von Bauteilen ermöglicht.“¹³⁴

¹³⁴ Block, Philippe, »Tragfähigkeit durch Geometrie und Materialeffektivität«, in: Dirk Hebel, Felix Heisel und Ken Webster (Hg.), Besser - Weniger - Anders Bauen. Kreislaufgerechtes Bauen und Kreislaufwirtschaft, Basel 2022, S. 72–77, hier S. 74.

Referenz 6: Milestone

Einen ähnlichen Ansatz verfolgt das Projekt Milestone, entworfen von Houben/van Mierlo Architekten. Es ist in Kooperation mit der Technischen Universität Eindhoven, Van Wijnen, Saint-Gobain Weber Beamix, Vesteda, der Stadt Eindhoven und Witteveen+Bos realisiert worden. Theo Salet, Professor für das Lehrgebiet "Concrete Structures" an der Technischen Universität Eindhoven, leitete die Forschungstätigkeit.

Technologischer Verfahrensablauf:

Innovativ ist die Herstellung von dreidimensional gedruckten Elementen in der Fabrik und deren Montage auf der Baustelle. Das Gebäude besteht aus 24 gedruckten Betonelementen. Die Vorfertigung der Komponenten bezieht sich aktuell nur auf die Tragelemente. In der weiteren Gebäudeerstellung wurden auf der Baustelle dann Fenster und die Dachkonstruktion in traditioneller Montage vor Ort appliziert (Abb. 14). Salet äußert sich wie folgt zu den Zielen des Projektes: "With this small building, a first major step has been taken today in the development of construction into a high-quality manufacturing industry. From design to implementation, digitalization leads to sustainable and affordable homes tailored to the wishes of the occupant. I'm proud that the knowledge we've developed at TU/e has led to this innovation by industry, with the help of the municipality, within a short timeframe."¹³⁵



Abb. 14: Montage der vorgefertigten 3-D-Druck Elemente, Milestones © 3dprintedhouse

¹³⁵ Theo A. M. Salet, »First resident of 3D-printed concrete house in Eindhoven receives key«, 2021, <https://www.tue.nl/en/news/news-overview/30-04-2021-first-resident-of-3d-printed-concrete-house-in-eindhoven-receives-key> (abgerufen am 28. Dezember 2023).

Erkenntnisgewinn in Bezug auf das Forschungsinteresse:

Das Projekt impliziert neben der additiven Fertigung (Leitfaktor Technik – automatisierte Fertigungstechnologie) eine Vorfertigung im Werk (Leitfaktor Konstruktion – intelligente Komponenten). Es werden demnach Technik, Konstruktion und Gestaltung gewinnbringend verknüpft. Im Vergleich zur Referenz 4 des 3-D-Drucks eines gesamten Gebäudes (Peri Haus) zeigen sich auf der Prozessebene und bezogen auf die Wirtschaftlichkeit bei dem 3-D-Druck vorgefertigter Komponenten erhebliche Stärken. Durch die Produktion im Werk werden die Vorteile der Vorfertigung genutzt und es erfolgt vor Ort nur die Teilmontage der Fertigteile. Die Bereitstellung der Maschinenteknologie für ein komplettes Haus vor Ort ist wesentlich komplexer als für die Erstellung von Komponenten im Werk. Die Emissionen für den Transport der Fertigteile sind dabei geringer einzuschätzen als die Emissionen, die bei der Erstellung der Großstruktur zum kompletten Hausdruck erforderlich sind.¹³⁶

¹³⁶ Bezüglich der Annahmen zur Bilanzierung des Transports besteht weiterer Forschungsbedarf.

2.2.3.2 Prinzip 2: Spritzbeton Applikation

Referenz 7: Shotcrete

Die Spritzbeton-Technologie wird in Kooperation an der Technischen Universität Braunschweig am Institut für Tragwerksentwurf (ITE), dem Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (IBMB) dem Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF) und der Leibniz Universität Hannover am Institut für Montagetechnik und Industrierobotik und der Technischen Universität Clausthal am Institut für Nichtmetallische Werkstoffe entwickelt. Die Forschungsergebnisse sind unter dem Titel „Shotcrete 3D Printing Technology for the Fabrication of Slender Fully Reinforced Freeform Concrete Elements with High Surface Quality: A Real-Scale Demonstrator“¹³⁷ veröffentlicht.

Technologischer Verfahrensablauf:

Bei dem Herstellungsverfahren des Spritzbetons wird Beton unter Hochdruck an die gewünschte Geometrie gesprüht. Im Forschungsprojekt wird die Herstellung einer doppelgekrümmten Wandkonstruktion mit integrierter Bewehrung innerhalb des automatisierten Prozesses erprobt.



Abb. 15: Kombination von drei Prozessschritten zur Erstellung des Shotcrete Demonstrators

© ITE Institut für Tragwerksentwurf, TU Braunschweig

Erkenntnisgewinn in Bezug auf das Forschungsinteresse:

Die Technologie grenzt sich zum 3-D-Druck insofern ab, da in dem Verfahren bereits mehrere Fertigungsschritte durch die Kombination verschiedener Maschinen zusammengeführt werden. Die **Abbildung 15** zeigt die Verfahrensschritte „core printing“, Einlegen der Bewehrung und „second layer printing“¹³⁸. Daraufhin folgt die automatisierte Nachbehandlung der Oberfläche. Das Fertigungslayout kombiniert gewinnbringend verschiedenen Schritte in einen kontinuierlichen Fertigungsprozess und bildet damit eine Komplexität der Fertigung ab. Die Herstellung ist wie der 3-D-Druck auch maximal individualisiert in der Geometrie. Die Umsetzung einer Standardisierung ist nicht erforderlich, da die Laufzeit der Maschine die gleiche ist,

¹³⁷ Vgl. Norman Hack und Harald Kloft, »Shotcrete 3D Printing Technology for the Fabrication of Slender Fully Reinforced Freeform Concrete Elements with High Surface Quality: A Real-Scale Demonstrator«, in: Freek P. Bos u. a. (Hg.), *Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication. Digital Concrete 2020*, Cham 2020 (RILEM bookseries Volume 28), S. 1128–1137.

¹³⁸ Ebd., S. 1131–1133.

egal, ob komplett idente oder unterschiedliche Bauteile erstellt werden. Es könnten sich jedoch Vorteile bei der Montage beispielsweise der einzulegenden Bewehrung ergeben. Dieser Gesichtspunkt wird bei der Forschung nicht abgebildet und bietet weiteres Forschungsinteresse.

2.2.3.3 Prinzip 3: Co-Extrusionsverfahren

Referenz 8: Aeroleichtbeton

In dem durchgeführten Forschungsprojekt „Aerogel – Entwicklung von Hybridbeton-Elementen mit Aerogel-Schaumbetonkern“¹³⁹, welches in Kooperation mit der Juniorprofessur Ressourceneffizientes Bauen (Jun.-Prof. Dr.-Ing. J. Albus), der TU Dortmund¹⁴⁰ sowie dem Industriepartner G.tecz Engineering GmbH¹⁴¹ erfolgreich abgeschlossen wurde, wurde die Aeroleichtbeton Technologie entwickelt (→4.4 Betontechnologie: Aeroleichtbeton).

Technologischer Verfahrensablauf:

Es wurde eine auf die Materialmatrix abgestimmte Maschinenteknik entwickelt, die einerseits die Anforderungen an einen schnellen, effizienten und nachhaltigen Produktionsprozess sicherstellt und andererseits eine hohe Qualität der Materialherstellung unterstützt. Es handelt sich um ein horizontal ausgeführtes Co-Extrusionsverfahren, bei dem die Betonmatrix in Schichten über Mischmodule automatisiert in einem fortlaufenden Prozess eingebracht werden kann (Abb.16). Forschungsleitend ist die Einbindung eines hochdämmenden Aerogels¹⁴². Dadurch soll ein bezogen auf den gesamten Lebenszyklus möglichst nachhaltiges Produkt generiert werden.

¹³⁹ Forschungsprojekt beim BMWI im Zeitraum vom 1. November 2017 bis zum 31. März 2020.

¹⁴⁰ Das Forschungsprojekt wurde durch den Lehrstuhl Baukonstruktion eingeworben (ehem. Prof. A. Schulz und B. Schulz) und wurde nach dem Ruf der Lehrstuhlinhaber an die TU Dresden an die Juniorprofessur Ressourceneffizientes Bauen (Jun.-Prof. Dr.-Ing. J. Albus) übertragen.

¹⁴¹ Aufgrund des Insolvenzverfahrens vom 22.03.2018 der Firma Housefabrik GmbH innerhalb des laufenden Forschungsprojektes wurden die Arbeitspakete des Kooperationspartner von der Firma G.tecz Engineering GmbH in Kassel übernommen und zu Ende geführt.

¹⁴² Detaillierte Informationen zur Wirkungsweise des Aerogels vgl.:

„Die feine Struktur des Aerogels schließt Luftmoleküle fest ein, was zu einer einzigartigen Isolationswirkung führt. Die Nanoporen im Aerogel schränken die wärmeleitenden Luftmoleküle dabei so stark in ihrer Bewegungsfreiheit ein, dass keine Energie an andere Luftmoleküle weitergegeben wird. So wird das Aerogel zum Hochleistungsisolator mit einer sehr niedrigen Wärmeleitfähigkeit, was zu einer höheren Energieeffizienz in der Nutzungsphase des damit ausgestatteten Bauwerks oder Produkts führt. Die mineralischen Dämmstoffe benötigen kein erdölbasiertes Ausgangsmaterial. Da das silicatbasierte Aerogel mineralisch ist, kann es nach einem Recyclingprozess erneut als Isolationsmaterial verwendet werden.“ (Fraunhofer UMSICHT, »Nils Mölders über den Hochleistungsdämmstoff: »Wir haben den Herstellungsprozess für Aerogele revolutioniert««, 2024, <https://www.umsicht.fraunhofer.de/de/presse-medien/pressemitteilungen/2022/aerogel-daemmputz.html> (abgerufen am 26. April 2024).



Abb. 16: Co-Extrusions-Technologie, Aeroleichtbeton © G.tecz Engineering GmbH

Erkenntnisgewinn in Bezug auf das Forschungsinteresse:

Das Potenzial der automatisierten Vorfertigung von monolithischen Betonbauweisen mit Dämmwirkung bestätigt sich. Im Vordergrund der Entwicklung steht die synchrone Optimierung auf den Ebenen Materialzusammensetzung, Konstruktion und Fertigung. Durch die Einbindung eines neuartigen Hybridbeton-Werkstoffs in den Produktionsablauf ist es möglich, maßgeschneiderte geschosshohe Betonpaneele in einem Endlos-Fertigungsprozess herzustellen. Das Verfahren bietet sowohl mit Blick auf die Variation der Paneldimensionen als auch der Oberflächenbeschaffenheit und Farbigkeit die Möglichkeit zur individuellen Anpassung und damit der Abbildung einer architektonischen Varianz. So werden alle drei Leitfaktoren komplementär umgesetzt.

2.2.4 Résumé: Forderung einer komplementären Fertigungsstrategie

Unter komplementärer Fertigung wird in dieser Arbeit das Ineinandergreifen mehrerer Fertigungstechnologien innerhalb der gesamten Prozesskette der Bauwerkserstellung¹⁴³ verstanden. In der additiven Fertigung wird bereits in einem Teilschritt ein ähnlich inkrementeller Ansatz erforscht. Kloft et al. stellen die Forschungsleistungen zur Herstellungsverfahren von bewehrten Betonkomponenten vor, bei denen die Verfahrensschritte nacheinander oder auch simultan aufgebracht werden (→2.2.2.4 Kombination verschiedener Verfahren innerhalb eines Fertigungsprozesses).¹⁴⁴ Diese integrale Herangehensweise bedarf weiterer Forschungsleistungen in der additiven Fertigung.¹⁴⁵ Die Dissertation sieht mit dem Begriff der komplementären Fertigung eine erweiterte Sichtweise innerhalb der Prozesskette, die sich aus der automatisierten Fertigung in Kombination mit der Umsetzung eines Systemansatzes ergibt. Nachfolgend wird am Beispiel der dargestellten Prinzipien aufgezeigt, warum dies gewinnbringend ist.

Diskrepanz zwischen technisch Möglichem und umgesetzter Praxis

Die aufgeführten drei Prinzipien der Verfahrenstechniken stellen sich in der Forschungslandschaft als Leuchtturmtechnologien und als wissenschaftliche Neuerung dar, die auf Grundlage unterschiedlichster Techniken durch Automatisierung und Robotik eine Lösung für die Bauaufgaben von morgen bereitstellen können. Die additive Fertigung prognostiziert die individuelle Anpassung der Maschine den funktionellen oder auch gestalterischen Anforderungen entsprechend, ohne einen exponentiell großen Aufwand oder Kosten zu generieren.¹⁴⁶ Dennoch kann die Umsetzung eines Systemgedankens sinnvoll sein, was im folgenden Kapitel (→2.3 Leitfaktor Konstruktion – Umsetzung einer anpassungsfähigen Systematisierung) vertieft wird. Der aktuelle Stand zeigt jedoch, dass noch stets zu großen Teilen in sequenzieller, monolithischer Bauweise aus den Bautechnologien Mauerwerk und Beton realisiert wird.¹⁴⁷ Es zeigt sich eine Abweichung zwischen den aktuell im Bauwesen in der breiten Masse angewendeten Konstruktionen und den Pilotprojekten, beispielsweise dem ersten 3D gedruckten Haus in Deutschland (Referenz 4)¹⁴⁸ und Projekten aus der Forschung wie unter den drei Prinzipien der Fertigung dargestellt. „However, a gap has emerged between the possibilities offered by architectural design and the reality of the building industry.“¹⁴⁹

¹⁴³ Die komplementäre Fertigung kann darüber hinaus positive Eigenschaften für den Rückbau von Gebäuden bewirken, die an dieser Stelle noch nicht dargelegt werden.

¹⁴⁴ Vgl. Kloft u. a. 2020 (wie Anm. 119), S. 135.

¹⁴⁵ Vgl. Vasilic 2023 (wie Anm. 82), S. 33.

¹⁴⁶ Schutter u. a. 2018 (wie Anm. 107), S. 33.

¹⁴⁷ Vgl. Kehl/Achternbosch/Revermann 2022 (wie Anm. 6), S. 59.

¹⁴⁸ Bis zum Juni 2023 wurden in Deutschland drei 3D gedruckte Gebäude vollständig genehmigt. Vgl. Daniela Diehl, »Ein Haus in 140 Stufen: 3D-Druck auf dem Bau«, 2023, <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/digitales/3d-drucker-groestes-haus-europas-100.html> (abgerufen am 4. Mai 2024).

¹⁴⁹ Schutter u. a. 2018 (wie Anm. 107), S. 32.

Kritisch bewertet wird bei den sich in Erprobung befindlichen Technologien die aktuell noch große Diskrepanz zur gebauten Wirklichkeit und deren Umsetzbarkeit in der Realität der Bauwirtschaft. Es handelt sich überwiegend um Prototypen, die unter Laborbedingungen entstanden sind¹⁵⁰, teils mit Zulassungen im Einzelfall, die für die aktuellen Bauaufgaben noch nicht flächendeckend oder im großen Stil einsetzbar sind. „Trotz der hohen Nutzenerwartungen, der vorliegenden Marktreife vieler Industrie 4.0¹⁵¹ Basistechnologien sowie deren vielfältigen Einsatzmöglichkeiten innerhalb der Wertschöpfungskette Bau ist dennoch eine große Zurückhaltung seitens der Unternehmen der Bauindustrie bei der Umsetzung spürbar. Dieser Umstand ist der Tatsache geschuldet, dass die mit der Anwendung dieses Konzeptes verbundenen Implikationen noch weitgehend unbekannt sind. Zudem existieren weiterhin offene Fragen ökonomischer, sozialer, technologischer und rechtlicher Natur, die im Rahmen weiterer Forschungsanstrengungen beantwortet werden müssen. In Anbetracht der zahlreichen ungeklärten Fragen ist es nicht weiter verwunderlich, dass eine breite Anwendung von Industrie 4.0 Technologien in der Bauindustrie noch nicht vorzufinden ist.“¹⁵² Vasilic zählt darüber hinaus als „die Haupthindernisse für die Umsetzung“ der additiven Fertigung in die Praxis unter anderem fehlende Genehmigungsverfahren, nichtexistente Normen- und Regelwerke sowie Schnittstellenprobleme von der Planung in die Fertigung auf.¹⁵³

Notwendigkeit der Verankerung von Technologie im Gesamtprozess

Um diese Hürde abzuschaffen, sind neben der Innovation in der Fertigungstechnologie an sich die Integration dieser in das Gesamtgefüge der Bauaufgabe essenziell. Es handelt sich daher nicht nur um die vordergründige Bereitstellung einer Technologie zur Erstellung von seriell und/oder individuell gefertigten Bauteilen, sondern um deren konsequente und integrale Einbindung. Damit wird ein kontinuierlicher Bauprozess von der Planung über die konstruktive Fügung bis hin zur Fertigung und Montage abgebildet. Dies stützt die Aussage von Kloft et al. wie folgt: „End-to-end digitalization in the construction industry: Continuous digitalization is of decisive importance for the successful introduction of AM in the construction industry.“¹⁵⁴ Um die Vorteile vollumfänglich auszunutzen, müssen demnach auch „Entwicklungen auf technischer Ebene“, also eine Automatisierung der Prozesse im Baubetrieb und der Bauverfahrenstechnik forciert werden.¹⁵⁵

Insgesamt als zukunftsorientiert wird die Kombination mehrerer Fertigungstechnologien in einem kontinuierlichen Fertigungsprozess angesehen. Wie bereits eingangs dargelegt, ist dafür die Umsetzung eines ganzheitlichen Ansatzes erforderlich (→2.1 Multifaktorielle Systemdarstellung vor dem Hintergrund

¹⁵⁰ Vgl. Kehl/Achternbosch/Revermann 2022 (wie Anm. 6), S. 130.

¹⁵¹ Begriffsdefinition Industrie 4.0 aus Oesterreich und Teutenberg/Produktion.

¹⁵² Oesterreich/Teuteberg 2017 (wie Anm. 8), S. 71.

¹⁵³ Vasilic 2023 (wie Anm. 82), S. 57.

¹⁵⁴ Kloft u. a. 2021 (wie Anm. 115), S. 115.

¹⁵⁵ Vgl. Witt/Anton 2020 (wie Anm. 110), S. 6.

kontinuierlicher Prozesse). Es ist daher nicht ausreichend, forschungsführend in einem singulären Gebiet zu sein, wie zum Beispiel in der Entwicklung der 3-D-Druck Technologie von Betonkonstruktionen. Es geht darüber hinaus, um den Transfer der jeweiligen Technologie zu einem angemessenen Gesamtprozess innerhalb eines hybriden Fertigungslayouts.¹⁵⁶

Ineinandergreifen komplementärer Technologien

Eine Kombination mehrerer Technologien kann dabei gewinnbringend sein. Laut Endbericht Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag mit dem Titel „Innovative Technologie, Prozesse und Produkte in der Bauwirtschaft“ wird geschlussfolgert, dass für „viele Anwendungen eine hybride Bauweise die wirtschaftlichste Variante sein wird. Das heißt, bestimmt Bauwerkselemente werden auf der Baustelle gedruckt, während andere Elemente im Werk vorgefertigt und auf der Baustelle lediglich montiert werden.“¹⁵⁷ Aufgrund der Komplexität der Bauaufgaben erscheint es ungünstig, eine Herausforderung mit nur einer Technologie lösen zu wollen, wie beispielsweise dem 3-D-Druck eines kompletten Hauses, da die Technologie in den unterschiedlichen Maßstäben an ihre Grenzen kommt. Die sich bei der 3-D-Druck-Technologie ergebenden Vorteile könnte verstärkt werden, wenn Komponenten mittels 3-D-Druck hergestellt und diese dann vor Ort gefügt würden (→2.2.3.1 Prinzip 1: Extrusionsbasiertes 3-D-Druckverfahren). Über das Ineinandergreifen von Technologien kann eine maximale Leistungsfähigkeit sichergestellt werden. Dies kann sowohl im größeren Maßstab als auch im Detail belegt werden. Erste Ansätze dafür bietet das „zementfreie Tiny House“¹⁵⁸ aus dem 3-D-Drucker, das mehrere vollständig im 3-D-Druck vorgefertigte Elemente kombiniert. Die vorgefertigte Bodenplatte, 3-D gedruckte Wandelemente und eine vorgefertigte Dachkonstruktion werden auf den Transport hin ausgelegt, zerlegt und auf der Baustelle zusammengefügt. Die additive Fertigungsmethode ermöglicht eine neue konstruktive Fügung der Standarddetails Boden-, Wand- und Dachanschluss. Hier erfolgt die aus Sicht der Autorin gewinnbringende Verknüpfung aus automatisierter und systematisierter Fertigung (→2.3 Leitfaktor Konstruktion – Umsetzung einer anpassungsfähigen Systematisierung). Dadurch kann der Prozess der Fertigung wesentlich optimiert werden, was in einer Zeit- und Kostenersparnis resultiert.

Dieser Ansatz erfordert wiederum eine ganzheitliche Digitalisierungsstrategie und ruft einmal mehr zu interdisziplinärer Zusammenarbeit in der Forschungslandschaft auf. Es ist als Chance zu begreifen, dass durch die Automatisierung verschiedene Prozesse und Gewerke zusammengeführt werden können. Diese Prozesskette wird beispielsweise bei der Aeroleichtbetontechnologie erprobt (→2.2.3.3 Prinzip 3: Co-Extrusionsverfahren). Da die Materialmatrix durch

¹⁵⁶ Vgl. J. Albus und K. E. Hollmann-Schröter, »Individualized standardization as the overarching principle in the context of planetary boundaries«, in: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1078 (2022), Nr. 1, S. 1–10, hier S. 7.

¹⁵⁷ Kehl/Achternbosch/Revermann 2022 (wie Anm. 6), S. 131.

¹⁵⁸ Das erste 3-D-Druck Modulbau-Gebäude wurde konzipiert und realisiert durch die Ingenieure und Architekten Mense-Korte und die Röser GmbH. Vgl.: <https://mense-korte.de/3d-gebaeuedruck/>

die Einbindung des Aerogels die Dämmfunktion übernimmt, wird ein komplettes Gewerk, in diesem Fall die separate Herstellung der Fassadendämmung, eingespart. Unter ganzheitlicher Digitalisierungsstrategie wird in dem Fall das Verknüpfen der digital über Planungswerkzeuge konzipierten Bauteilgeometrie mit der digitalen Materialansteuerung über die Mischmodule verstanden. So erlaubt die automatisierte Herstellung einer spezifischen Materialmischung die Realisierung einer systematisierten, aber projektspezifischen Konstruktion. Diese Hauptprozesskette wird durch ineinandergreifende Technologien und/oder Maschinen ergänzt, um beispielsweise Tafeln automatisiert zu schneiden, eine Matrize zur Oberflächengestaltung in der Schalung zu platzieren oder eine zusätzliche Bewehrung einzulegen. Auch das Spritzbetonverfahren bildet durch die Kombination der Verfahrensschritte aus, Aufbringen des Grundmaterials, Einlegung der Bewehrung, Applikation der Deckschicht und Glätten, ein Ineinandergreifen komplementärer Fertigungsschritte ab (→2.2.3.2 Prinzip 2: Spritzbeton Applikation).

Koren fordert in dem Zusammenhang unter anderem „reconfigurable manufacturing systems“ für die wirtschaftliche Herstellung innovativer Produkte.¹⁵⁹ Der Ansatz der komplementären Fertigung entspricht den zukünftigen Bedürfnissen im Bauwesen und wird im folgenden Leitfaktor Konstruktion unter dem Begriff „adaptiver Systeme“ weiter vertieft (→2.2.4 Résumé: Forderung einer komplementären Fertigungsstrategie). Dies ermöglicht schnelle und effiziente Bauweisen und führt zu einer systematisierten Architektur, die die ideale Voraussetzung für die Umsetzung kreativer und technisch anspruchsvoller Entwürfe entsprechend dem Prinzip der Individualisierten Standardisierung bietet. Welche Potenziale sich bei der Applikation einer komplementären Fertigung im Umgang mit der Ertüchtigung von Bestandsgebäuden bieten, wird im Ausblick näher betrachtet (→6.3 Ausblick eines ganzheitlichen Szenarios).

¹⁵⁹ Vgl. Yoram Koren, *The global manufacturing revolution. Product-process-business integration and reconfigurable systems*, Hoboken, N.J. 2010 (Wiley series in systems engineering and management), S. 16.

2.3 Leitfaktor Konstruktion – Umsetzung einer anpassungsfähigen Systematisierung

Nach der separaten Betrachtung des Leitfaktors Technik wird deutlich, welche veränderten Möglichkeiten dem Bauwesen im Fertigungsprozess zur Verfügung stehen. Insbesondere die aktuellen Fertigungstechnologien für Betonkonstruktionen ermöglichen einzeln betrachtet eine maximale Individualisierung der Fertigung.

Entsprechend der forschungsleitenden These wird jedoch die Notwendigkeit der Anwendung eines Systemgedankens als zielführend erachtet und damit die Individualisierte Standardisierung. Daher schließt sich im Folgenden die detaillierte Betrachtung des Leitfaktors Konstruktion an (Abb. 17). Darunter wird im Rahmen der Dissertation die Entwicklung von Konstruktionen verstanden, die einen Systemansatz mit einem angemessenen Maß implizieren. Durch die Systematisierung wird eine Wirtschaftlichkeit erreicht, gleichzeitig wird jedoch eine Anpassungsfähigkeit der Systeme eingefordert. Es erfolgt zum Einstieg eine historische, materialoffene Herleitung des Systembegriffs in der Architektur mit einem Schwerpunkt auf die Entwicklung von Standardisierungsprozesse und die Überführung in die heutige Zeit. Daraufhin erfolgt die Abbildung des Stands der Technik zur Systematisierung von Betonkonstruktionen. Anhand von gewählten Referenzen werden anschließend drei entsprechende konstruktive Prinzipien herangezogen, die den Erkenntnisgewinn vor dem Forschungsinteresse der Individualisierten Standardisierung deutlich machen. Im Résumé erfolgt die Zusammenführung der Erkenntnisse vor dem Hintergrund adaptiver Systeme¹⁶⁰.

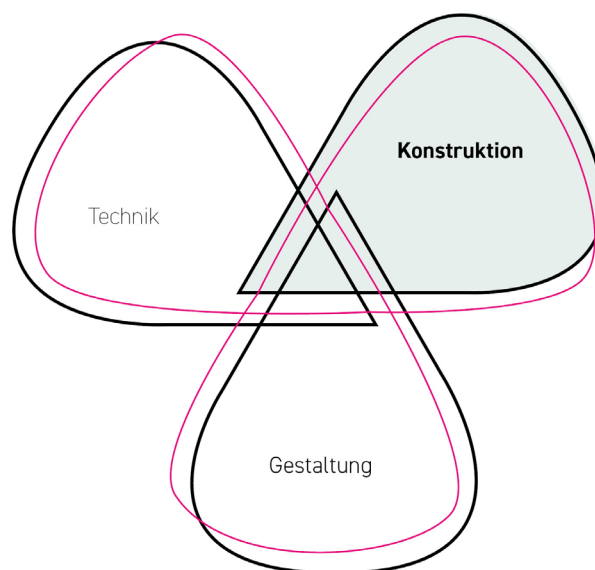


Abb. 17: Bedeutung des Leitfaktors Konstruktion innerhalb des Dreiklangs.

Eigene Darstellung

¹⁶⁰ Der Begriff adaptive Strukturen wurde maßgeblich am Institut für Leichtbau, Entwerfen und Konstruktion (ILEK) an der Universität Stuttgart geprägt und unter dem Sonderforschungsbereich 1244 „Adaptive Hüllen und Strukturen für die gebaute Umwelt von morgen“ vorangetrieben. Seit über 20 Jahren zählt die am Institut durchgeführte Forschungsleistung zum adaptiven Bauen als wegweisend.

2.3.1 Herleitung des Spannungsfeldes von System und Varianz

Im Folgenden wird die Abgrenzung unterschiedlicher Treiber von Systematisierungsprozessen damals und heute dargelegt. Dabei wird neben einer differenzierten Einführung relevanter Terminologien die Bedeutung des Konstruierens im System sowie die Systematisierung von Prozessen im Bauwesen thematisiert. Neben der Abbildung des Stands der Technik der Umsetzung seriell oder modular erstellter Bauten wird anhand aktuell zur Verfügung stehender neuartiger Werkzeuge und individualisierter Anforderungen die Bedeutung der architektonischen Vielfalt innerhalb des Systems hervorgehoben. Ziel ist es, den Leitfaktor Konstruktion vor der These der Individualisierten Standardisierung aufzuspannen und die Bedeutung des Systemansatzes zur Verbesserung der Nachhaltigkeit zu definieren.

2.3.1.1 Genese und Ablösung rein effizienzgetriebener Standardisierungsprozesse

„Neue Baumaterialien und -techniken bereiteten im Zuge der Industriellen Revolution¹⁶¹ den Weg für die industrielle Vorfertigung und schufen neue Voraussetzungen für das Bauwesen. Die Industrialisierung hat in diesem Sinne mit der Ablösung traditioneller handwerklicher Tätigkeiten durch Maschinen das Prinzip des Fügens, auch aus einem Effizienzgedanken heraus, neu definiert. Wachsmann beschrieb die Bedeutung der Maschine für die damalige Zeit so:¹⁶² „Es entstand jener umfassende Begriff der Technik, der den Begriff des Handwerks zu ersetzen begann. Konzepte, bedingt durch neue Möglichkeiten im abstrakten wie konkreten Sinn, formten sich durch die fortschreitende Ausdehnung der Industrialisierung. Das Handwerkszeug wurde zur Maschine. Die Maschine wurde das Werkzeug der Zeit.“¹⁶³ Durch die Verschiebung der bis dato lokalen Erstellung der Fertigung ins Werk wurde zudem auf der Baustelle nur noch montiert, was anderer Fügeprinzipien bedurfte. Wachsmann schrieb in „Wendepunkt im Bauen“: „Der Anspruch auf Präzision, Qualität und größte Leistung zu ökonomischen Bedingungen führt zur Vorfabrikation im Sinne einer kompletten Fertigfabrikation aller Teile. Dadurch ergibt sich eine neue Technik des Zusammenfügens der einzelnen Elemente auf der Baustelle. Der Bau wird zur Montage. Ein Vorgang, der sich wesentlich von allen bisher üblichen Methoden des Bauens unterscheidet und nur durch die Industrialisierung bedingt ist.“¹⁶⁴ „Die Standardisierung implizierte eine Vereinheitlichung von Elementen zugunsten einer Mehrfachanwendung, um Synergien in der Herstellung herbeizuführen. Hierbei war es essenziell, dass die

¹⁶¹ Zur Definition der Industriellen Revolution Vgl.: „In the late eighteenth and early nineteenth centuries (two centuries ago), major changes in manufacturing took place, in Britain first, and in all Europe and North America later. In this period, which is called the Industrial Revolution, a move from manual-labor-based economy towards machine-based manufacturing occurred. The introduction of power-driven machinery and the parallel development of factory organization [...] created an enormous increase in the production of many kinds of goods, and is regarded as the birth of modern manufacturing city.“ (Koren 2010 (wie Anm. 159), S. 20.)

¹⁶² Kirsten E. Hollmann-Schröter, »Gefügte Räume«, in: Piet Eckert und Wim Eckert (Hg.), *Ontologie der Konstruktion. Raumwirkung in der Architektur*, Zürich 2024, S. 214–239, hier S. 219.

¹⁶³ Konrad Wachsmann (Hg.), *Wendepunkt im Bauen*, Stuttgart 1989, S. 10.

¹⁶⁴ Ebd., S. 11.

Maschinen eine bis dahin nicht mögliche Präzision in der Fertigung und damit auch eine Optimierung in der Fügung anbieten konnten. Das heißt, die Standardisierung hat eine neue Art der Fügung mit sich gebracht, die auch in der Raumwirkung ablesbar ist. Dem konstruktiven Fügepunkt wurde eine größere Bedeutung beigemessen, um Synergieeffekte durch immer gleiche Anschlussdetails zu erzielen.¹⁶⁵ Dabei ist das Verhältnis von Bauteil und Fuge prägend. In der Fuge kommen statische, bauphysikalische sowie materialspezifische und gestalterische Anforderungen zusammen.¹⁶⁶ Wachsmann sprach der Rolle der Fuge in seinem damals wie heute viel referenzierten Werk „Wendepunkt im Bauen“ eine zentrale Bedeutung zu: „Ihr Platz ist durch Material und Methode, Konstruktionsprinzip, Standard und modulare Ordnung bestimmt. Unter Umständen verbergen sich Systeme der Elementverbindungen und der Konstruktionsprinzipien hinter ihnen. In der vollkommenen Beziehung von Objekt, Funktion und Trennung vermittelt die Fuge eine neue visuelle Anschauung.“¹⁶⁷

„Die Suche nach einem universellen modularen Bausystem hatte während des Zweiten Weltkriegs bereits [der ‚Pionier des industriellen Bauens‘] Konrad Wachsmann in Zusammenarbeit mit Walter Gropius mit der Entwicklung des ‚Packaged House System‘ vorangetrieben.¹⁶⁸ In dem Buch ‚Wendepunkt im Bauen‘ beschrieb Wachsmann die Grundlagen und Potenziale der Industrialisierung des Bauens und zeichnete ein neuartiges Architekturverständnis vor.“¹⁶⁹ „Es wäre ein Missverständnis anzunehmen, dass Rationalismus, Technologie und Funktion die einzigen übrigbleibenden Ausdrucksmittel wären, die nur noch das ‚Gesicht der Kultur‘ bestimmen. Die Methoden und Werkzeuge, die sich nun die Zivilisation erarbeitet und erfunden hat und zu denen sie in ihrer sozialen und gesellschaftlichen Struktur so völlig korrespondierten, sind nur als Basis, auf der sich eine neue Anschauung aufbaut, von größter Bedeutung. Sie müssen aber in ihrer Potenzialität erkannt werden und in das Bewußtsein dringen, ehe ein Gedanke formuliert werden kann.“¹⁷⁰ „Wachsmann sah also die Grundlage für eine den Ansprüchen der Gesellschaft entsprechende Architektur gegeben. Sein Systembegriff beinhaltet zum einen eine rationale Haltung, die im Ingenieursdenken verhaftet ist und in der Konsequenz zu Standardisierung und einem Effizienzgewinn führt. Zum anderen bietet das System darüber hinaus die Möglichkeit, in Form der Bricolage¹⁷¹ Bestandteile neu zu komponieren, was einen erweiterten Gestaltungsfreiraum bietet. Das Zusammenspiel dieser beiden von Claude Lévi-Strauss beschriebenen diversen Herangehensweisen ist individuell auszutarieren. Das aufgezeigte

¹⁶⁵ Hollmann-Schröter 2024 (wie Anm. 162), S. 221.

¹⁶⁶ Vgl. Forschungsstelle Realienkunde, »Fuge (Baukunst)«, (abgerufen am 22. Juni 2023), [https://www.rdklabor.de/wiki/Fuge_\(Baukunst\)#I._Definition_und_Wortgebrauch](https://www.rdklabor.de/wiki/Fuge_(Baukunst)#I._Definition_und_Wortgebrauch).

¹⁶⁷ Wachsmann 1989 (wie Anm. 163), S. 76.

¹⁶⁸ Vgl. Claudia Klinkenbusch, »Perfektionierte Herstellung: Konrad Wachsmann und die unvollendete Revolution«, in: *der architekt*, 02 (2019), S. 38–43, hier S. 38–43.

¹⁶⁹ Hollmann-Schröter 2024 (wie Anm. 162), S. 221.

¹⁷⁰ Konrad Wachsmann, *Wendepunkt im Bauen, mit einem Vorwort von Fritz Haller*, Stuttgart 1989, S. 232.

¹⁷¹ Die Begriffe des Bricoleurs und des Ingenieurs gehen zurück auf die Definition von Claude Lévi-Strauss, die er in seinem Buch *La Pensée sauvage* im Jahr 1962 ausführt. Eine differenzierte Betrachtung im Rahmen des konstruktiven Entwerfens werden von Eckert und Eckert in der Einleitung der *Ontologie der Konstruktion* gegeben (Piet Eckert und Wim Eckert (Hg.), *Ontologie der Konstruktion. Raumwirkung in der Architektur*, Zürich 2024, S. 10).

Spannungsfeld wurde bis heute durch unterschiedlichste Protagonisten und Protagonistinnen erprobt. Erfolg oder Misserfolg gebauter Zeitzeugen sind häufig messbar an ebendiesem Verhältnis von System und Varianz.“¹⁷²

2.3.1.2 Differenzierung des Systembegriffs und Vorgehens zur Umsetzung eines Systemansatzes

Vor diesem Hintergrund erfolgt zuerst eine Definition des Systembegriffs und dessen Bedeutung für das Bauwesen. Laut Duden bezeichnet ein System ein „Prinzip, nach dem etwas gegliedert oder geordnet wird“ und der Begriff systemisch bedeutet „ein bestimmtes System (als Ganzes) betreffend“¹⁷³. Darüber hinaus bildet die allgemeine Systemtheorie einen Bezugspunkt zur Definition des Systembegriffs. Nach Bertalanffy ist dabei die wechselseitige Beziehung untereinander relevant.¹⁷⁴ „Als interdisziplinäre Grundlagen-Wissenschaft stellt die Allgemeine Systemtheorie einen einheitlichen Beschreibungs- und Analyserahmen zur fächerübergreifenden Untersuchung komplexer Sachverhalte zur Verfügung. Im Mittelpunkt steht dabei der Begriff System. Hierunter wird allgemein eine verschiedene und untereinander in Beziehung stehende Teile umfassende Ganzheit verstanden. Der Systembegriff lässt sich auf unterschiedliche Sachgebiete anwenden.“¹⁷⁵

In der Architektur taucht der Begriff System in vielfältigen Bereichen auf. Die Anwendung eines Systemansatzes im Entwurfsprozess erfordert zu Beginn eine Reduktion der Komplexität und eine Anpassung auf einen gemeinsamen Nenner. Die Umsetzung von Rationalisierungen in einer frühen Phase des Entwurfsprozesses resultiert aus dem Wunsch, ein gewisses Maß an Wirtschaftlichkeit zu erzielen. „Eine rein effizienzgetriebene Standardisierung, beziehungsweise die in diesem Zusammenhang erforderliche Reduktion der Komplexität, passt auf den ersten Blick jedoch nicht mit der sich verstärkenden Nachfrage an beispielsweise personenbezogenen Wohnformen oder individualisierten Konstruktionen zusammen.“^{176,177} Vielmehr wird auch im System der Anspruch an eine gestalterische Varianz gestellt. In diesem Zusammenhang etabliert sich der Begriff der seriellen Maßanfertigung¹⁷⁸, der eine angepasste Massenfertigung beschreibt. Es ist evident, dass innovative Anwendungen eines bereits im Entwurfsprozess entwickelten Systems mit hoher gestalterischer Qualität zurzeit noch der Einzelfall bleiben.

¹⁷² Ebd.

¹⁷³ Cornelsen Verlag GmbH, »Duden: System«, <https://www.duden.de/rechtschreibung/System> (abgerufen am 21. April 2024).

¹⁷⁴ Vgl. Ludwig von Bertalanffy, *General system theory. Foundations, development, applications*, 17. Aufl., New York, N.Y. 2009, S. 10.

¹⁷⁵ Christian Schmidt, *Management komplexer IT-Architekturen* 2009, S. 7–8.

¹⁷⁶ Vgl. Horx/Horx-Strathern/Varga 2017 (wie Anm. 45), S. 68.

¹⁷⁷ Hollmann-Schröter 2021 (wie Anm. 15), S. 190.

¹⁷⁸ Mark et al. beziehen sich in der Definition der seriellen Maßanfertigung (mass customization) auf die Quelle: (Koren 2010 (wie Anm. 159), S. 73). Dort wird der Unterschied zwischen serieller Maßanfertigung und personalisiertem Produkt weiter vertieft.

2.3.1.3 Vorteile offener Systeme

Nach Winter et al. werden Bausysteme in offene und geschlossene Systeme differenziert. Als geschlossene Systeme werden Bausysteme bezeichnet, die eine festgelegte, herstellerbezogene Kombination von Bauteilen innerhalb eines Gesamtsystems vorsehen. Diese Herangehensweise bietet durch den vorgegebenen Rahmen eine gesteigerte Effizienz sowie Vorteile im Prozessablauf, „da alle Elemente speziell auf ein Bausystem und eine Anwendung ausgelegt werden.“¹⁷⁹ Oftmals stoßen geschlossene Systeme gestalterisch an ihre Grenzen, da im Status quo der Umsetzungspraxis die Varianz begrenzt ist und sich Bauteile im System häufig wiederholen.

Offene Bausysteme erlauben eine Kombination verschiedener am Markt verfügbarer, standardisierter Elemente unterschiedlicher Hersteller. Dies erfordert im Vorfeld einen erhöhten Planungsaufwand, erreicht dann jedoch eine gesteigerte Planungsflexibilität für die Umsetzung.¹⁸⁰ Die Implementierung bauteilbezogener standardisierter Systeme für Bauprojekte, auch als Elementbauweise bezeichnet, wie beispielsweise vorgefertigte Deckensysteme oder Treppenbauteile, erfolgt bereits in vielfältiger Weise. „Solche anschlussfähigen Systemlösungen existieren vom kleinsten Maßstab (beispielsweise systematisierte, konstruktive Verbindungen) bis hin zu seriell erstellten Produkten auf Bauteilebene (beispielsweise Deckensysteme).“¹⁸¹ Dabei handelt es sich jedoch noch nicht um funktionierende Gesamtsysteme, die in einem kontinuierlichen Prozess eingebunden sind.

Unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten ist das Ziel bei der Anwendung von Systemen, dass diese nicht nur singulär eingesetzt werden, sondern mannigfaltig zum Einsatz kommen. Die Herausforderung dabei ist, eine gestalterische Repetition zu vermeiden. Hierbei ist entscheidend, auf welcher Ebene und wie allumfassend der Systemansatz eingeführt wird, damit er weitergehende Potenziale generiert. Die Herausforderung stellt die Abbildung eines kompletten Bausystems auf Gebäudeebene und dessen Einfügung in die gebaute Umwelt dar.¹⁸² Zur Etablierung eines Ordnungsprinzips mit hoher Gestaltungsvielfalt bei gleichzeitig effizienter Fertigung bedarf es der Entwicklung anschlussfähiger Systembaukästen, also einer Mischung aus geschlossenem und offenem System (→2.3.4 *Résumé: Adaptive Konstruktionssysteme als Mittelweg aus Standardisierung und Individualisierung*). Ein nachhaltiges System zu generieren, bedeutet, im Zuge der Digitalisierung des Bauwesens die Balance zwischen Flexibilität und Adaptivität auf der einen Seite und Systematisierung auf der anderen Seite sinnvoll zu finden (→5.1 *Potenziale anpassungsfähiger Betonkonstruktionen*). Vor dem Hintergrund des modularen Entwerfens gibt es dabei unterschiedliche Entwurfsansätze. Die bisher beschriebene Herangehensweise der Addition verschiedener Bauteile zu einem Gesamtgefüge, auch als Baukastensystem bezeichnet, wird von Foreman et al. als Bottom-up-Prinzip

¹⁷⁹ Stefan Winter u. a., *Bauen mit Weitblick. Systembaukasten für den industrialisierten sozialen Wohnungsbau*, Stuttgart 2019, S. 62.

¹⁸⁰ Vgl. ebd.

¹⁸¹ Hollmann-Schröter 2021 (wie Anm. 15), S. 194.

¹⁸² Ebd.

definiert (Abb. 18). Dem steht der Entwurfsansatz das Top-Down-Prinzip gegenüber.¹⁸³ Dabei werden individuelle Entwürfe in standardisierte Komponenten zerlegt, unter Zuhilfenahme digitaler Werkzeuge (→3.1.3.5 Schnittstelle Konstruktion – Gestaltung: digital gestützter Neuentwurf).

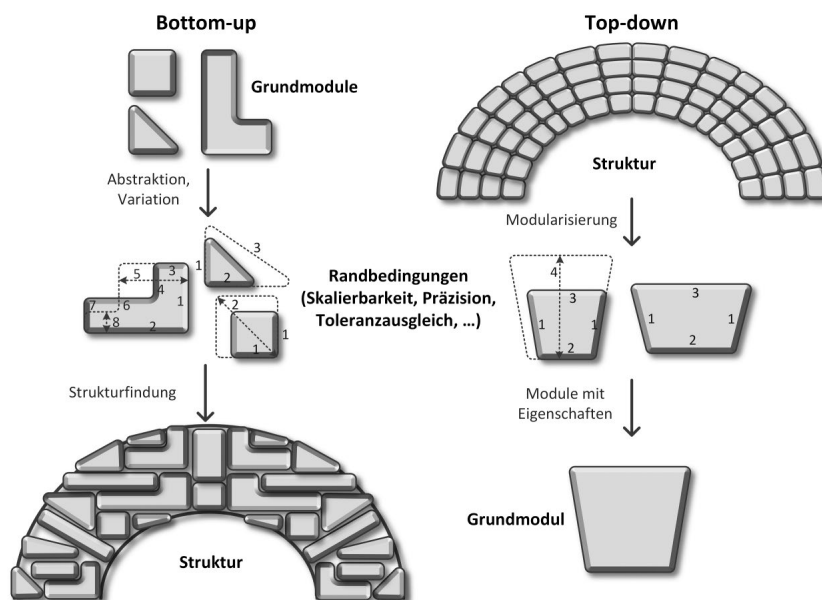


Abb. 18: Zusammenführung fester Grundmodule zur Struktur (bottom-up) beziehungsweise Modularisierung einer Struktur in neue Module (top-down) © Patrick Forman¹⁸⁴

Es ist möglich, sich von unterschiedlichen Seiten der Umsetzung eines Systemansatzes zu nähern. Dies wird mit dem dritten Leitfaktor, dem Parameter Gestaltung, vertieft (→2.3 Leitfaktor Konstruktion – Umsetzung einer anpassungsfähigen Systematisierung).

¹⁸³ Peter Mark u. a., »Vom Handwerk zur individualisierten Serienfertigung«, in: *Bautechnik*, 98 (2021), Nr. 3, S. 243–256, hier S. 247.

¹⁸⁴ Abb. 5 in: ebd., S. 246.

2.3.1.4 Statusbericht serielles und modulares Bauen

Laut Definition in der Zeitschrift „der Architekt“ impliziert das serielle Bauen „die Herstellung mehrerer oder einer Serie von Bauten nach exakt dem gleichen Gebäudeplan. Neben den genannten Begriffen der Typisierung und der industriellen Vorfertigung handelt es sich hierbei um die generalisierendste und am wenigsten flexible Methode. Auf den Ort und die Topographie kann beim Bau nicht eingegangen werden.“¹⁸⁵ Genau dieser Tatsache entsprechend bildet heute die gebaute Umwelt besonders im seriell realisierten Wohnungsbau eine gewisse Einfältigkeit ab. Vorgefertigte, in modularer Bauweise erstellte Objekte setzten einen Systemgedanken um, jedoch oftmals unter Abbildung einer begrenzten Vielfalt und dadurch relativ geringen Strahlkraft.¹⁸⁶ Die verfügbaren technischen Möglichkeiten zur individualisierten Fertigung erscheinen aus Sicht der Autorin noch nicht ausreichend eingebunden, und es wird kein ausreichendes Augenmerk auf eine notwendige Anpassungsplanung gelegt.

Zum aktuellen Zeitpunkt wird die Anwendung elementierter Bauweisen mit vorgefertigten, zweidimensionalen Elementen oder die Planung von Gebäuden aus Raummodulen von der Politik und Wohnungswirtschaft forciert. Das belegt zum Beispiel die Durchführung eines bereits 2017 europaweit ausgeschriebenen Wettbewerbs für serielles Bauen des Spitzenverbands der Wohnungswirtschaft (GdW) in Kooperation mit dem Bundesbauministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI).¹⁸⁷ Dieser mündete in der Festschreibung einer Rahmenvereinbarung für neun serielle und modulare Wohnungsbaukonzepte.¹⁸⁸ In einer zweiten Ausschreibungsrunde wurde die gestalterische Qualität in den Fokus gesetzt.¹⁸⁹ Der aktuelle Druck auf dem Wohnungsmarkt fordert Lösungen, die von der Politik im seriellen Bauen gesucht werden.¹⁹⁰ Laut der Studie von McKinsey 2019 wird der Digitalisierung eine entscheidende Rolle für den Aufbau des Modulbausektor beigemessen: „Several factors lead us to believe that the current renewed interest in modular construction may have staying power in additional markets worldwide, first and foremost due to digitization. The maturing of digital tools has radically changed the modular construction proposition. The design of the different modules, the coordination of the processes within the construction facility, and the optimization of the logistics of just-in-time delivery onsite are just some of the enhancements that are changing the modular proposition. The further development of these tools, including automated design, will further enhance the modular proposition.“¹⁹¹ Der

¹⁸⁵ »Glossar: Typisierung, Vorfertigung, serielles Bauen«, in: *der architekt*, 2 (2019), S. 22–23, hier S. 23.

¹⁸⁶ Vgl. Reiner Nagel und David Kasperek, »Ohne Bezug zum Ort geht es nicht: Möglichkeiten und Grenzen von Typ und Serie«, in: *der architekt*, 2 (2019), S. 51–55, hier S. 52.

¹⁸⁷ Vormals BMUB.

¹⁸⁸ Vgl. GdW Bundesverband deutscher Wohnungs- und Immobilienunternehmen e. V., *GdW Rahmenvereinbarung - Serielles und modulares Bauen Überblick über die Angebote*, 2018, <https://web.gdw.de/wohnen-und-stadt/serielles-bauen/seriellesbauen>.

¹⁸⁹ Vgl. GdW, *Seriell und modulares Bauen 2.0: Spitzenverband der Wohnungswirtschaft GdW legt neue Rahmenvereinbarung vor*, Nr. 29, 2023, https://www.gdw.de/media/2023/10/pm-29-23_seriemer-und-modularer-wohnungsbau-2.0_rahmenvereinbarung.pdf (abgerufen am 29. Dezember 2023).

¹⁹⁰ Vgl. für den Neubau die Rahmenvereinbarung „Seriell und modulares Bauen“ und für die Sanierung die Bundesförderung „Serielle Sanierung“ sowie die Tätigkeiten zum „Energiesprong-Prinzip“.

¹⁹¹ Bertram u. a. 2019 (wie Anm. 32), S. 18–19.

Wandel hat sich jedoch mit Rückblick auf die letzten fünf Jahre in Deutschland nicht wie prognostiziert entwickelt. Als ein Grund dafür wird durch Blanco et al. eine mangelnde Integration der Modulbauer in einen ganzheitlichen Planungsprozess identifiziert. „The benefits of modular buildings come from the industrialization of key construction tasks. Modular companies aim to standardize, streamline, and automate big parts of the value chain, allowing buildings to be treated like products rather than projects. To get that right, modular players need best-in-class manufacturing capabilities, including sophisticated digital design platforms and lean, efficient production lines.“¹⁹² Ferner wurden modulare Ansätze meist vergleichsweise starr konzipiert, also auf den ungünstigsten Lastfall ausgelegt, was massive Überdimensionierungen beziehungsweise einen erhöhten Einsatz von Ressourcen zur Folge hatte. Blanco et al. beschreiben in dem Zusammenhang den Vorteil maßgeschneiderter Entwurfstechniken wie folgt: „Standardization allows modular companies to use efficient series production techniques, but a design that is robust enough for every application will inevitably be over-engineered for most of them. For example, in multistory buildings, the loads experienced by upper-story units will be much lower than those at the base. Conventional building techniques therefore call for different specifications for different floors. Designs that use stacks of repeated modules, by contrast, tend to stick to a single specification optimized around the highest loads. That mismatch can inflate material costs and reduce the competitiveness of modular designs. Companies can address overdesign by using design-to-value techniques to optimize features and material specifications for individual modules prior to manufacture, thereby minimizing excess use of steel, wood, and concrete.“¹⁹³ Dabei ist es essenziell, zu erkennen, dass ganz im Gegensatz zu der eingangs gesetzten Definition einer begrenzten Flexibilität serieller Bauweisen eine neuartige automatisierte Fertigung sehr wohl das Potenzial eines individualisierten Systembaus bieten kann, wenn Entwurf, Konstruktion und Produktion aufeinander abgestimmt werden. Dass dieses Value Engineering möglich ist und bereits in der Branche durch Modulbauer erfolgreich umgesetzt wird, zeigt sich im realisierten Projekt REFH in Wald in der Schweiz. Die von der spanischen Firma Compact Habit produzierten massiven Raummodule sind beispielsweise durch die Rippenstruktur der Wand- und Deckenbauteile sehr materialeffizient konstruiert.¹⁹⁴

¹⁹² Jose Luis Blanco u. a., *Making modular construction fit*, 2023, <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/making-modular-construction-fit#/> (abgerufen am 28. Dezember 2023).

¹⁹³ Ebd.

¹⁹⁴ Jutta Albus, »Stand der Technik«, in: Jutta Albus u. a. (Hg.), *Systematisierte Planungs- und Bauprozesse. Hintergründe, Strategien und Potenziale industrieller Vorfertigungstechnologien*, Stuttgart 2021, S. 101–159, hier S. 144.

2.3.1.5 Erfolgsfaktor gezielte Anpassungsplanung

Die architektonische Vielfalt wird beeinflusst durch die Eigenschaft der Anpassungsfähigkeit, auch als Adaptivität¹⁹⁵ bezeichnet, und umfassend von Heidrich et al. beleuchtet.¹⁹⁶ Der Begriff Adaptivität deutet eine Änderbarkeit an. Das impliziert, dass sich ein Gebäude, eine Struktur oder ein Bauteil an unterschiedliche konstruktive, soziologische, oder klimabedingte Gegebenheiten anpassen kann.¹⁹⁷ Die Möglichkeit zur Anpassungsfähigkeit muss in den meisten Fällen bereits in der Konzeptionierung von den Planerinnen und Planern bedacht werden.

Es bietet sich ein breites Ansatzfeld zur Umsetzung einer Anpassungsfähigkeit, begonnen mit dem größten Nenner wie dem städtebaulichen Umfeld und ebenso einem kleineren Nenner wie der konstruktiven Fügetechnik eines Knotenpunktes. Es ist aufgrund der Unterschiedlichkeit der sich teils widersprechenden Anforderungen nicht möglich, nur eine Strategie zu verfolgen. Es gilt dabei vielmehr stets abzuwägen, wo und in welchem Maße die Strukturen adaptiv sein sollten, um deren Nachhaltigkeit bezogen auf den gesamten Lebenszyklus auch tatsächlich zu verbessern. „A direct connection can be made between adaptive building and sustainability.“¹⁹⁸ An diesem Punkt muss besonderes Augenmerk auf das notwendige Maß an Varianz gelegt werden.

Die Evaluation zur Rahmenvereinbarung „Seriell und modulares Bauen in der Praxis“¹⁹⁹ des Bundesverbands deutscher Wohnungs- und Immobilienunternehmen e.V. (GdW), belegt die Wichtigkeit, das System stets mit einer architektonischen Vielfalt zusammen zu denken. Albus führt dazu wie folgt aus: „Ziel ist es, zu einer Art Standardisierung in der Planung oder einem standardisierten Planungsprozess zu gelangen, wobei trotzdem eine hohe gestalterische Qualität erreicht werden soll.“²⁰⁰ „Hinzu kommt, dass im Bauwesen in Abgrenzung zum Flugzeug- und Automobilsektor das gebaute Objekt immobil ist. Das bedeutet, dass ein wesentlicher Schritt in der gelungenen Einfügung des Gebäudes in seinen spezifischen Ort besteht. Der Erfolgsfaktor liegt daher in der Anpassungsplanung bei Systembaukästen und Modulbauten beziehungsweise bei jeglicher Art von Einführung eines Systemansatzes. Damit ist gemeint, dass es grundlegend ist, den Anspruch an eine gestalterische Qualität im Zuge der Systematisierung ausdifferenzieren und so die Möglichkeit zu bieten, eine ortsspezifische Anpassungsplanung vornehmen zu können.“²⁰¹ „Je stärker ein Prototyp im Sinne einer Gestaltqualität ausdifferenziert ist, desto besser wird er sich in der jeweiligen

¹⁹⁵ Vgl. Erläuterungen Glossar.

¹⁹⁶ Vgl. Heidrich u.a. tragen die wissenschaftlichen Erkenntnisse zum Thema der Adaptivität, die zwischen 1990-2017 erschienen sind, zusammen und kategorisieren diese in folgende Begriffe: „Adjustable, Versatile, refitable, convertible, scaleable, movable“.

Oliver Heidrich u. a., »A critical review of the developments in building adaptability«, in: *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, 35 (2017), Nr. 4, S. 284–303, hier S. 10.

¹⁹⁷ Vgl. ebd., S. 287.

¹⁹⁸ Rob Geraedts, »FLEX 4.0, A Practical Instrument to Assess the Adaptive Capacity of Buildings«, in: *Energy Procedia*, 96 (2016), S. 568–579, hier S. 568.

¹⁹⁹ Die Rahmenvereinbarung wird von der Bundesregierung unterstützt.

²⁰⁰ Andreas Rietz, Juliane Jäger und André Hempel, *Seriell und modulares Bauen in der Praxis. Eine Zwischenbilanz im Rahmen der Wohnraumoffensive zur Förderung des seriellen und modularen Bauens ; Dokumentation der Veranstaltung*, unter Mitw. von Michael Neitzel, 2021. Aufl., Bonn 2022, S. 25–27.

²⁰¹ Hollmann-Schröter 2021 (wie Anm. 15), S. 194.

Anpassungsplanung individualisieren lassen.“²⁰² Digitale Werkzeuge können uns bei der Planung und Bewertung helfen.

2.3.1.6 Abgrenzung zu bisherigen Herangehensweisen und Gründe für einen Wandel

In der Vergangenheit fand eine individualisierte Vorfertigung aufgrund fehlender Wirtschaftlichkeit und begrenzter technologischer Möglichkeiten nicht statt. Heute hingegen haben sich in Abgrenzung dazu die Grundlagen durch den möglichen Einsatz digitalisierter Entwurfs- und Produktionsprozesse strukturell verändert (→2.3 Leitfaktor Konstruktion – Umsetzung einer anpassungsfähigen Systematisierung). So belegen beispielsweise Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zur Betontechnologie CONPrint3D® eine erhöhte Wirtschaftlichkeit der 3-D gedruckten Wand im Vergleich zu klassischen Kalksandstein-, Ziegel- und Betonwandsystemen.²⁰³

Darüber hinaus ermöglicht erst die Entwicklung neuartiger Maschinent Technologien, wie zuvor unter dem Leitfaktor Technik (→2.2 Leitfaktor Technik – komplexe Fertigungstechnologien) dargestellt, die Umsetzung einer Individualisierten Standardisierung. Die Entwicklung zum Kundenspezifischen Produkt bietet nach Koren zudem eine Kosteneffizienz: „With personalized production, products are cost-effectively made or assembled to fit the exact personal needs of individual customers.“²⁰⁴ „Bezogen auf den Bausektor erlauben parametrisch-assoziative Entwurfsmethoden und die robotische Fertigung diese maximale Individualisierung der gebauten Umwelt in Form von singulären Sonderlösungen auch in der Architektur. Die Tatsache, dass jedes verwendete Element einzigartig ist, wird mit dem Argument der maschinellen Fertigung entschärft und so eine gewisse Wirtschaftlichkeit auch für individualisierte Konstruktionen impliziert.“²⁰⁵

„Die Ausstellung der TU München ‚Wendepunkt(e) im Bauen – von der seriellen zur digitalen Architektur‘²⁰⁶, die im Jahr 2010 im Architekturmuseum der Pinakothek der Moderne zu sehen war, nimmt direkten Bezug auf das Werk Wachsmanns ‚Wendepunkt im Bauen‘²⁰⁷. Innerhalb der Ausstellung wurde von den Kuratoren bereits Zwischenbilanz gezogen mit der Fragestellung: ‚Sind die heutigen computerbasierten Entwurfs- und Fertigungsmethoden, mit denen individuelle Formen maschinell und wirtschaftlich produziert werden können, ein neuer ‚Wendepunkt im Bauen‘? Und welche Konsequenzen ergeben sich aus der digitalen Architektur in Hinblick auf die Möglichkeiten der Vorfertigung und des Systembaus?‘²⁰⁸ Nach über zehn Jahren kann das Zwischenfazit gezogen werden,

²⁰² Nagel/Kasperek 2019 (wie Anm. 186), S. 53.

²⁰³ Vasilic 2023 (wie Anm. 82), S. 48.

²⁰⁴ Koren 2010 (wie Anm. 159), S. 78.

²⁰⁵ Hollmann-Schröter 2021 (wie Anm. 15), S. 190.

²⁰⁶ Die Ausstellung wurde konzipiert von Winfried Nerdinger, dem damaligen (bis 2012) Leiter des Architekturmuseums der TU München, in Kooperation mit mehreren Lehrstühlen der Fakultät für Architektur.

²⁰⁷ Vgl. Wachsmann 1989 (wie Anm. 172).

²⁰⁸ Hartwig Schmidt, »Wendepunkt(e) im Bauen – Von der seriellen zur digitalen Architektur«, in: *Bautechnik*, 87 (2010), Nr. 5, S. 300–301, hier S. 300.

dass die Prozesse fließend und die Auseinandersetzungen zwischen Systemgedanke und Gestaltungsvielfalt in der Architektur noch immer präsent sind.“²⁰⁹ Ein sich ergebender Kurswechsel kann jedoch an zwei Punkten festgemacht werden. Erstens ist eine steigende Anzahl an Forschungsprojekten und wissenschaftlichen Veröffentlichungen zu dem Themenfeld anpassungsfähiger Konstruktionen zu verzeichnen.²¹⁰ Zweitens ist eine Zunahme an Bauprojekten, die im System individualisierte Konstruktionen umsetzen, zu erkennen (→2.2.3 Aufstellung von Verfahrensprinzipien am Beispiel der Betonforschung).

²⁰⁹ Hollmann-Schröter 2021 (wie Anm. 15), S. 190.

²¹⁰ Auszugsweise wird an dieser Stelle auf den Sonderforschungsbereich DFG SPP 2187 „Adaptive Modulbauweisen mit Fließfertigungsverfahren: Präzisionsschnellbau der Zukunft“ und Sonderforschungsbereich DFG SPP 1244 „Adaptive Hüllen und Strukturen für die gebaute Umwelt von morgen“ hingewiesen sowie auf die Publikationen von Liliane Wong, *Adaptive reuse in architecture. A typological index*, Basel 2023.

2.3.1.7 Einführung einer Systematik auf Prozessebene

Nicht nur in der Konstruktion von Bauteilen, sondern auch auf den bisher erläuterten Ebenen der Entwurfs- und Planungsprozesse sowie in Produktionsverfahren erscheint die Anwendung einer Systematik aussichtsreich.²¹¹ Bergmann unterscheidet „zwischen dem Bauen (als Prozess) und der gebauten Umwelt (als Produkt)“ und sieht diese beiden Bestandteile als „Grundlage für das Verständnis der systemischen Zusammenhänge.“²¹² Vor dem Hintergrund der Arbeitsthese der Individualisierten Standardisierung und unter der Berücksichtigung der multiplen Einflüsse im Bauwesen (→2.1 Multifaktorielle Systemdarstellung vor dem Hintergrund kontinuierlicher Prozesse) wird die Kombination systematisierter Prozesse mit systematisierten Konstruktionsweisen als gewinnbringend erachtet was unter (→3.1.4 Résumé: Kreislauffähigkeit durch digital gestützte Prozesse) weiter vertieft wird. „An die Stelle des Bauens mit System tritt das Bauen im System. Nicht mehr nur das Bauwerk wird als System angesehen, das sich systematisch in seine Einzelteile zerlegen lässt, sondern vielmehr wird der Prozess des Bauens als System verstanden, das sich in wechselseitigen Beziehungen zu seiner Umwelt einerseits und dem Bauwerk andererseits befindet. Der Fokus wird von den Elementen weg, hin auf die Zusammenhänge des Gesamtsystems gerichtet. Das analytische Untergliedern der Einzelteile anhand einer Systematik wird dank der Fähigkeit von Computern, die Zusammenhänge zu verarbeiten, durch eine Systematik ersetzt.“²¹³ Damit wird ein Lösungsansatz für den eingangs diskutierten Mangel einer fehlenden Kanalisierung der Komplexität im Bauprozess in systemische Lösungsansätze auf Prozess und Bauteilebene aufgezeigt. Neuartig ist, dass durch den Einsatz von digitalen Planungswerkzeugen, über die reine Digitalisierung des Entwurfs hinaus, die Beziehung der Elemente innerhalb der Systematik geregelt werden kann, was wiederum Vorteile für den kontinuierlichen Bauprozess hat (→1.1.2 Darstellung des Zusammenhangs von Mangel, Forschungslücke und Potenzial). Genau diese vielfältigen Abhängigkeiten im Konstruktionsprozess können durch assoziative Verknüpfungen innerhalb digitaler Modelle zusammengeführt werden. Diese Inhalte werden anhand der Forschung zum digitalen Gestalten detailliert erläutert (→2.4.3.1 Prinzip 1: digitales Gebäudebeschreibungsmodell – MZD).²¹⁴

²¹¹ Vgl. Albus u. a. 2021 (wie Anm. 11), S. 209.

²¹² Christian Bergmann, *Prozesse entwerfen. Eine Strategie für die Zukunft des Bauens*, Berlin/Boston 2019, S. 13.

²¹³ Ebd.

²¹⁴ Die Assoziativität der Abhängigkeiten kreiert ein neues Ganzes. Vgl. ebd. S. 17.

2.3.1.8 Weitreichende Bedeutung des Systemansatzes für die Verbesserung der Nachhaltigkeit

„Mit Blick auf einen ressourcenschonenden Umgang und auf dem Wege zu einer Verbesserung der Nachhaltigkeit im Bauwesen gewinnen die Aspekte des Konstruktionsprozesses und des Materialeinsatzes an Bedeutung.“²¹⁵ War früher die Arbeitskraft im Gegensatz zum Material erschwinglich, erlebten wir im Zeitverlauf eine Umkehrung in der Hinsicht, dass die Arbeitskraft teurer wurde.²¹⁶ Heute zeichnet sich zudem ein schon konstatierte Fachkräftemangel ab. Hinzu kommt, dass die Endlichkeit von Ressourcen zunehmend problematisch wird, was wiederum zu einem Anstieg der Materialkosten führt. Die innerhalb der Dissertation zentral stehende Forderung nach der Umsetzung eines Systemansatzes kann zusammen mit den Leitfaktoren Technik und Gestaltung Ressourcen und Prozesse aufeinander abstimmen. Durch diese ist eine deutliche Verbesserung der Nachhaltigkeit zu erwarten. „Ferner wird durch das Hinwirken auf eine zirkuläre Kreislaufwirtschaft der Systemgedanke wesentlich erweitert. Hier spielen auch Faktoren wie Lebensdauer und Nachnutzung von Gebäuden eine entscheidende Rolle.“²¹⁷ „Nutzungsflexibilität ist die erste Voraussetzung für zukünftigen Re-Use. Die Nutzungsflexibilität wird ganz wesentlich von der Gebäudestruktur bestimmt.“²¹⁸ Dieser Ansatz muss in der Erweiterung des Systemgedankens Raum finden und wird im Kapitel III bei der Verknüpfung der Leitfaktoren mit Fokus auf die Nachhaltigkeitsaspekte detailliert betrachtet (→3.1 Verknüpfung der Leitfaktoren mit einem Fokus auf Nachhaltigkeitsaspekte).

²¹⁵ Hollmann-Schröter 2021 (wie Anm. 15), S. 194.

²¹⁶ Kloft u. a. 2020 (wie Anm. 119), S. 131.

²¹⁷ Hollmann-Schröter 2021 (wie Anm. 15), S. 194.

²¹⁸ Annette Hillebrandt, »Architekturkreisläufe – Urban-Mining-Design«, in: Annette Hillebrandt u. a. (Hg.), *Atlas Recycling. Gebäude als Materialressource*, München 2021 (*Edition Detail*), S. 10–15, hier S. 12.

2.3.2 Eingrenzung: Systematisierung massiver Konstruktionen

Anschließend wird die übergeordnete Betrachtung der Relation von System und Varianz auf den Betonsektor zugeschnitten. Dabei wird der Frage nachgegangen, wie bei der Konstruktion von massiven Beton-Komponenten durch die Etablierung eines Systemansatzes, der eine gezielte Anpassungsfähigkeit zulässt, das Maß an Individualisierung erhöht und gleichermaßen die Nachhaltigkeit verbessert werden kann.

2.3.2.1 Frühes Beispiel der Systematisierung gestalteter Betonmodule

„Das systematisierte Fügen wird oftmals von einem konstruktiven System beherrscht, vom einzelnen Element ausgehend entsteht so ein Ganzes.“²¹⁹ Der Verwendung des Werkstoffs Beton hat eine lange Entwicklungsgeschichte, die an viele Protagonisten geknüpft ist, die dessen Einsatz experimentell weiterentwickelt haben. Mit Fokus auf eine Systematisierung wurden bereits zu Beginn der Industrialisierung modulare Betonbauteile produziert. „Hierfür lieferte Frank Lloyd Wright in den 1920er-Jahren mit der Entwicklung der textile blocks frühe Lösungen für einen innovativen Umgang mit Beton Modulen. Die großformatigen textile blocks wurden mit einer umlaufenden Einkerbung ausgebildet, in die Stahlstäbe geführt und eingemörtelt wurden. Diese vertikal und horizontal geflochtene Bewehrung verlieh dem System seinen Namen.“²²⁰ [...] Mit dem System der betonähnlichen Module realisierte Wright über fünfzig Projekte, unter anderem die in [Abbildung 19](#) dargestellte kalifornischen Villen Ennis House (1924), Samuel Freeman House (1924) und das Florida Southern College (1954). Der Umgang mit dem Blockformat war dabei für ihn essenziell.“²²¹ Eckert und Eckert differenzieren unter dem Begriff der Archetypen der Konstruktion zwischen dem Filigranbau und dem Massivbau. Im letzteren wird unterteilt in das erste monolithische Prinzip (Schichtung und Fügung) und das zweite monolithische Prinzip (Schalung und Guss).²²² Diese Einordnung nimmt Bezug auf den Prozess der Konstruktion. Wrights System lässt sich entsprechend dem ersten monolithischen Prinzip des Schichtens und Fügens zuordnen, da die Betonmodule im ursprünglichen Sinn geschichtet und gefügt werden. „Der Umgang mit dem betonähnlichen Werkstoff an sich entspricht wiederum dem zweiten monolithischen Prinzip von Schalung und Guss. Das Prinzip beruhte auf einem Wandbaustein, der in variierenden Dimensionen von 4 bis 6 Fuß deutlich größer war als das herkömmliche Ziegelformat. Das System verzichtete auf das klassische nasse Mörtelbett. Durch die geflochtene Bewehrung und die Materialeigenschaften des Mörtels im Verbund mit der Stahlbewehrung wurden die statischen Anforderungen optimal zusammengebracht.“²²³ Sicherlich beruhte die

²¹⁹ Hollmann-Schröter 2024 (wie Anm. 171), S. 221.

²²⁰ Vgl. Kenneth Frampton, »The Text-Tile Tectonic«, in: Robert McCarter (Hg.), *Frank Lloyd Wright. A primer on architectural principles*, New York, N.Y. 1991, S. 124–149, hier S. 139–141.

²²¹ Edward Losch, »The Textile Block System.«, in: *Concrete international: ci; the magazine of the American Concrete Institute, an international technical society*, 2012, 34, 3, S. 45–54, hier S. 45.

²²² Vgl. Piet Eckert und Wim Eckert (Hg.), *Ontologie der Konstruktion. Raumwirkung in der Architektur*, Zürich 2024, S. 12–13.

²²³ Vgl. Jeffrey M. Chusid, *Preserving the Textile Block at Florida Southern College*, New York 2009, S. 12.

Entwicklung der *textile blocks* auf der Ausrichtung hin zu einer neu zu gewinnenden Effizienz. Sie ist jedoch darüber hinaus ein offensichtliches Gestaltungsmittel. 'This system arose from Wright's desire to wed machine-age production techniques with organic architecture – the principle that a structure should look as though it naturally grew on a site – so as to make his design affordable to people of modest means.'²²⁴ Das Beispiel verdeutlicht das schon damalige Anliegen der Entwicklung modularer Systeme, die zugleich einen gestalterischen Anspruch umsetzen.



Abb. 19: Frank Lloyd Wright, Ennis House, textile blocks, Los Angeles, 1924 © Alan M. Pavlik

²²⁴ Hollmann-Schröter 2024 (wie Anm. 171), S. 221.

2.3.2.2 Systematisierung des Wohnungsbaus durch die Großtafelbauweise

Eine wesentliche Veränderung zu der zuvor dargestellten kleinteiligen modularen Handhabung vollzog sich mit den die sich wandelnden Vorfertigungstechnologien bei Betonkonstruktionen, die eine großformatige Herstellung ermöglichten. „Die in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts entwickelte Großtafelbauweise leistete gerade in den sozialistisch geprägten Staaten, aber auch weltweit, Abhilfe gegen den herrschenden Druck auf dem Wohnungsmarkt. Nach der Architekturhistorikerin Hnilica geht ‚die flächendeckende Durchsetzung des Systembaus hier einher mit der Typisierung aller Bauteile, Normierung aller Grundrisse und der zentralen Steuerung aller Abläufe.‘²²⁵ Das Bauen als analytischer Prozess wurde zu einer Ingenieurstätigkeit deklariert, die von einem technischen Prinzip bestimmt wurde. Der politische Druck aufgrund der Notwendigkeit, sehr schnell sehr viel Wohnraum zu generieren, bedingte eine einseitige Optimierung der Systeme. So fand zum Beispiel in der damaligen DDR eine zunehmende Vereinheitlichung in der Bauweise statt; als Nachfolger des Typus P2 setzte sich die Wohnungsbauserie WBS 70 durch.²²⁶ Das höchst standardisierte System der Architekten Wilfried Stallknecht und Achim Felz basierte auf Gerhard Kosels ‚Einheitssystem Bau‘.²²⁷ Es ließ sich durch die Kombination von Grund- und Ergänzungssegmenten zu unterschiedlichen Baukörpern fügen und suggerierte so den Weg zu einer größeren Individualisierung weg von der Einheitsplatte.²²⁸ Der mögliche Gestaltungsfreiraum wurde wiederum aus wirtschaftlichen Gründen nicht ausgeschöpft. Betrachtet man die Art der konstruktiven Fügung der prägnanten Betonbauteile, so gewinnt neben der flächigen geschosshohen Tafel an sich die Fuge bei systematisierten Elementen an Bedeutung. Die starke Repetition und als Folge konstituierte Monotonie gebauter Zeitzeugen zu Zeiten der Industrialisierung hat die Architekturgeschichte und bauliche Umwelt nachdrücklich geprägt.“^{229,230}

„Mit der Einführung des Systemgedankens war in der Vergangenheit oftmals ein begrenztes Maß an Varianz möglich geworden. Man könnte daraus schlussfolgern, dass das System die Gestaltungsvielfalt vor allem konterkariert und damit die Leistung der Architekten und Architektinnen obsolet macht. Letztere diskutieren das Bauen im System noch heute kontrovers und lehnen es oft ab.“²³¹ Zwei historische und zwei zeitgenössische gebaute Beispiele zeigen im Folgenden jedoch aus Sicht der Autorin erhebliche Potenziale und Gestaltungsmöglichkeiten auf, die sich im Bauen mit System für Betonkonstruktionen ergeben können.

²²⁵ Sonja Hnilica, *Der Glaube an das Große in der Architektur der Moderne. Großstrukturen der 1960er und 1970er Jahre*, Zürich 2018, S. 143.

²²⁶ Vgl. Bundesministerium für Raumordnung Bauwesen und Städtebau (Hg.), *Leitfaden für die Instandsetzung und Modernisierung von Wohngebäuden in der Plattenbauweise. Wohnungsbauserie 70 - WBS 70*, unter Mitw. von Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e.V. an der TU Berlin, 1997. Aufl., Bonn- Bad Godesberg 1997.

²²⁷ Christine Hannemann, *Die Platte. Industrialisierter Wohnungsbau in der DDR*, Braunschweig/Wiesbaden 1996, S. 74.

²²⁸ Vgl. Hnilica 2018 (wie Anm. 234), S. 153–154.

²²⁹ Nowak 2021 (wie Anm. 50), S. 34.

²³⁰ Hollmann-Schröter 2024 (wie Anm. 171), S. 221.

²³¹ Ebd., S. 222.

2.3.2.3 Konstruktive Fügung im System

Wegweisend ist noch heute die Haltung Angelo Mangiarottis, der es vorbildlich verstand, industrielle Betonsysteme als Gestaltungsmittel von Architekten bereitzustellen. Mangiarotti selbst definierte den für ihn gültigen Zusammenhang zwischen der Bedeutung der industriellen Möglichkeiten, welche in den 70er-Jahren in breiter Masse zur Verfügung standen, und deren Verwendung neu und deklarierte diese Konstruktionen zum „industriellen Produkt“. Er plädierte dafür an die Planerinnen und Planer, das Anwendungsfeld vom ursprünglichen Kontext („spezielle Verwendung“) zu erweitern und in „spontanere und differenziertere“ Anwendung zu transferieren.²³² „[...] man muß ein anderes Verhältnis zwischen der Produktion des Mittels und seiner Verwendung schaffen; - ein Verhältnis, das auch die Wünsche und Vorstellungen der späteren Nutzer berücksichtigt. Es geht darum, Bedingungen zu schaffen, welche die schöpferische Arbeit des Architekten fördern und nicht ausschalten ...“²³³ Aus dieser Haltung heraus entwickelte Mangiarotti zahlreiche Bausysteme in Stahlbeton mit jeweils spezifischen baukonstruktiven Lösungen. Es ist ein Zeichen höchster Ingenieurleistung, wie er in der Stahlbeton-Vorfertigung Haupt- und Nebenträger sowie Stütze in einem Punkt konstruktiv zusammenbrachte und den Lastabtrag sichtbar machte. Sein erstes Bausystem entstand 1964 für die Firma Elmag in Lissone. Kennzeichnend ist die „Hammerform mit H-Querschnitt“, in welche die Deckenplatten und Träger gelegt wurden. Als Weiterentwicklung brachte er das System „U70 Isocell“ im Jahr 1969 für die Firma Lema bei Como hervor. Im Jahr 1972 entwickelte er das System „Briona“. Die Systeme waren als erweiterbare Systeme geplant und bestanden vollständig aus vorgefertigten Elementen, was die Montagezeit deutlich verkürzen konnte. Mangiarotti zeigte ein ausgesprochenes Gespür im Umgang mit Betonfertigteilen und deren Detaillierung, was sich unter anderem bei der Realisierung des sakralen Raums der Chiesa di Nostra Signora della Misericordia offenbart (Abb. 20). Seine Entwicklungen dienen als Beleg, dass die schöpferische Arbeit des Architekten mit den Mitteln der Zeit zu architektonischer Qualität führen können. „The use of precast elements for the entire building enabled assembly and build-up within just 15 days. The element designs followed force-flow and structural performance criteria, and the component designs significantly contributed to the distinct architectural appearance of the building.“²³⁴ Mangiarotti hatte die Möglichkeiten neuer Fertigungstechnologien erkannt und durch seine Herangehensweise für eine neue Baukultur nutzbar gemacht. Schon Krippner konstatierte 1999 in seinem Beitrag *Der Systemgedanke in der Architektur – Bausysteme aus Stahlbeton von Angelo Mangiarotti*, dass Mangiarottis Ansatz der Erneuerung ohne weiteres in die heutige Zeit übertragbar ist: „Aber die Welt der Technik und die damit verbundene maschinelle Technologie zur Herstellung von Bauteilen und -elementen ist für viele

²³² Angelo Mangiarotti, »Industrialisiertes Bauen und Nutzerbeteiligung = Construction industrialisée et participation de l'utilisateur = Industrialized building and user participation«, in: *Bauen + Wohnen = Construction + habitation = Building + home* :, 31 (1977), Nr. 6, S. 225–227, hier S. 225–226.

²³³ Ebd., S. 225..

²³⁴ Jutta Albus, *Prefabrication and automated processes in residential construction*, Berlin 2018, S. 112.

Architekten kaum ein Thema der Auseinandersetzung. Dabei stellt sich heute mehr denn je die Aufgabe, die Gegebenheiten der Produktionsmethoden auch für die Entwurfs- und Entwicklungsarbeit von Gebäuden konstruktiv gestaltend dienstbar zu machen.“²³⁵



Abb. 20: Mangiarotti, Morassutti, Favini, Chiesa di Nostra Signora della Misericordia, Baranzate di Bollate, 1957 © Marco Introini

Die Nutzung der industriellen Mittel der Zeit im Umgang mit Betonkonstruktionen zur konstruktiven Ausgestaltung führte zugleich zu einer wirtschaftlichen Optimierung und gestalterischen Neuerung und ist damit ein Beispiel für die Umsetzung von Systemen mit Gestaltungsanspruch.

²³⁵ Roland Krippner, »Der Systemgedanke in der Architektur - Bausysteme aus Stahlbeton von Angelo Mangiarotti«, in: *Beton- und Stahlbetonbau*, 94 (1999), Nr. 11, S. 476–482, hier S. 481.

2.3.2.4 Konstruktionsprinzipien und Nutzerantizipation

„Ein weiteres viel zitiertes Beispiel für den systematisierten Wohnungsbau mit höchst individuellem Charakter ist die zwischen 1972 und 1977 realisierte Wohnanlage an der Genter Straße in München von Otto Steidle, Doris Thut und Ralph Thut (Abb. 21). Die Grundlage des Entwurfs ist ein starres, konstruktives Raster aus Betonfertigteilen. Vorrangig ging es Steidle darum, dass die Bewohnerinnen und Bewohner das eigene Wohnen innerhalb dieses modularen Rasters aktiv mitgestalten können.“^{236,237}

Mit der Wohnanlage generierte Steidle durch das rigide Tragwerk eine Struktur, die durch den Einsatz von Erschließungselementen und Galerien wieder an Leichtigkeit gewinnt. Gerhard Ullmann beschrieb es wie folgt: „... immer wieder wird man gezwungen, die Verbindungsstellen zu suchen, an denen die Bewegung in statische Ordnung übergleitet.“²³⁸ Das Fügen von Elementen aus einem Baukasten gewinnt heute wieder an Aktualität. Zur Etablierung eines Ordnungsprinzips mit hoher Gestaltungsvielfalt bedarf es laut Ullmann des Abgleichs von Struktur und Funktion: „Jede Planung von Wohngebäuden, die auf Veränderungen angelegt sind, erfordert von Beginn an eine genaue Abstimmung zwischen Konstruktion und Funktion. Steidle hat diesen Dialog mit den Bewohnern frühzeitig gesucht und Vorschläge und Änderungswünsche in ein flexibles Planungskonzept eingebunden. Eine tragende Konstruktion aus Betonfertigteilen erlaubt es den Bewohnern, Veränderungen innerhalb der 7,20 m breiten Wohneinheiten vorzunehmen.“²³⁹

Der Architekt Florian Kossak schilderte Otto Steidles Ansatz so: „Es muss nicht das menschliche Handgemachte gegen das mit der Maschine industriell Gefertigte stehen, nicht natürlich gegen unnatürlich. Es geht [Steidle] um eine erweiterte Sicht, eine erweiterte Möglichkeit für die Errichtung der menschlichen Behausung. Es geht um ‚Erleichterung‘ – leicht herstellbar, leicht handhabbar, leicht gestaltbar, um Leichtigkeit in der Planung, im Bauen und im Materialaufwand. Es sind ‚offene Systeme‘, die auf vielfältige und unterschiedliche Zusammensetzungen verschiedener Bauelemente abzielen. Ihre Koordinierbarkeit, ihre Kombinierbarkeit ist eine bei der Entwicklung erforderliche Bedingung und Qualität.“^{240,241} Dieses Prinzip hat Otto Steidle beeindruckend umgesetzt, so dass das Objekt an der Genter Straße noch heute seine Strahlkraft hat.²⁴²

²³⁶ Vgl. Ulrich Conrads und Manfred Sack (Hg.), *Otto Steidle*, unter Mitw. von Otto Steidle, Braunschweig 1985 (*Reißbrett* 3), S. 5–6.

²³⁷ Hollmann-Schröter 2024 (wie Anm. 171), S. 222.

²³⁸ Gerhard Ullmann, »Zeit des Bauens, Zeit des Alterns – Ein frühes Wohnbauexperiment von Otto Steidle und Partner in der Genter Straße in München«, in: *db*, 2 (1993), S. 104–112, hier S. 104.

²³⁹ Ebd., S. 112.

²⁴⁰ Florian Kossak (Hg.), *Otto Steidle: bewohnbare Bauten*. = *Otto Steidle: structures for living*, Zürich 1994, S. 94.

²⁴¹ Die Begriffe „Erleichterung“ und „offene Systeme“ sind Zitate Steidles.

²⁴² Vgl. Hollmann-Schröter 2024 (wie Anm. 171), S. 222.



Abb. 21: Steidle, Thut und Thut, Wohnanlage Genter Straße, München, 1972 © Klaus Kinold-Stiftung Architektur+Fotografie

Die von Steidle bereitgestellte konstruktive systematisierte Betonstruktur erlaubt in besonderem Maße eine individuelle Aneignung des Raums durch den Nutzer und ist damit Beispiel für die Umsetzung eines definierten Systems, das im Zusammenspiel mit einer leichten Ausbaustruktur eine Individualisierung durch den Nutzer zulässt.

Arge Summacumfemmer Büro Juliane Greb

Die von Steidle realisierte Herangehensweise der Schaffung einer konstruktiven Struktur als Grundlage für eine Nutzungsflexibilität können auch für die Herausforderungen heutiger Bauaufgaben zur Erstellung von wandelbaren Strukturen mit einem flexiblen Raumkonzept herangezogen werden. Das in [Abbildung 22](#) dargestellte genossenschaftliche Wohnhaus San Riemo (2020) der Arge Summacumfemmer Büro Juliane Greb zeigt eine konzeptionelle Parallele zur Genter Straße. Hier wird entsprechend über die Struktur eine maximale Antizipation von Nutzungen ermöglicht. Das Maß an Adaptivität und Flexibilität fußt auf einer gefügten massiven Struktur, die Grundrissvariationen zulässt. Das Betontragwerk ist so dimensioniert, dass auf weitere tragende und damit raumteilende Wände verzichtet werden kann.



Abb. 22: Arge Summacumfemmer Büro Juliane Greb, Wohnhaus San Riemo, München, 2020 © Florian Summa

Der Zusammenhang aus System und Varianz liegt bei diesem Beispiel in der Schaffung einer systematisierten, dauerhaften Konstruktion, die eine individuelle und wandelbare Bespielung über die gesamte Lebensdauer des Gebäudes ermöglicht.

Architekten FAR frohn&rojas

Ein weiteres Beispiel für die Umsetzung eines konstruktiven Systemansatzes, der ein gesteigertes Maß an Individualisierung zulässt, ist das Wohnregal (2019) in Berlin (Abb. 23). Die Architekten FAR frohn&rojas haben für das Projekt ein katalogisiertes System aus Betonfertigteilen entwickelt, das in seinen Dimensionen projektspezifisch angepasst werden kann. Das entwurfsleitende Ziel bestand darin, stützenfrei von Fassade zu Fassade zu spannen, um so maximale Freiheiten in der Grundrissorganisation zu ermöglichen. Das hier entwickelte Prinzip des Fügens verweist auf eine universelle Systementwicklung, erlaubt jedoch durch die teilautomatisierte Fertigung Spielraum für die objektspezifische Anpassung. „Das Wohnregal ist ein gelungenes Beispiel für die Umsetzung einer individualisierbaren Standardisierung. Struktur und Fügung werden im Innenraum inszeniert. Als Antithese zum verkleideten Raum führt die Offenlegung des Tragsystems zu einer Ästhetisierung der Fügung. Der Umgang mit der Detaillierung des konstruktiven Knotens verweist auf Mangiarotti und stellt darüber hinaus einen Bezug zum Prozess der Konstruktion her, der gerade in der Vorfertigung herausfordernd ist. Gegenüber den Tendenzen zu einem Verkleiden der eigentlichen Struktur kann das Sichtbarmachen der Konstruktion und dessen Fügung eine Lösung sein, Kosten im Wohnungsbau zu reduzieren.“²⁴³



Abb. 23: FAR frohn&rojas, Wohnregal, Berlin, 2019 © David von Becker

²⁴³ Ebd.

Das Beispiel Wohnregal zeigt, wie durch die Schaffung einer robusten Betonstruktur aus Betonfertigteilen, die skaliert in einem anderen Projekt Anwendung finden können, eine Individualisierung durch den Nutzer erfolgen kann.

Die Ausführungen in diesem Kapitel weisen darauf hin, dass die Einführung eines Systemansatzes unterschiedlich erfolgen kann. Ziel dieses Gliederungspunktes ist es zu eruieren, ob durch die Etablierung eines Systemgedankens generell eine Varianz abgebildet werden kann. Die gebauten Beispiele der Vergangenheit sowie die zeitgenössischen Projekte belegen, dass eine systematisierte Betonkonstruktion, die weitestgehend über die Zerlegung und Fügung vorgefertigter Betonkomponenten erfolgt, sehr wohl eine gestalterische Vielfältigkeit abbilden kann und Individualisierungsmöglichkeiten in der Nutzung bestehen.

2.3.2.5 Anpassungsfähige Systematisierung von Betonkonstruktionen

Das Kapitel zur Eingrenzung der Systematisierung von Betonkonstruktionen wurde mit der Frage eingeleitet, wie durch die Anwendung neuartiger, innovativer Fertigungstechnologien anpassungsfähige Betonkomponenten innerhalb eines Systemansatzes entstehen können (→2.2.3 Aufstellung von Verfahrensprinzipien am Beispiel der Betonforschung). Dabei geht die Betrachtung über die bisher diskutierte Bereitstellung anschlussfähiger Komponenten und die Entwicklung konstruktiver Fügeprinzipien innerhalb eines Systembaukastens hinaus. Vielmehr sollte die Kopplung digitaler Entwurfswerkzeuge mit einer automatisierten Produktion bei entsprechender Abbildung einer Individualisierten Standardisierung eine Justierung der konstruktiven Bauteile bereits innerhalb des Fertigungsprozesses ermöglichen. Dafür bildet die eingangs thematisierte Systematisierung auf konstruktiver ebenso wie auf Prozessebene die Grundlage. Mark et al. beschreiben mit Bezug auf die Herausforderungen im Sonderforschungsprogramm „SSP 2187: Adaptive Modulbauweisen mit Fließfertigungsmethoden - Präzisionsschnellbau der Zukunft“ die Anpassungsfähigkeit von Modulen wie folgt: „Mit der Modularisierung ist hier allerdings kein Baukastensystem mit großen und schweren Fertigteilen, wie etwa im industriellen Hallenbau gemeint. Die Module sind nicht ‚fertig‘, sondern sie sind adaptiv, d. h., sie können innerhalb zuvor definierter Grenzen on the fly, also innerhalb der Produktion, an die jeweiligen Anforderungen angepasst werden (mass customization).²⁴⁴ Nur solche adaptiven Module können den Anspruch erfüllen, individuelle und ästhetische Baustrukturen zu erschaffen.“²⁴⁵

Diese Denkweise der Verknüpfung von digitaler Planung, konstruktiver Modularisierung und automatisierter Fertigung innerhalb eines kontinuierlichen Prozesses beleuchtet das aktuelle Spannungsfeld der Individualisierten Standardisierung und belegt die zu Beginn positionierte Fragestellung.

„Bei all den beschriebenen Kontroversen zwischen Systemgedanke und Gestaltungsvarianz ist unumstritten: Die Aufgabe der Architektinnen und Architekten wird zukünftig durch die Umsetzung der Individualisierten Standardisierung nicht gemindert, sondern vielmehr umso mehr gefordert bei der Realisierung qualitativ hochwertiger Architektur auf dem Weg zu einer nachhaltigen Entwicklung im Zeitalter der Digitalisierung.“²⁴⁶ Genau diese Herausforderungen müssen die Planerinnen und Planer aktuell als Chance begreifen und die neuen Mittel aus der robotischen Fertigungstechnologie, aber auch neuartiger Materialtechnologie und zur Verfügung stehender Planungswerkzeuge zusammenbringen und zu etwas Individuellem zusammenzuführen. Ziel sollte es im ersten Schritt sein, funktionierende Konzepte in einen konstruktiven Systemansatz zu überführen und traditionelle Bausysteme abzulösen. Standardisierte Verfahren und Prozesse können dabei die Grundlage zukunftsfähiger individualisierter Bauweisen bilden, wenn diese

²⁴⁴ Vgl. Mark et al. beziehen sich in der Definition der seriellen Maßanfertigung (mass customization) auf die Quelle: (Koren 2010 (wie Anm. 168), S. 73). Dort wird der Unterschied zwischen serieller Maßanfertigung und personalisiertem Produkt weiter vertieft.

²⁴⁵ Mark u. a. 2021 (wie Anm. 183), S. 246.

²⁴⁶ Hollmann-Schröter 2021 (wie Anm. 15), S. 196.

als adaptive Systeme²⁴⁷ geplant werden. Diese Annahme belegen die folgenden Beispiele.

2.3.3 Aufstellung von Konstruktionsprinzipien am Beispiel der Betonforschung

Der Betrachtungsraum der Dissertation fokussiert auf die Untersuchung monolithischer Betonkonstruktionen²⁴⁸ nach der Definition der Anforderungen in Abb. 6 (→1.2.3 Eingrenzung monolithische Betonbauweisen). Bisher stehen noch keine vorgefertigten, monolithischen Betonwandkonstruktionen mit Dämmwirkung in Form marktreifer Produkte oder zertifizierter Verfahren zur Herstellung adaptiver Betonsysteme zur Verfügung, die die Anforderungen an Tragfähigkeit, Dämmwirkung und Varianz vereinen. Daher wird der Betrachtungsrahmen von rein monolithischen Systemen mit Dämmwirkung an dieser Stelle erweitert.

Nach der Herleitung einer Umsetzung gelungener Systemansätze anhand von Zeitzeugen der Geschichte, werden im Folgenden unterschiedliche Prinzipien für eine gelungene Einführung eines adaptiven Systemansatzes bei aktuellen Betonkonstruktionen dargestellt. Diese implizieren eine Anpassungsfähigkeit der Strukturen. Die Auswahl der exemplarischen Referenzen aus der Betonforschung erfolgt mit der Zielsetzung, ein möglichst breites Spektrum unterschiedlicher Konstruktionsprinzipien im Kontext einer Systematisierung abzubilden, die das Potenzial im aktuellen Spannungsfeld zwischen Systemansatz und Gestaltungsvielfalt verdeutlichen. Die konstruktive Herangehensweise der Systematisierung ebenso wie das Maß der Modularisierung sind bei den anschließend betrachteten Systemen sehr verschieden. Sie reichen vom Bauteil bis hin zum größten Modul einer Raumzelle. Jede Referenz verdeutlicht einen spezifischen Zugang zur Umsetzung anpassungsfähiger Strukturen.

Bei der Betrachtung wird vorrangig die Umsetzung eines Systemansatzes untersucht und auf das Maß der Varianz hin geprüft. Die Beschreibung der Beispiele folgt folgender Struktur: Benennung des Konstruktionsprinzips in der Überschrift, Herkunft und Bezeichnung des Forschungsprojekts, Kurzbeschreibung, konstruktive Machart, Erkenntnisgewinn vor dem Forschungsinteresse.

²⁴⁷ Vgl. Erläuterung im Glossar

²⁴⁸ Gemeint sind hier die in der Dissertation zentral stehenden vorgefertigten monolithischen Konstruktionen mit Dämmung.

2.3.3.1 Prinzip 1: Baukastensystementwicklung am Beispiel „Intelligente Modularisierung“

Herkunft und Bezeichnung:

Sonderforschungsprogramm SPP 2187 - Adaptive Modulbauweisen mit Fließfertigungsmethoden: Präzisionsschnellbau der Zukunft²⁴⁹

Teilprojekt: Intelligente Modularisierung für den skalierbaren Betonbau durch Adaption der Methoden zur Baukastenentwicklung

Kurzbeschreibung:

Die interdisziplinäre Forschungsleistung des Instituts für Produktentwicklung (IKPE) und des Instituts für Massivbau und Baustofftechnologie (IMB) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) ist ein Teilprojekt des Sonderforschungsprogramms SPP 2187 (→2.3.4 Résumé: Adaptive Konstruktionssysteme als Mittelweg aus Standardisierung und Individualisierung). „Ziel des Schwerpunktprogramms ist es, die grundlegenden wissenschaftlichen Methoden für eine Herstellung von teiladaptiven Modulen aus Hochleistungsbeton in industrieller Fließfertigung zu entwickeln. Die Module sollen Seriencharakter besitzen und im Schnellbau assemblierbar sein. Die optische Individualität der zusammengesetzten Tragstruktur ist dabei zu erhalten, so dass skalierbare, adaptive und auch über die Nutzungszeit wandelbare Module und passende Fertigungskonzepte gesucht sind.“²⁵⁰ Das ausgewählte Forschungsprojekt widmet sich der Baukastensystementwicklung mit standardisierten Betonbauteilen und damit der Verknüpfung der Faktoren Konstruktion und Technik vor dem Hintergrund, eine gestalterische Varianz für Tragwerke bereitzustellen.

²⁴⁹ Vgl. Agemar Manny, Lothar Stempniewski und Albert Albers, »Adaptive Modulbauweisen mit Fließfertigungsmethoden: Präzisionsschnellbau der Zukunft (DFG SPP 2187): Intelligente Modularisierung für den skalierbaren Betonbau durch Adaption der Methoden zur Baukastenentwicklung«, https://www.imb.kit.edu/mb/download/Poster_de.pdf (abgerufen am 28. April 2024).

²⁵⁰ DFG Deutsche Forschungsgemeinschaft, »SPP 2187: Adaptive Modulbauweisen mit Fließfertigungsmethoden - Präzisionsschnellbau der Zukunft«, <https://gepris.dfg.de/gepris/projekt/402702316?context=projekt&task=showDetail&id=402702316&> (abgerufen am 28. April 2024).

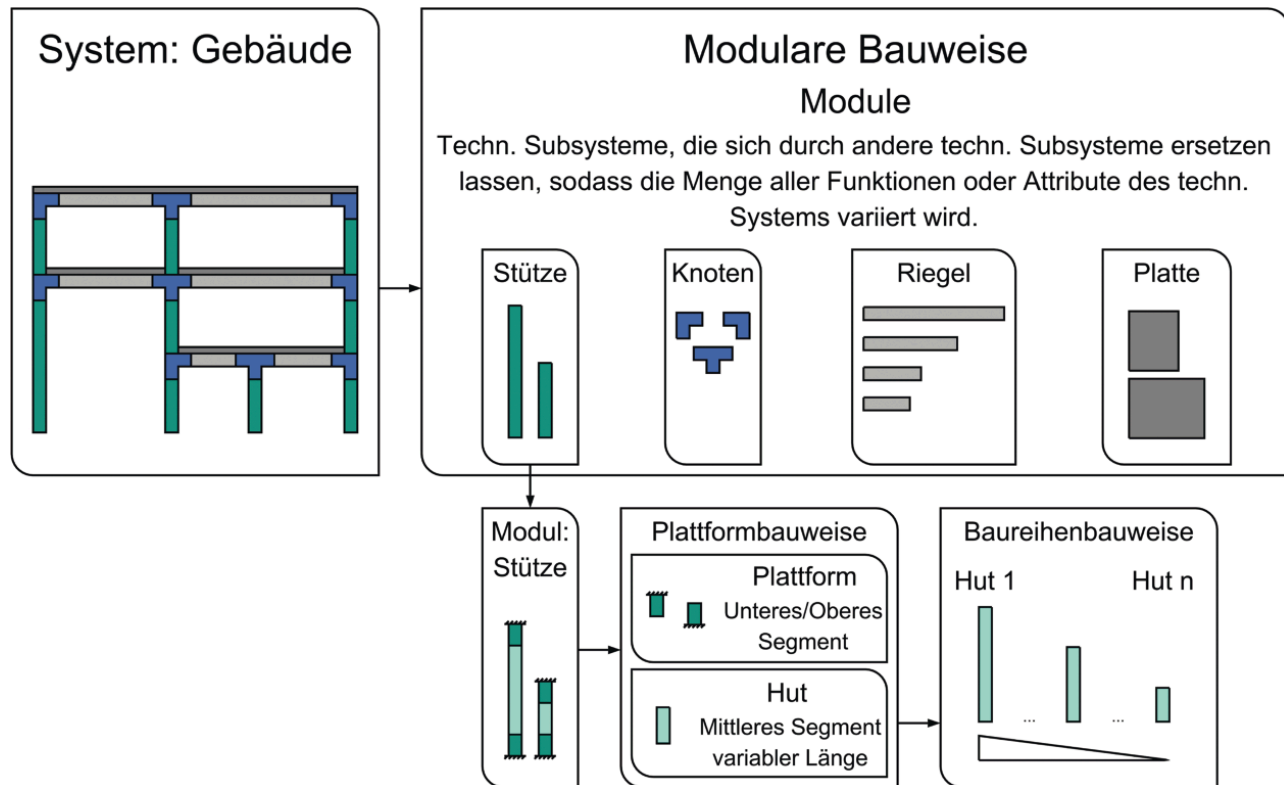


Abb. 24: Fraktaler Charakter der Standardisierungsmethoden am Beispiel einer Gebäudekonstruktion aus Stahlbetonbauteilen

© Agemar Manny²⁵¹

Konstruktive Ausbildung:

Es werden gezielt biegesteife Rahmenkonstruktionen mit stabförmigen Bauteilen aus ultrahochfestem Beton entwickelt (Abb. 24). Die standardisierten Bauteile werden so ausgelegt, dass sie durch einen optimierten Querschnitt für möglichst viele Lastfälle in einem Anwendungskorridor erstellt sind und somit eine erhebliche Massenreduktion vorweisen. „Diese auf baupraktische Maße gerundeten Querschnittswerte ermöglichen die Errichtung möglichst vieler verschiedener Skeletttragwerke bei gleichzeitig möglichst geringer Anzahl unterschiedlicher Modulvarianten, sodass gemäß Baukastenstrategie eine maximale externe Vielfalt bei möglichst geringer interner Vielfalt des Baukastensystems erreicht werden kann.“²⁵² Einen Forschungsschwerpunkt bildet zudem die Realisierung einer reversiblen Bauteilfügung für Betonbauteile, welche besondere Ansprüche an die Kraftübertragung stellt (Abb. 25). „Ein doppelkonisches Zusatzelement ermöglicht aufgrund seiner Form ohne aufwändigen Einsatz technischer Hilfsmittel eine präzise Bauteilfügung, die zudem reversibel ist und damit einen schadensfreien Rückbau modularer Tragwerke zulässt.“²⁵³ Diese Fügetechnologie erfordert extreme Genauigkeiten bei der Bauteilerstellung, die durch die Vorteile der additiven Fertigung, in diesem Fall durch die Verwendung einer 3-D-gedruckten

²⁵¹ Abb. 8 in: Mark u. a. 2021 (wie Anm. 183), S. 249.

²⁵² Agemar Manny u. a., »Modularisierung für den skalierbaren Betonbau: Baukastenentwicklung und Schnittstellenkonzeption«, in: *Betonwerk international*, 2023, Nr. 4, S. 34–35, hier S. 34.

²⁵³ Ebd., S. 34–35.

2.3.3.2 Prinzip 2: vorgefertigte Tafel-Komponenten am Beispiel „Norra Tornen“

Herkunft und Bezeichnung:

Wohnturm Norra Tornen, Stockholm, 2020

Reinier de Graaf und OMA

Kurzbeschreibung:

Das Projekt verdeutlicht, wie im großen Maßstab der Typologie eines Wohnturmes die Verwendung von Betonfertigteilen eine konstruktive wie gestalterische Qualität generieren kann. Durch das Stapeln von Kuben auf Basis eines vorgefertigten, modularen Systems mit einer begrenzten Anzahl an Modulen konnten zwei asymmetrisch geformte Zwillingstürme entstehen. Der Verwendung einer großen Anzahl von Fassadentafeln im System von über 2900 Fertigteilen wurden maximal große Fensteröffnungen an einer Seitenfläche des Würfels entgegengesetzt (Abb. 26).²⁵⁴



Abb. 26: Wohnhochhaus in vorgefertigter Betonbauweise, Reinier de Graaf/OMA, Norra Tornen, Stockholm, 2020

© Photo by Laurian Ghinitoiu, courtesy of OMA

²⁵⁴ Vgl. weiter Projektinformationen:

OMA, »OMA OFFIC WORK: Norra Tornen«, <https://www.oma.com/projects/norra-tornen> (abgerufen am 28. April 2024)

Konstruktive Ausbildung:

Bei den Fertigteilen handelt es sich um Sandwich-Konstruktionen mit einer additiven Kerndämmung. Innerhalb der Dissertation mit Bezug auf monolithische Konstruktionen, wie diese im Kapitel IV in der Synopse dreier Betontechnologien analysiert werden, kann daher nur die konstruktive Idee des Projekts zum Vergleich herangezogen werden.

Die Struktur des Gebäudes wird von den Aussteifungskernen mit zusätzlichen Scherwänden und Stützen gebildet. Aus diversen Fertigteilen der Wandscheiben sowie der Boden- und Deckenplatten werden nach außen offene Boxen zusammengefügt, die dann mit der Glasfassade und den prägnanten Fassadenkomponenten ergänzt werden (Abb. 27). Aufgrund der in Schweden vorwiegend kühlen Temperaturen sind die Zeitfenster zur vor-Ort-Betonage deutlich begrenzt, was die Verwendung vorgefertigter Komponenten begünstigte. Durch den flächendeckenden Einsatz der Betonfertigteile²⁵⁵ konnte der Fertigungsprozess optimiert und damit die Bauzeit signifikant verkürzt werden, was wiederum positiven Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit hatte.

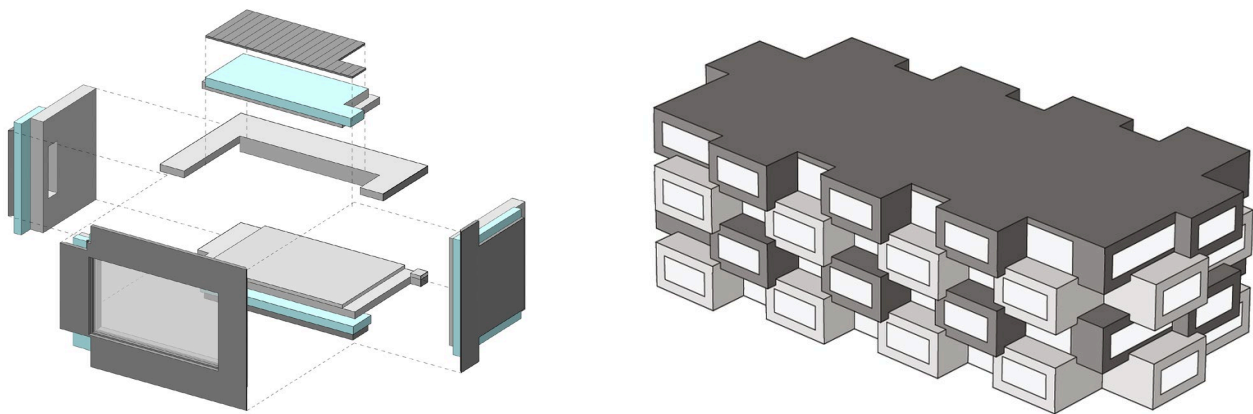


Abb. 27: Isometrische Darstellung der Sandwichbauteile und des Prinzips der Stapelung © OMA

Erkenntnisgewinn vor dem Forschungsinteresse:

Mit der Darstellung des Projekts sollen die allgemeinen Potenziale der Systematisierung im Kontext von Konstruktionsprinzipien hinsichtlich prozessualer Wirtschaftlichkeit, architektonischer Varianz und konstruktiver Qualität hervorgehoben werden. Die Modularisierung erfolgt im Maßstab der raumbegrenzenden vertikalen und horizontalen Tafeln. Das Fügeprinzip der Tafeln zu von außen ablesbaren Raummodulen ist nicht offensichtlich und die Module addieren sich zu einer geometrischen Figur. Der Entwurf des konstruktiven Systems resultiert trotz einer starken Repetition in einer einzigartigen Wirkung. Die Rippenstruktur gibt dem Erscheinungsbild eine zusätzliche Tiefe. Seine Haptik erhält der Betonwerkstoff durch die Anreicherung mit dänischem Sandstein und bunten Kieselsteinen. So wird der Fassade neben der konstruktiven und geometrischen

²⁵⁵ Vgl. weiter Projektinformationen:

Reckli GmbH, »Norra Tornen – »Innovationen Tower«: Brutalismus neu gedacht«, Norra Tornen – »Innovationen Tower« (abgerufen am 28. April 2024).

Ausgestaltung durch die Materialisierung bewusst eine Individualität verliehen. Das Prinzip der Systematisierung wäre ohne weiteres auf andere Objekte anzupassen. Varianz besteht zum einen in der Anpassung der Dimension der Tafel, der individuellen Stapelung der Räume in der Horizontalen wie Vertikalen sowie zum anderen in der Anpassung der Materialzusammensetzung und Farbigkeit und bildet damit einen nennenswerten Unterschied zur Großtafelbauweise.

2.3.3.3 Prinzip 3: Raummodule am Beispiel „Gomos Building System“

Herkunft und Bezeichnung:

Gomos Building System²⁵⁶, Biennale Venedig, Italien

Wohnungsbau, Vale del Cambra, Portugal

Summary Architects, Porto



Abb. 28: SUMMARY Studio, „infrastructure-structure-architecture“, La Biennale di Venezia 2016, Italien © Tiago Casanova

Kurzbeschreibung:

Das System Gomos wurde im Rahmen der 15. Architektur Biennale in Venedig, kuratiert durch Alejandro Aravena im Jahr 2016 zum Thema „infrastructure – structure – architecture“ ausgestellt (Abb. 28). Das Architekturbüro Summary aus Portugal hat erreicht, ein Prinzip aus dem Tiefbau umzuwandeln als Lösungsansatz zur Schaffung von seriell gefertigtem Wohnungsbau. Die Vorfertigung generiert Vorteile hinsichtlich des verringerten Zeitaufwands zur Erstellung dieses Wohnraums, aber auch in Bezug auf eine wirtschaftliche Fertigung.

Bei der Entwicklung des Systems war im ersten Schritt eine Vereinfachung des konstruktiven Prinzips notwendig. Bei der Umsetzung eines Systemansatzes ist es wichtig eine Kompatibilität anzubieten (→2.3.1.3 Vorteile offener Systeme). Das Planungsbüro Summary zeigt eindrücklich die zuvor erläuterte Adaptionfähigkeit eines Grundprinzips, welches den unterschiedlichen Anforderungen entsprechend, eine Varianz von architektonischer Qualität hervorbringt (→2.3.4 Résumé: Adaptive Konstruktionssysteme als Mittelweg aus Standardisierung und Individualisierung). So sind drei verschiedene Projekte mit ganz diverser Strahlkraft realisiert beziehungsweise projektiert. Das erste Projekt „Gomos 1“ wurde 2015 in Arouca fertiggestellt, das zweite Projekt „Gomos 2“ wurde 2019 in Vale del Cambra realisiert

²⁵⁶ Vgl. weitergehende Projektinformationen:

Summary Architecture, »Gomos System«, <https://summary.pt/works/gomos-system/> (abgerufen am 28. April 2024).

(Abb. 29) und das dritte „Ci3 – Center for Industrial Innovation and Business Incubator“ befindet sich seit 2017 in Planung (Abb. 30).

Konstruktive Ausbildung:

Das entwickelte System fügt vorgefertigte Beton-Röhren zu Raummodulen zusammen. Die konstruktive Fügung der kerngedämmten Sandwichkonstruktionen erfolgt nach dem Schlüssel-Schloss-Prinzip, so dass mehrere Elemente zu einem Ganzen addiert werden können. Die Röhrenkonstruktion wird jeweils in der Herstellung durch zwei U-Elemente, die wiederum gefügt werden, erstellt. Das Maß der Vorfertigung ist sehr hoch, da die Raummodule im Werk komplett inklusive technischer Ausstattung und Innenausstattung vorgefertigt werden.



Abb. 29: SUMMARY Studio, 1000sqm prefab, Vale de Cambra, Portugal © Fernando Guerra | FG+SG

Erkenntnisgewinn vor dem Forschungsinteresse:

Das Projekt wurde als Konstruktionsprinzip auf Ebene der Systematisierung mit Raummodulen herangezogen, weil die Elemente einen sehr hohen Vorfertigungsgrad erreichen, bei gleichzeitig großer konstruktiver wie gestalterischer Qualität. Die Varianz in der Gestaltung wird durch adaptive Module gewährleistet. Das Prinzip der Konstruktion - nämlich der Sandwich-Aufbau und die Fügung von zwei U-Komponenten - bleibt gleich. Je nach Vorhaben kann die Geometrie des Moduls jedoch variieren, wie beispielsweise in der Dachform und in den Proportionen ganz im Sinne einer projektspezifischen Standardisierung. Da es sich aber immer um die Addition von Raumzellen handelt, bedingt die Art der Fügung eine Repetition. Dem wurde durch eine individuelle Anpassungsplanung entgegengewirkt. Bei der Realisierung des in Abbildung 29 dargestellten Projektes „Gomos“ sind die Module

auf ein andersartiges Sockelgeschoss gestellt, dass ebenfalls aus Betonfertigteilen gefügt wurde und die gleichen Grundmodule zu einer Einheit zusammenbindet. Das in **Abbildung 30** konzipierte „Ci3 – Center for Industrial Innovation and Business Incubator“ kombiniert die Module des Gomos Systems mit anderen Fertigteilen. An einen zentralen Bereich, der auch als offener Arbeitsbereich genutzt wird, docken sich mehrere Raummodule an. Weiteres Potenzial liegt in einer möglichen Erweiterung des Bausystems. Die Architekten beschreiben die Konstruktionszeit als fünfmal schneller im Vergleich zu traditionellen Herstellungsverfahren. Auch wenn die Fertigungskosten der vorgefertigten Systeme vergleichbar sind zu klassischen Bauweisen ergibt sich laut Aussage des Architekturbüros durch die Zeitersparnis eine Gesamtkostenersparnis.²⁵⁷ Kritisch zu betrachten ist die Tatsache, dass das hohe Maß der Varianz jedoch durch die singuläre Anordnung der Module in einer relativ großen Hüllfläche resultiert. Dies erfordert wiederum einen größeren Materialaufwand. Trotz erkennbarer Optimierungsbedarfe belegt das Beispiel auf mehreren Ebenen, wie eine Individualisierte Standardisierung zielführend umgesetzt werden kann.

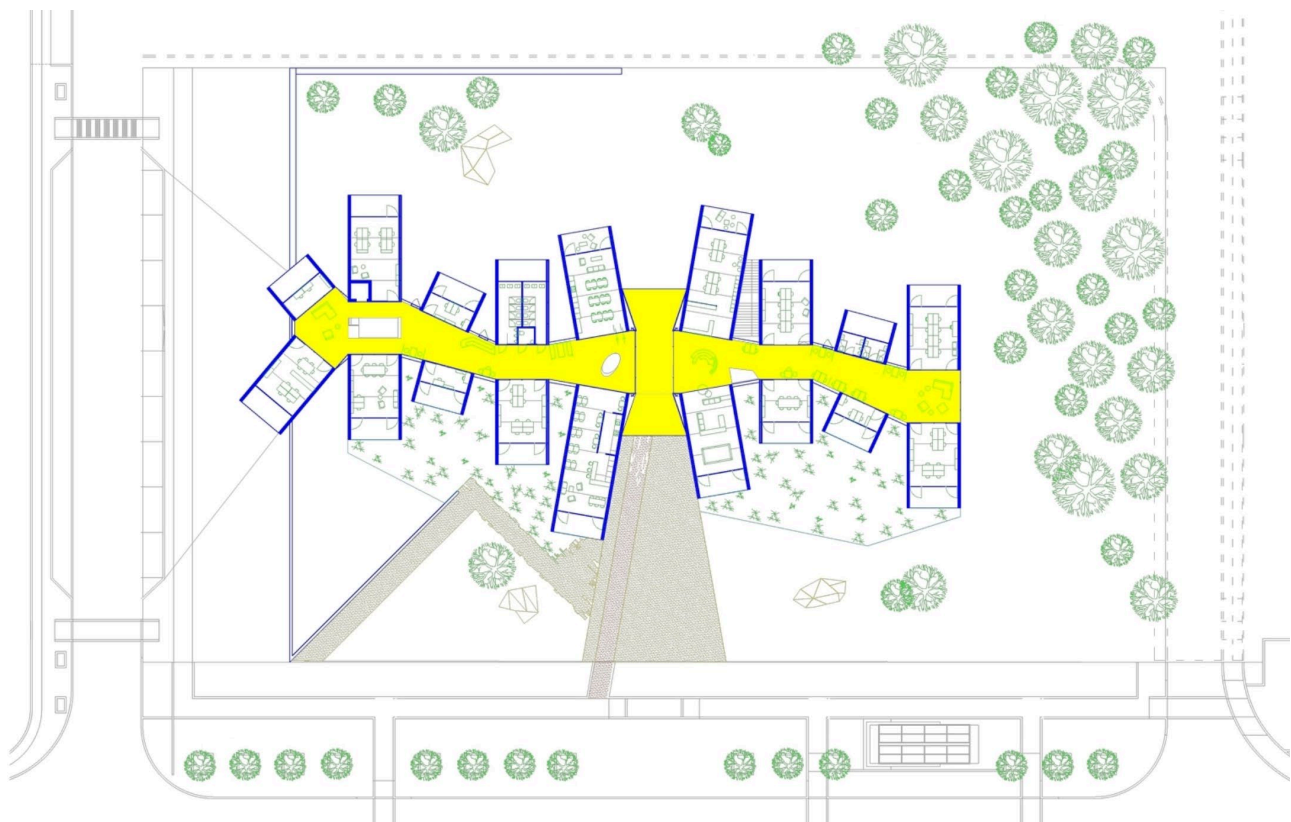


Abb. 30: SUMMARY Studio, Ci3 – Center for Industrial Innovation and Business Incubator, Arouca, Portugal © SUMMARY

²⁵⁷ Dass., »Ci3 – Center for Industrial Innovation and Business Incubator«, <https://summary.pt/works/ci3-center-for-industrial-innovation/> (abgerufen am 15. Mai 2024).

2.3.4 Résumé: Adaptive Konstruktionssysteme als Mittelweg aus Standardisierung und Individualisierung

Planerinnen und Planer als Initiatoren eines austarierten Mittelwegs von System und Varianz

Anhand der zuvor aufgeführten Beispiele wurde dargelegt, dass es Akteurinnen und Akteuren bedarf, die es als Herausforderung annehmen, die Relation von System und Varianz unter Anwendung der zur Verfügung stehenden Hilfsmittel, den digitalen Entwurfs- und Planungswerkzeugen sowie den automatisierten Fertigungswerkzeugen auszugestalten und in die Produktion zu transferieren (Abb. 7). „Die Informationstechnologie wird den menschlichen Intellekt und seine Intuition nicht ersetzen, aber sie kann dabei unterstützen, Entwurfsmethoden und Abbauprozesse integrativ neu zu denken.“²⁵⁸ Die Definition dieses austarierten Verhältnisses setzt sich projektabhängig jeweils anders zusammen. Bisher bestehen diesbezüglich keine harten Faktoren zur Abwägung. Erste Ansätze zur Bewertung des Gleichgewichts aus Effizienz und Varianz liefert Geraedts mit dem „flexibility performance indicator Flex 4.0“²⁵⁹ (→5.3 Fazit).

Auf der einen Seite ist eine rein effizienzgetriebene Applikation eines Systems an sich wenig lösungsorientiert, da sie den aktuell steigenden Ansprüchen nicht gerecht wird (→2.3.1.1 Genese und Ablösung rein effizienzgetriebener Standardisierungsprozesse). „Der kontinuierliche Anstieg des Anspruchsniveaus folgt vielmehr dem kontinuierlichen Anstieg der Einkommen – wie in anderen Konsumbereichen von Urlaub über Pkw bis zu Kleidung und Lebensmittel gilt auch im Wohnen: größer, schöner, weiter (und mehr Bio).“²⁶⁰ Es besteht die technische Infrastruktur und somit in der Theorie die Möglichkeit, Gebäude oder Bauteile als Unikate zu konstruieren und zu erstellen. Ein Beispiel dafür sind 3-D gedruckten Häuser. Eine flächendeckende Umsetzung einer ausschließlich individualisierten Fertigung für das Bauwesen erscheint aus Sicht der Autorin jedoch wirtschaftlich aktuell nicht zielführend. Gerade mit Blick auf eine effiziente Montage vor Ort bringt die Standardisierung Vorteile mit sich. Als Lösungsweg wird daher der in Teilen anpassbare Systemansatz gesehen (→2.3.1.5 Erfolgsfaktor gezielte Anpassungsplanung). Die damit verbundene adaptive Fertigung kann darüber hinaus auf Kapazitäten und Anforderungen des Marktes reagieren.²⁶¹ Folglich kann eine integrale systemische Betrachtung wirtschaftlich wie gestalterisch erfolgreich sein. Dies belegen die gewählten Referenzen aus der Betonforschung (→2.3.3 Aufstellung von Konstruktionsprinzipien am Beispiel der Betonforschung). Das Potenzial der aufgestellten Arbeitsthese liegt in der Zusammenführung dieser konträren Standpunkte der Standardisierung und Individualisierung (Abb. 31), da sich das Bauwesen in vielen Bereichen auf der Suche nach einem geeigneten Mittelweg in diesem Spannungsfeld befindet.

²⁵⁸ Marco Hemmerling und Luigi Cocchiarella, *Informed Architecture. Computational Strategies in Architectural Design*, Cham 2018, S. 16.

²⁵⁹ Vgl. Geraedts 2016 (wie Anm. 198).

²⁶⁰ Harald Simons, »Frühjahrgutachten Wohnimmobilien 2024«, in: ZIA Zentraler Immobilien Ausschuss e.V. (Hg.), *Frühjahrgutachten Immobilienwirtschaft 2024 des Rates der Immobilienweisen* 2024, S. 195–220, hier S. 210.

²⁶¹ Vgl. Koren 2010 (wie Anm. 168), S. 20–21.

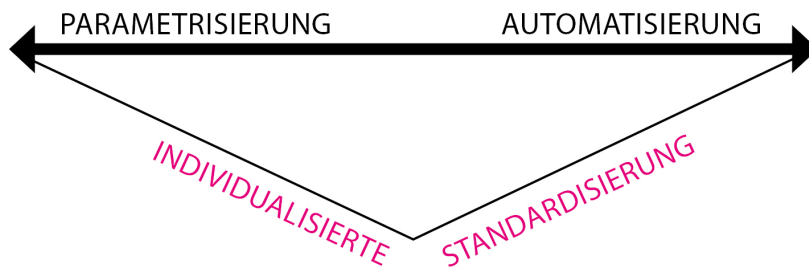


Abb. 31: Neuartige Zusammenführung von Standardisierung und Individualisierung.

Eigene Darstellung

Als gangbarer Weg für die Produktion, und damit einem Rückgriff auf den Leitfaktor Technik, wird von Koren im Sektor der industriellen Fertigung die „Dedicated Manufacturing Line (DML)“, bei der genau ein Produkt in großem Volumen produziert wird, und das „Flexible Manufacturing System (FMS)“, bei dem eine Variation von Produkten mit geringer Anzahl gefertigt werden, zu einem neuen System zusammengeführt.²⁶² Dies wird als „Reconfigurable Manufacturing System (RMS)“ bezeichnet. „An RMS is designed to ‘reconfigure’, to grow and change within the scope of its lifetime, and so it can respond to market changes quickly. In other words, the RMS is designed for changes in its production capacity (the number of products it can produce) and in its functionality (which provides the capability to produce new parts and products) in ways that do not affect its overall robustness or reliability.“²⁶³ Korens Ausführungen zu den Produktionssystemen können in die baukonstruktive Fertigung überführt werden. Die formulierte Forderung nach anpassungsfähigen Systemen, die auf den Markt oder die Bauaufgabe abgestimmt werden können, wäre entsprechend denkbar.

²⁶² Ebd., S. 6.

²⁶³ Ebd., S. 16–18.

Systematisierte Konstruktionsprinzipien

Es bedarf der Entwicklung von standardisierten Konstruktionsprinzipien (offenen Systemen), die einem individuellen Bedarf entsprechend mithilfe einer automatisierten Fertigung zu anschlussfähigen Komponenten angepasst werden können (→2.3.2.5 Anpassungsfähige Systematisierung von Betonkonstruktionen). Dies ist eine wesentliche Neuerung zu einer oftmals umgesetzten effizienzgetriebenen Modularisierung (geschlossene Systeme). Dabei versteht man unter projektspezifischer Anpassungsfähigkeit die Möglichkeit, ein Konstruktionsprinzip oder einen Produktionsprozess so zu modifizieren, dass das systematisierte konstruktive Prinzip an sich konstant bleibt, aber in einer bestimmten Dimension eine Individualisierung erlaubt.²⁶⁴ Die gewählten Beispiele aus der Betonforschung (→2.2.3 Aufstellung von Verfahrensprinzipien am Beispiel der Betonforschung) zeigen, dass diese Adaption in unterschiedlicher Weise erfolgen kann von großem bis kleinem Maßstab - auf städtebaulicher Ebene durch die Addition und Rotation von Raummodulen (Prinzip 3: Raummodule), hinsichtlich der Fügung von Bauteilen mit angepassten Dimensionen oder Schichtenaufbauten (Prinzip 2: Tafelkomponenten), in der Variation der Größe, Konstellation und der Materialzusammensetzung von Elementen aus einem Baukastensystem (Prinzip 1: Baukastensystementwicklung), um nur einige Variablen zu nennen. Die technischen Möglichkeiten für adaptive Komponenten²⁶⁵ sind vorhanden – nun besteht vielmehr der Anspruch, diese mit dem erforderlichen Maß und in Kombination dort einzusetzen, wo eben erforderlich, um zu einer neuen Varianz bei gleichzeitiger Effizienz zu führen. So kann auf der Grundlage technologischer Entwicklungen in Kombination mit einem Systemansatz eine neue Gestaltungsvielfalt auch im Bausektor Einzug halten und auf die Anforderungen des Markts reagieren.²⁶⁶ Dieser Mittelweg kann im Speziellen anhand der betrachteten adaptiven Betonkonstruktionen (→2.3) ebenso wie im Übergeordneten am Beispiel des individualisierten Systembaus dargelegt werden (→2.3.1.4 Statusbericht serielles und modulares Bauen).

²⁶⁴ Albus/Hollmann-Schröter 2022 (wie Anm. 165), S. 7.

²⁶⁵ Dies zeigen unter anderem die Forschungen zum SSP 2187.

²⁶⁶ Hollmann-Schröter 2021 (wie Anm. 15), S. 191.

Teiladaptive Betonkonstruktionen

Die Betonfertigteilindustrie ist eine Branche, die zwar den ersten Schritt in die Vorfertigung gemacht hat, den vollständigen Weg in Richtung Automatisierung jedoch noch nicht beschritten hat.²⁶⁷ Nach wie vor sind die Herstellungsprozesse in vielfältiger Weise an traditionelle Arbeitsschritte gebunden, die von Arbeitskräften begleitet werden müssen.²⁶⁸ Es ist jedoch ein Wandel auf Prozessebene und den damit verbundenen Fertigungsabläufen in der Vorfertigung von Betonbauteilen möglich. Die Vorteile bei der Umsetzung eines Systemgedankens im Betonsektor mit Anspruch auf eine Anpassungsfähigkeit spiegeln sich im Forschungsansatz des Sonderforschungsprogramms der DFG „SSP 2187: Adaptive Modulbauweisen mit Fließfertigungsmethoden - Präzisionsschnellbau der Zukunft“²⁶⁹ wider (→2.3.3.1 Prinzip 1: Baukastensystementwicklung am Beispiel „Intelligente Modularisierung“). Überdies sind die in der Dissertation konstatierten Leitfaktoren innerhalb des Programms in den folgenden drei Bereichen verankert:

- Entwerfen und Konstruieren unter dem Aspekt der Modularisierung (Konstruktion)
- Fertigungsstrategien und Produktionskonzepte für skalierbare Module (Technik)
- Durchgängig digitale Modelle für die Prozesse (Gestaltung)

In dem Forschungsschwerpunkt geht es um die automatisierte Herstellung von teiladaptiven Elementen. Des Weiteren fokussiert die Forschung auf die Fügung und Montage der Elemente zu einer wandelbaren Struktur.²⁷⁰ Dieser Schritt der Verknüpfung von Technik und Konstruktion ist notwendig, um eine gewisse Anpassungsplanung von Betonbauteilen zur Steigerung einer Varianz zu ermöglichen. Es werden im Rahmen des Sonderforschungsbereichs vielfältige Lösungsansätze aufgezeigt, die die Lücke zwischen digitaler Gestaltung und automatisierter Fertigung über einen systematisierten Konstruktionsansatz schließen sollen. In diesem Zusammenhang erscheint die Implementierung eines adaptiven, aber systematisierten Ansatzes sinnvoll, um a) die Einschränkungen und Limitierungen geschlossener modularer Systems zu überwinden und b) den aktuellen Herausforderungen im Bauwesen zu begegnen (Mangel 1. Produktivitätssteigerung; Mangel 2. Kanalisierung der Komplexität; Mangel 3. Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft).

²⁶⁷ DBV-Heft 53: Digitale Fertigung im Betonbau.

²⁶⁸ Oesterreich/Teuteberg 2017 (wie Anm. 8), S. 88.

²⁶⁹ Laufzeit des SPP 2187 seit 2020 für 6 Jahre. Kooperation von 60 Forschenden aus acht Universitätsstandorten in insgesamt 12 Forschungsprojekten.

²⁷⁰ Ruhr Universität Bochum (wie Anm. 122).

Individualisierter Systembau

Aus Sicht der Autorin ist diese dargelegte ausbalancierte Systematisierung wie sie innerhalb der Forschung forciert wird, entsprechend für den individualisierten Systembau auf Gebäudemaßstab anzuvisieren. Dies kann neuerlich durch zwei Tatsachen gelingen:

Zum einen sind für eine Forcierung des seriellen und modularen Bauens eine gestalterische Vielfalt und eine Anpassung der Systeme unabdingbar (→2.3.1.5 Erfolgsfaktor gezielte Anpassungsplanung). Zum anderen betont Albus die Notwendigkeit einer gestalterischen Qualität beim Bauen im System.²⁷¹ Die Umsetzung dieser Forderung durch die zuvor dargelegten Möglichkeiten der Konstruktion adaptiver Systeme kann wesentlich dazu beitragen, dass sich ein individualisierter Systembau tatsächlich durchsetzen wird. Darüber hinaus verschärfen sich die Rahmenbedingungen, was exemplarisch am Wohnungsmarkt ablesbar ist. „Der Wohnungsneubau befindet sich in einer tiefen Krise, wobei die Krise tiefer ist als die Zahlen zu Baufertigstellungen und Baugenehmigungen bislang zeigen.“²⁷² Es werden zwei wesentliche Hauptfaktoren, 1) der Wohnungsmangel und 2) die hohen Baukosten ausgemacht, die nun tatsächlich die Akzeptanz modularer Bauweisen auf dem Markt steigern könnten. Der aktuelle Druck auf dem Wohnungsmarkt zeigt sich am starken Rückgang der Baugenehmigungen²⁷³ sowie Fertigstellung von Gebäuden²⁷⁴ seit 2021. Zudem haben sich laut Frühjahrsgutachten der ZIA die Baukosten im Zeitraum zwischen 2021 und dem Frühjahr 2024 aufgrund „gestörter Lieferketten und gestiegener Energiekosten“ um mindestens 15% erhöht.²⁷⁵ Simons beschreibt die Einsparpotenziale durch das serielle und Modulare Bauen und hält eine „Neubau-Revolution“ für möglich.²⁷⁶ Da sich das Modulare Bauen im Wesentlichen durch die vergleichsweise kurze Montagezeit und damit eine signifikante Einsparung von Kosten zu herkömmlichen Bauweisen abgrenzt²⁷⁷, kann durch den individualisierten Systembau folgerichtig schnell Wohnraum wirtschaftlich realisiert werden. Diese These wird im Ausblick anhand des Forschungsprojektes MZD manifestiert (→6.1.1 Forschungsprojekt: hybride Systembaukonstruktion „Modular – Zirkulär - Digital (MZD)“).

²⁷¹ Vgl. Rietz/Jäger/Hempel 2022 (wie Anm. 209), S. 25–27.

²⁷² Simons 2024 (wie Anm. 270), S. 210.

²⁷³ „Die Baugenehmigungen sind 2023 das zweite Jahr in Folge auf vermutlich knapp 270.000 Wohnungen gefallen. Im Vergleich zum Jahr 2021, dem Höhepunkt des vergangenen Bauzyklus, entspricht dies einem Rückgang von 30%.“ (ebd., S. 201).

²⁷⁴ „Über alle Gebäudearten hinweg ist mit einem Rückgang der Wohnungsfertigstellungen auf etwa 150.000 bis 2025 zu rechnen.“ (ebd., S. 218).

²⁷⁵ Vgl. ebd., S. 205.

²⁷⁶ Ebd., S. 207.

²⁷⁷ Albus 2021 (wie Anm. 294), S. 158.

Konstruktive und prozessuale Systematisierungsansätze

Generell bestehen vielfältige Herangehensweisen, wie ein Systemansatz in der Architektur umgesetzt werden kann. Dabei wurde differenziert in konstruktive und prozessuale Systematisierungsansätze (→2.3.1.7 Einführung einer Systematik auf Prozessebene). Bergmann sieht den entscheidenden Unterschied zwischen dem Bauen „mit System“ und dem Bauen „im System“. Letzteres ermöglicht durch die Herstellung von Abhängigkeiten der Bestandteile untereinander die Schaffung ganzheitlicher Zusammenhänge.²⁷⁸ Diese Erkenntnis verweist auf die neuartigen digitalen Planungswerkzeuge, die über eine reine Digitalisierung hinweg zunehmend eine Verknüpfung vielschichtiger Parameter steuern können. Unter Zuhilfenahme dieser neuartigen Werkzeuge kann die Komplexität, die sich in den multifaktoriellen Einflussfaktoren spiegelt, durch Verknüpfungen in systemische Prozesse kanalisiert werden (→2.1 Multifaktorielle Systemdarstellung vor dem Hintergrund kontinuierlicher Prozesse). So wird ein Lösungsansatz zur Umsetzung kontinuierlicher Prozesse von der Planung bis in die Ausführung geliefert und leitet über zum dritten Leitfaktor, der im anschließenden Kapitel detailliert betrachtet wird.

Überführung des Systemansatzes vor dem Hintergrund der Kreislaufwirtschaft

Der wesentliche Vorteil der Umsetzung eines Systemansatzes liegt nach Bewertung der Autorin in der Verbesserung der Nachhaltigkeit begründet. Für einen ganzheitlichen Ansatz muss daher eine Kombination der Aspekte Vorfertigung und Zirkularität eingeführt werden. Der Beleg für diese Argumentation erfolgt in Kapitel III. Die vielfältigen Ebenen der Nachhaltigkeit werden in der Verknüpfung der Leitfaktoren definiert, gefiltert und bewertet, um eine übergreifende Strategie zu entwickeln, die das komplexe Anforderungsnetzwerk in Beziehung setzt (→3.1 Verknüpfung der Leitfaktoren mit einem Fokus auf Nachhaltigkeitsaspekte). Entscheidend ist dabei die geeignete Teiladaption des Systematisierungsansatzes (→5.1 Potenziale anpassungsfähiger Betonkonstruktionen). Die aufgestellten Anforderungen an Konstruktion, Technik und Gestaltung können nur durch die Implementierung digitaler Werkzeuge möglich werden, was im folgenden Leitfaktor vertieft wird.

²⁷⁸ Bergmann 2019 (wie Anm. 212).

2.4 Leitfaktor Gestaltung – digital gestütztes Entwerfen und Produzieren

Im Folgenden wird der Leitfaktor Gestaltung (Abb. 32) und dessen Bedeutung für das Bauwesen eingeführt. Dieser definiert im Dreiklang mit den beiden anderen Leitfaktoren Technik und Konstruktion die Konzeption und Steuerung von Konstruktionen durch digitale Werkzeuge auf unterschiedlichen Ebenen. Im Folgenden werden unterschiedliche Arten der Gestaltung dargelegt, die auf digitale Werkzeuge zurückgreifen, wie die Gestaltung von Prozessen, die Gestaltung von Konstruktionen sowie die Gestaltung des Fertigungslayouts. Dies erfolgt mithilfe digitaler Entwurfs- und Planungswerkzeuge zur Optimierung des Entwurfs beziehungsweise der Konstruktion und/oder des Fertigungsverfahrens.

Wesentlich ist die These, dass nicht nur die Gestaltung an sich, sondern auch das Maß der Varianz Einfluss nimmt auf die architektonische Qualität, die Steigerung der Effizienz sowie die Verbesserung der Nachhaltigkeit. Um diesen Zusammenhang abzubilden, erfolgt zuerst die Herleitung digitaler Entwurfs- und Planungswerkzeuge und deren Bedeutung für die Digitalisierung des Bauwesens. Daraufhin werden die Möglichkeiten zur kontinuierlichen Überführung der Entwurfsdaten in die Produktion analysiert. Anschließend erfolgt die Eingrenzung auf Entwurfs- und Planungsprinzipien im Umgang mit Betonkonstruktionen.

Anhand von gewählten Referenzen werden Prinzipien des digitalen Gestaltens von Betonkonstruktionen herangezogen, die den Erkenntnisgewinn vor dem Forschungsinteresse der Individualisierten Standardisierung deutlich machen. Im Résumé erfolgt die Zusammenführung der Erkenntnisse vor dem Hintergrund der Verbesserung der Nachhaltigkeit.

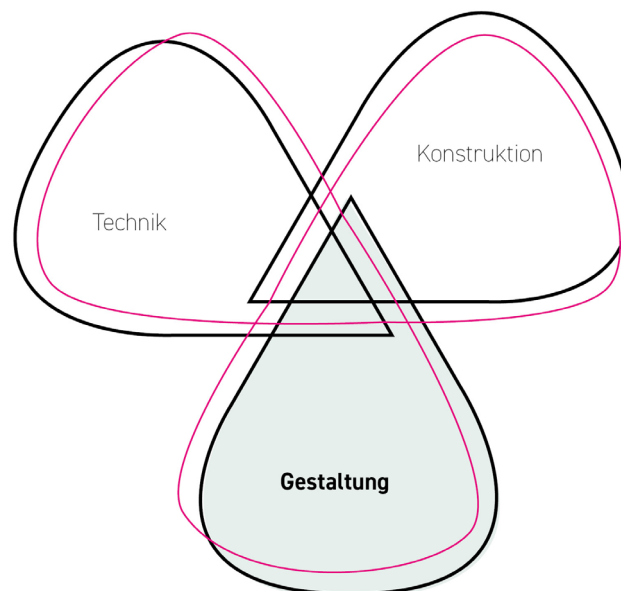


Abb. 32: Bedeutung des Leitfaktors Gestaltung innerhalb des Dreiklangs. Eigene Darstellung

2.4.1 Herleitung der Optimierung von Planung und Produktion durch digitale Werkzeuge

Im Folgenden werden zu Beginn die wesentlichen Schritte der Digitalisierung des Bauwesens durch computerbasierte Entwurfs- und Planungswerkzeuge bis hin zum Status quo differenziert. Eine substanzielle Herausforderung bildet dabei die bis heute oftmals inkonsistente Überführung von Planungsdaten in die Fertigung. Es wird dargelegt, in welchem Maße Planerinnen und Planer in dem Kontext befähigt sein sollten, die aktuell zur Verfügung stehenden Mittel zu einer neuen Effizienz, Varianz und Nachhaltigkeit zusammen zu führen, entsprechend der Arbeitsthese der Individualisierten Standardisierung. Anschließend erfolgt die Darlegung eines möglichen Paradigmenwechsels durch die Einbindung neuartiger assoziativer Werkzeuge, die zu einer erfolgreichen digitalen Prozesskontinuität führen können.

2.4.1.1 Differenzierung wesentlicher Digitalisierungsschritte durch Entwurfs- und Planungswerkzeuge

Mitte der 1970er Jahre entwickelten sich allererste Programme, die als digitale Zeichenwerkzeuge fungierten und als „Computer Aided Drafting“ bezeichnet werden. Daraufhin erfolgte ab Mitte der 1980er Jahre Weiterentwicklungen, die „mehr geometrische Freiheiten und Variationsmöglichkeiten einräumten“.²⁷⁹ Der Einsatz des Computers diente in erster Linie zur Digitalisierung des Entwurfs. Diese zuerst zweidimensionale digitale Abbildung des analogen Plans beziehungsweise Modells wird als CAD Computer Aided Design (CAD) bezeichnet. Als dritter Entwicklungsschritt wird in den 1990er Jahren unter dem Begriff „Computer Aided Architectural Design (CAAD)“ das objektorientierte Modellieren auch dreidimensionaler Entwürfe angeführt.²⁸⁰ Mit fortschreitender Digitalisierung wurden im Verlauf in einer weiteren Phase der Implementierung generative, digitale Werkzeuge häufig zur Konzeption von Entwürfen mit einer erhöhten Komplexität genutzt, die zuvor nicht darstellbar waren. Sogenannte parametrische²⁸¹ Modelle überstiegen deutlich die Ausdifferenzierung analoger Techniken und führten zu einer maximalen Individualisierung der Entwürfe mit einem hohen Maß an gestalterischer Varianz. Geier folgert rückblickend, dass durch die Implementierung digitaler Entwurfswerkzeuge eine gesteigerte Komplexität abgebildet werden konnte. „Die Digitalisierung [...] führt im ersten Schritt weg von der Idee der Zielsetzung, die in den Anfängen des 20. Jahrhunderts ein Grund für die Entwicklung des industrialisierten Bauens war: nämlich günstig finanzierbare Wohn- und Gewerberäume zu schaffen. Die Digitalisierung vereinfacht zwar den Entwurfs- und Planungsprozess, führt aber zu aufwendigen Formen und Konstruktionen, die bisher mittels analoger Hilfsmittel nicht geplant werden konnten.“²⁸² Laut van Berkel und Bos besteht bei der

²⁷⁹ Marco Hemmerling und Boris Bähre, *Building Information Modeling – Theorie und Praxis. Integrale Architekturplanung*, Basel 2019, S. 24.

²⁸⁰ Ebd.

²⁸¹ Vgl. Definition von Parametrik: ebd., S. 94.

²⁸² Sonja Geier, »Analysemodell für das vorgefertigte Bauen mit Holz«, *Dissertation Technische Universität München* 2018, S. 27.

Anwendung parametrischer Entwurfstechniken das Risiko, den Bezug zum individuellen Entwurf zu verlieren. „Parametric design techniques have resulted in an extreme focus on technique and an accompanying loss of perspective and the desired result, leading to a deadly homogeneity of avant-garde design.“²⁸³

Mit der Entwicklung des Building Information Modelling (BIM) stehen erstmalig Tools zur dreidimensionalen geometrischen Abbildung gebauter Strukturen und deren Abhängigkeiten untereinander zur Verfügung. „Im Bereich der architektonischen Formfindung spielen generative Entwurfsmethoden, Building Information Modeling (BIM, Gebäudedatenmodellierung) und digitale Fabrikationstechnologien eine zunehmend bedeutende Rolle. Die umfassende Darstellung von dreidimensionalen Gestaltungskonzepten mit Hilfe digitaler Simulationen und die direkte Interaktion mit dem virtuellen Modell im Entwurfsprozess erweitern die Wahrnehmung von räumlichen Zusammenhängen. Von der ersten Konzeptvisualisierung bis zum fertigen 3D-Gebäudedatensatz bildet der Computer mittlerweile den kompletten Entwurfs- und Planungsprozess ab.“²⁸⁴ Durch die kontinuierlich fortschreitende Entwicklung steht leistungsfähige Software zur Verfügung, die die Durchführung vielfältiger Prozesse am Bau regelt. Ferner wird es durch die Zusammenarbeit mehrerer Planungsbeteiligter an einem digitalen Modell einfacher möglich, darüber zu kommunizieren sowie eingespeiste Daten kooperativ zu nutzen, beispielsweise zur Datenerfassung bei der Leistungsbeschreibung oder der Extraktion der Daten für die Produktion.

Im Vorfeld der Produktion können digitale Werkzeuge eine Leistungsfähigkeit geplanter Konstruktionen abbilden und durch die Simulation eine Optimierung der Konstruktion ermöglichen. Thiel et al. beschreiben durch die Anwendung datengetriebener (Bau-)Produktentwicklungsverfahren eine „effizientere Fertigung von Bauteilen“ durch digitale Vorsimulation (virtual prototyping).²⁸⁵ Dies kann beispielsweise zu einem funktionsoptimierten Einsatz der Werkstoffe führen oder aber auch eine Fehlerbegrenzung wie einer Kollisionsplanung ermöglichen.

„Darüber hinaus verändern sich durch die Anwendung computergestützter Werkzeuge auch angrenzende Prozesse in der Produktion. Lineare Fertigungsabläufe wie der Einsatz von CNC-Maschinen werden durch CAM-Technologien (computer aided manufacturing) abgelöst, wodurch eine computerintegrierte Produktion unterstützt wird. Das Programm zur numerischen Steuerung (NC) wird dadurch schon in der Arbeitsvorbereitung eingesetzt und nicht erst in der Werkstatt, wie es beim Einsatz von CNC-Maschinen der Fall ist.“²⁸⁶

Ein breites Feld eröffnet sich aktuell durch Bilanzierungstools und Datenbanken zur Vermittlung bereits verwendeter Bauteile. Diese Werkzeuge sind

²⁸³ Ben van Berkel und Caroline Bos, *UN Studio. Design models ; architecture, urbanism, infrastructure*, London 2006, S. 20.

²⁸⁴ Marco Hemmerling, Jens Böke und Frank Püchner, »Digitales Entwerfen und Konstruieren«, in: *Produktentwicklung Architektur. Visionen, Methoden, Innovationen*, Basel 2013, S. 140–147, hier S. 140.

²⁸⁵ Vgl. Charlotte Thiel u. a., »Strategien zur Implementierung der Kreislaufwirtschaft beim Bauen mit Beton«, in: *Beton- und Stahlbetonbau*, 118 (2023), Nr. 4, S. 261–274, hier S. 271.

²⁸⁶ Hollmann-Schröter 2021 (wie Anm. 15), S. 164.

wertvolle Hilfsmittel zur Bewertung der Nachhaltigkeit beziehungsweise können die Einsparung von Ressourcen wesentlich vorantreiben.

Entsprechend dieser auszugsweisen Darstellung hat sich das Einsatzgebiet digitaler Entwurfs- und Planungswerkzeuge in den vergangenen Jahren maßgeblich erweitert. „Digitale Planungstools dienen als Werkzeuge zur Umsetzung, schaffen Abhängigkeiten, sind Kontrollinstanz und nicht mehr nur Entwurfsmittel per se.“²⁸⁷

2.4.1.2 Fragmentierung durch Übergabeprobleme an den Schnittstellen

Dennoch bleibt wie zu Eingang beschrieben, bisher eine wesentliche Produktivitätssteigerung durch die Digitalisierung in der Baubranche aus.²⁸⁸ Die Optimierung des Gesamtprozesses wird offenkundig nicht ausreichend forciert. „Entsprechend der Kurzstudie „Baubranche aktuell. Wachstum 2020 – Digitalisierung und BIM der PricewaterhouseCoopers GmbH“ entfaltet sich die produktivitätssteigernde ‚Industrie 4.0‘ in vielen Wirtschaftszweigen. Als Beispiel wird der Dienstleistungssektor angeführt, in dem bereits 24 % der Beschäftigten digitale Dienste nutzen.“²⁸⁹ Auf das Bauwesen bezogen werden im Vergleich dazu digitale Planungsmethoden (BIM), welche oft mit der Umsetzung der ‚Industrie 4.0‘ für die Baubranche gleichgesetzt werden, lediglich zu 4 % angewandt.²⁹⁰ Als Ursache für dieses vergleichsweise niedrige Digitalisierungsniveau kann unter anderem die deutliche Fragmentierung der Baubranche angenommen werden.“²⁹¹ Genau mit Blick auf die Zusammenführung dieser multiplen Einflussfaktoren (→2.1 Multifaktorielle Systemdarstellung vor dem Hintergrund kontinuierlicher Prozesse) bedarf es nach Auffassung der Autorin und wie unter Kapitel I dargelegt vorgezeichneter Digitalisierungsstrategien (→1.1.1 Relevanz).

„Nach Einschätzungen des Unternehmens ‚Design-to-Production (DTP)‘, Protagonist in der Gebäudedatenmodellierung, erfordert die digitale Transformation im Bauwesen neben neuen technischen Lösungen vor allem auch neue Denkansätze. Auf dem Weg zu einer erfolgreichen Digitalisierung im Bauwesen ist es nach Ansicht von DTP nicht zielführend, analoge Prozesse eins zu eins zu digitalisieren. Die Applikation von BIM sei bisher nur eine Übersetzung tradierter Abläufe in digitale Prozesse. Dies bedeute jedoch noch keinen Fortschritt an sich. Innovation entstehe erst, wenn der komplette Planungsprozess durchgängig digital gedacht und umgesetzt werde.“^{292,293}

„Aktuell gibt es hingegen ein erkennbares Übergabeproblem zwischen den an der Planung, Ausführung und Fertigung beteiligten Partnerinnen und Partner durch unterschiedliche Datenqualitäten. Trotz digitaler Planung von Entwurf und

²⁸⁷ Ebd., S. 163.

²⁸⁸ Bertschek/Niebel/Ohnemus 2019 (wie Anm. 7), S. 93.

²⁸⁹ PricewaterhouseCoopers GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft, *Baubranche aktuell Wachstum 2020. Digitalisierung und BIM*, 2018, S. 14, <https://www.pwc.de/de/industrielle-produktion/baubranche-aktuell-wachstum-2020-maerz-2018.pdf> (abgerufen am 23. März 2024).

²⁹⁰ Vgl. ebd.

²⁹¹ Hollmann-Schröter 2021 (wie Anm. 15), S. 165.

²⁹² Vgl. Arnold Walz, digitale Prozessketten, Interview von Kirsten Hollmann-Schröter, 14. November 2019.

²⁹³ Hollmann-Schröter 2021 (wie Anm. 15), S. 166.

Ausführung werden jeweils eigene Datenmodelle erstellt. Dies belegt die Studie des Fraunhofer IAO Digitale Planungs- und Fertigungsmethoden: „Nur 22 % der befragten Firmen nutzen 2D-Daten für die Fertigung, die nicht CNC gesteuert ist. Lediglich 4 % der Ausführenden erhalten Daten ihrer Projektpartner im Leseformat der Fertigungsmaschine und können diese ohne Weiterbearbeitung nutzen. Fast jeder dritte Ausführende baut sich sein eigenes Datenmodell für die Fertigung. Fast 60 % der Befragten bestätigen, dass es aufgrund unterschiedlicher Software und fehlender Austauschformate zu Schnittstellenproblemen zwischen den an der Planung, Ausführung und Fertigung beteiligten Partnern gibt. Die einzelnen Teilnehmergruppen isoliert betrachtet, beklagen diesen Aspekt vor allem 86 % der Zulieferer und alle Bauhandwerker.“²⁹⁴ Aufgrund unzureichender Konsistenz in der Struktur und Logik der Datensätze können folgerichtig keine automatisierten Daten abgeleitet werden.“²⁹⁵ Diesen Mangel belegt der Beitrag von Kloft et al. wie folgt: „Moreover, the traditional manual construction processes also hinder progress in the preliminary planning processes. This happens because the transfer of formwork and reinforcement positioning information from the planning processes to the construction sites still takes place mainly in the form of 2D plans [...]. Whether the 2D plans were drawn with conventional CAD programs or generated from a 3D BIM model is currently irrelevant for the plan-based use of information on the construction sites. A decisive factor for the future of the construction industry is end-to-end digitalization from planning to production.“²⁹⁶ „Innovationspotenzial für Planung und Produktion entsteht nun in der kontinuierlichen Umsetzung dieser digitalen Prozessketten. Durch einen durchgängigen digitalen Planungs- und Ausführungsprozess wird mehr Transparenz und Interdisziplinarität im Planungsprozess ermöglicht.“²⁹⁷

²⁹⁴ Steffen Braun u. a., *FUCON 4.0 - Nachhaltiges Bauen durch digitale und parametrische Fertigung, Stuttgart 2019 (Forschungsinitiative Zukunft Bau F 2995)*, S. 20.

²⁹⁵ Hollmann-Schröter 2021 (wie Anm. 15), S. 166.

²⁹⁶ Kloft u. a. 2020 (wie Anm. 119), S. 132.

²⁹⁷ Hollmann-Schröter 2021 (wie Anm. 15), S. 164.

2.4.1.3 Assoziative Verknüpfungen und Datenkompatibilität

„Dass eine konsequente digitale Kette konsistente Datensätze entstehen lassen kann, die nicht nur die Planung, sondern auch die Produktion der Bauteile wesentlich vereinfacht, zeigt ein Interview mit den Architekten Alexander Rieck (LAVA) und Arnold Walz (DTP). „Parametrische Prozesse verlaufen nicht linear, sondern in Kreisläufen – dies eröffnet die Möglichkeit, veränderte Parameter mithilfe von Zirkelschlüssen zu frühen Planungsständen relativ einfach berücksichtigen zu können.“²⁹⁸ Es war in der Architektur schon immer entscheidend, möglichst umfassend Konstruktion, Material, Fertigung und Tragwerk im Entwurf zu vereinen, um einen möglichst effizienten Planungs- und Produktionsprozess zu erhalten. Für Scheurer liegt die Neuartigkeit darin, dass die Durchgängigkeit digitaler Prozessketten Entwurf, Fertigung und realisiertes Gebäude so miteinander verknüpft, dass ein effizienter und verlustfreier Fluss von Informationen ermöglicht wird, der sich auch in der Kompatibilität der Datenqualität spiegelt.“^{299, 300} Um diese komplexen Daten in konsistente Datenmodelle zu überführen, werden aktuelle offene BIM-Prozesse gefordert, die eine Datenkompatibilität schaffen. Diese werden als Datenaustauschkonzepte beschrieben.³⁰¹ Die Software Simplebim liefert hierfür beispielsweise einen Ansatz. Durch die Software könnten unterschiedliche Dateien tatsächlich zusammengeführt und nicht nur übereinandergelegt werden.³⁰²

„Durch die digitale und interdisziplinäre Arbeitsweise hat sich heutzutage die Informationstiefe in der Anfangsphase intensiviert. Allen Planungsbeteiligten wird aufgrund erhöhter Komplexität ein erhöhtes Maß an Genauigkeit abverlangt. Die sich dadurch ergebende Nulltoleranz wiederum ermöglicht eine direkte Einspeisung der Daten in die Produktion. Es besteht aber gegenwärtig das Problem, dass die zur Verfügung stehenden Planungstools diese Informationen nicht allumfassend verwalten können. Dieser Problemstellung widmet sich das Innovationsnetzwerk FUCON 4.0 und untersucht in der Studie des Fraunhofer IAO ‚Digitale Planungs- und Fertigungsmethoden‘ die Rolle der Planungsmethode BIM und stellt einen neuen Planungsansatz losgelöst von einer spezifischen Software dar. Durch folgende drei Parameter sollen sich laut der Studie die Bauprozesse von der Planung bis zur Realisierung grundlegend optimieren lassen:

1. Verschiebung der Einspeisung von Planungsdaten und Fertigungsdaten in frühere Planungsphase („Frontloading“),
2. Planungsgrundlage auf parametrischen Gebäudedatenmodellen,
3. Einbindung einer stärkeren automatisierten Fertigung.³⁰³

²⁹⁸ Roland Pawlitschko, »Digitale Prozesse beim Entwerfen komplexer Bauwerke: Roland Pawlitschko im Gespräch mit Alexander Rieck, LAVA, und Arnold Walz, designtoproduction«, in: Eva Herrmann und Tim Westphal (Hg.), *Building Information Modeling | Management. Methoden und Strategien für den Planungsprozess, Beispiele aus der Praxis*, München 2015 (*DETAIL Spezial*), S. 70–73, hier S. 70.

Vgl. ²⁹⁹ Fabian Scheurer, »Materialising Complexity«, in: *Architectural Design*, 80 (2010), Nr. 4, S. 86–93, hier S. 93.

³⁰⁰ Hollmann-Schröter 2021 (wie Anm. 15), S. 166.

³⁰¹ Julia Lemcke, »BIM-Datenaustausch: Wie er in der Praxis gelingt«, 3. November 2022, <https://www.bauen-aktuell.eu/bim-datenaustausch-wie-er-in-der-praxis-gelingt-a-84c72431887f5cad6c39ef058e9b2fcf/> (abgerufen am 28. April 2024).

³⁰² Vgl. Corinna Voit, »Datenaustausch: IFC für Simplebim: Die Zukunft des open BIM-Managements«, in: *Bauen aktuell Building Information Modelling und Gebäudeautomation*, 05 (2023), S. 22–23, hier S. 22.

³⁰³ Vgl. Braun u. a. 2019 (wie Anm. 294), S. 28.

In der Studie des Fraunhofer IAO wird der folgende Wunsch formuliert: „Durch frühzeitige Integration von Fachinformationen (Frontloading) wie Materialeigenschaften, Lieferbedingungen, Fertigungsspezifikationen und daraus resultierende Kosten in ein regelbasiertes Mastermodell stellen sich in einem iterativen Prozess schrittweise Optimierungen ein. [...] Die Parametrisierung des Gebäudedatenmodells erlaubt den Optimierungsprozess, da Änderungen automatisiert aktualisiert werden können. Fehlertolerante Echtzeitmodelle gestatten ein flexibles Agieren bei Abweichungen des ursprünglichen SOLL-Standes (z. B. Bautoleranzen, Änderungswünsche des Bauherrn).“³⁰⁴ Es ist als Potenzial zu begreifen, durch digitale Planungswerkzeuge den Entwurfsprozess zu strukturieren und im Verlauf anzupassen und zu optimieren. Automatisierung bedeutet nicht, Daten nur einmal einzuspeisen mit dem Ziel, ein determiniertes Endprodukt zu erhalten, sondern es wird ein iterativer Prozess ermöglicht, der steuerbar ist. Hierzu bedarf es der Entwicklung assoziativer Datenmodelle (→2.4.3.1 Prinzip 1: digitales Gebäudebeschreibungsmodell). Dieses mehrdimensionale Entwerfen muss gelernt und gelehrt werden.“³⁰⁵

2.4.1.4 Relevanz der Planenden bei der Umsetzung der Individualisierten Standardisierung

Der Einsatz automatisierter und digitaler Planungs- und Produktionswerkzeuge hat eine entsprechende Auswirkung auf die Tätigkeit der am Bau beteiligten Akteurinnen und Akteure. Glock beschreibt, dass sich durch die digitale Transformation ein zunehmendes Maß an Komplexität einstelle. Dieser Herausforderung, um übergreifend eine verbesserte Effizienz und eine bessere Nutzung über den kompletten Wertschöpfungsprozess zu ermöglichen, stellten sich momentan relativ wenige.³⁰⁶

„Es ändert sich aber nicht nur die Rolle der Architektinnen und Architekten, sondern auch die formale Gestaltung. Durch die technologischen Weiterentwicklungen in der Produktion (→2.2 Leitfaktor Technik – komplexe Fertigungstechnologien) und den zunehmenden Anforderungen an die Nachhaltigkeit müssen die Planenden mit einer neuen Planungsmethodik und der Möglichkeit der Verknüpfung von Entwurf und Produktion umgehen lernen. Mit Blick auf die Entwurfsmethodik wird die Auseinandersetzung primär von zwei Faktoren bestimmt. Durch die Digitalisierung des Entwurfsprozesses an sich und die Erstellung eines digitalen Datenmodells zu Beginn des Entwurfs kommt ein erheblicher rationaler Faktor im Entwurfsprozess hinzu. Auch die Herstellung des Gleichgewichts aus Standardisierung und Individualisierung stellt neue Anforderungen an Planerinnen und Planer. Zudem ist es erforderlich, dass das zwangsläufig erforderliche Know-how aus der Fertigungstechnologie stärker mit in das Denken der

³⁰⁴ Ebd.

³⁰⁵ Hollmann-Schröter 2021 (wie Anm. 15), S. 164.

³⁰⁶ Vgl. Glock 2018 (wie Anm. 12), S. 621.

Entwerferinnen und Entwerfer einfließt. Es kommt zu einer Verschiebung von einem intuitiven hin zu einem rationalen Vorgehen.“³⁰⁷

Die Architektin oder der Architekt ist trotz Digitalisierung und einhergehender Verschiebung weiterhin die zentrale Figur der gesamten Architekturproduktion. Gerade der Aspekt, die neuen Mittel zu einer gesteigerten Effizienz, Varianz und Nachhaltigkeit zusammen zu führen, ist entscheidend. „Ein professioneller Umgang mit digitalen Medien sorgt dafür, dass die architektonische Qualität vom Entwurf bis zur Realisierung im Kompetenzbereich des Gestalters bleibt, und erweitert gleichzeitig dessen Einfluss auf die zukünftige Entwicklung von Architektur.“³⁰⁸ Planerinnen und Planer entscheiden maßgeblich über die Einführung eines Systemansatzes (→2.3.4 *Résumé: Adaptive Konstruktionssysteme als Mittelweg aus Standardisierung und Individualisierung*) und dessen Überführung in Konstruktion und Ausführung unter Selektion des geeigneten Materials. Aufgrund der sich oftmals diametral verhaltenden Anforderungen ist der Prozess von der Planung zur Ausführung projektspezifisch an vielfältige Entscheidungen gekoppelt und durch die Planerinnen und Planer zu gewährleisten. In Bezug auf das Verhältnis des Leitfaktors „Gestaltung“ zu digitalen Planungswerkzeugen wird in dieser Arbeit auf Hemmerling zurückgegriffen. „Demnach liege die Kunst darin, digitale Planungswerke zu beherrschen und mit deren Hilfe in einem individuellen Designprozess qualitativ hochwertige sowie nachhaltige Architektur zu generieren. Es müsse die Balance zu einem neuen ästhetischen Ausdruck der Architektur ‚im digitalen Zeitalter‘ gefunden werden.“^{309,310} Um diese Forderung umzusetzen bedarf es folgender Anstrengungen.

³⁰⁷ Hollmann-Schröter 2021 (wie Anm. 15), S. 164.

³⁰⁸ Hemmerling/Böke/Püchner 2013 (wie Anm. 284), S. 141.

³⁰⁹ Ebd., S. 147.

³¹⁰ Hollmann-Schröter 2021 (wie Anm. 15).

2.4.1.5 Paradigmenwechsel durch Prozesskontinuität und erhöhtes Maß der Varianz

Durch die zunehmende weitreichendere Digitalisierung, die durch eine Vielzahl von digitalen Werkzeugen unterstützt wird, zeichnet sich ein Paradigmenwechsel im Bauwesen ab:

1) Zum einen schafft der Brückenschlag zwischen digitalem Gestalten und der digitalen Ansteuerung innovativer, automatisierter Fertigungstechnologien eine neuartige Prozesskontinuität.

Durchgängig digital zu planen bedeutet, neue Arbeitsabläufe zu entwickeln. Dafür ist ein ganzheitlicher Ansatz gefordert (→1.1.1 Relevanz). Es ist zweifelhaft, ob der alleinige Fokus auf die Gebäudedatenmodellierung diesen Anforderungen gerecht werden kann. Die Autorin kommt vor dem Hintergrund der aufgezeigten Entwicklung zu dem Schluss, dass neben der Gebäudedatenmodellierung auch begleitende Prozesse zu digitalisieren sind.³¹¹ „Bisherige Lösungsansätze stellen oftmals Software-Applikationen zur Verfügung, die nicht ausreichend in der Lage sind, eine durchgängige Vernetzung von Planungsbeteiligten und Prozessen gemäß einem sich ständig wandelnden Prozessgeschehens zu gewährleisten.“³¹² „Diese komplexe Umstellung stellt eine zentrale Aufgabe der kommenden Jahre dar. Lösungsansätze, die schon jetzt die eingeforderte Prozesskontinuität von der Planung in die Fertigung abbilden, werden exemplarisch im Folgenden am Beispiel der Betonforschung dargelegt.“³¹³

2) Zum anderen ermöglichen digitale Entwurfsmethoden und computergestützte Fertigung eine Ansteuerung, Gestaltung und Variation beziehungsweise Anpassung ganz im Sinne einer Individualisierten Standardisierung.

Das Maß der Varianz und damit das Verhältnis aus Individualisierung und Standardisierung macht einen entscheidenden Unterschied. Durch digitale Werkzeuge und digital angesteuerte Fertigungstechnologien können projektspezifische Entwürfe in standardisierte Komponenten umgesetzt werden, ohne ihren individuellen Charakter zu verlieren. Sie bilden die Grundlage für gestalterisch wie ausführungstechnisch hochwertige Entwürfe.³¹⁴ Damit wird sowohl die Integrität von Entwürfen oder Konstruktionen durch deren Anpassbarkeit verbessert, die durch eine Varianz der Gestaltung ermöglicht wird (Adaptive Systeme). Ebenso ermöglicht die digital gesteuerte Fertigung selbst wiederum erst diese Varianz im Aussehen (komplementäre Fertigung).

³¹¹ Vgl. ebd., S. 165.

³¹² Inhalt aus dem Beitrag in der Antragstellung im Rahmen der Forschungsförderung Zukunft Bau mit Kurztitel „LOOP 3 – Digital-Assoziativ-Ganzheitlich. Kontinuierliche Digitalisierungsstrategie für Planungs- und Bauprozesse“ S. 4. Die nicht bewilligte Einreichung wurde von Frau Jun. Prof. Dr.-Ing J. Albus in Kooperation mit dem Industriepartner Design to Production erarbeitet. Die Autorin wirkte bei der Antragstellung mit.

³¹³ Hollmann-Schröter 2021 (wie Anm. 15), S. 165.

³¹⁴ Vgl. ebd., S. 163.

2.4.2 Eingrenzung: innovative Entwurfs- und Planungsprozesse mit Betonkonstruktionen

Folgend wird die übergeordnete Einforderung einer digitalen Prozesskontinuität auf den Betonsektor zugeschnitten. Es wird der Frage nachgegangen, wie durch die Einbindung digitaler Entwurfs- und Planungswerkzeuge das Ziel der Individualisierten Standardisierung im Umgang mit Betonkonstruktionen erreicht werden kann und welche Potenziale sich für die Verbesserung der Nachhaltigkeit ergeben.

2.4.2.1 Alleinstellungsmerkmal für das digitale Gestalten mit Beton

Ein wesentlicher Vorteil des Werkstoffs Beton ist die Möglichkeit zur digitalen Ansteuerung des Materials über das Fließfertigungsverfahren. Das generiert, im Gegensatz zu beispielsweise Holz als Feststoff, in der Verarbeitung als plastischer Werkstoff ein Alleinstellungsmerkmal für die automatisierte Fertigung. Die Materialeigenschaften erlauben somit einen vielfältigen Gestaltungsspielraum. Der Baustoff Beton kann darüber hinaus in vielerlei Weise an Funktion und Dimension angepasst werden. In diesem Sinne bietet sich ein besonderes Potenzial für den digital gestützten Entwurfsprozess mit adaptiven Betonbauweisen und die Überführung der digital konzeptionierten Bauteile in die automatisierte Fertigung. Die Gestaltung bedingt in diesem Sinne die Nachhaltigkeit. Das heißt, die gestalterische Varianz kann bereits im Entwurf durch digitale Werkzeuge konzipiert werden. Die Effizienz und Nachhaltigkeit der Konstruktion wird darüber hinaus maßgeblich durch digitale Werkzeuge gesteuert und optimiert. Ein Entwerfen mit digitalen Planungswerkzeugen kann beispielsweise materialeffizientere Konstruktionen generieren, welche zugleich gestalterisch abzulesen sind.

2.4.2.2 Abbildung der digitalen Wertschöpfungskette

Der Fokus liegt im Folgenden auf der vertieften Darstellung der Zusammenhänge zwischen digitalen Entwurfs- und Planungswerkzeugen und automatisierten Fertigungstechnologien im Umgang mit Betonbauweisen. Blandini, Bechmann und Brunetti gehen mit dem Beitrag *Die Digitalisierung des Planens und Bauens – Ansätze und Ziele* detailliert auf die Potenziale der Digitalisierung für die Betonforschung ein. „Die Autoren sind der Meinung, dass die Digitalisierung der gesamten Wertschöpfungskette dazu führen wird, dass die Parametrisierung und Durchgängigkeit des Prozesses nicht nur neue Formen von Architektur ermöglicht, sondern auch neue Wege im Sinne einer Optimierung des Ressourcenverbrauchs eröffnet.“³¹⁵ Rund um den Begriff „digital concrete“ clustern sich diverse Forschungstätigkeiten, die genau diese digitalen Planungswerkzeuge in den Vordergrund stellen und über eine digitale Ansteuerung in die automatisierte

³¹⁵ Lucio Blandini, Roland Bechmann und Matteo Brunetti, »Die Digitalisierung des Planens und Bauens – Ansätze und Ziele«, 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. 727–760, hier S. 758.

Fertigung überführen. Innerhalb der jährlichen Internationalen Konferenz „RILEM³¹⁶ International Conference on concrete and digital fabrication“ werden die Forschungsergebnisse zusammengetragen. Durchgeführt wurde die 4th RILEM³¹⁷ von der Technischen Universität Braunschweig und der Technischen Universität München in Anbindung an die Forschungsk Kooperation des Sonderforschungsbereiches TRR 277 "Additive Manufacturing in Construction (AMC)", der bereits unter dem Leitfaktor Technik thematisiert wurde. Mit Bezug auf das Sonderforschungsprojekt SPP 2187, was bereits unter Kapitel →2.2.3.1 Prinzip 1: Extrusionsbasiertes 3-D-Druckverfahren eingeführt wurde, konstatieren Mark et al. wie folgt: „Durch frühzeitige und gezielte Kommunikation, Abstimmung und Koordination zwischen Design und Produktion können Entwicklungszeiten von neuen Produkten verkürzt werden. Daher müssen für die schnelle und präzise Fertigung von flexiblen Modulen aus frei formbaren Hochleistungswerkstoffen relevante Daten zum Ablauf der Produktion und zum aktuellen Zustand des Moduls kontinuierlich erfasst, zusammengeführt und bereitgestellt werden. Auf Basis dieser digitalen Informationen können anschließend die einzelnen Fertigungsschritte genauer abgestimmt und die Auslastung der Maschinen besser geplant werden. Eine wichtige Voraussetzung für die Realisierung von durchgängigen digitalen Modellen, die auch als digitale Zwillinge bezeichnet werden, ist die Kombination der aktuellen Konzepte des Building Information Modeling und der erprobten Methoden aus dem Kontext von Industrie 4.0, die eine weitgehend selbst organisierte Produktion durch Integration von digitalen Werkzeugen und automatisierter Produktionstechnik vorsehen.“³¹⁸ Das Zitat führt die dargelegten Bausteine der digitalen Prozesskette für den Betonbau zusammen und legen den Nachdruck auf die Echtzeitkopplung von Entwurfsdaten und Produktion. Durch die Verknüpfung von Planung und Produktion über einen individualisierten Systemansatz sind die Forschungen aus dem Sonderforschungsprogramm Beispiele für die erfolgreiche Umsetzung von Aspekten der dargelegten Individualisierten Standardisierung.

³¹⁶ Acronym RILEM (*Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages*) The International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures (RILEM, from the name in French) was founded in June 1947, with the aim to promote scientific cooperation in the area of construction materials and structures.

³¹⁷ Die kommende 4th RILEM Konferenz wird im September 2024 in München stattfinden.

³¹⁸ Mark u. a. 2021 (wie Anm. 183), S. 250.

2.4.2.3 Durch digitale Simulation zur Verbesserung der Kreislauffähigkeit

Neuartig ist, dass durch digitale Planungswerkzeuge auf vielfältigen Ebenen gestaltet und damit das Maß der Varianz differenziert werden kann. Diese maßgeschneiderte Individualisierung bildet die Brücke zur Entwicklung nachhaltigerer Konstruktionen. Das Maß der Varianz in Abhängigkeit von Material und Konstruktion wird im Entwurf durch die digitale Simulation konzipiert (Gestaltung). Im Weiteren wird die Varianz in der Anpassbarkeit eines Systemansatzes umgesetzt (Konstruktion) und durch eine individualisierte Produktion in die Realisierung überführt (Technik).

Die digital konzipierte Vorhaltung einer gewissen Flexibilität, die sich auch gestalterisch ablesen lässt, wird letztendlich zu längeren Nutzungszyklen führen und damit die Nachhaltigkeit der Konstruktion positiv beeinflussen (→5.1.1 Dauerhaftigkeit durch Flexibilität).

Gerade im Betonbau sind Simulationsverfahren zur Abbildung der Tragfähigkeit und der Optimierung von Strukturen erprobt. Es geht dabei um die Abbildung digitaler Bauteile oder im erweiterten Sinne einer digitalen Materialzusammenstellung (→2.4.3.3 Prinzip 3: Verfahren zur digital entworfenen Materialmatrix). „Mittels additiver Fertigung besteht [zum Beispiel] die Möglichkeit, Beton tatsächlich nur dort zu verwenden, wo er aus statischen oder funktionalen Gründen benötigt wird.“³¹⁹ Thiel et al. beschreiben den Gewinn darüber hinaus für die Wertschöpfung darin, dass durch einen „simulierten und datenintegrierten Ansatz“ eine „Datenkreislaufkette“ installiert werden könne.³²⁰ Betonbauteile können zukünftig mit vielseitigen Informationen ausgestattet werden, die sie kreislauffähig machen.

Ein weiterer Vorteil liegt in der Planung der Wiederverwendung durch digitale Werkzeuge. „Im Sinne der Kreislaufwirtschaft ist bereits zu Beginn der Planung auf die Möglichkeit des selektiven Rückbaus zu achten. Auch die Segmentierung auf Bauteil- und Bauwerksebene ist ein wichtiger Beitrag, Beton kreislaufgerecht einzusetzen. Möglichkeiten der funktionalen Hybridisierung und der Strukturoptimierung müssen zukünftig verstärkt in der Planung mithilfe von geeigneten digitalen Ansätzen berücksichtigt werden, um wertvolle Ressourcen besser erfassen und sie kreislaufgerechter einsetzen zu können. Hier stellen die digitale Planung und Fertigung einen wesentlichen Baustein dar, zukünftig regionale Stoffkreisläufe zu schließen, materialeffiziente, anpassbare, dauerhafte und resiliente Bauteile aus Beton zu schaffen und im Kreislauf zu belassen.“³²¹

Es kann gefolgert werden, dass die digitalen Entwurfs- und Planungswerkzeuge maßgebliche Stellschrauben hin zu einer kreislauffähigen Betonwirtschaft sein können.

³¹⁹ Ebd.

³²⁰ Vgl. ebd., S. 271.

³²¹ Ebd., S. 272.

2.4.3 Aufstellung von Entwurfs- und Planungsprinzipien am Beispiel der Betonforschung

Im Folgenden werden exemplarische Prinzipien erläutert, die den Parameter digitale Gestaltung innerhalb des Dreiklangs Technik, Konstruktion, Gestaltung hervorheben. Die im Folgenden gewählten Projekte könnten jedoch auch bei einem der beiden anderen Leitfaktoren zur Verdeutlichung angeführt werden, da hier bereits zwei oder drei Faktoren im Sinne einer angestrebten Prozesskontinuität zusammengebracht werden.

Gegenstand der Betrachtung exemplarischer Referenzen aus der Betonforschung sind digitale Planungswerkzeuge, die eine Prozesskontinuität abbilden. Dies umfasst eine Bandbreite vom Erstellen von Neubaustrukturen über die Wiederverwendung von Betonkonstruktionen bis hin zur digitalen Konzeption von Betonzusammensetzungen.

Die gewählten Prinzipien der digitalen Entwurfs- und Planungswerkzeuge werden nach einem einheitlichen Aufbau dargestellt. Zuerst wird die Konstellation der Projektbeteiligten aufgeführt. Daraufhin wird das Forschungsprojekt benannt und die angewendete digitale Prozesskette unter Anwendung des digitalen Werkzeuges beschrieben sowie abschließend der Erkenntnisgewinn in Bezug auf das Forschungsinteresse dargelegt.

2.4.3.1 Prinzip 1: digitales Gebäudebeschreibungsmodell – MZD

Herkunft und Bezeichnung:

Forschungsprojekt „Modular – Zirkulär – Digital (MZD): Individualisierbare Standardisierung – Ganzheitlicher Modulbaukasten zum Erreichen nachhaltiger Planungskonzepte und hoher planerischer Flexibilität“³²²

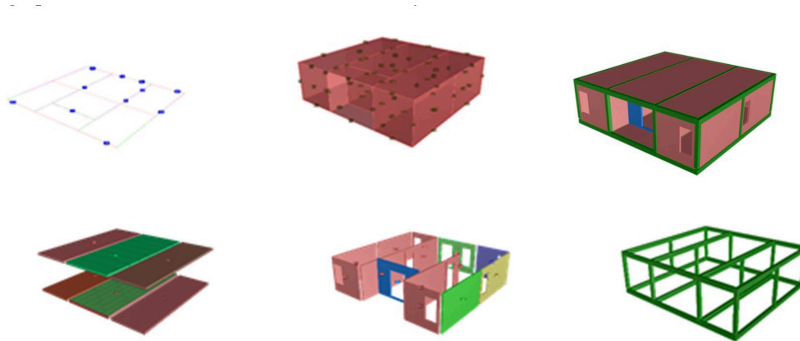


Abb. 33: Topologisches Beschreibungsmodell © Design-to-Production

Kurzbeschreibung:

Die nachfolgenden Beschreibungen des Forschungsprojektes MZD, sind Ergebnisse einer interdisziplinären Forschung der TU Dortmund unter der Leitung von Frau Prof. Dr.-Ing. J. Albus, der Juniorprofessur Ressourceneffizientes Bauen (REB)³²³ und dem Lehrstuhl Baukonstruktion, dem Unternehmen Design-to-Production als Experten digitaler Planungsmethoden und dem ausführenden Unternehmen Solid.Modulbau GmbH mit Expertise in der Realisierung modularer Gebäude. Das Forschungsprojekt dient als Referenz, um die Bedeutung digitaler Planungswerkzeuge für die Prozesskontinuität abzubilden. Im Rahmen der Forschung soll eine neuartige digitale Prozesskette etabliert werden. Sie beruht auf der Entwicklung eines digitalen Gebäudebeschreibungsmodells, das über die bisherige visuelle Abbildung von Geometrien erstmalig ein „In Beziehung Setzen“ der Bauteilverbindungen ermöglicht. Hintergrund der Entwicklung ist eine lückenlose Überführung digitaler Bauteilinformationen über parametrisch-assoziative Beschreibungen sämtlicher benachbarter Bauteilinformationen bis in die Produktion.³²⁴ Das Datenmodell wird an einer stark vereinfachten, systematisierten Raumstruktur erprobt, die alle relevanten Bauteilbeziehungen über die konstruktive Fügung abbildet.

³²² DBU „Modular – Zirkulär – Digital: Individualisierbare Standardisierung – Ganzheitlicher Modulbaukasten zum Erreichen nachhaltiger Planungskonzepte und hoher planerischer Flexibilität“ (10/2022-03/2025).

³²³ Beziehungsweise nach Berufung an die Hochschule Bochum der Professur Entwerfen und Konstruieren. Nachhaltiges Bauen (EKNB).

³²⁴ Tiefergehende Information hat der Projektpartner DTP wie folgt ausgeführt: „Damit dies gelingen kann, werden Bauteilbeziehungen benachbarter Bauteile so parametrisch-assoziativ hergestellt werden, dass bei Entwurfsänderung die unterliegende Struktur bestehen bleibt, jedoch produktions-erforderliche Daten unmittelbar aktualisiert werden können“ (Philipp Rumpf, *Modellhafte Konzipierung - Abbildung durchgängig digitaler Prozesse*, unter Mitw. von Kirsten Hollmann-Schröter 2024, 29. September 2024.

Digitale Konzeption:

Die folgende Beschreibung der digitalen Konzeption stellt die Leistung des Kooperationspartners Design-to-Production dar. Die Entwicklung beruht auf einer topologischen Unterstruktur, wie sie bereits bei bestehenden Programmen als Meshes³²⁵ oder Breps³²⁶ Anwendung finden, um rein geometrische Daten zu verwalten. Die Komplexität der Daten beziehungsweise der Beziehungen erfordert jedoch über die flächige Erfassung hinaus auch Aussagen zu Linien und Punkten, um die nachbarschaftlichen Beziehungen von Bauteilen in Gänze erfassen zu können. Sämtliche Bauteilbeziehungen werden daher über die Referenzierung von Raumzelle zu Fläche zu Kante bis zum Punkt über ein topologisches Modell beschrieben (Abb.33). „Der topologische Kern wird als Plug-in für Rhino mit C# programmiert. Der Kern verwaltet die topologischen Abhängigkeiten und steuert den Zugriff auf diese.“³²⁷ Dadurch können auch komplexe Zusammenhänge wie Fügepunkte abgebildet werden. Laut Walz und Rumpf verfolgt der entwickelte Ansatz, ein Gebäude zunächst stark vereinfacht durch ein topologisches Modell abzubilden, welches dann im Folgenden mit Informationen angereichert werden kann.

Erkenntnisgewinn vor dem Forschungsinteresse:

Das Forschungsprojekt fokussiert auf die konsistente Überführung von Planungsdaten in die Produktion auf Grundlage eines digitalen Gebäudebeschreibungsmodells. Dieses Werkzeug erlaubt die Abbildung von Bauteilbeziehungen über Algorithmen. Durch diese neuartige Verknüpfung können Materialwahl, Konstruktion und Nachhaltigkeit von Beginn an mit einer effizienten Produktion abgestimmt und noch im Prozess modifiziert werden. Sie sind somit Beispiel einer optimalen Prozesskontinuität. Anhand der Forschungsleistung kann abgebildet werden, wie die drei Leitfaktoren Technik, Konstruktion und Gestaltung verknüpft werden können und deren Verhältnis austariert werden kann. Das sich in der Entwicklung befindliche digitale Werkzeug erlaubt eine nachhaltige Planung im System, das in Teilen zu individualisieren ist und stützt damit die aufgestellte These der Individualisierten Standardisierung.

³²⁵ Objekte und Formen können geometrisch über zusammengesetzte Polygone zu einem Polygongitter, dem so genannten *Mesh* beschrieben werden.

³²⁶ „Boundary Representation, auf Deutsch *Begrenzungsflächenmodell*, (B-rep oder Brep) ist eine Darstellungsform eines *Flächen-* oder *Volumenmodells*, in der Objekte durch ihre begrenzenden Oberflächen beschrieben werden. Der Begriff setzt sich aus den englischen Worten *boundary* für *Begrenzung*, *Rand* und *representation* für *Darstellung* zusammen.“ (Wikipedia, »Boundary Representation«, https://de.wikipedia.org/wiki/Boundary_Representation (abgerufen am 20. Mai 2024).)

³²⁷ Rumpf 2024 (wie Anm. 324).

2.4.3.2 Prinzip 2: Planungswerkzeug zur Wiederverwendung von Beton-Komponenten

Herkunft und Bezeichnung:

Precast Concrete Components 2.0 Project (PCC 2.0)

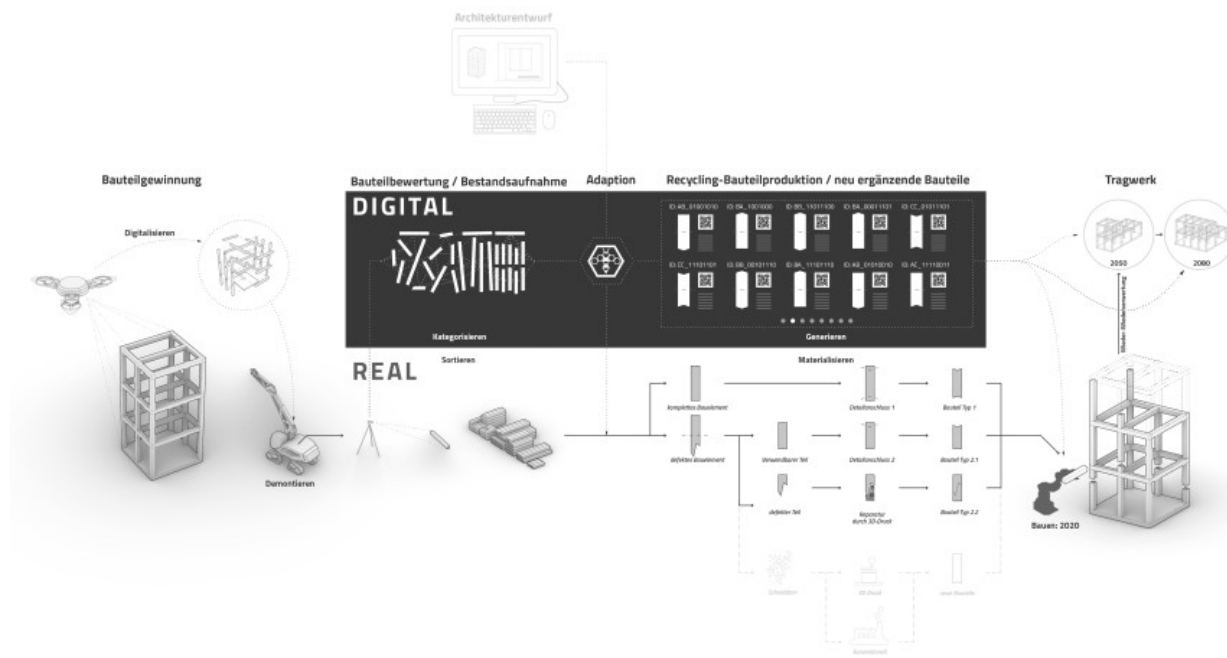


Abb. 34: Abbildung der diagrammatischen Prozesskette "real-digital" © DDU

Kurzbeschreibung:

Die Forschungsk Kooperation besteht aus dem Institut für Tragwerksentwurf (ITE), TU Braunschweig, der Digital Design Unit (DDU), TU Darmstadt sowie den Industriepartnern THING TECHNOLOGIES GmbH und FARO Europe GmbH. Das Team unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. O. Tessmann forscht aktuell zum Thema der Wiederverwendbarkeit von Betonbauteilen und setzt damit am Ende der Prozesskette bei der Rückführung von Komponenten ins System an (→3.1.2 Etablierung einer aufeinander aufbauenden Pyramidalen Zirkularität). Das Forschungsprojekt "Precast Concrete Components 2.0 Project (PCC 2.0)"³²⁸ gefördert durch das BMBF im Rahmen der Förderrichtlinie „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Bauen und Mineralische Stoffkreisläufe (ReMin)“ liefert Lösungsansätze für die eingangs geforderte ganzheitliche Planungsstrategie (→2.1 Multifaktorielle Systemdarstellung vor dem Hintergrund kontinuierlicher Prozesse).³²⁹ Gegenstand der Forschung ist im ersten Schritt die

³²⁸ Vgl. Technische Universität Darmstadt, Digital Design Unit, »The Precast Concrete Components 2.0 Project (PCC 2.0) develops circular economy strategies for concrete components of obsolete buildings.«, https://www.dg.architektur.tu-darmstadt.de/forschung_ddu/digitale_prozessketten_ddu/computational_design/fertigteil_2_0/fertigteile_2_0.en.jsp (abgerufen am 28. April 2024).

³²⁹ Das Forschungsprojekt wird gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung im Programm „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Bauen und Mineralische Stoffkreisläufe (ReMin)“. Die Forschungsk Kooperation besteht aus dem Institut für Tragwerksentwurf (ITE), TU Braunschweig,

digitale Erfassung und im zweiten Schritt der gezielte Rückbau von bestehenden Gebäuden mit dem Ziel, wiederverwendbare Betonkomponenten zu gewinnen (→3.1.3.4 Schnittstelle Technik – Konstruktion: digitale Zerlegung). Es geht um die Abbildung der digital-realen Prozesskette vom Urban Mining (Rohstoffgewinnung) zur Montage des wiedergewonnenen Betonbauteils (Abb. 34).

Digitale Konzeption:

Der Forschungsansatz setzt auf Prozessebene an und ermöglicht durch die Bereitstellung einer digital-digitalen Prozesskette eine Kopplung vorhandener Bestandsstrukturen bis hin zu neu gewonnenen Ressourcen. Es geht dabei um die Digitalisierung des Bestands, dessen Zerlegung und einer logistischen Vermittlung (Abb.35). Darüber hinaus werden neben der Kategorisierung Detaillösungen entwickelt, die die konstruktive Fügung für eine Wiederverwendung ermöglichen.³³⁰



Abb. 35: selektiver Rückbau von Betonkomponenten am Campus Lichtwiese © Malcom Unger, DDU

dem und der Digital Design Unit (DDU), TU Darmstadt sowie den Industriepartnern THING TECHNOLOGIES GmbH und FARO Europe GmbH.

³³⁰ Vgl. Weiterführende Informationen:

“ITE at TU Braunschweig produces the PCC’s by standardizing the deconstructed concrete components through subtractive post-processing. DDU develops discrete, graph-based computational design tools as well as combinatorial optimization algorithms to ensure a highly flexible reassembly of novel buildings made from PCC 2.0. A comprehensive, accompanying life cycle analysis (LCA), carried out by ENB at TU Darmstadt will allow an assessment of the method’s ecological and economic impact.”

(Technische Universität Darmstadt, Digital Design Unit, »Precast Concrete Components 2.0«, https://www.dg.architektur.tu-darmstadt.de/forschung_ddu/digitale_prozessketten_ddu/computational_design/fertigteile_2_0/fertigteile_2_0.en.jsp (abgerufen am 20. Mai 2024).

Erkenntnisgewinn vor dem Forschungsinteresse:

Eine individuelle, bestehende Betonstruktur wird durch digitale Werkzeuge in ein System überführt, so dass Bauteile gewonnen werden können, die zu einer neuen Struktur mit anderem Erscheinungsbild gefügt werden. Es wird dargelegt, dass die Faktoren System und Varianz ebenso an Bestandsstrukturen gewinnbringend zusammengeführt werden können und dies maßgeblich auf der Grundlage digitaler Planungswerkzeuge beruht. Das Projekt verdeutlicht, dass Komponenten und damit systematisierte Bauteile sogar aus bestehenden Strukturen gewonnen werden können. Diese Forschung stellt jedoch auch klar, welche Herausforderungen damit verbunden sind und stärkt somit die These, dass es mit Blick auf den Rückbau von Gebäuden gewinnbringend ist, bereits in der Konzeption einen Systemgedanken umzusetzen. Dieser Ansatz bedarf neuartiger digitaler Planungswerkzeuge.

2.4.3.3 Prinzip 3: Verfahren zur digital entworfenen Materialmatrix

Herkunft und Bezeichnung:

ReActivate - Automatisiert. Adaptiv. Kreislaufgerecht

Seriellles Sanierungsverfahren für den Gebäudebestand mit RC-Aeroleichtbeton

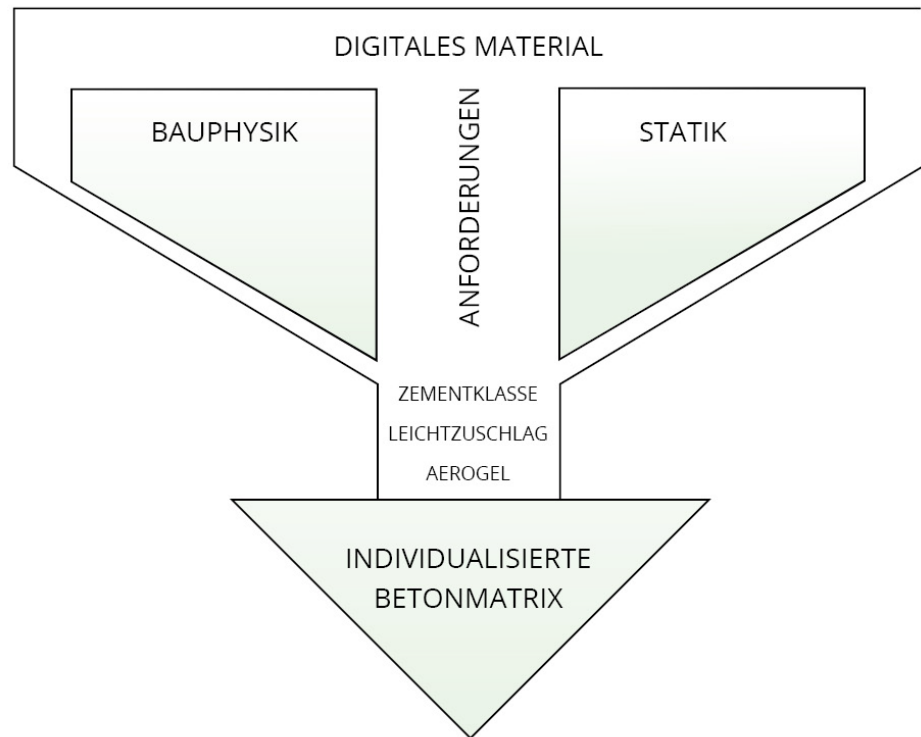


Abb. 36: Digitale Abstimmungen der Anforderungen an die Materialmatrix. Eigene Darstellung

Kurzbeschreibung:

Die projektierte Forschungsleistung „ReActivate“ soll ein Verfahren zur automatisierten Gebäudedämmung von Bestandsgebäuden bereitstellen (→6.2.1 Forschungskonzept: Sanierungsverfahren ReActivate). Dabei handelt es sich um eine in weiten Teilen selbst vorangetriebene Forschungsidee, die bisher als Kooperationsprojekt im Förderprogramm KMU innovativ eingereicht, jedoch abgelehnt wurde. Die Antragstellung erfolgte in Kooperation mit Frau Prof. J. Albus (ehemals Juniorprofessur Ressourceneffizientes Bauen) und Prof. Piet Eckert und Prof. Wim Eckert (Lehrstuhl Baukonstruktion). Angedachte Kooperationspartner bei einer Durchführung sind die Fa. G.tecz Engineering GmbH und Concrete Robotics.

Digitale Konzeption:

Die anvisierte Sanierungsstrategie zielt auf die spezifische Abstimmung von vorhandenen Strukturen und neuen Bauteilen. Das projektierte technische Verfahren strebt an, mit der Maschinen- und Materialtechnologie auf den individuellen Gebäudebestand einzugehen und eine maßgeschneiderte monolithische Gebäudehülle zu fertigen. Durch die Entwicklungsleistung gilt es, die konstruktiven und bauphysikalischen Parameter mit den Anforderungen an Material- und Maschinenteknologie zu kombinieren (Abb. 36). Um diese Feinabstimmung erreichen zu können, sollen als Grundvoraussetzung die Dämmstärkenden und der Einsatz der verwendeten Zuschläge objektspezifisch an die vorhandene Gebäudesubstanz angepasst werden können. Dies wird durch die Entwicklung einer variablen Materialmatrix, die auf den Gebäudebestand mit den nach GEG³³¹ geforderten U-Werten für Wandbauteile individuell abgestimmt werden kann, erreicht werden.

Erkenntnisgewinn vor dem Forschungsinteresse:

Der Begriff des digitalen Gestaltens wurde erweitert, da es sich nicht nur um eine geometrische wie optische Gestaltung von Betonkonstruktionen durch digitale Werkzeuge handelt, sondern darüber hinaus die Materialbestandteile digitalisiert zusammengefügt werden können. So wird erstmalig ein digitaler Materialentwurf möglich. Es wird im Folgenden als exemplarisches Beispiel herangezogen, da dies das Prinzip verdeutlicht, wie mit dem Werkstoff Beton eine direkte Fortschreibung von der Konzeption eines Materials in die automatisierte Fertigung umgesetzt werden kann. Es wird auf der Ebene der Werkzeuge (→2.1 Multifaktorielle Systemdarstellung vor dem Hintergrund kontinuierlicher Prozesse) eine Verknüpfung von digitalen Entwurfs- und Planungswerkzeugen (digitale Bestandsaufnahme) mit Werkzeugen der Fertigung (automatisierten Mischen der Betonmatrix) sowie Werkzeugen der Montage (robotischen Applikation) innerhalb einer kontinuierlichen Prozesskette angestrebt.

³³¹ Das Gebäudeenergiegesetz (GEG) regelt unter anderem die energetische Qualität von Gebäuden sowie den Einsatz erneuerbarer Energien.

(Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, »Das Gebäudeenergiegesetz«, <https://www.bmwsb.bund.de/Webs/BMWSB/DE/themen/bauen/energieeffizientes-bauen-sanieren/gebaeudeenergiegesetz/gebaeudeenergiegesetz-node.html> (abgerufen am 20. Mai 2024)).

2.4.4 Résumé: Auswirkungen digitaler Werkzeuge auf Prozesskontinuität und Nachhaltigkeit

Differenzierung der wesentlichen Digitalisierungsschritte im Bauwesen

Es lassen sich seit ihrer Einführung und in deren Fortentwicklung unterschiedlichste digitale Werkzeuge ausmachen, die den Entwurfs- und Fertigungsprozess von (Beton-)Konstruktionen entsprechend geprägt haben.

1. Digitalisierung des Entwurfs als zuerst zweidimensionale später auch dreidimensionale digitale Abbildung eines analogen Modells (durch CAD)
 - Auswirkungen auf Prozessebene, beispielsweise Gewerke Koordination
2. Individualisierung des Entwurfs mit maximaler Formenvielfalt durch Parametrisierung
 - Kopplung von Planung und Herstellungstechnik, beispielsweise Schalungsbau Mercedes-Benz-Museum
3. Tools zur dreidimensionalen geometrischen Abbildung einer Struktur und deren Abhängigkeiten (BIM)
 - Datenerfassung und Bereitstellung von Rohdaten wie Flächen von Bauteilen und Mengen von Materialien für angrenzende Prozesse wie Leistungsbeschreibung und Produktionsdaten
4. Werkzeuge zur Erfassung der Leistungsfähigkeit (FEM Analysen, Betondiagnostik) von Betonkonstruktionen
 - Funktionsoptimierter Einsatz des Werkstoffs Beton, Fehlerbegrenzung durch Digitalisierung, verringerte Toleranzen durch genauere Produktion
5. Bilanzierungstools zur Bewertung der Nachhaltigkeit und Datenbanken zur Vermittlung bereits verwendeter Bauteile
 - Bewusstsein zur Bewertung von (Beton-)Konstruktionen, Ermöglichung einer Dauerhaftigkeit durch Wiederverwendung

Paradigmenwechsel durch digital gestützte Prozesskontinuität

Die Digitalisierung justiert Entwurfs- und Planungswerkzeuge sowie Computerisierung und Automatisierung der Produktion jeweils den Treibern der Zeit entsprechend und verändert immer wieder auch die Architektursprache. All die zuvor aufgeführten Neuerungen auf Ebene der digitalen Entwurfs- und Planungswerkzeuge sind jedoch angesichts heutiger Anforderungen isoliert betrachtet nicht mehr ausreichend lösungsorientiert und müssen vielmehr integral verknüpft werden. Unter dem Leitfaktor der Konstruktion wird daraufhin resümiert, dass vielmehr ein Gleichgewicht aus technisch Möglichem und individuellen Anforderungen aussichtsreich erscheint (→2.3.4 **Résumé: Adaptive Konstruktionssysteme als Mittelweg aus Standardisierung und Individualisierung**). Zur Umsetzung dieser Forderung wird bei der Betrachtung des Leitfaktors Gestaltung eine sinnvolle Zusammenführung der digitalen Informationen ebenso wie der Planungsbeteiligten gefordert. „Das größte Potenzial datengetriebener Anwendungen liegt [aber] in der Möglichkeit, die Expertise ganz unterschiedlicher Disziplinen in gemeinsamen Modellen zusammenzubringen – nicht nur die von Architekten und Ingenieuren, sondern auch die von Soziologen, Landschaftsplanern, Geoökologen oder Mobilitätsplanern. So könnten wir zur multidimensionalen und multiskalaren, holistischen Bewertung der gebauten und geplanten Umwelt kommen – hoch relevant angesichts unserer planetaren Grenzen.“³³² Dieser Anspruch einer ganzheitlichen Verknüpfung zielt auf eine digitale Prozesskontinuität und eine effiziente und gewinnbringende Regelung einer bisher oftmals inkonsistenten Datenübergabe (→2.4.1.2 **Fragmentierung durch Übergabeprobleme an den Schnittstellen**). Damit dies gelingen kann bedarf es über den aktuellen Stand hinaus einer weiteren Evolution digitaler Werkzeuge, die sich auf die Verknüpfung der Bauteile und die Herstellung einer Prozesskontinuität fokussieren und das zuvor eingeforderte ausgewogene Verhältnis aus Standardisierung und Individualisierung verwirklichen. Solche ganzheitlichen Ansätze etablieren sich in der Betonforschung durch Projekte wie beispielsweise dem Sonderforschungsprogramm SPP 2187 „Adaptive Modulbauweisen mit Fließfertigungsmethoden- Präzisionsschnellbau der Zukunft“ und dem Sonderforschungsbereich TRR 277 "Additive Manufacturing in Construction (AMC)" (→2.4.3 **Aufstellung von Entwurfs- und Planungsprinzipien am Beispiel der Betonforschung**).

Assoziative Werkzeuge zur Verbesserung der Nachhaltigkeit

Ein weiterer wichtiger Aspekt, neben der Überführung der Daten aus der Planung in die Produktion, liegt in der Notwendigkeit, das Entwerfen auf die Prämisse der Nachhaltigkeit zu fokussieren. Kehl et al. beschreiben dahingehend den Mangel aktueller Bilanzierungswerkzeuge in der Entkopplung vom Entwurfs- und Konstruktionsprozess. „Automatisierte Ökobilanzierungen, etwa um Änderungen bei der Konstruktion oder der technischen Gebäudeausrüstung zu prüfen, können noch

³³² Marco Hemmerling und Boris Bähre, *Informierte Architektur. Building Information Modelling für die Architekturpraxis*, Basel 2020, S. 7.

nicht zufriedenstellend durchgeführt werden.“³³³ Dies erfordert digitale Entwurfswerkzeuge, die schon in einer frühen Planungsphase Bilanzierungsdaten mit unter anderem konstruktiven, bauphysikalischen und fertigungstechnischen Eigenschaften in Beziehung setzt und durch die Möglichkeiten der digitalen Simulation miteinander verknüpfen (→2.4.2.3 Durch digitale Simulation zur Verbesserung der Kreislauffähigkeit). Ein Beispiel dafür ist das assoziative Gebäudedatenmodell, welches in der Forschungsleistung MZD entwickelt wird und gerade diese Lücke zwischen der Bilanzierung eines Materials und dessen Überführung in eine konstruktive Lösung schließen soll (→2.4.3.1 Prinzip 1: digitales Gebäudebeschreibungsmodell – MZD). Als zielführend wird daher das konstruktive Entwerfen unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Nachhaltigkeit schon in der Entwurfsphase erachtet. In diesem Sinne müssen die Nachhaltigkeit der Konstruktion und eine Wiederverwendbarkeit für einen weiteren Lebenszyklus von Beginn an mitgedacht werden (→3.1.3 Erweiterung der Leitfaktoren um neuartige Schnittstellen), was eine Verschiebung des Entwurfsprozesses einfordert (→5.3 Fazit). Auch hier liefert die beschriebene Forschung einen Lösungsvorschlag, der darlegt, dass durch digitale Werkzeuge Varianz und Nachhaltigkeit maßgeblich optimiert werden können, indem Material beziehungsweise die Bauweise bereits in der Phase Null durch ein assoziatives Werkzeug bereitgestellt werden. (→6.1.1 Forschungsprojekt: hybride Systembaukonstruktion „Modular – Zirkulär - Digital (MZD)“).

Einforderung einer Strategie für die Umsetzung einer digital gestützten Kreislaufwirtschaft

Es wird offensichtlich, dass sich eine digitale Unterstützung in vielschichtigen Prozessen des Bauens bereits etabliert hat und eine konsequente Etablierung digital gestützter Prozesse weitreichende Vorteile zur Verbesserung der Nachhaltigkeit bieten kann. An dieser Stelle wird jedoch erneut deutlich, mit welcher Komplexität Planerinnen und Planer ebenso wie Ausführende mit dem Anspruch, eine Prozesskontinuität im Bauwesen umzusetzen, konfrontiert werden. Auch wenn die digitalen Werkzeuge zunehmend Prozesse optimieren und weitreichendere Dienste anbieten können, ist mit Blick auf die Prozessebene und die Abwägung der oftmals diametral wirkenden Faktoren der Mensch mit seinen Kompetenzen unabdingbar. Es bedarf daher einer übergeordneten Strategie, die eine Hilfestellung für ebendiesen bereithält. Im Rahmen der Dissertation wird eine solche Strategie im folgenden Kapitel als „Pyramidale Zirkularität“ eingeführt, die die Aspekte einer digital gestützten Nachhaltigkeitsplanung sortiert und für die Akteurinnen und Akteure im Bauwesen zugänglich macht (→3.1.2 Etablierung einer aufeinander aufbauenden Pyramidalen Zirkularität).

Bei der Einzelbetrachtung eines jeden Leitfaktors und insbesondere in der Diskussion um den dritten Leitfaktor Gestaltung wird deutlich, dass sich die drei Faktoren gegenseitig bedingen und die vielschichtigen Einflüsse nicht immer stringent zu trennen sind. Einen Schwerpunkt der Dissertation bildet daher die

³³³ Kehl/Achternbosch/Revermann 2022 (wie Anm. 6), S. 222.

Verknüpfung der Leitfaktoren. Im folgenden Kapitel IV schließt sich daher die Betrachtung zur Verknüpfung der Leitfaktoren an. Dabei wird die Bewertung der Nachhaltigkeit im Allgemeinen und der von Betonkonstruktionen im Speziellen beleuchtet.

