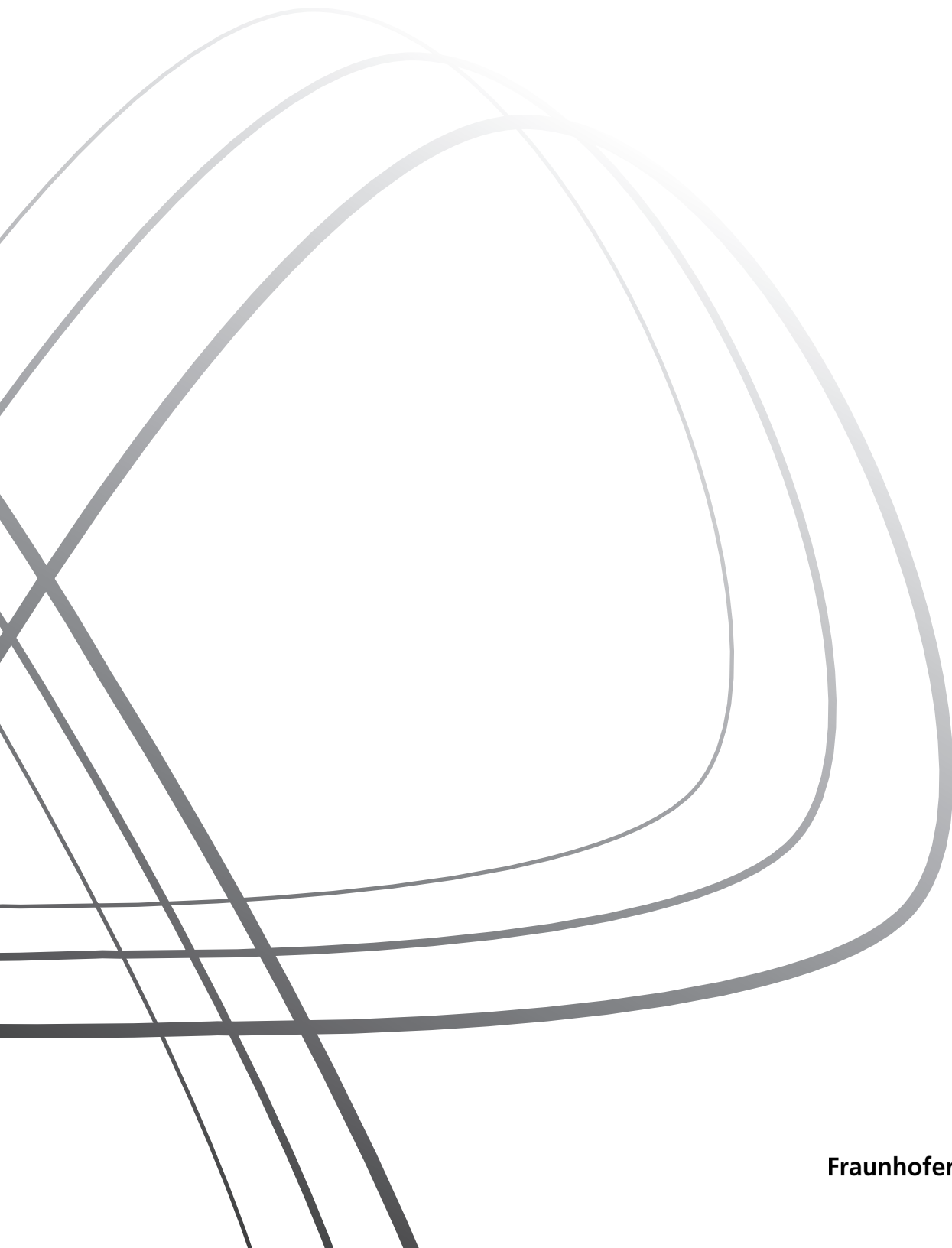


Individualisierte Standardisierung monolithischer (Beton-)Konstruktionen
Austarierte Implementierung der Leitfaktoren
Technik, Konstruktion und Gestaltung
vor dem Hintergrund einer Verbesserung der Nachhaltigkeit

Kirsten E. Hollmann-Schröter



Individualisierte Standardisierung monolithischer (Beton-)Konstruktionen

Austarierte Implementierung der Leitfaktoren

Technik, Konstruktion und Gestaltung

vor dem Hintergrund einer Verbesserung der Nachhaltigkeit

Dissertation

**Individualisierte Standardisierung monolithischer (Beton-)Konstruktionen
Austarierte Implementierung der Leitfaktoren Technik, Konstruktion und Gestaltung
vor dem Hintergrund einer Verbesserung der Nachhaltigkeit**

zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieurin (Dr.-Ing.)
an der Fakultät für Architektur und Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Dortmund

vorgelegt von

Kirsten Elisabeth Hollmann-Schröter

Prüfungskommission

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Wolfgang M. Willems, Technische Universität Dortmund

Erstgutachterin: Prof. Dr.-Ing. Jutta Albus BDA, Hochschule Bochum

Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek BDA, Universität Stuttgart

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über www.dnb.de abrufbar.

ISBN (Print): 978-3-7388-1015-8

ISBN (E-Book): 978-3-7388-1016-5

DOI: 10.60628/9783738810165

<https://doi.org/10.60628/9783738810165>

Zugl.: Dortmund, Technische Universität Dortmund, Diss., 2024

Herstellung: Andreas Preising

Satz, Layout und Umschlaggestaltung: K. E. Hollmann-Schröter

Druck: Libri Plureos GmbH, Hamburg

Sofern nicht anders angegeben, ist der Inhalt dieses Werks unter einer Creative Commons

Namensnennung-Share Alike 4.0 International-Lizenz lizenziert:

<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode.de>

Davon ausgenommen sind sämtliche Abbildungen. Die Bildrechte sind an der jeweiligen Stelle ausgewiesen.



In dieser Arbeit wird zugunsten einer offenen Geschlechterzugehörigkeit die weibliche wie männliche Sprachform parallel ausgezeichnet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten – sofern nicht anders kenntlich gemacht – gleichermaßen für alle Geschlechter (m/w/d). Im Sinne der Lesbarkeit wird auf die Nennung von Titeln und Vornamen verzichtet und nur im Rahmen der Danksagung und Fallanalysen eine vollständige Angabe gemacht.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften. Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert werden, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Fraunhofer IRB Verlag, 2025

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB

Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Telefon +49 711 970-2500

Telefax +49 711 970-2508

irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

Individualisierte Standardisierung monolithischer (Beton-)Konstruktionen

Austarierte Implementierung der Leitfaktoren

Technik, Konstruktion und Gestaltung

vor dem Hintergrund einer Verbesserung der Nachhaltigkeit

Kirsten Elisabeth Hollmann-Schröter

Vorwort

Die neunjährige Tätigkeit bei UNStudio, Van Berkel en Bos, Amsterdam hat erstmalig mein Interesse für tragende Betonbauweisen geweckt und mir die gestalterische Kraft monolithischer Konstruktionen an Projekten wie dem Mercedes-Benz-Museum aufgezeigt. Die langjährige Begleitung der Bauausführung bis zur Eröffnung des „Hauses für Musik und Musiktheater – Mumuth“ in Graz mit seinem raumwirkenden Beton-Twist hat meine weitere baukonstruktive Entwicklung bis heute beeinflusst. Für mich stand bei der Planung und Realisierung von Architektur zunehmend die Bedeutung der Verbesserung der Nachhaltigkeit im Bauwesen im Fokus, was schließlich in der Weiterbildung zur Energie-Effizienz-Expertin resultierte und mich nach wie vor aus Respekt vor der Umwelt antreibt. Planerinnen und Planer können meiner Überzeugung nach besonders dazu beitragen, den Klimazielen näher zu kommen. Mein starker Wille, neben der Bauausführung die interdisziplinäre Bauforschung näher zu ergründen, hat mich an die TU Dortmund geführt. Ein maßgebender Tag war rückblickend die Bewilligung des Forschungsprojektes zur Aeroleichtbetonweise, welches letztlich den Initialpunkt meines Dissertationsthemas bildete. Bereits in der Antragstellung wurde von mir das Zusammenspiel der drei Leitfaktoren Technik, Konstruktion und Gestaltung erstmalig synthetisiert und die später aufgestellte Strategie der Individualisierten Standardisierung erprobt. Meine Dissertation versucht im Folgenden, einen ganzheitlichen Blick auf die komplexen Einflüsse auf eine Bauaufgabe abzubilden und daraus mit einer klaren Fokussierung auf die Zukunftsfähigkeit monolithischer Betonkonstruktionen eine Handlungsstrategie zu entwickeln, wie Planerinnen und Planer einen Wandel bewirken können.

Im Sinne der Lesbarkeit wird auf die Nennung von Titeln und Vornamen verzichtet und nur im Rahmen der Danksagung und Fallanalysen eine vollständige Angabe gemacht. In dieser Arbeit wird zugunsten einer offenen Geschlechterzugehörigkeit die weibliche wie männliche Sprachform parallel ausgezeichnet. Spezifische Fachbegriffe werden im Glossar detailliert erläutert.

Danksagung

Vor allem richte ich meinen aufrichtigen Dank und Respekt an meine Betreuerin Frau Prof. Dr.-Ing. Jutta Albus. Ihrer professionellen Begleitung in allen Phasen meiner Dissertation, und darüber hinaus, habe ich in großen Teilen meine wissenschaftliche Weiterentwicklung zu verdanken. Sie prägte mich durch ihren starken Willen, Forschung und Lehre innerhalb der Profession voranzutreiben. Sie förderte mich auf Augenhöhe durch die Durchführung gemeinsamer Forschungsvorhaben und Lehrtätigkeiten, Veröffentlichungen sowie Konferenzteilnahmen und vieles mehr. Unsere gleiche Wellenlänge, die sich im Verständnis von Anspruch und Vertrauen spiegelt, setzt ungeahnte Kräfte frei.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek als meinem Mentor und Zweitgutachter gilt meine besondere Achtung und mein Dank. Fachlich diente er, als Entwickler des Gradientenbetons, als direkte wissenschaftliche Quelle und gewährte mir wertvolle Einblicke in diese Forschung. Darüber hinaus danke ich Ihm für sein Eingehen auf meine Persönlichkeit. Der regelmäßige Austausch zu meiner professionellen und persönlichen Entwicklung hat mich kontinuierlich wachsen lassen.

Ich bedanke mich bei dem Vorsitzenden des Prüfungsausschusses an der Fakultät Architektur und Bauingenieurwesen, Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfgang M. Willems, für die Durchführung des Dissertationsverfahrens in der Konstellation mit meinen Gutachtern.

Ich danke meinem Arbeitgeber, der TU Dortmund, und in Persona der Leitung des Lehrstuhls Baukonstruktion, Prof. Piet Eckert und Prof. Wim Eckert, sowie den ehemaligen Lehrstuhlinhabern Prof. Ansgar Schulz und Prof. Benedikt Schulz für die stete Förderung während meiner Beschäftigung. Besonders schätze ich das gute Verhältnis zu den Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl Baukonstruktion, an der Juniorprofessur Ressourceneffizientes Bauen sowie an der Hochschule Bochum EKNB, mit denen ich direkt zusammengearbeitet habe und die mich während dieser Zeit unterstützt haben.

Diese Dissertation bezieht sich in großen Teilen auf die kooperative Forschung mit anderen Universitäten und Praxispartnern, die vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)¹ sowie der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördert wurden. Mein Dank gilt diesen Projektförderern. Mein besonderer Dank gilt den Kooperationspartnern, Prof. Dr.-Ing. Gregor Zimmermann der G.tecz Engineering GmbH, Arnold Walz und Philipp Rumpf von Design-to-Production und Hermann Stegink der Solidmodulbau GmbH, mit denen ich intensiv zusammenarbeiten durfte. Ebenso danke ich Dr.-Ing. Matthias Molter der Bremer SE, durch den ich wertvolle Einblick in die Betonverarbeitung und Vorfertigungsprozesse erlangen konnte. Ich danke Prof. Dr.-Ing. Oliver Tessmann für den gewinnbringenden Forschungsaustausch zum digitalen Gestalten an der DDU, sowie Prof. Dr.-Ing. Alexander Hückler, der mir umfassenden Zugang zu den Forschungsergebnissen der Infraleichtbetontechnologie gegeben hat.

Mein Dank gilt Karoline Müller-Stahl und Andrea Wiegelmann, von denen ich viel Wertvolles über das wissenschaftliche Schreiben lernen konnte. Danke an Anke Kujawski, die innerhalb des mentoring³-Programms der UA Ruhr, meine wissenschaftliche Entwicklung kontinuierlich hat wachsen lassen. Ich bedanke mich bei allen Planerinnen, Planern und Forschenden, die mir die Informationen und das Bildmaterial zu den referenzierten Projekten zur Verfügung gestellt haben.

Meinen Weg bis hierher hätte ich ohne die Personen, die mich in meinem privaten Umfeld begleiten, nicht gehen können. Daher gilt meiner Familie und meinen Freundinnen mein tiefster Dank. Die Wurzeln für diesen Weg in die Wissenschaft wurden schon während meines Studiums an der Bauhaus Universität Weimar und der Tätigkeit bei UNStudio in Amsterdam gelegt. Ich schätze alle meine Unterstützer auf diesem Weg sehr und möchte Ihnen an dieser Stelle meinen Dank aussprechen.

Paderborn, im Juni 2025

¹ Zur Zeit der Antragstellung noch unter der Bezeichnung Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi).

INHALTSVERZEICHNIS

KAPITEL I FORSCHUNGSRAHMEN	1
1.1 EINLEITUNG	1
1.1.1 RELEVANZ	1
1.1.2 DARSTELLUNG DES ZUSAMMENHANGS VON MANGEL, FORSCHUNGSLÜCKE UND POTENZIAL	4
1.2 ZIELVORSTELLUNG UND EINGRENZUNG DES UNTERSUCHUNGSFELDES	8
1.2.1 DARSTELLUNG DER PROBLEME UND ZIELE	8
1.2.2 EINFÜHRUNG DER STRATEGIE DER INDIVIDUALISIERTEN STANDARDISIERUNG	10
1.2.3 EINGRENZUNG MONOLITHISCHE BETONBAUWEISEN	13
1.3 VORGEHENSWEISE DER DISSERTATION	19
1.4 METHODIK	21
KAPITEL II DIFFERENZIERUNG DER LEITFAKTOREN	25
2.1 MULTIFAKTORIELLE SYSTEMDARSTELLUNG VOR DEM HINTERGRUND KONTINUIERLICHER PROZESSE	25
2.2 LEITFAKTOR TECHNIK – KOMPLEXE FERTIGUNGSTECHNOLOGIEN	29
2.2.1 HERLEITUNG AUTOMATISierter FERTIGUNGSPROZESSE	30
2.2.1.1 DIFFERENZIERUNG DER BEGRIFFLICHKEITEN	30
2.2.1.2 TECHNISCHE ENTWICKLUNG DER COMPUTERGESTÜTZTEN AUTOMATISIERTE FERTIGUNG	30
2.2.1.3 NEUARTIGE ANFORDERUNGEN AN KOMPLEXE FERTIGUNGSSTRATEGIEN	32
2.2.2 EINGRENZUNG: AUTOMATISIERTE FERTIGUNG MONOLITHISCHER KONSTRUKTIONEN	33
2.2.2.1 NEUARTIGE STANDARDISIERUNGSVERFAHREN DURCH AUTOMATISIERUNG IM BETONSEKTOR	33
2.2.2.2 ZUSAMMENSPIEL VON MATERIALTECHNOLOGIE UND FERTIGUNGSVERFAHREN	34
2.2.2.3 ERHÖHTE VARIANZ DURCH AUTOMATISIERTE FERTIGUNGSVERFAHREN	35
2.2.2.4 KOMBINATION VERSCHIEDENER VERFAHREN INNERHALB EINES FERTIGUNGSPROZESSES	37
2.2.3 AUFSTELLUNG VON VERFAHRENSPRINZIPIEN AM BEISPIEL DER BETONFORSCHUNG	39
2.2.3.1 PRINZIP 1: EXTRUSIONSBASIERTES 3-D-DRUCKVERFAHREN	40
2.2.3.2 PRINZIP 2: SPRITZBETON APPLIKATION	49
2.2.3.3 PRINZIP 3: CO-EXTRUSIONSVERFAHREN	51
2.2.4 RÉSUMÉ: FORDERUNG EINER KOMPLEMENTÄREN FERTIGUNGSSTRATEGIE	53
2.3 LEITFAKTOR KONSTRUKTION – UMSETZUNG EINER ANPASSUNGSFÄHIGEN SYSTEMATISIERUNG	57
2.3.1 HERLEITUNG DES SPANNUNGSFELDES VON SYSTEM UND VARIANZ	58
2.3.1.1 GENESE UND ABLÖSUNG REIN EFFIZIENZGETRIEBENER STANDARDISIERUNGSPROZESSE	58
2.3.1.2 DIFFERENZIERUNG DES SYSTEMBEGRIFFS UND VORGEHENS ZUR UMSETZUNG EINES SYSTEMANSATZES	60
2.3.1.3 VORTEILE OFFENER SYSTEME	61
2.3.1.4 STATUSBERICHT SERIELLES UND MODULARES BAUEN	63
2.3.1.5 ERFOLGSFAKTOR GEZIELTE ANPASSUNGSPLANUNG	65
2.3.1.6 ABGRENZUNG ZU BISHERIGEN HERANGEHENSWEISEN UND GRÜNDE FÜR EINEN WANDEL	66
2.3.1.7 EINFÜHRUNG EINER SYSTEMATIK AUF PROZESSEBENE	68
2.3.1.8 WEITREICHENDE BEDEUTUNG DES SYSTEMANSATZES FÜR DIE VERBESSERUNG DER NACHHALTIGKEIT	69
2.3.2 EINGRENZUNG: SYSTEMATISIERUNG MASSIVER KONSTRUKTIONEN	70
2.3.2.1 FRÜHES BEISPIEL DER SYSTEMATISIERUNG GESTALTETER BETONMODULE	70

2.3.2.2	SYSTEMATISIERUNG DES WOHNUNGSBAUS DURCH DIE GRÖRTAFELBAUWEISE	72
2.3.2.3	KONSTRUKTIVE FÜGUNG IM SYSTEM	73
2.3.2.4	KONSTRUKTIONSPRINZIPIEN UND NUTZERANTIZIPATION	75
2.3.2.5	ANPASSUNGSFÄHIGE SYSTEMATISIERUNG VON BETONKONSTRUKTIONEN	80
2.3.3	AUFSTELLUNG VON KONSTRUKTIONSPRINZIPIEN AM BEISPIEL DER BETONFORSCHUNG	81
2.3.3.1	PRINZIP 1: BAUKASTENSYSTEMENTWICKLUNG AM BEISPIEL „INTELLIGENTE MODULARISIERUNG“	82
2.3.3.2	PRINZIP 2: VORGEFERTIGTE TAFEL-KOMPONENTEN AM BEISPIEL „NORRA TORNEN“	85
2.3.3.3	PRINZIP 3: RAUMMODULE AM BEISPIEL „GOMOS BUILDING SYSTEM“	88
2.3.4	RÉSUMÉ: ADAPTIVE KONSTRUKTIONSSYSTEME ALS MITTELWEG AUS STANDARDISIERUNG UND INDIVIDUALISIERUNG	91
2.4	LEITFAKTOR GESTALTUNG – DIGITAL GESTÜTZTES ENTWERFEN UND PRODUZIEREN	97
2.4.1	HERLEITUNG DER OPTIMIERUNG VON PLANUNG UND PRODUKTION DURCH DIGITALE WERKZEUGE	98
2.4.1.1	DIFFERENZIERUNG WESENTLICHER DIGITALISIERUNGSSCHRITTE DURCH ENTWURFS- UND PLANUNGSWERKZEUGE	98
2.4.1.2	FRAGMENTIERUNG DURCH ÜBERGABEPROBLEME AN DEN SCHNITTSTELLEN	100
2.4.1.3	ASSOZIATIVE VERKNÜPFUNGEN UND DATENKOMPATIBILITÄT	102
2.4.1.4	RELEVANZ DER PLANENDEN BEI DER UMSETZUNG DER INDIVIDUALISIERTEN STANDARDISIERUNG	103
2.4.1.5	PARADIGMENWECHSEL DURCH PROZESSKONTINUITÄT UND ERHÖHTES MAß DER VARIANZ	105
2.4.2	EINGRENZUNG: INNOVATIVE ENTWURFS- UND PLANUNGSPROZESSE MIT BETONKONSTRUKTIONEN	106
2.4.2.1	ALLEINSTELLUNGSMERKMAL FÜR DAS DIGITALE GESTALTEN MIT BETON	106
2.4.2.2	ABBILDUNG DER DIGITALEN WERTSCHÖPFUNGSKETTE	106
2.4.2.3	DURCH DIGITALE SIMULATION ZUR VERBESSERUNG DER KREISLAUFFÄHIGKEIT	108
2.4.3	AUFSTELLUNG VON ENTWURFS- UND PLANUNGSPRINZIPIEN AM BEISPIEL DER BETONFORSCHUNG	109
2.4.3.1	PRINZIP 1: DIGITALES GEBÄUDEBESCHREIBUNGSMODELL – MZD	110
2.4.3.2	PRINZIP 2: PLANUNGSWERKZEUG ZUR WIEDERVERWENDUNG VON BETON-KOMPONENTEN	112
2.4.3.3	PRINZIP 3: VERFAHREN ZUR DIGITAL ENTWORFENEN MATERIALMATRIX	115
2.4.4	RÉSUMÉ: AUSWIRKUNGEN DIGITALER WERKZEUGE AUF PROZESSKONTINUITÄT UND NACHHALTIGKEIT	117

KAPITEL III | NACHHALTIGKEIT **122**

3.1	VERKNÜPFUNG DER LEITFAKTOREN MIT EINEM FOKUS AUF NACHHALTIGKEITSASPEKTE	122
3.1.1	GRUNDLAGENBETRACHTUNG ZUR NACHHALTIGKEITSBEWERTUNG	122
3.1.2	ETABLIERUNG EINER AUF EINANDER AUFBAUENDEN PYRAMIDALEN ZIRKULARITÄT	126
3.1.3	ERWEITERUNG DER LEITFAKTOREN UM NEUARTIGE SCHNITTSTELLEN	132
3.1.3.1	SCHNITTSTELLE GESTALTUNG – KONSTRUKTION: DIGITALE PLANUNGSWERKZEUG	134
3.1.3.2	SCHNITTSTELLE KONSTRUKTION – TECHNIK: DIGITALE BAUTEIL	136
3.1.3.3	SCHNITTSTELLE GESTALTUNG – TECHNIK: DIGITALE MATERIAL	138
3.1.3.4	SCHNITTSTELLE TECHNIK – KONSTRUKTION: DIGITALE ZERLEGUNG	140
3.1.3.5	SCHNITTSTELLE KONSTRUKTION – GESTALTUNG: DIGITAL GESTÜTZTER NEUENTWURF	143
3.1.3.6	SCHNITTSTELLE TECHNIK – GESTALTUNG: DIGITALE KATASTER	145
3.1.4	RÉSUMÉ: KREISLAUFFÄHIGKEIT DURCH DIGITAL GESTÜTZTE PROZESSE	147

KAPITEL IV | SYNOPSIS DREIER BETONTECHNOLOGIEN **151**

4.1	EINLEITUNG VERGLEICHENDE FORSCHUNG	151
4.1.1	DEFINITION DER BAUTEILANFORDERUNGEN AN MONOLITHISCHE, VORGEFERTIGTE WANDSYSTEME	152

4.1.2	KRITERIEN ZUR NACHHALTIGKEITSBEWERTUNG VON BETONKONSTRUKTIONEN	152
4.1.2.1	NUTZUNGSDAUER	154
4.1.2.2	REDUKTION VON MASSE	155
4.1.2.3	REDUKTION ZEMENTANTEIL	157
4.1.2.4	SUBSTITUTION ZEMENT	158
4.1.2.5	EINFLUSS DER DRUCKFESTIGKEIT	160
4.1.2.6	RECYCLINGANTEIL	161
4.1.2.7	WIEDERVERWENDUNG VON VORGEFERTIGTEN KOMPONENTEN	163
4.1.2.8	RÜCKBAUBARKEIT UND REVERSIBLE FÜGETECHNIK	166
4.1.2.9	ABFALLREDUKTION	167
4.1.2.10	TRANSPORT UND REGIONALITÄT	169
4.1.2.11	VORFERTIGUNG UND PRODUKTIVITÄT	171
4.1.2.12	ZEIT UND PROZESS	172
4.2	BETONTECHNOLOGIE: INFRALEICHTBETON	175
4.2.1	MATERIALTECHNOLOGIE	176
4.2.2	FERTIGUNGSTECHNOLOGIE	178
4.2.3	KONSTRUKTION	179
4.2.4	DIGITALES GESTALTEN	182
4.2.5	ABGLEICH DER INFRALEICHTBETON-TECHNOLOGIE ANHAND DES KRITERIENGELEITETEN PRÜFRASTERS	185
4.2.6	RÉSUMÉ: INFRALEICHTBETON	187
4.3	BETONTECHNOLOGIE: GRADIENTENBETON	189
4.3.1	MATERIALTECHNOLOGIE	191
4.3.2	FERTIGUNGSTECHNOLOGIE	195
4.3.3	KONSTRUKTION	198
4.3.4	DIGITALES GESTALTEN	204
4.3.5	ABGLEICH DER GRADIENTENBETON-TECHNOLOGIE ANHAND DES KRITERIENGELEITETEN PRÜFRASTERS	205
4.3.6	RÉSUMÉ: GRADIENTENBETON	207
4.4	BETONTECHNOLOGIE: AEROLEICHTBETON	209
4.4.1	MATERIALTECHNOLOGIE	210
4.4.2	FERTIGUNGSTECHNOLOGIE	213
4.4.3	KONSTRUKTION	216
4.4.4	DIGITALES GESTALTEN	220
4.4.5	ABGLEICH DER AEROLEICHTBETON-TECHNOLOGIE ANHAND DES KRITERIENGELEITETEN PRÜFRASTERS	221
4.4.6	RÉSUMÉ: AEROLEICHTBETON	223
4.5	ZUSAMMENFASSUNG SYNOPSIS	225
4.6	ANNAHMENKRITIK	231
KAPITEL V ERGEBNISZUSAMMENFÜHRUNG		235
5.1	POTENZIALE ANPASSUNGSFÄHIGER BETONKONSTRUKTIONEN	235
5.1.1	DAUERHAFTIGKEIT DURCH FLEXIBILITÄT	235
5.1.2	EMISSIONEN IM ZUSAMMENHANG ZWISCHEN MASSE UND FLEXIBILITÄT	236
5.1.3	PLANERISCHE UMSETZUNG DER STRATEGIE DER INDIVIDUALISIERTEN STANDARDISIERUNG	237
5.2	DEFIZITE IN BEZUG AUF DIE UMSETZUNG DER LEITSTRATEGIE	239

5.2.1	DYSBALANCEN DURCH GEGENEINANDER WIRKENDE PARAMETER	239
5.2.2	FEHLENDE STANDARDS AUFGRUND DER NOTWENDIGKEIT EINER RELATIERTEN GEWICHTUNG	240
5.2.3	STATUS DER ANWENDUNG EINER INDIVIDUALISIERTEN STANDARDISIERUNG	241
5.2.4	FORSCHUNGSFÖRDERUNG ALS WEICHENSTELLER	242
5.3	FAZIT	244
5.3.1	SYNTHESE DER AUFGESTELLTEN THEORIEN	244
5.3.2	WERTSCHÄTZUNG MONOLITHISCHER BETONKONSTRUKTIONEN	247
5.3.3	NEUORDNUNG DER ENTWURFSMETHODIK DURCH KONSTRUKTIVE UND PROZESSUALE SYSTEMATISIERUNGSANSÄTZE	248
KAPITEL VI FORSCHUNGSTRANSFER DER THEORIEBILDUNGEN		251
6.1	ÜBERTRAGUNG DER LEITTHEORIE AUF ANDERE BAUWEISEN UND MATERIALIEN	252
6.1.1	FORSCHUNGSPROJEKT: HYBRIDE SYSTEMBAUKONSTRUKTION „MODULAR – ZIRKULÄR - DIGITAL (MZD)“	253
6.2	ÜBERTRAGUNG DER LEITTHEORIE AUF DEN ANWENDUNGSFALL BESTANDSSTRUKTUREN	255
6.2.1	FORSCHUNGSKONZEPT: SANIERUNGSVERFAHREN REACTIVATE	256
6.3	AUSBLICK EINES GANZHEITLICHEN SZENARIOS	257
KAPITEL VII ANHANG		259
7.1	GLOSSAR	259
7.2	LITERATURVERZEICHNIS	263
7.3	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	272

Kapitel I | Forschungsrahmen

1.1 Einleitung

1.1.1 Relevanz

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

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

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

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

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

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

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

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

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

¹⁰ Ebd., S. 87.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

²¹ Ebd., S. 161.

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

1.1.2 Darstellung des Zusammenhangs von Mangel, Forschungslücke und Potenzial

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

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

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

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

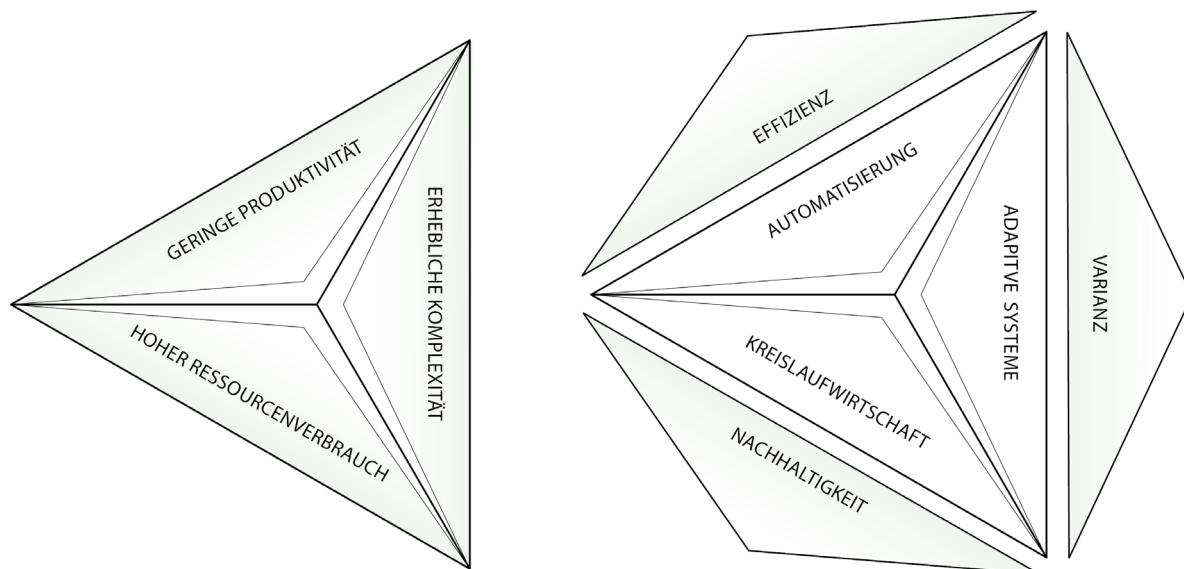


Abb. 1: Mängel im Bauwesen (links) und sich daraus ergebende Forschungslücken (rechts). Eigene Darstellung

²² Vgl. Erläuterung im Glossar.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2. Fehlende Kanalisierung der Komplexität im Bauprozess in systemische³⁰ Lösungsansätze

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

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

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

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

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

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

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

3. Hoher Ressourcenverbrauch im Bauwesen

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

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

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

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

1.2 Zielvorstellung und Eingrenzung des Untersuchungsfeldes

1.2.1 Darstellung der Probleme und Ziele

Probleme

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

Ziele

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

³⁷ und Ausnutzung des Potenzials maßgeschneiderter Betonfertigung

³⁸ für adaptive Betonkonstruktionen

³⁹ und Rückführung von Betonbauteilen in den Kreislauf

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

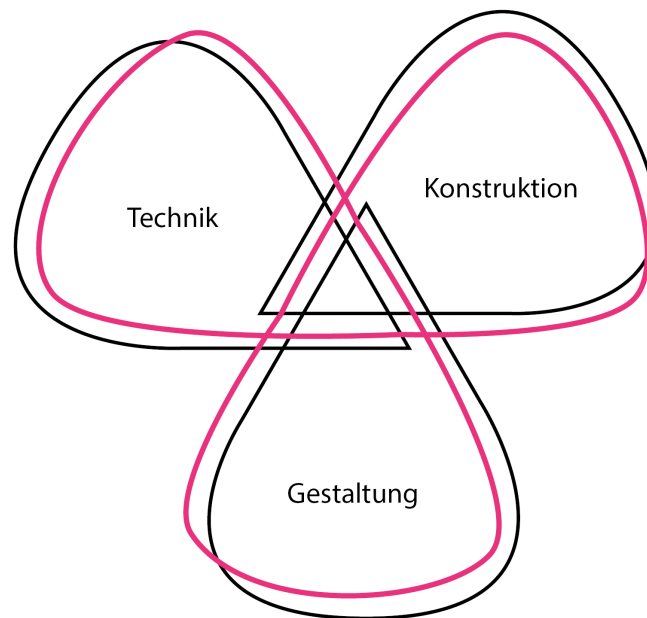


Abb. 2: drei Leitfaktoren. Eigene Darstellung

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

1.2.2 Einführung der Strategie der Individualisierten Standardisierung

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

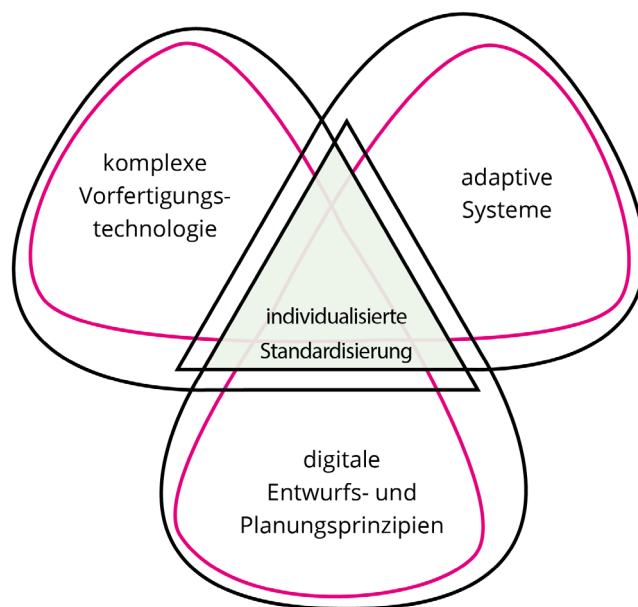


Abb. 3: Definition der Leitfaktoren, die eine Individualisierte Standardisierung ausmachen.

Eigene Darstellung

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

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

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

⁴² Vgl. Erläuterung im Glossar.

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

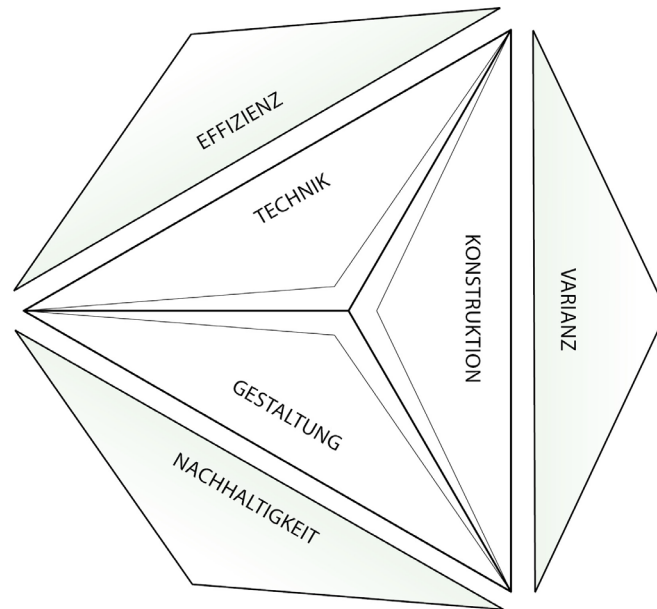


Abb. 4: Zusammenhang aus Leitfaktoren und sich durch die synchrone Umsetzung ergebender Fortschritt. Eigene Darstellung

Herleitung und Übertragung auf das Bauwesen

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

1.2.3 Eingrenzung monolithische Betonbauweisen

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

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

Herleitung monolithischer Konstruktionen

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

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

⁴⁹ Vgl. Definition:

„Der Monolith (griechisch μονόλιθος, monólithos, „der Einstein“, „einheitlicher Stein“, aus μονο-, mono-, „einzel-“ und λίθος, líthos, „der Stein“) bedeutet so viel wie „Stein aus einem Guss“. Allgemein bezeichnet man Objekte, die aus einem Stück bestehen, als monolithisch.“

(<https://www.fremdwort.de/suchen/bedeutung/monolith>).

⁵⁰ Eigene Definition vor der forschungsleitenden These.

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

Definition monolithischer Betonkonstruktionen vor dem Forschungsrahmen

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

Mehrschichtige Wandkonstruktionen

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

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

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

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

⁵⁴ Vgl. Bearth & Deplazes Architekten et al.

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

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

Daseinsberechtigung monolithischer Systeme

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

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

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

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

⁶⁰ Ebd., S. 5.

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

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

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

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

Monolithische Konstruktionen vor dem Hintergrund der Kreislauffähigkeit

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

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

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

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

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

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

⁶⁸ Vgl. Erläuterungen Glossar.

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

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

Verknüpfung zum Forschungsprojekt

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

⁷⁰ Ebd., S. 54.

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

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

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

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

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



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

Vorteile monolithischer Wandkonstruktionen

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

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

1.3 Vorgehensweise der Dissertation

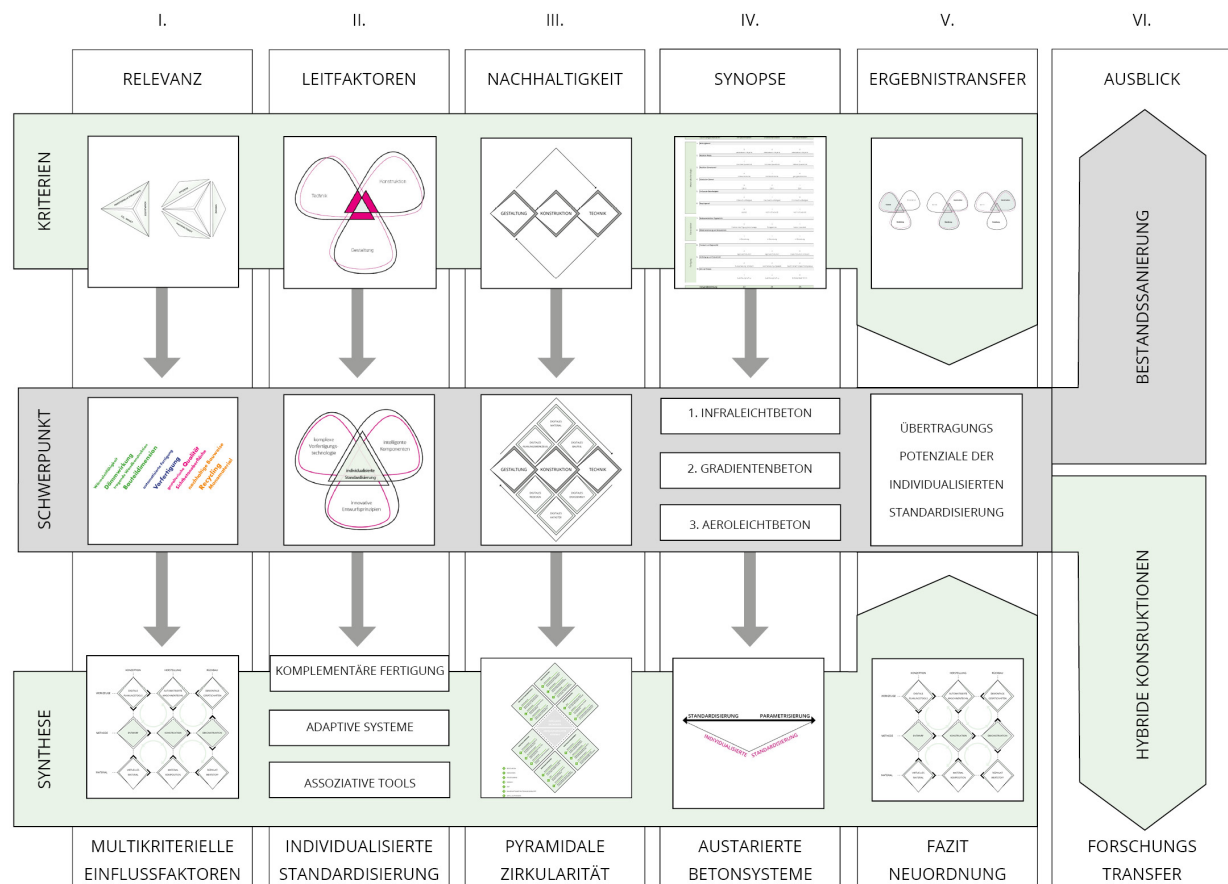


Abb. 6: Differenzierung von übergeordneter Betrachtung und Fokus auf Betonkonstruktionen. Eigene Darstellung

Die Dissertation ist so konzipiert, dass aus der Theorie heraus drei Leitfaktoren konstatiert werden, die zu einem eigenen theoretischen Modell, der Strategie der Individualisierten Standardisierung, zusammengeführt werden. Diese wird im Weiteren anhand von Praxis- und Forschungsbeispielen belegt. Den Ursprung für das Vorgehen der Dissertation bildet die Antragstellung für das Forschungsprojekt zur Aeroleichtbetontechnologie. Anhand dieser Forschung wurde erstmalig der Zusammenhang aus der Verknüpfung der drei Leitfaktoren und der Verbesserung der Nachhaltigkeit hergestellt und an der Betonforschung aufgezeigt.

In der weiteren Entwicklung der Dissertation wurde evident, dass die Strategie der Individualisierten Standardisierung nicht nur auf die Betonforschung anwendbar ist, sondern Übertragungspotenzial für vielseitige Ansätze im Bauwesen aufweist. Hinzu kommt, dass für eine fokussierte Betrachtung zuerst der geweitete Blick auf multiple Einflussfaktoren als sinnvoll erachtet wird. Daher wird eine deduktive Vorgehensweise gewählt. Entsprechend wird die Forschungsfrage stets übergeordnet betrachtet (grüne Darstellung Abb. 6) und dann auf einen spezifischen Fall, die monolithischen Betonkonstruktionen, zugeschnitten (graue Darstellung Abb. 6).

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

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

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

1.4 Methodik

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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.

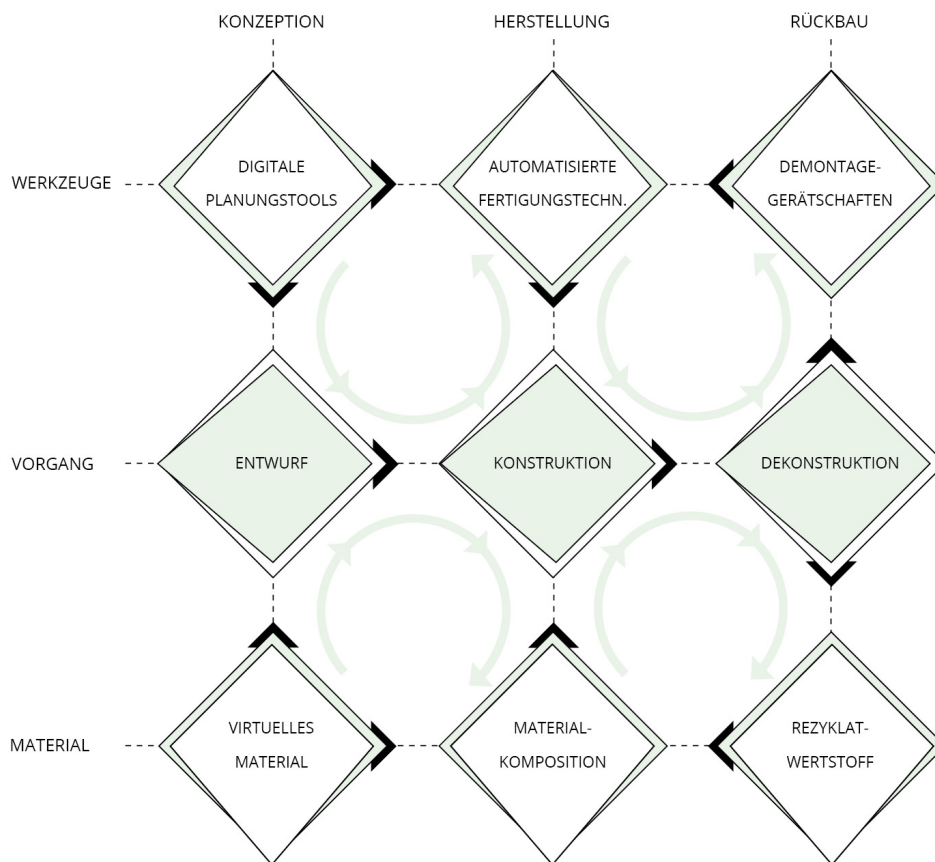


Abb. 7: Verflechtung von Hilfsmitteln, Vorgang und Material in Korrelation zum Lebenszyklus. Eigene Darstellung

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.

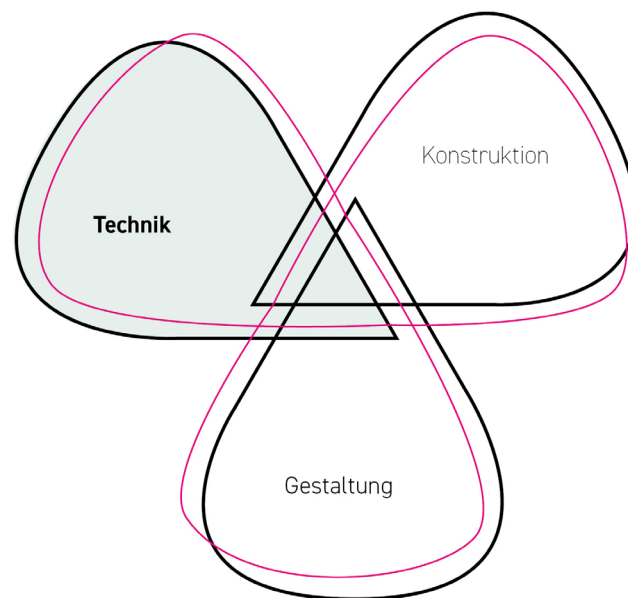


Abb. 8: Bedeutung des Leitfaktors Technik innerhalb des Dreiklangs. Eigene Darstellung

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 Vasilic 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 Vasilic 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 Vasilic (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 Schönig, 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 Betonfertigteilmbauten 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 „Fachkräftengpässe 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 Betonfertigteilmbauten 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 Fertigungstechnologien 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 Fließfertigungsverfahren - Präzisionsschnellbau der Zukunft"¹¹³ beschäftigt sich mit der Entwicklung von teiladaptiven Modulen, die in einen automatisierten Fließfertigungsverfahren 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 Fließfertigungsverfahren 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 Fließfertigungsverfahren - 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.

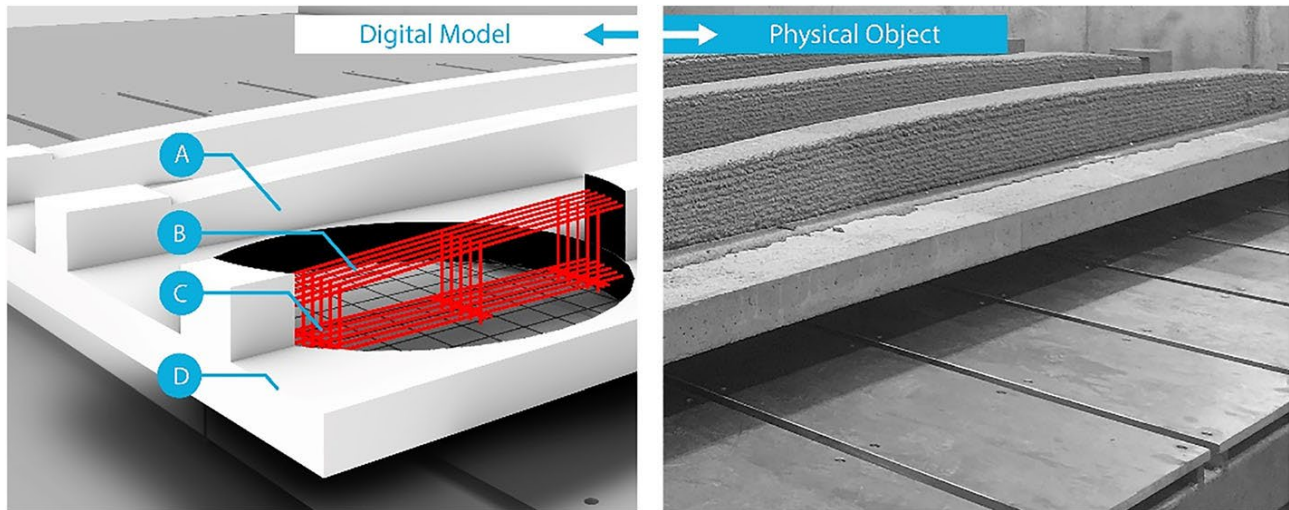


Abb. 9: Kombiniertes Fertigungsverfahren einer Betonfertigdecke mit dem SC3DP Verfahren

© 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, »SOLIQUID: Large 3D printing in suspension«, <https://soliqoid.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 Maschinentechologie 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.

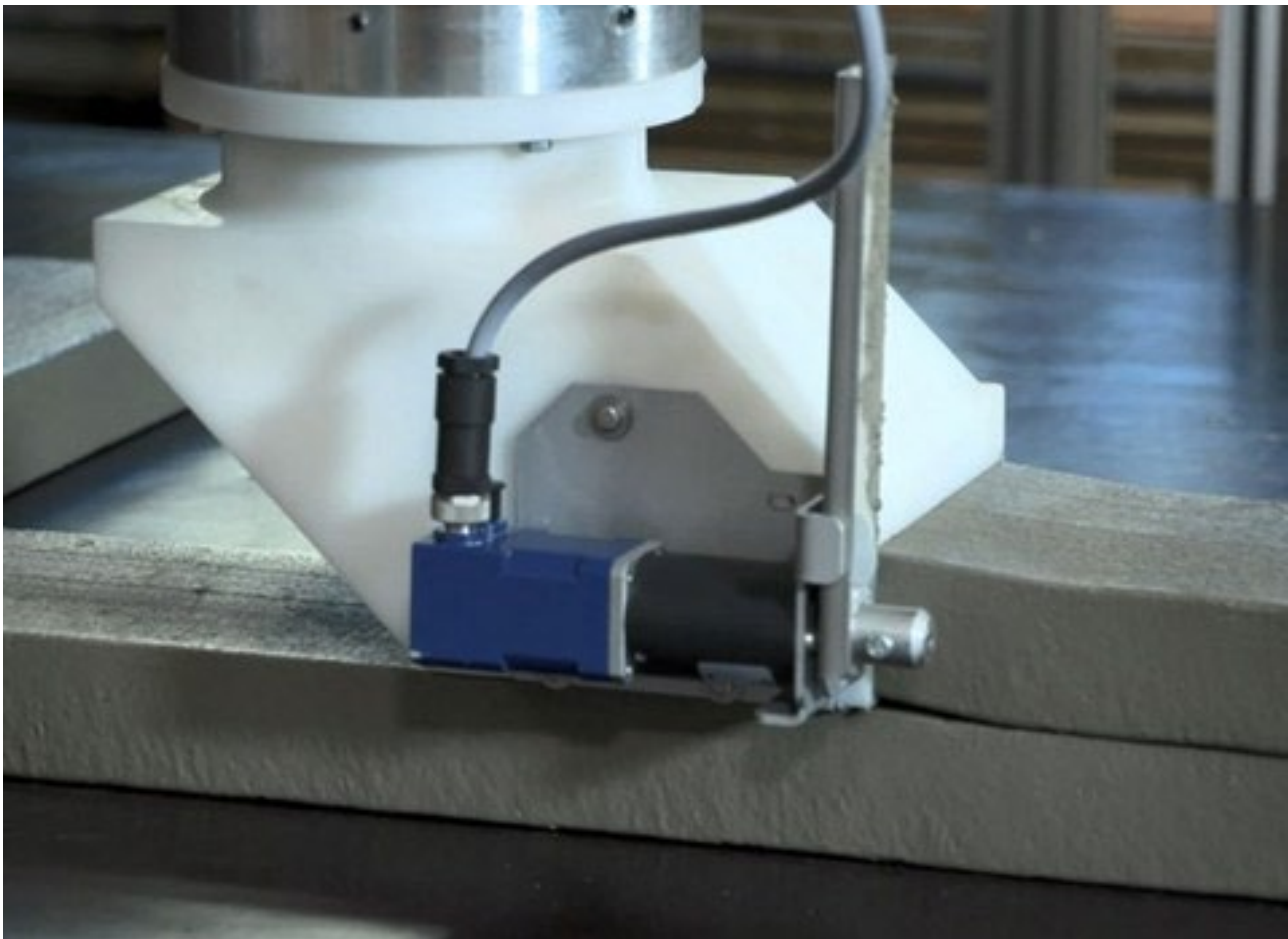


Abb. 11: CONPrint3D®-Druckkopf © TU Dresden

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 Architekturbiennale 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 Stunden: 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, bestimmte 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.

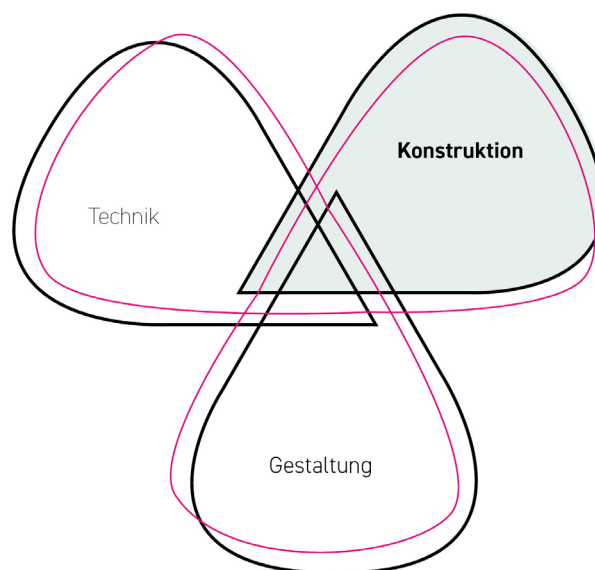


Abb. 17: Bedeutung des Leitfaktors Konstruktion innerhalb des Dreiecks.

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).

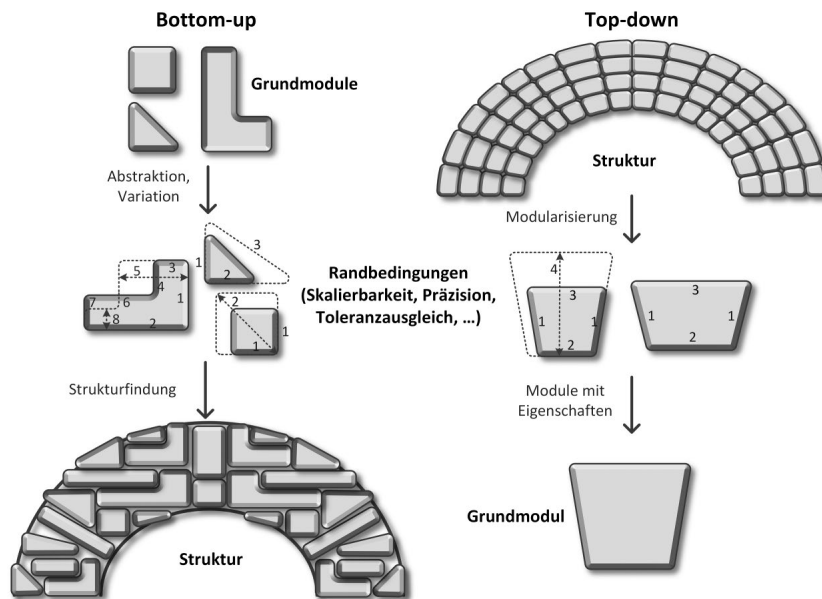


Abb. 18: Zusammenführung fester Grundmodule zur Struktur (bottom-up) beziehungsweise Modularisierung einer Struktur in neue Module (top-down) © Patrick Forman¹⁸⁴

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 setzen 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 Vormalis 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 „Serielles 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, *Serielles 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 konstatiertes 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, Morassuti, 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 vorgefertigte monolithische Konstruktionen mit Dämmlösung.

2.3.3.1 Prinzip 1: Baukastensystementwicklung am Beispiel „Intelligente Modularisierung“

Herkunft und Bezeichnung:

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

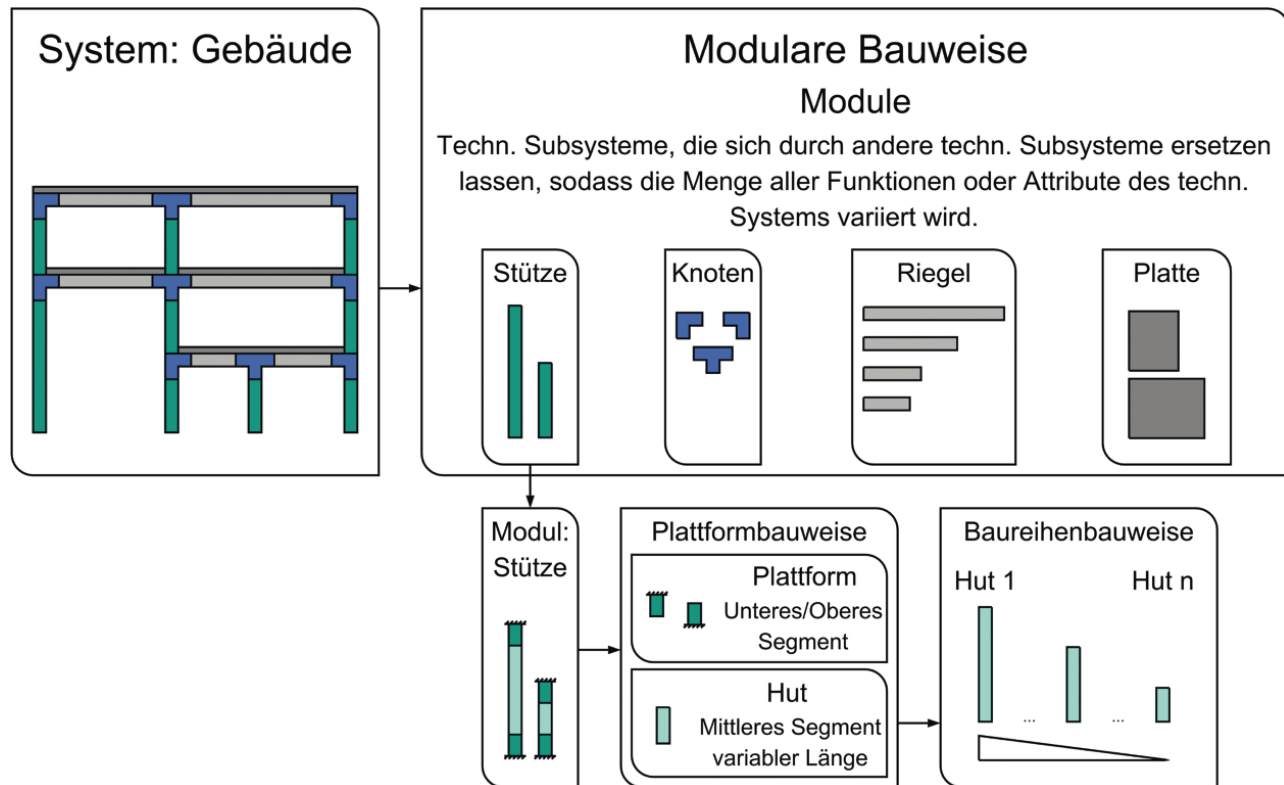


Abb. 24: Fraktaler Charakter der Standardisierungsmethoden am Beispiel einer Gebäudekonstruktion aus Stahlbetonbauteilen

© 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 Bauteilfüugung 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 Bauteilfüugung, 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.

Kunststoffschalungen ermöglicht werden können. Die Leitfaktoren Konstruktion und Technik bedingen sich an dieser Stelle gegenseitig.

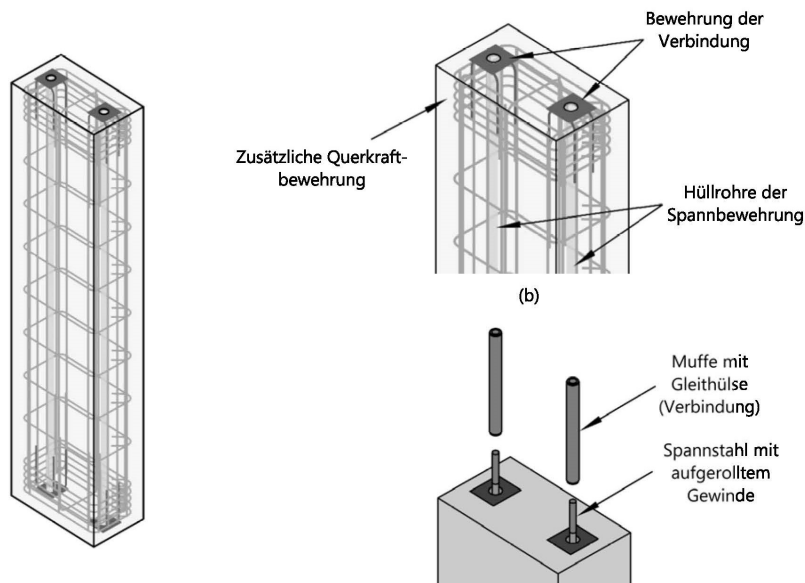


Abb. 25: Schematische Darstellung der standardisierten Schnittstelle

© Institut für Massivbau IMB des KIT, Agemar Manny

Erkenntnisgewinn mit Bezug auf das Forschungsinteresse:

Die Systematisierung erfolgt durch die eingeführte Modularisierung der Tragkonstruktion in die Subsysteme Stützen, Knoten, Riegel und Platte und deren Kombination und Variation. Die Zielvorgabe, mit einer minimierten Anzahl an Elementen eine maximierte Vielfalt zu generieren, wurde durch das konstruktive Prinzip in Abstimmung mit der Materialisierung umgesetzt. Die Fokussierung auf die Zerlegung in Module muss im Konstruktionsprozess berücksichtigt werden. Die gewählte Fertigungstechnologie kann eine Anpassungsplanung ermöglichen. Die Entwicklung stellt ein anschlussfähiges System dar. Zunächst erfolgt eine Systematisierung in der Rohbaukonstruktion. Eine Anpassungsplanung wiederum kann im Folgenden durch eine individuelle Fassadenentwicklung und den Ausbau projektspezifisch angewendet werden. Durch die Einbindung spezifischer Fertigungstechniken können kreislauffähige Betonkonstruktionen mit einem breiten Anwendungsfeld gefügt werden. Durch die Verwendung von ultrahochfestem Beton für die konstruktiven Bauteile werden zwar leistungsfähige Bauteile geschaffen. Diese Auslegung erfordert jedoch eine Rückkopplung mit dem bei der Herstellung eingeflossenen Ressourceneinsatz. Der Zusammenhang zwischen eingebrachter Masse und bereitgestellter Flexibilität ist relevant und wird unter →5.1.2 vertieft. Das System hat eine vergleichsweise geringe, in der Gestaltung ablesbare Repetition, die durch die Konstruktion vorgegeben wird.

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.

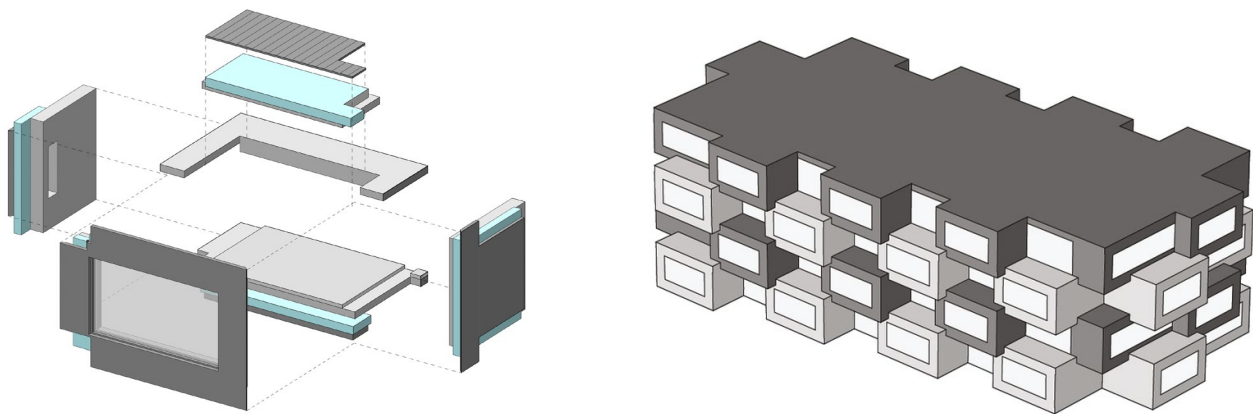


Abb. 27: Isometrische Darstellung der Sandwichbauteile und des Prinzips der Stapelung © OMA

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, das 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.

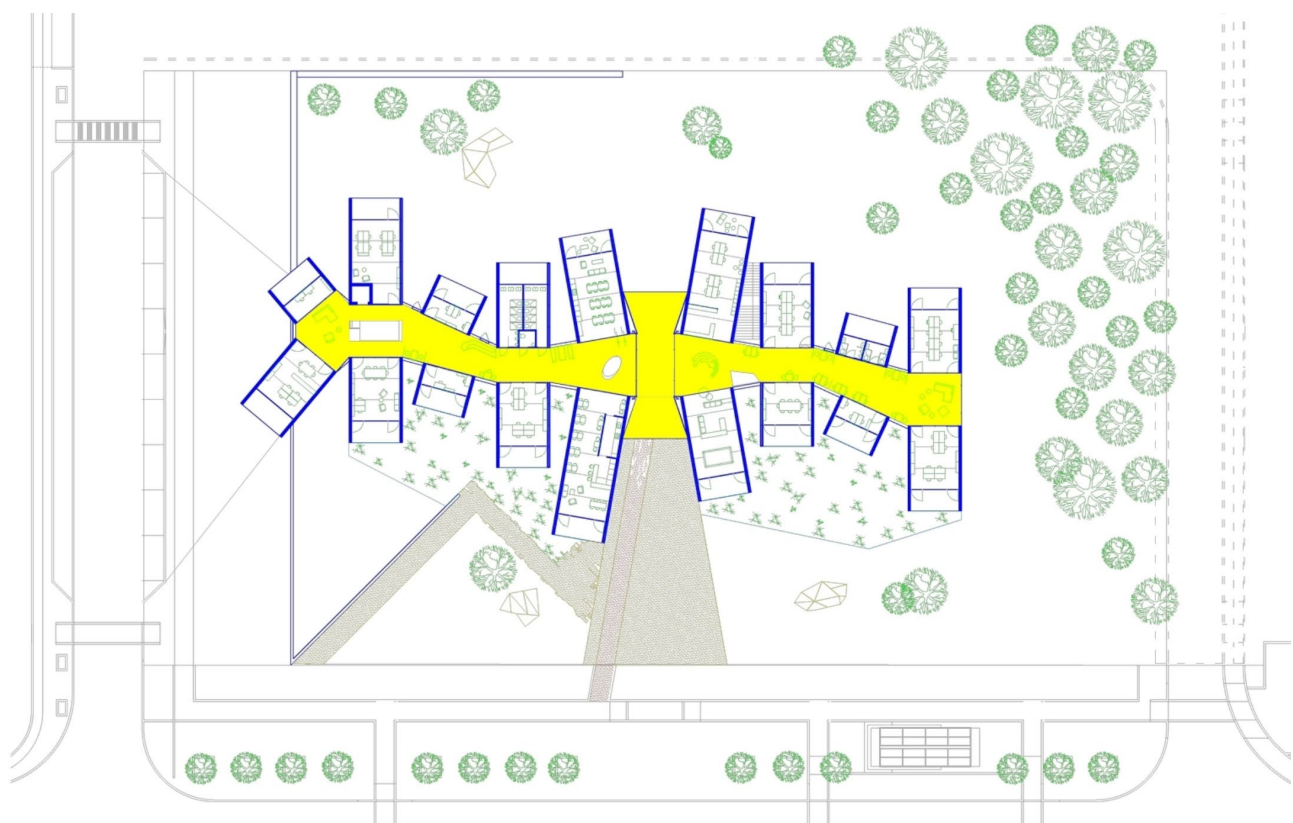


Abb. 30: SUMMARY Studio, Ci3 – Center for Industrial Innovation and Business Incubator, Arouca, Portugal © SUMMARY

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.

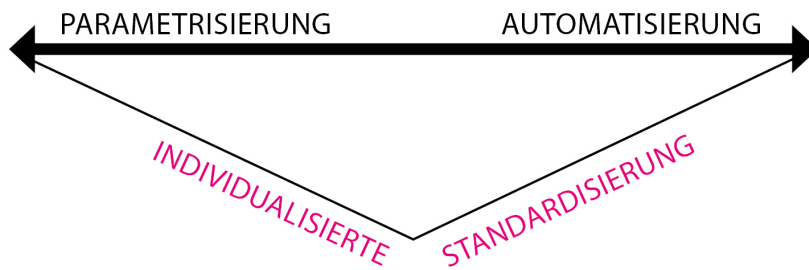


Abb. 31: Neuartige Zusammenführung von Standardisierung und Individualisierung.
Eigene Darstellung

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 Betonfertigteileindustrie 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.

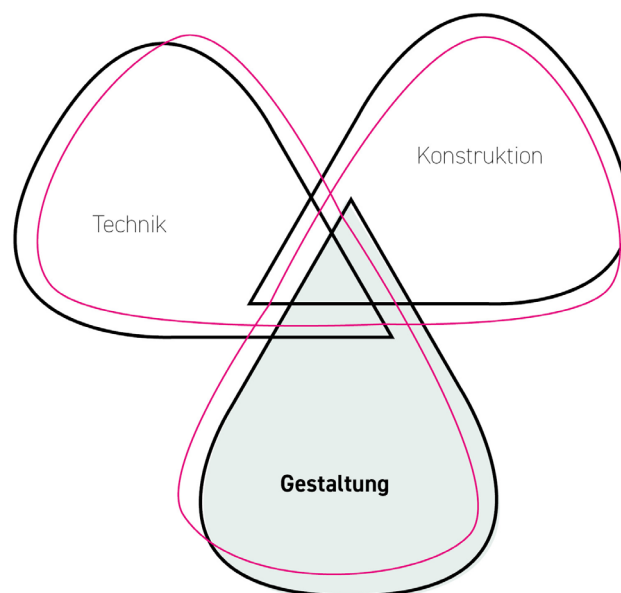


Abb. 32: Bedeutung des Leitfaktors Gestaltung innerhalb des Dreiklangs. Eigene Darstellung

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 substantielle 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-gelinkt-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

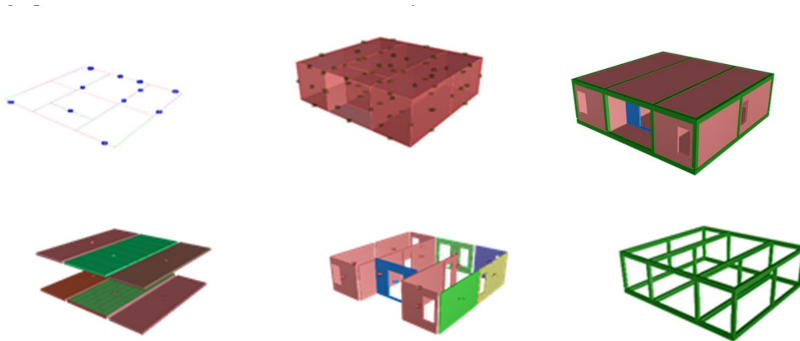


Abb. 33: Topologisches Beschreibungsmodell © Design-to-Production

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 Bauteildaten 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“ (10/20222-03/2025).

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

³²⁴ Tiefgehende 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

Seriell Sanierungsverfahren für den Gebäudebestand mit RC-Aeroleichtbeton

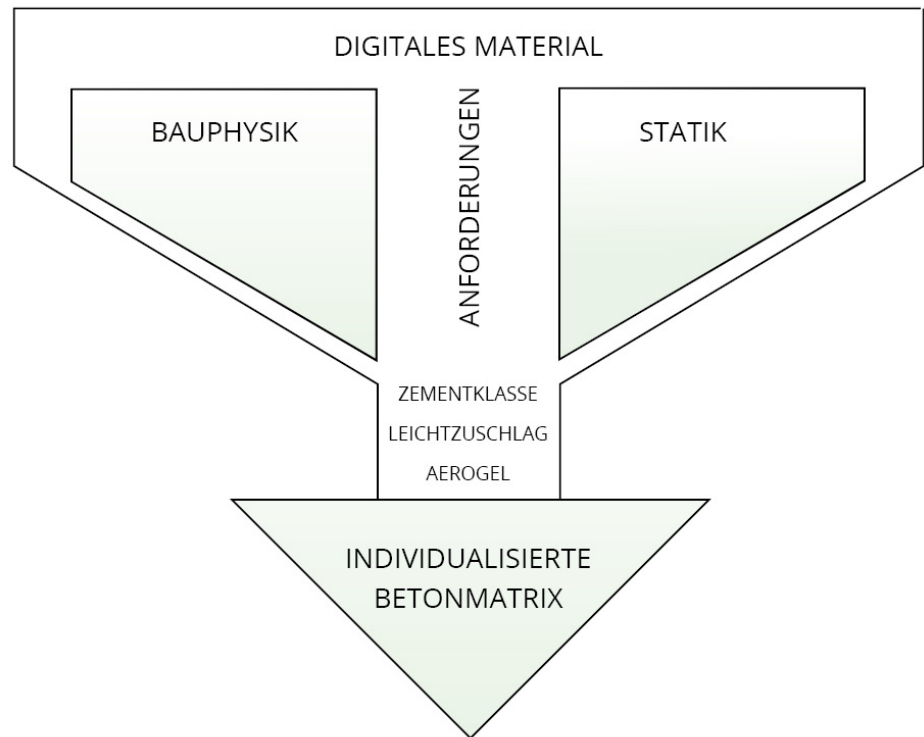


Abb. 36: Digitale Abstimmungen der Anforderungen an die Materialmatrix. Eigene Darstellung

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 Forschungs idee, 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 Maschinentechologie 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.

Kapitel III | Nachhaltigkeit

3.1 Verknüpfung der Leitfaktoren mit einem Fokus auf Nachhaltigkeitsaspekte

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

3.1.1 Grundlagenbetrachtung zur Nachhaltigkeitsbewertung

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

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

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

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

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

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

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

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

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

³³⁹ Vgl. Erläuterungen Glossar.

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

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

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

³⁴³ Ebd., S. 104.

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

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

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

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

³⁴⁵ Vgl. ebd., S. 20.

³⁴⁶ Vgl. ebd., S. 75.

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

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

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

3.1.2 Etablierung einer aufeinander aufbauenden Pyramidalen Zirkularität

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

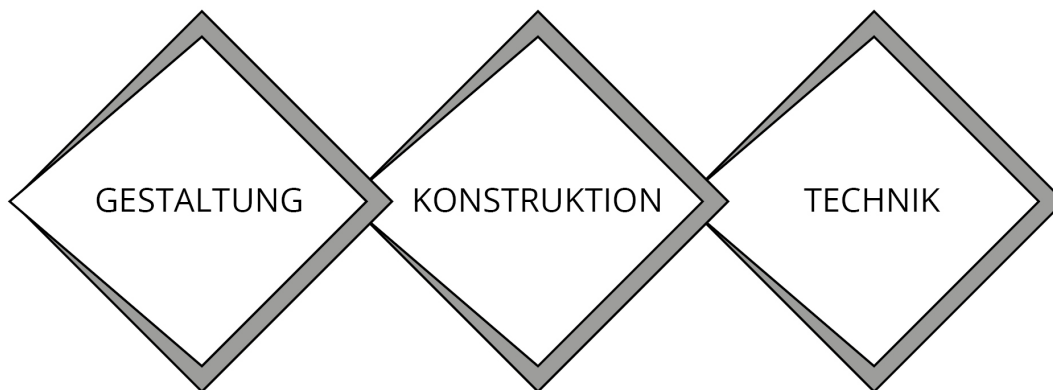


Abb. 37: Leitfaktoren in zeitlicher Abhängigkeit. Eigene Darstellung

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

³⁴⁸ Vgl. Erläuterungen Glossar.

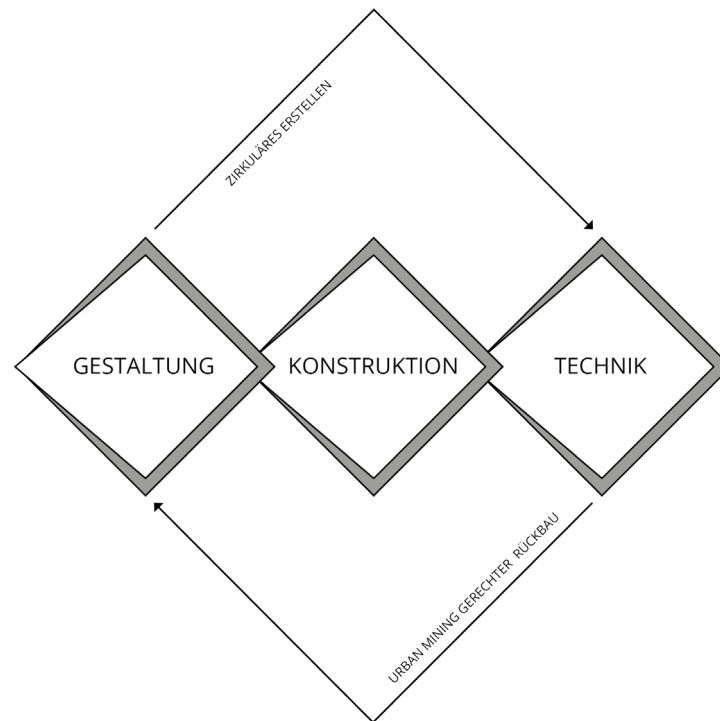


Abb. 38: Systemerweiterung zirkuläres Entwerfen – Urban Mining-gerechter Rückbau.

Eigene Darstellung

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

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

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

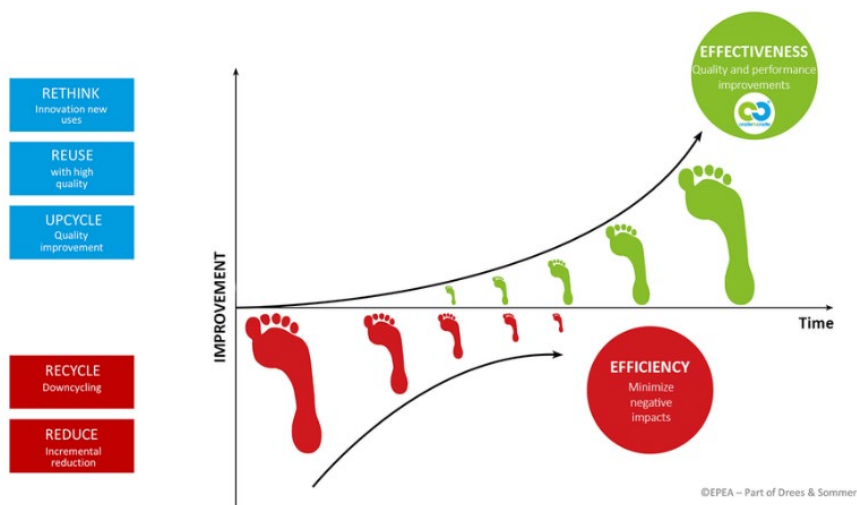


Abb. 39: Verbesserung der Nachhaltigkeit aus Effizienz- und Effektivitätsansprüchen

© EPEA GmbH, Drees und Sommer

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

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

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

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

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

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

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

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

³⁵⁴ Ebd., S. 12.

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

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

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

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

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

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

³⁵⁹ Ebd., S. 8.

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

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

³⁶² Ebd., S. 58.

³⁶³ Vgl. ebd., S. 49–59.

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

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

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

3.1.3 Erweiterung der Leitfaktoren um neuartige Schnittstellen

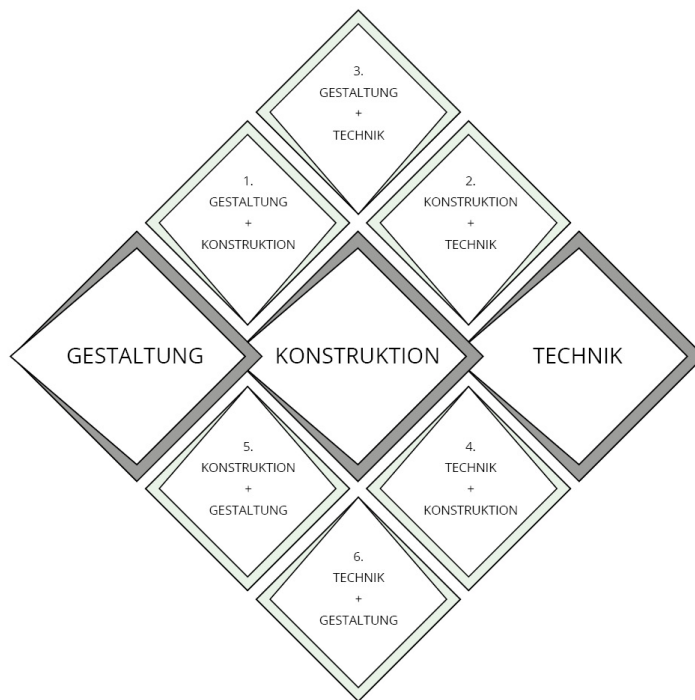


Abb. 40: Zusammenschau der Einflussfaktoren zur Umsetzung einer digital gestützten Nachhaltigkeit. Eigene Darstellung

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

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

3.1.3.1 Schnittstelle Gestaltung – Konstruktion: digitales Planungswerkzeug

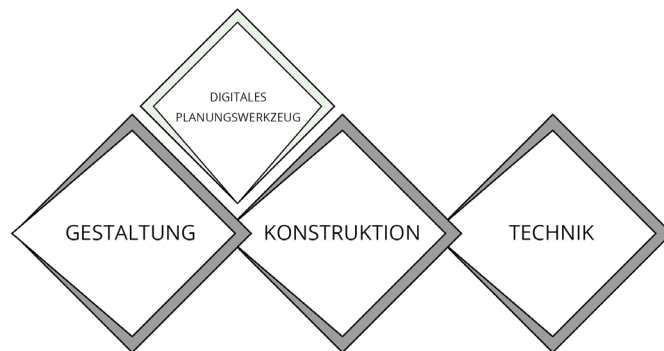


Abb. 41: Nachhaltigkeitspotenzial durch digitales Planungswerkzeug. Eigene Darstellung

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

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

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

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

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

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

³⁶⁷ Vgl. Erläuterung im Glossar.

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

³⁶⁹ Vgl. ebd., S. 25.

3.1.3.2 Schnittstelle Konstruktion – Technik: digitales Bauteil

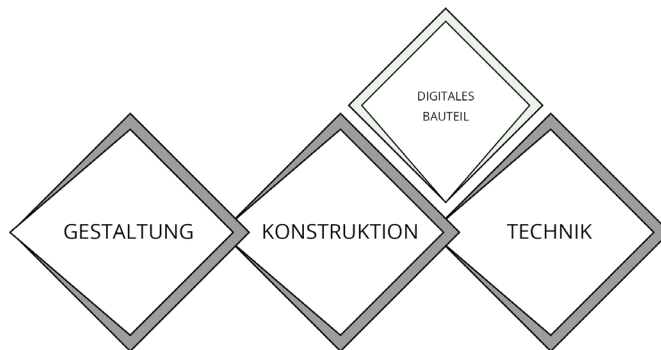


Abb. 42: Nachhaltigkeitspotenziale durch digitales Bauteil. Eigene Darstellung

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

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

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

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

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

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

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

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

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

³⁷⁴ Vgl. ebd., S. 46.

³⁷⁵ Ebd., S. 45.

3.1.3.3 Schnittstelle Gestaltung – Technik: digitales Material

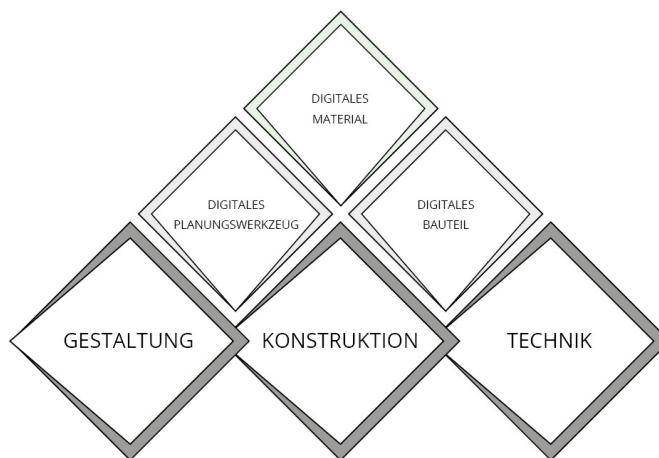


Abb. 43: Nachhaltigkeitspotenziale durch digitales Material. Eigene Darstellung

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

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

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

³⁷⁷ Vgl. Originalzitat:

“In the construction industry, the application of conventional processes and the use of pre-dimensioned building products often lead to oversized components and, thus, excessive material use.”

Albus/Hollmann-Schröter 2022 (wie Anm. 156), S. 6.

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

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

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

³⁷⁹ DFC ist die Abkürzung für Digitally Fabricated Concrete.

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

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

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

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

3.1.3.4 Schnittstelle Technik – Konstruktion: digitale Zerlegung

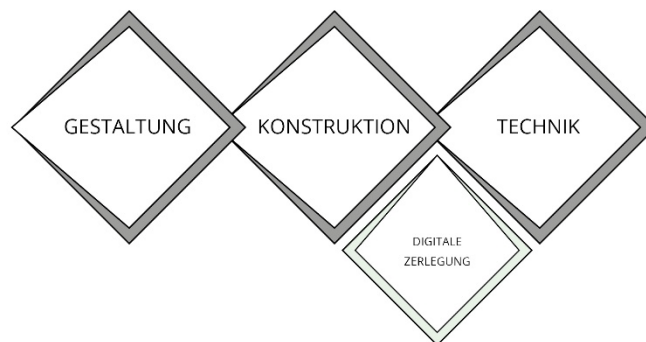


Abb. 44: Nachhaltigkeitspotenziale durch digitale Zerlegung. Eigene Darstellung

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

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

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

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

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

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

³⁸⁶ Vgl. Erläuterungen im Glossar.

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

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

³⁸⁹ Auch als Re-Assembly bezeichnet.

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

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

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

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

3.1.3.5 Schnittstelle Konstruktion – Gestaltung: digital gestützter Neuentwurf

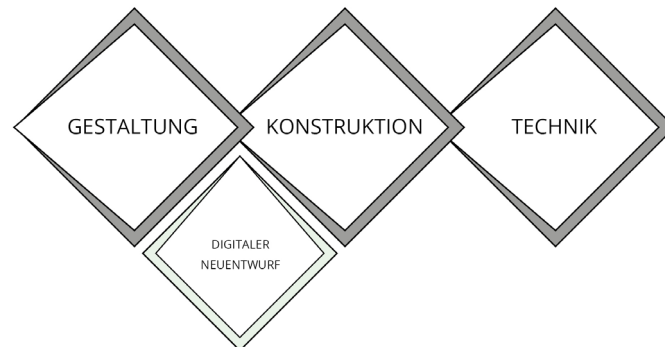


Abb. 45: Nachhaltigkeitspotenziale durch digital gestützten Neuentwurf. Eigene Darstellung

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

³⁹⁶ Ebd.

3.1.3.6 Schnittstelle Technik – Gestaltung: digitales Kataster

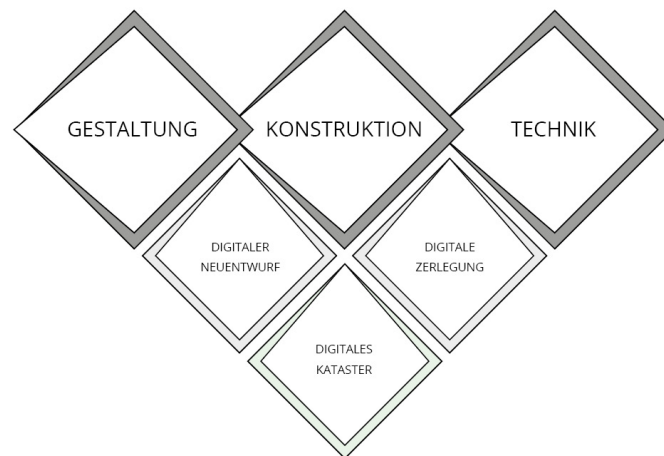


Abb. 46: Nachhaltigkeitspotenzial digitales Kataster. Eigene Darstellung

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

3.1.4 Résumé: Kreislauffähigkeit durch digital gestützte Prozesse

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

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

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

Anschließend und im Gegenzug ist der Weg des Rückbaus dargestellt.

4. Schnittstelle Technik – Konstruktion: digitale Zerlegung
Durch bereits in der Konstruktionsphase umgesetzte Systemisierungsansätze werden automatisierte Demontageprozesse möglich, die einen effizienten Rückbau gewährleisten.
5. Schnittstelle Konstruktion – Gestaltung: digital gestützter Neuentwurf
Der Neuentwurf mit systemisierten, wiederverwendeten Komponenten kann durch digitale Werkzeuge zu hochwertigen Konstruktionen führen.
6. Schnittstelle Technik – Gestaltung: digitales Kataster
Die Etablierung digitaler Kataster ermöglicht die Wiederverwendung von Bauteilen. Vorgefertigte, standardisierte Bauteile haben erhebliche Vorteile bei der Vermittlung.

Erweiterte Abbildung der Nachhaltigkeitspotenziale im zirkulären Setting

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

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

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

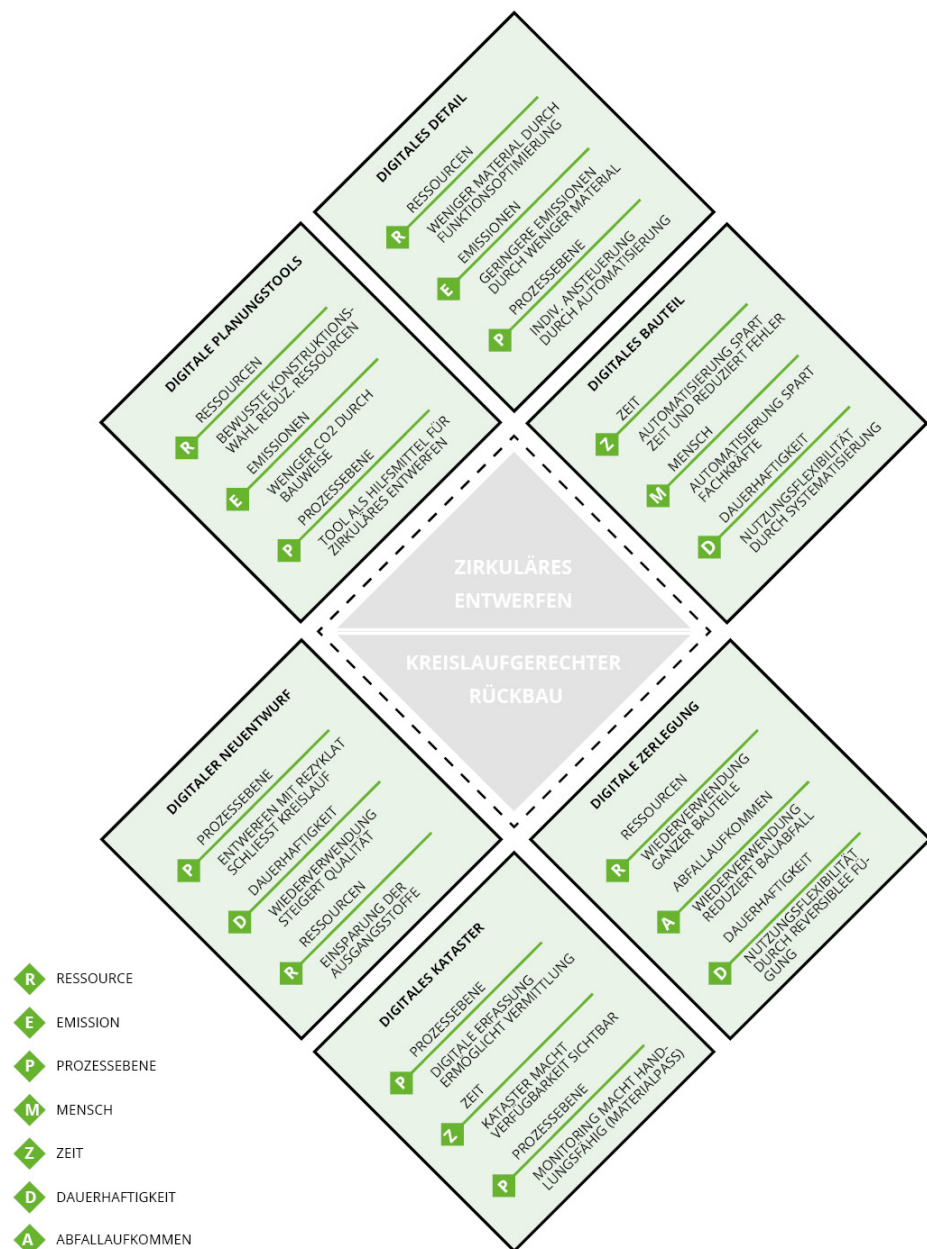


Abb. 47: Zusammenschau Nachhaltigkeitspotenziale. Eigene Darstellung

Übertragbarkeit der Theorie der Pyramidalen Zirkularität

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

Kapitel IV | Synopse dreier Betontechnologien

4.1 Einleitung vergleichende Forschung

Im folgenden Kapitel werden drei Betontechnologien - Gradientenbeton, Infraleichtbeton und Aeroleichtbeton – nebeneinander untersucht und in Beziehung gesetzt. Es zeigt sich, dass die Entwicklung der drei Betontechnologien auf Forschungsansätzen beruhen, die vorbildlich die Forschung im Sinne einer Individualisierten Standardisierung vorantreiben.

Der wissenschaftliche Vergleich erfolgt in Form einer synoptischen Darstellung hinsichtlich der aufgestellten These zu den Potenzialen der Individualisierten Standardisierung (→1.2.2 Einführung der Strategie der Individualisierten Standardisierung). Entscheidend ist eine übereinstimmende Ausgangslage, um eine echte Vergleichbarkeit herbeizuführen. So werden im ersten Schritt die Vergleichskriterien zur Nachhaltigkeitsbewertung vorgestellt. Ziel ist es, die aufgestellten Schnittstellen für die Verbesserung der Nachhaltigkeit von Betonkonstruktionen aufzuzeigen (→3.1.3 Erweiterung der Leitfaktoren um neuartige Schnittstellen). Diese Herangehensweise erlaubt im zweiten Schritt einen direkten Vergleich, eine Bewertung und die Ableitung von Potenzialen anhand der betrachteten drei Betontechnologien. Es wird aufgezeigt, dass die drei verschiedenen Herangehensweisen zu ähnlichen Zielen kommen, jedoch auf unterschiedlichen Wegen.

Die Systeme gehen von den gleichen Ausgangsfaktoren aus, die im folgenden Kapitel 4.1.1 zusammengefasst werden (→4.1.1 Definition der Bauteilanforderungen an monolithische, vorgefertigte Wandsysteme). Dennoch gibt es Schwerpunkte in jedem der Forschungsansätze, die in der Analyse der jeweiligen Betontechnologie herausgearbeitet werden (→4.2 Betontechnologie: Infraleichtbeton, 4.3 Betontechnologie: Gradientenbeton, 4.4 Betontechnologie: Aeroleichtbeton).

4.1.1 Definition der Bauteilanforderungen an monolithische, vorgefertigte Wandsysteme

Gegenstand der Betrachtungen sind die unter (→1.2.3 Eingrenzung monolithische Betonbauweisen) eingeführten monolithischen Betonbauweisen, die die folgenden Anforderungen vereinen:

- tragende Wandkonstruktion mit Dämmwirkung für 4-5-geschossigen Wohnungsbau
- monolithisches, mineralisches Material mit Leichtzuschlägen
- Bauteildimension und Wärmeleitfähigkeit entsprechend Anforderungen nach GEG⁴⁰⁴
- serielle Fertigung
- optimierte Betonmatrix mit reduziertem Zementgehalt
- Qualität mit Sichtbetonoberfläche
- gestalterische Varianz

4.1.2 Kriterien zur Nachhaltigkeitsbewertung von Betonkonstruktionen

Die zuvor gemachten Betrachtungen zur digital gestützten Nachhaltigkeit werden in dieser Vertiefung auf den Betonsektor zugeschnitten. Die Aspekte werden hinsichtlich der Zielstellung einer Verbesserung der Nachhaltigkeit von Betonkonstruktionen neu sortiert. Dazu erfolgte von der Autorin eine gezielte Auswahl von Kriterien, denen ein nennenswertes Potenzial zur Verbesserung der Nachhaltigkeit zugeschrieben wird. Die Auswahl setzt sich zusammen aus Kriterien, die auf Materialebene eine Optimierung herbeiführen, aber auch aus Kriterien, die maßgeblich die Prozessebene optimieren beziehungsweise eine Umsetzung der Kreislauffähigkeit forcieren. Die Kriterien sind allesamt in der Wissenschaft hinlänglich bekannt, jedoch in dieser Zusammenschau neu gruppiert.

1. Nutzungsdauer
2. Reduktion von Masse
3. Reduktion Zementanteil
4. Substitution Zement
5. Einfluss der Druckfestigkeit
6. Recyclinganteil
7. Wiederverwendung von vorgefertigten Komponenten
8. Rückbaubarkeit und reversible Fügetechnik
9. Abfallreduktion
10. Transport und Regionalität
11. Vorfertigung und Produktivität
12. Zeit und Prozess

⁴⁰⁴ Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (wie Anm. 340).

Der Aufbau der Zuordnung der Kriterien entspricht der sich anschließenden Synopse, die nach den Oberbegriffen Materialtechnologie, Fertigungstechnologie, Konstruktion und Digitales Gestalten sortiert ist. Einleitend wird jedes Kriterium in einer Kurzdarstellung erläutert und ein Bezug zum vorangehend erläuterten Prinzip der Pyramidalen Zirkularität hergestellt. Dadurch können Planerinnen und Planer einen umfassenden Überblick über die relevanten Stellschrauben zur Verbesserung der Nachhaltigkeit von Betonkonstruktionen erhalten. Darüber hinaus bilden die Kriterien die Wissensgrundlage für das kriteriengeleitete Prüfraster der Synopse.

4.1.2.1 Nutzungsdauer

Aufgrund der hohen CO₂-Emissionen in der Herstellungsphase schneiden Betonkonstruktionen in der Ökobilanzierung signifikant schlechter ab als beispielsweise Holzkonstruktionen. Dabei ist zu beachten, dass bei der Bewertung von Betonkonstruktionen nach klassischen Bilanzierungsverfahren häufig eine Lebensdauer von 50 Jahren angesetzt wird. Die tatsächliche Langlebigkeit von Betonwerkstoffen fließt in diesem Fall nicht angemessen in die Betrachtung ein. Im Betonkalender 2022 wird von Dehn und Wiens neben der Einflussgröße der Umweltwirkung der Zusammenhang aus Lebensdauer und Leistungsfähigkeit über die untenstehende Gleichung festgesetzt.⁴⁰⁵ Die Formel definiert das Nachhaltigkeitspotenzials von Baustoffen. Eine positive Beeinflussung des Baustoff-Nachhaltigkeitspotenzials kann nach Dehn und Wiens über die Steigerung der Leistungsfähigkeit, die Reduktion der Umweltwirkungen sowie die Erhöhung der Nutzungsdauer von Baustoffen erreicht werden:

$$\text{Baustoff-Nachhaltigkeitspotenzial} \sim \frac{\text{Lebensdauer} * \text{Leistungsfähigkeit}}{\text{Summe der Umweltwirkungen}}^{406}$$

Bei einer vergleichenden Betrachtung, die an der TU München zum Projekt „Einfach Bauen“ durchgeführt wurde, wurden monolithische Konstruktionen unterschiedlicher Materialisierung (Holz, Mauerwerk, Leichtbeton) auf Basis einer erweiterten Lebensdauerbetrachtung von 100 Jahren bilanziert.⁴⁰⁷ „Der Vergleich zeigt, dass bei einer Betrachtungsdauer von 100 Jahren das Treibhausgaspotenzial bei Leichtbeton deutlich niedriger liegt als bei einem Standard-Referenzgebäude aus Stahlbeton mit WDVS nach ENEC 2014/2016.“⁴⁰⁸

Zusammenhang zu den Schnittstellen der Pyramidalen Zirkularität

Mit Blick auf die Zielstellung der Pyramidalen Zirkularität kann an dieser Stelle geschlussfolgert werden, dass die Berücksichtigung der Lebensdauer schon zu Planungsbeginn wesentlich ist. Thiel et al. beschreiben, dass gerade durch die lange Lebensdauer des Werkstoffs Beton bei entsprechender Planung, die eine Anpassbarkeit beziehungsweise Nutzungsflexibilität oder modulares Bauen berücksichtigt „ein großer Hebel bei zirkulärem Bauen mit Beton“ erreicht werden könne (→3.1.3.1 Schnittstelle Gestaltung – Konstruktion: digitales Planungswerkzeug).⁴⁰⁹

⁴⁰⁵ Dehn/Wiens 2022 (wie Anm. 52), S. 140.

⁴⁰⁶ Vgl. ebd.

⁴⁰⁷ Vgl. Florian Nagler u. a., *Einfach Bauen. Ganzheitliche Strategien für energieeffizientes, einfaches Bauen - Untersuchung der Wechselwirkung von Raum, Technik, Material und Konstruktion*, Stuttgart 2019 (Forschungsinitiative Zukunft Bau F 3151).

⁴⁰⁸ Anna Mendgen und Mike Schlaich, »Infraleichtbeton für den Geschosswohnungsbau – Zusammenfassung und Vergleich des Forschungsstands zu GWP und thermischen Speichereffekten«, in: *Bauphysik*, 43 (2021), Nr. 5, S. 335–346, hier S. 339.

⁴⁰⁹ Thiel u. a. 2023 (wie Anm. 285), S. 265.

4.1.2.2 Reduktion von Masse

Oberstes Ziel sollte es sein, jeden Werkstoff in Abhängigkeit von seiner Leistungsfähigkeit einzusetzen und falls möglich durch leistungsfähigere Baustoffe zu ersetzen, nur so kann sichergestellt werden, dass Ressourcen zielgerichtet und effizient eingesetzt und damit letztlich eingespart werden. Diesem Assessment sollte sich jede geplante Konstruktion unterziehen. Das Verhältnis aus Materialeinsatz und Leistungsfähigkeit beschreibt der Begriff Formeffizienz.⁴¹⁰ So hat der Baustoff Beton beispielsweise im Einsatz als nichttragende Innenwand keine bevorzugte Berechtigung, da es bezüglich der damit verbundenen Anforderung Produkte mit geringerem ökologischem Fußabdruck gibt (→5.3 Fazit).

Bei der Betrachtung von Betonbauteilen erfordert die Reduktion der Masse eine bewusstere Dimensionierung. Durch digitale Berechnungsverfahren wie beispielsweise die Finite-Elemente-Methode⁴¹¹ können Festigkeits- und Verformungsuntersuchungen simuliert werden. Somit kann eine Überdimensionierung, wie sie bei bisherigen Konstruktionen oftmals vorhanden ist, vermieden werden. „Instead of thin-walled shell structures, thick-walled concrete components subjected to flexural stress dominate today's construction activities. The reason for this is the permanent increase in wage costs compared to material costs over the past decades. In concrete construction, this led to the increased use of uniform system formwork, which replaced material-saving construction systems requiring labor-intensive, individualized mold making.“⁴¹² Eine optimierte Materialzusammensetzung der Betonmatrix kann zur Reduktion von Ressourcen beitragen, indem in Abhängigkeit von der Tragfunktion beispielsweise Leichtzuschläge zugefügt werden oder die Einbindung von Luft erhöht wird.⁴¹³ Die Möglichkeit, Material durch neuartige automatisierte Fertigungstechnologien (Leitfaktor Technik) zielgerichtet einzusetzen, kann ebenso Ressourcen einsparen.⁴¹⁴ Hierbei werden konstruktive, geometrische Prinzipien wie beispielsweise Bogenkonstruktionen oder die Implementierung von Hohlkörpern oder Rippen entsprechend dem Lastverlauf eingesetzt. Ein Beispiel für das optimierte Zusammenspiel aus erhöhter Tragfähigkeit bei reduziertem Materialeinsatz zeigt die **Abbildung 48** zur Forschung zum Rippmann Floor System (RFS), welches das klassische, auf Zug belastete Deckensystem umkehrt und durch eine leicht bogenförmige Ausbildung in ein auf Druck beanspruchtes System gewandelt wird.⁴¹⁵

⁴¹⁰ Vgl. Vasilic 2023 (wie Anm. 82), S. 45.

⁴¹¹ Finite-Elemente-Methode (FEM).

⁴¹² Kloft u. a. 2020 (wie Anm. 119), S. 131.

⁴¹³ Vgl. Materialzusammensetzungen des Aeroleichtbetons, Infraleichtbetons, Gradientenbetons

⁴¹⁴ Vgl. Digital Building Technologies, »Fast Complexity«, <https://dbt.arch.ethz.ch/project/fast-complexity/> (abgerufen am 7. Juni 2023).

⁴¹⁵ M. Rippmann u. a., »Design, fabrication and testing of discrete 3D sand-printed floor prototypes«, in: *Materials Today Communications*, 15 (2018), S. 254–259, hier S. 254.

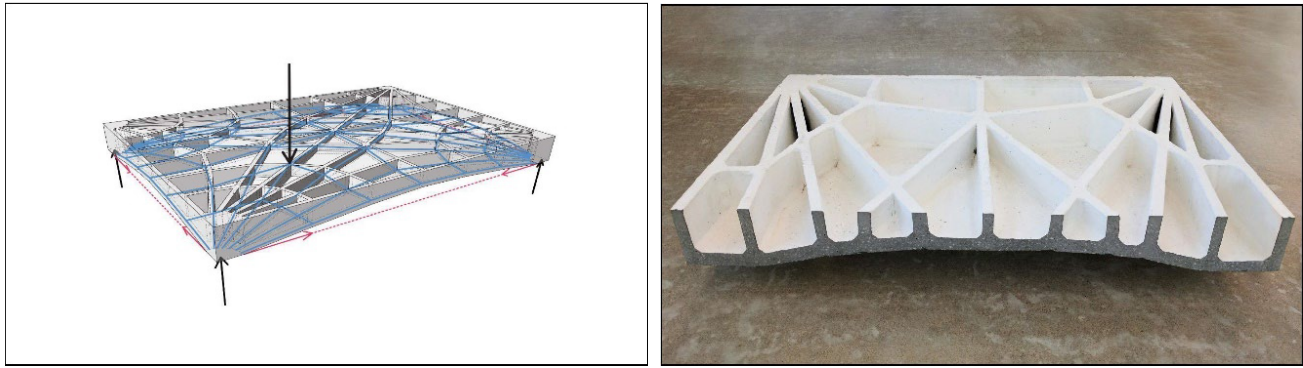


Abb. 48: Rippmann Floor System (RFS) © Block Research Group, ETH Zürich

Zusammenhang zu den Schnittstellen der Pyramidalen Zirkularität

Bei der Reduktion der Masse geht es vorwiegend um die Verknüpfung optimierter Materialzusammensetzungen (→3.1.3.3 Schnittstelle Gestaltung – Technik: digitales Material), konstruktiver Prinzipien und automatisierter Fertigung (→3.1.3.2 Schnittstelle Konstruktion – Technik: digitales Bauteil). Die Erschließung dieser Vorteile wird nur durch digitale Simulation im Vorfeld möglich (→3.1.3.1 Schnittstelle Gestaltung – Konstruktion: digitales Planungswerkzeug) und beschreibt so das Spannungsfeld zwischen den Leitfaktoren Gestaltung – Konstruktion, Konstruktion – Technik und Gestaltung – Technik.

4.1.2.3 Reduktion Zementanteil

Laut Studie des WWF mit dem Titel „Klimaschutz in der Beton- und Zementindustrie“ entstehen zwei Prozent der deutschen und acht Prozent der globalen Treibhausgasemissionen bei der Produktion von Zement.⁴¹⁶ Aufgrund der damit verbundenen Relevanz wurden bereits vielseitige Strategien zur Reduktion dieser Emissionen initiiert, die auf unterschiedlichen Ebenen national sowie international ansetzen. Beauftragt von der Internationalen Energie Agentur (IEA)⁴¹⁷, hat die „Cement Sustainable Initiative“ (CSI) schon im Jahr 2018 einen Fahrplan für die Zementindustrie erstellt, wie sich diese zukunftsfähig aufstellen kann. Ebenfalls sind Akteure der Wirtschaft wie der Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ), an einem nachhaltigen Wandel des Werkstoffs Zement interessiert.⁴¹⁸ Dieser vollzieht sich jedoch langsam und in unterschiedliche Richtungen, wie die Studie des WWF ebenso aufzeigt. Sie unterteilt bei der Potentialanalyse bezogen auf die Herstellung von Zement in Einsparung prozessbedingter sowie energiebedingter Emissionen. „Knapp 50% der Emissionen sind auf die Entsäuerung des Klinkers während des Brennvorgangs im Hochofen, sog. prozessbedingte Emissionen, zurückzuführen. Die restlichen Emissionen entstehen energiebedingt durch die Wärmebereitstellung für den Brennprozess im Hochofen (Brennstoffe), den Stromverbrauch für Mahl-, Mühl- und Förderprozesse sowie den Transport der Rohstoffe.“⁴¹⁹ Nachhaltigkeitspotenzial liegt somit in der Reduktion dieser prozess- und energiebedingten Emissionen durch beispielsweise effizientere Verfahren oder den Einsatz erneuerbarer Energien. Für das Bauwesen bestehen zudem auf Materialebene drei Substitutionsstrategien: 1.) Ersatz des Baustoffs Beton; 2.) Verringerung des Zementanteils im Beton; 3.) Verringerung des Klinkeranteils im Zement.⁴²⁰ Eine Reduktion des Zementanteils wird durch die zuvor beschriebene Strategie der Reduktion von Masse erreicht, da in diesem Fall auch der Zementanteil direkt vermindert wird. Darüber hinaus kann der Zementanteil in Abhängigkeit der erforderlichen Druckfestigkeit sinken (→4.1.2.5 Einfluss der Druckfestigkeit), was wiederum durch optimierte Konstruktionen ermöglicht wird.

Zusammenhang zu den Schnittstellen der Pyramidalen Zirkularität

Die Schnittstelle Digitales Material zeigt sich bei der Anwendung der drei eingeführten Substitutionsstrategien. Im Abgleich konstruktiver Anforderungen mit einem angemessenen Materialeinsatz kann Beton und damit auch Zement funktionsoptimiert zum Einsatz kommen. Grundlage dieser Reduktionsstrategien

⁴¹⁶ Vgl. WWF Deutschland 2019 (wie Anm. 353), S. 5.

⁴¹⁷ Vgl. International Energy Agency (IEA), World Business Council on Sustainable Development (WBCSD), Cement Sustainability Initiative, *Technology Roadmap. Low-Carbon Transition in the Cement Industry*, 2018, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/cbaa3da1-fd61-4c2a-8719-31538f59b54f/TechnologyRoadmapLowCarbonTransitionintheCementIndustry.pdf> (abgerufen am 5. August 2023).

⁴¹⁸ Vgl. Verein Deutscher Zementwerke e.V., *Zementindustrie im Überblick 2022/2023*, Berlin, 2022, S. 10, https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/zementindustrie/zementindustrie_ueberblick/VDZ_Zementindustrie_im_Ueberblick_2022-2023.pdf (abgerufen am 5. August 2023).

⁴¹⁹ WWF Deutschland 2019 (wie Anm. 353), S. 13.

⁴²⁰ Vgl. ebd., S. 14.

bildet die digitale Simulation (→3.1.3.3 Schnittstelle Gestaltung – Technik: digitales Material).

4.1.2.4 Substitution Zement

Für die negative Ökobilanz bei der Herstellung von Portlandzement (Typ CEM I) sind maßgeblich die prozessbedingten CO₂-Emissionen verantwortlich. Detaillierte Einblicke in die Zementproduktion, mit den damit verbundenen Emissionen, Abfallstoffen, aber auch Entwicklungen zu Zementen mit reduzierten CO₂-Emissionen geben Sobek et al.⁴²¹ „Der Großteil des in Deutschland abgesetzten Zements entfällt auf die drei Hauptzementarten Portlandzement (CEM I, ca. 27 Prozent), Portlandkompositzement (CEM II, ca. 51 Prozent) sowie Hochofenzement (CEM III, ca. 20 Prozent). Künftig wird eine weitere Verschiebung des Marktes hin zu klinkereffizienteren Zementen wie z.B. CEM II-C/M angestrebt.“⁴²² Bezogen auf den dritten Punkt der WWF-Studie „Verringerung des Klinkeranteils im Zement“ wird in der „CO₂-Roadmap für die deutsche Zementindustrie“ der CSI in einem Szenario eine CO₂-Einsparung von 19 Prozent durch genau diese Substitution des Portlandzementklinkers und durch den Einsatz neuer Bindemittel als möglich beschrieben.⁴²³ Das Kapitel „Klinkereffiziente Zemente“ des Betonkalenders 2022 erläutert ausführlich die Möglichkeiten neuartiger Zemente. Diese neuen CEM-II/C- und CEM-VI-Zemente werden in der EN 197-5 geregelt. Maßgeblich wird dabei der Gehalt des Portlandzementklinkers im Zement/Bindemittel optimiert. „Hierbei spielt neben dem Einsatz von CEM-II/C-Zementen (Klinkeranteil zwischen 50 und 65 %) auch CEM-VI-Zementen (Klinkergehalt zwischen 35 und 50 %) eine Rolle. Der Einsatz von Hüttensand und v. a. Flugasche wird dabei sukzessive abnehmen und gleichzeitig werden calcinierte Tone und ungebrannter Kalkstein an Bedeutung gewinnen. Bis 2050 kann der Klinker-Zement-Faktor so auf 53% gesenkt werden.“⁴²⁴ Zu berücksichtigen ist, dass für das Eintreten der prognostizierten Entwicklung die angesetzten Substitute und daran gekoppelte Prozesse in ausreichendem Maße verfügbar sein müssen.

Im Rahmen der Dissertation kann auf den spezifischen Forschungsbedarf in diesem Feld nicht näher eingegangen werden. Der in Abb. 49 von Mendgen und Schlaich dargestellte Vergleich von Zementarten belegt jedoch den möglichen positiven Einfluss klimaeffizienter Zemente auf die Ökobilanz der Betonkonstruktionen.

⁴²¹ Vgl. Sobek/Heinlein 2022 (wie Anm. 3), S. 44–52.

⁴²² Verein Deutscher Zementwerke e.V. 2022 (wie Anm. 434), S. 9.

⁴²³ Vgl. Dehn/Wiens 2022 (wie Anm. 52), S. 140.

⁴²⁴ Bergmeister/Fingerloos/Wörner 2022 (wie Anm. 121), S. 140.

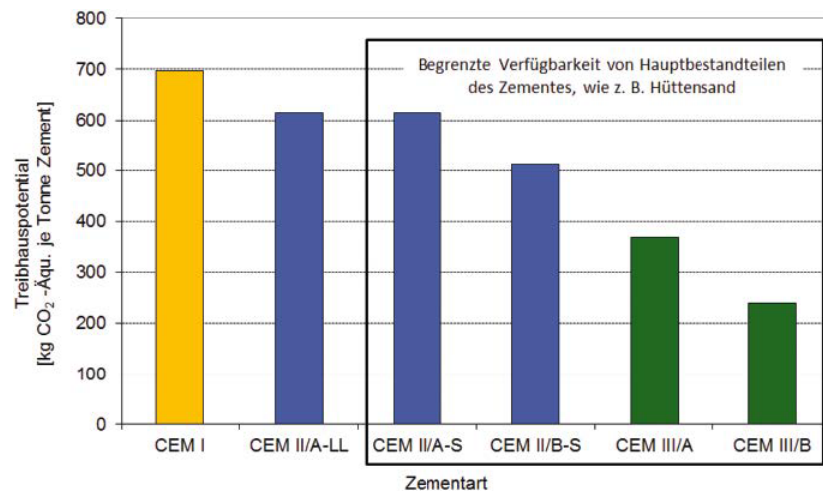


Abb. 49: Optimierung des Treibhauspotenzials durch klimaeffizientere Zemente

© Anna Mendgen und Mike Schlaich⁴²⁵

Zusammenhang zu den Schnittstellen der Pyramidalen Zirkularität

Auch die Entwicklung neuartiger Materialzusammensetzungen und deren Einsatz verortet sich in der Schnittstelle des Digitalen Materials und ist wesentlich für die Verbesserung der Nachhaltigkeit im Bauwesen verantwortlich (→3.1.3.3 Schnittstelle Gestaltung – Technik: digitales Material)

⁴²⁵ Aus: (Mendgen und Schlaich 2021, (wie Anm. 408), S. 336).

4.1.2.5 Einfluss der Druckfestigkeit

In der Studie „Konzepte zur Herstellung ressourceneffizienter Betone am Beispiel Zement“ wird der Zusammenhang aus Druckfestigkeit und Lebensdauer vor dem Hintergrund der entstehenden CO₂-Emissionen hergestellt.⁴²⁶ Entscheidend ist laut Studie die Abstimmung der tragkonstruktiven Anforderung an die Materialzusammensetzung, da das Treibhausgaspotenzial nachweislich in Relation zur Druckfestigkeitsklasse um 10-15 Prozent steigt.⁴²⁷ Die Druckfestigkeit der Materialmatrix könnte zukünftig direkt auf Gebäudehöhe und -klasse und damit einhergehende Lasten abgestimmt werden, um so maximal Ressourcen einzusparen. Dies geht aus der Forschung der HTW Berlin „Ökobilanzierungsvergleich zwischen Ortbetondecken und Spannbeton-Fertigdecken am Beispiel einer Wohnanlage für Studierende in Bochum“ hervor.⁴²⁸ Es gibt demnach bei der Betrachtung des Einflusses der Druckfestigkeit zwei Möglichkeiten, eine CO₂-Reduktion zu bewirken: Es kann entweder ein leistungsfähiger Beton mit einem schlanken Querschnitt (→4.1.2.2 Reduktion von Masse), jedoch höherem Zementanteil zum Einsatz kommen, oder die Festigkeit minimiert werden und damit auch der Zementanteil. „Voraussetzung hierfür ist eine entsprechend differenzierte Bemessung. [...] Wichtig ist, die Leistungsfähigkeit der Betone, z. B. die Druckfestigkeit, möglichst vollständig auszunutzen.“⁴²⁹

Auch Mendgen und Schlaich differenzieren den Zusammenhang und belegen analog im Rahmen der Forschung um den Infraleichtbeton, dass eine höhere Druckfestigkeit ein unmittelbar größeres Treibhauspotenzial bewirkt.⁴³⁰

Zusammenhang zu den Schnittstellen der Pyramidalen Zirkularität

Zwei mögliche Strategien lassen sich abschließend zusammenfassen. So kann entweder die Betonqualität bei vordimensionierten Bauteilstärken an die Leistungsnotwendigkeit angepasst, oder schlankere Bauteile mit leistungsfähigeren Betonen umgesetzt werden. Mit einer Verknüpfung an weitere Parameter, beispielsweise Anforderungen an die Dämmwirkung, kann das entsprechende Optimum für die jeweilige Bauaufgabe konzipiert werden. Diese Potenziale ergeben sich an der Schnittstelle der Leitfaktoren Gestaltung und Technik im Sinne der Pyramidalen Zirkularität (→3.1.3.3 Schnittstelle Gestaltung – Technik: digitales Material).

⁴²⁶ Christoph Müller, »Konzepte zur Herstellung von ressourceneffizienten Betonen am Beispiel Zement«, in: *Beton*, 9 (2019), S. 311–314, hier S. 312.

⁴²⁷ Vgl. Tab. 1 Quelle des Concrete Sustainability Council (CSC)

Julian Biermann u. a., »Nachhaltig bauen mit Beton: Klimaeffizient. Ressourcenschonend. Energiesparend«, S. 14–15, <https://betonshop.de/media/wysiwyg/PDF/Nachhaltig-bauen-mit-Beton-2023.pdf> (abgerufen am 7. April 2024).

⁴²⁸ Vgl. Andreas Heuer, »Ortbetondecken vs. Spannbeton-Fertigdecken: Auswirkung auf die Ökobilanz eines Gebäudekomplexes«, 2023, S. 26, https://www.dw-systembau.de/downloads.html?file=files/downloads/Nachhaltigkeit/HTW%20Berlin_%C3%96kobilanzierung_Ortbetondecken%2Bvs.%2BSpannbeton-Fertigdecken.pdf (abgerufen am 7. April 2024).

⁴²⁹ Biermann u. a. (wie Anm. 427), S. 14.

⁴³⁰ Vgl. Mendgen/Schlaich 2021 (wie Anm. 408), S. 346.

4.1.2.6 Recyclinganteil

Aktuell ist ein Recycling-Anteil von bis zu 45 Volumen-Prozent je nach Kategorie der beigefügten Gesteinskörnung möglich und wird in der Richtlinie für Beton mit RC-Gesteinskörnung des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) sowie in der DIN EN 206-1 in Verbindung mit der DIN 1045-2, Abschnitte 5.2.3.3 und 5.2.4, geregelt.⁴³¹ Die Thematik wird kontrovers diskutiert, da die Einsparungen der Treibhausgasemissionen durch die Einbindung des Rezyklats im Vergleich zur alternativen Möglichkeit der Reduktion des Zementanteils nur marginal seien.⁴³² Es sei jedoch zu beachten, dass nicht nur die Reduktion der Emissionen relevant ist. Der Einsatz von Rezyklat spare darüber hinaus wertvolle Primärressourcen ein, so dass der Materialfußabdruck um 31-43 Prozent im Vergleich zum konventionellen Beton reduziert werden könne.⁴³³ Neben der Substitution der Gesteinskörnung können auch feinere Anteile rezyklierter Materialien in die Betonmatrix eingebunden werden. „Diese sogenannten (gemahlene) Brechsande können im Bindemittel üblicherweise eingesetzte inerte Zuschlagstoffe wie Kalksteinmehle ersetzen.“⁴³⁴ Die Nutzung alternativer Zusatzstoffe wird von Mostert et al. als gewinnbringend zur Reduktion des Klimafußabdrucks beschrieben.⁴³⁵ Auch in diesem spezifischen Forschungsbereich gibt es vielfältige Ansätze auf Materialebene ebenso wie mit Bezug auf neue Fertigungstechnologien zur Gewinnung von Recyclingstoffen. Müller legt zudem eine umfassende Bestandsaufnahme der notwendigen Anlagen zur Aufbereitung vor, die die Grundlage für die eigentliche Einbindung von Rezyklaten bilden.⁴³⁶

Entscheidend bei der Verwendung von Recycling-Anteilen sind deren ausreichende und lokale Verfügbarkeit, da ein langer Transport einer positiven Klimabilanz entgegenwirken. An dieser Stelle kann keine pauschale Handlungsempfehlung zum Einsatz von Rezyklaten in Betonbauteilen gegeben werden. Vielmehr sollte geprüft werden, ob Synergien genutzt werden können, wenn beispielsweise ein Bestandsgebäude rückgebaut wird und eine direkte lokale Aufbereitung der Baustoffe und eine Verwendung möglich ist. Vor diesem Hintergrund wird sich die Infrastruktur zum Beispiel von stationären hin zu mobilen Recyclinganlagen weiterentwickeln müssen.

Die „Ökonomie des Urban Mining“ wurde beispielhaft beim selektiven Rückbau des Modellprojektes Rathaus Korbach beispielhaft umgesetzt.⁴³⁷ Das Projekt wird ausführlich in dem Forschungsbericht „Neubau aus Rückbau -

⁴³¹ Vgl. Fachinformationen werden im Zement-Merkblatt Betontechnik B30 zusammengefasst.

Michaela Biscopig, Diethelm Boslod und Markus Brunner, »Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung - R-Beton«, in: *Zement-Merkblatt Betontechnik*, S. 1–8.

⁴³² Vgl. Dehn/Wiens 2022 (wie Anm. 52), S. 143.

⁴³³ Vgl. Rosen 2022 (wie Anm. 356), S. 84.

⁴³⁴ Dehn/Wiens 2022 (wie Anm. 52), S. 141.

⁴³⁵ Vgl. Clemens H. Mostert u. a., *Neubau aus Rückbau. Wissenschaftliche Begleitung der Planung und Durchführung des selektiven Rückbaus eines Rathausanbaus aus den 1970er-Jahren und der Errichtung eines Neubaus unter Einsatz von Urban Mining (RückRat)*, BBSR-Online-Publikation, Bonn, S. 59, https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2021/bbsr-online-15-2021-dl.pdf?__blob=publicationFile&v=3.

⁴³⁶ Vgl. Anette Müller, *Baustoffrecycling. Entstehung - Aufbereitung - Verwertung*, Wiesbaden 2018 (*SpringerLink Bücher*), S. 125–147.

⁴³⁷ Rosen 2022 (wie Anm. 356), S. 84.

Wissenschaftliche Begleitung der Planung und Durchführung des selektiven Rückbaus eines Rathausanbaus aus den 1970er-Jahren und der Errichtung eines Neubaus unter Einsatz von Urban Mining (RückRat)⁴³⁸ dokumentiert und belegt exemplarisch einen vollumfänglichen Einsatz von Recyclingmaterialien. Die konkreten Effekte auf die Ökobilanz von R-Betonen werden durch ein neuartiges digitales Bewertungstool der Firma SURAP⁴³⁹ erforscht.⁴⁴⁰ „Mit der vergleichenden Fußabdruckanalyse wurde erstmalig ein softwaregestütztes, ökobilanzielles Bewertungskonzept entwickelt und erfolgreich getestet, mit dem die ökologische Vorteilhaftigkeit der Verwendung von RC-Materialien in Urban Mining-Projekten abgeschätzt werden kann. Die ausgewählten Indikatoren haben sich als richtungssicherer Bewertungsmaßstab für die Bestimmung der Ressourceneffizienz im Hochbau erwiesen.“⁴⁴¹

Zusammenhang zu den Schnittstellen der Pyramidalen Zirkularität

Die Schnittstelle des Digitalen Materials zeigt sich in der Nutzung digitaler Simulations- und Bewertungstools und gibt Rückschluss auf den ressourcenschonenden Materialeinsatz auch unter Anwendung von Rezyklaten (→3.1.3.3 Schnittstelle Gestaltung – Technik: digitales Material). Auch die Einbindung von Rezyklaten beeinflusst die Materialzusammensetzung und Bauteilentwicklung.

⁴³⁸ Mostert u. a. (wie Anm. 435).

⁴³⁹ SURAP ist ein Startup, das sich auf die Bilanzierung des Ressourcenaufwands und der Klimawirkung von Baumaterialien, inklusive R-Betonen, und deren Implementierung in Building Information Modeling (BIM) Systeme spezialisiert hat.

⁴⁴⁰ Vgl. C. Mostert u. a., »Urban Mining for Sustainable Cities: Environmental Assessment of Recycled Concrete«, in: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 588 (2020), Nr. 5, S. 52021, hier S. 1.

⁴⁴¹ Mostert u. a. (wie Anm. 435), S. 58.

4.1.2.7 Wiederverwendung von vorgefertigten Komponenten

Gerade in Betonkonstruktionen steckt aufgrund der großen Mengen an gebundenem CO₂ ein großes Nachhaltigkeitspotenzial. Dies rechtfertigt es, diese Strukturen als Speicher grauer Energie zu halten, und durch eine planerische Herangehensweise auf unterschiedlichen Skalen in robuste und erweiterbare Strukturen zu wandeln. Der Abriss und Ersatz hingegen bedingen den Verlust vorangegangener Bindungen grauer Emissionen des Bestandes und implizieren weitgehend neue Emissionen. Sonderegger beschreibt die Sinnhaftigkeit der Wiederverwendung von bestehenden massiven Konstruktionen wie folgt: „Insbesondere massive Primärstrukturen, die den Löwenanteil an der Baumasse ausmachen, lassen sich kaum zerstörungsfrei dekonstruieren und folglich werden diese in den Recyclingprozessen zu Rohstoffen zerlegt und aufgereiht. Innenausbauten, Holz- und Stahlbaustrukturen eignen sich besser zur Wiederverwendung, aber auch nur, wenn sich die Verbindungen der Bauteile beschädigungsfrei demontieren lassen, was oftmals nicht der Fall ist.“⁴⁴²

Basierend auf dem Ziel einer kreislauffähigen Betonwirtschaft wird geschlussfolgert, dass man in Betracht ziehen sollte, Betonkonstruktionen situationsbezogen so zu konstruieren, dass Sie zerstörungsfrei wiederverwendet werden können, also als gesamtes Bauteil. Laut Aussage der Autorin ist diese Rückbaubarkeit in Abhängigkeit an die konzipierte Flexibilität zu berücksichtigen. Die Anforderung an eine flächeneffiziente Nachnutzung und zerstörungsfreie Zerlegung von Betonstrukturen beschreibt Rosen wie folgt: „Das mineralische Baustoffrecycling bietet ein hohes Potenzial zur Einsparung endlicher stofflicher Ressourcen, kann aber nur einen geringen Beitrag zum Klimaschutz leisten, weil eine Rückgewinnung des klimaschädlichen Zements noch nicht möglich ist. Bestandsgebäude sollten deshalb bevorzugt erhalten werden, wenn eine flächeneffiziente Nachnutzung sinnvoll möglich ist. Bei der Planung neuer Gebäude muss der Anteil von Stahlbeton auf ein möglichst geringes Maß reduziert werden. Die eingesetzten Betonbauteile sollten im besten Fall so konstruiert sein, dass sie als Bauelemente ohne Zerstörung komplett wiederverwendet werden können. Hinsichtlich der Entwicklung und des Einsatzes demontagefähiger Betonkonstruktionen besteht jedoch noch vielfältiger Forschungsbedarf.“⁴⁴³ Das Forschungsprojekt „MZD“⁴⁴⁴ verfolgt den dargelegten Zusammenhang aus bewusster Reduktion massiver Bauteile und deren in Teilen reversiblen Fügung (→6.1.1 Forschungsprojekt: hybride Systembaukonstruktion „Modular – Zirkulär - Digital (MZD)“).

⁴⁴² Sonderegger 2021 (wie Anm. 392), S. 285.

⁴⁴³ Rosen 2022 (wie Anm. 356), S. 91.

⁴⁴⁴ DBU „Modular – Zirkulär – Digital: Individualisierbare Standardisierung – Ganzheitlicher Modulbaukasten zum Erreichen nachhaltiger Planungskonzepte und hoher planerischer Flexibilität“ (10/20222-03/2025).

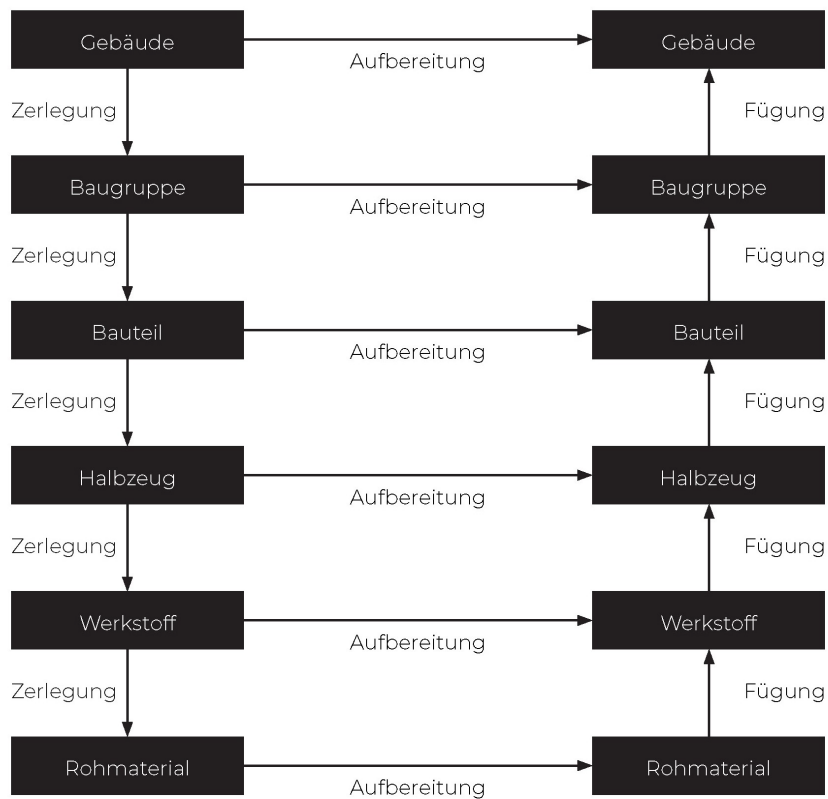


Abb. 50: Ebenen der Wiederverwendung © Baukreisel e.V.

Entscheidend bei der Rückführung ist, auf welcher Stufe dabei angesetzt wird. Die obenstehende **Abbildung 50** zeigt die Ebenen der Wiederverwendung und damit einhergehend, dass das Nachhaltigkeitspotenzial in Abhängigkeit von der Ebene der Rückführung steigt. Bei der Rückführung auf Bauteilebene ganzer Komponenten entstehen wesentlich weniger Emissionen als bei der Rückführung auf Baustoffebene beispielsweise als Betonbruch. Ein Wiederverwendungsfall wird als „Optimal Reuse Case (ORC)“⁴⁴⁵ bezeichnet, wenn er eine sehr hohe praktische Anwendbarkeit aufweist und die vom Verein Baukreisel definierten vier Kriterien „Gesamtkosten, CO₂-Emissionen, Ressourcenverbrauch und Abfallmenge“ optimiert.⁴⁴⁶

Der Umsetzung einer Wiederverwendung müssen immer Aufwand und Kosten gegengerechnet werden. In der Lehrveranstaltung „Material – Einsatz – Wandel“⁴⁴⁷ wurde in Kooperation mit Baukreisel e.V., der Juniorprofessur Ressourceneffizientes Bauen Prof. Dr.-Ing. J. Albus und dem Lehrstuhl Baukonstruktion Prof. P. Eckert und W. Eckert ein Format entwickelt, das die Studierenden für die Prozesse bei der Wiederverwendung sensibilisieren soll. Es galt dabei, das optimale Wiederverwendungsszenario für ein gewähltes Bauteil aus dem bestehenden Materiallager des Rheinlanddammturms in Dortmund zu eruieren (**Abb. 51**).

⁴⁴⁵ Vgl. Baukreisel e.V., »Baukreisel: Kollektiv für Transformtion und Gestaltung«, <https://baukreisel.org/> (abgerufen am 23. April 2024).

⁴⁴⁶ Jonas Läufer und Conrad Riesch, *WPF - MATERIAL EINSATZ WANDEL. Optimal Reuse Case (ORC)*, Dortmund 2023.

⁴⁴⁷ Wahlpflichtfach mit dem Titel „Material - Einsatz – Wandel“ im Sommersemester 2023 an der TU Dortmund.

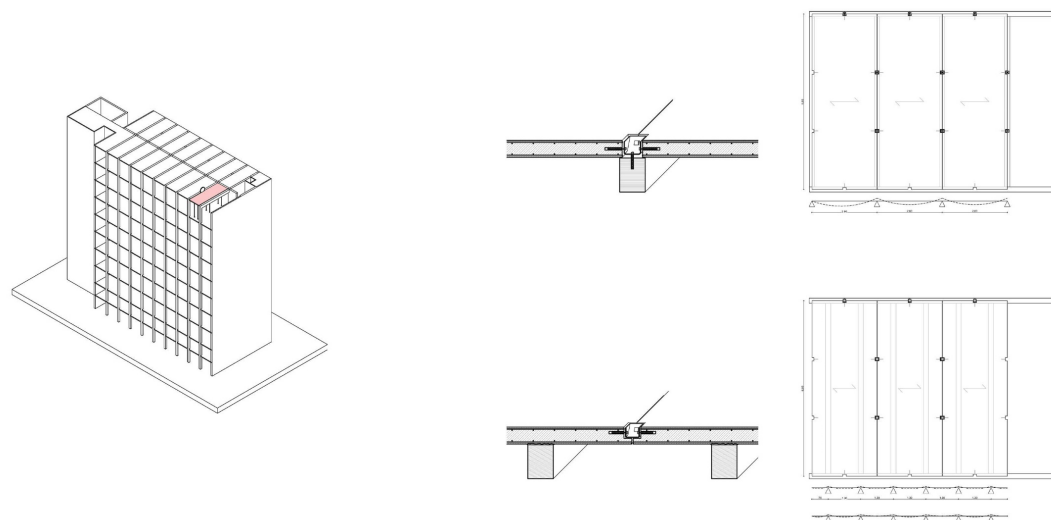


Abb. 51: Ergebnis aus der Lehrveranstaltung „Material – Einsatz – Wandel“ © Dina Suberg, Leona Wiemers

Eine Forschung mit zwei Fallstudien zur Wiederverwendung von Betonkomponenten wurden in der Schweiz von K pfer et al. an der Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) durchgeführt. Dies geschah vor dem Hintergrund die Auswirkungen der Wiederverwendung von Betonbauteilen auf die Ökobilanz zu evaluieren. Bei der Studie „Environmental and economic analysis of new construction techniques reusing existing concrete elements: two case studies“⁴⁴⁸ wurden im ersten Fall großformatige Betonblöcke zur Konstruktion einer Bogenbrücke sowie im zweiten Fall zur Herstellung einer Parkplatzdecke wiederverwendet. K pfer et al. zogen folgende Bilanz: „Reusing concrete blocks can significantly reduce the environmental footprint of projects. Compared to conventional alternatives, the studied reused-concrete arch and pavement reduce up to 75 % and 82 % climate-change impact and up to 67 % and 77 % the ecological load, respectively.“⁴⁴⁹

Zusammenhang zu den Schnittstellen der Pyramidalen Zirkularität

Die Wiederverwendung kompletter Komponenten stellt an der Schnittstelle zwischen Technik und Konstruktion im Rückbau-Kreislauf einen nennenswerten Mehrwert zur Einsparung von Ressourcen dar (→3.1.3.4 Schnittstelle Technik – Konstruktion: digitale Zerlegung). Diese Strategie einer Wiederverwendung muss bereits in der Herstellung durch eine geeignete Konstruktion und Fügetechnik die spätere Zerlegung vorbereiten, so dass ein Neuentwurf mit wiederverwendeten Bauteilen möglich wird (→3.1.3.5 Schnittstelle Konstruktion – Gestaltung: digital gestützter Neuentwurf).

⁴⁴⁸ C. K pfer u. a., »Environmental and economic analysis of new construction techniques reusing existing concrete elements: two case studies«, in: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1078 (2022), Nr. 1, S. 12013.

⁴⁴⁹ Ebd., S. 8–9.

4.1.2.8 Rückbaubarkeit und reversible Fügetechnik

„Im Sinne der Kreislaufwirtschaft ist bereits zu Beginn der Planung auf die Möglichkeit des selektiven Rückbaus zu achten.“⁴⁵⁰ Die Umsetzung einer reversiblen Fügetechnik hat Auswirkungen auf Statik und Abdichtungstechnik und muss auf das System abgestimmt sein. So kann der Verbund bei Wandbauteilen beispielsweise über die gesamte Querschnittsbreite erfolgen, oder aber punktuell wirken. Bei der Konzipierung zerlegbarer Fügetechniken sollte eine sortenreine Trennung im Vordergrund stehen. Die Herangehensweisen zur Entwicklung loser Fügeprinzipien sind vielfältig und erfordern eine hohe Präzision. Innerhalb des Transregio Projektes TRR 277 „Additive Manufacturing in Construction“ werden von Lanwer et al. neuartige Trockenfugen entwickelt, die unter Einbindung additiver Fertigungsverfahren realisiert werden.⁴⁵¹ Thiel et al. beschreiben den Zusammenhang aus Fügeprinzip und Lastübertragung. Oftmals geht eine reversible Fügetechnik mit Einbußen bei der Kraftübertragung einher. „Es gilt daher für jede Konstruktion die geeignete lösbare Verbindung zu wählen, ohne dabei den Materialbedarf unverhältnismäßig ansteigen zu lassen, um somit eine bestimmte Belastbarkeit zu erreichen.“⁴⁵² Hier können geometrische Prinzipien wie Nut-Feder-Verbindungen ausgebildet werden. Alternativ können Stoßfugen mit Klettbandern ausgeführt werden, die innerhalb eines automatisierten Prozesses eingelegt werden. Eine weitere Möglichkeit bildet die Verwendung von mechanischen Elementen wie Popnieten, die in die Betonstrukturen integriert werden können. An der TU Graz am Institut für Architekturtechnologie laufen Forschungstätigkeiten, die die Entwicklung reversibler Fügetechniken von Betonbauteilen vorantreiben.⁴⁵³ Das Prinzip des Klettbetons wird beispielsweise von Raudaschl in der Dissertationsschrift „Klettbeton: Analyse und Herstellung verbindungsfähiger Betonstrukturen am Vorbild der Klettverbindung“ ausgeführt.⁴⁵⁴

Zusammenhang zu den Schnittstellen der Pyramidalen Zirkularität

Auch wenn die Thematik der Rückbaubarkeit im ersten Moment bei Betonkonstruktionen aufgrund der vergleichbar langen Lebensdauer nicht vorrangig erscheint, sollte diese nicht ausgeschlossen werden. Vielmehr sollte bewusst bereits im Planungsprozess abgewogen werden, bei welchen Konstruktionen es sinnvoll ist, eine Rückbaubarkeit von Beginn an mitzudenken. Die Kriterien Rückbaubarkeit und reversible Fügetechniken sind somit kongruent zur Schnittstelle Technik und Konstruktion (→3.1.3.4 Schnittstelle Technik – Konstruktion: digitale Zerlegung).

⁴⁵⁰ Thiel u. a. 2023 (wie Anm. 285), S. 272.

⁴⁵¹ Jan-Paul Lanwer u. a., »Jointing Principles in AMC—Part 1: Design and Preparation of Dry Joints«, in: *Applied Sciences*, 12 (2022), Nr. 9, S. 4138.

⁴⁵² Thiel u. a. 2023 (wie Anm. 285), S. 268.

⁴⁵³ Vgl. F. Oswald, R. Riewe und M. Raudaschl, »Hook-and-Loop fastener – application for the technical building equipment«, in: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 323 (2019), Nr. 1, S. 12124, hier S. 6–7.

⁴⁵⁴ Vgl. Matthias Raudaschl, »Klettbeton: Analyse und Herstellung verbindungsfähiger Betonstrukturen am Vorbild der Klettverbindung« Technische Universität Graz, <https://diglib.tugraz.at/download.php?id=6110fd7f6240e&location=browse> (abgerufen am 20. September 2023).

4.1.2.9 Abfallreduktion

Einen umfassenden Überblick über die Mengen und eine Aufschlüsselung zum Abfallaufkommen in Deutschland gibt Sobek: „Der Begriff Bauschutt bezeichnet ausschließlich mineralische Abfälle, also Baumaterialien wie zum Beispiel Beton, Backsteine, Ziegel, Klinkersteine und Mörtelreste, aber auch Fliesen, Keramiken oder Ziegel.“⁴⁵⁵ Ausschlaggebend vor dem Hintergrund der Kreislaufwirtschaft ist Sobeks Wertung zum Umgang mit diesen enormen Massen. „Trotz einer nominal sehr hohen Verwertungsquote von über 90% bei Baustellen- und Abbruchabfällen ist festzustellen, dass eine hochwertige Kreislaufführung unter Weiternutzung der stofflichen Eigenschaften der mineralischen Sekundärbaustoffe nicht umfassend praktiziert wird. Von den jährlich in Deutschland anfallenden circa 52 mio. t Bauschutt werden zwar ca. 80% recycelt, aber nur ein Bruchteil davon wird wieder als hochwertiger Betonzuschlagstoff eingesetzt. Rund 42 Mio. t an Recyclingbaustoffen werden im Straßenbau eingesetzt. Ein großer Teil des Sekundärmaterials wird in Form eines Downcyclings⁴⁵⁶ beispielsweise im Landschafts- und Wegebau oder als Ausgleichsmaterial verwendet. Die Gründe hierfür liegen zumeist in informatorischen, logistischen und rechtlichen Hindernissen.“^{457,458} Mit dem Ziel einer Verbesserung der Nachhaltigkeit von Betonkonstruktionen und deren Wertschätzung als Ressource innerhalb des urbanen Rohstofflagers entsprechend des Urban Mining Ansatzes ist es wichtig, rückzubauende Betonkonstruktionen nicht einfach zu zerkleinern, sondern im besten Fall als Komponente weiter zu vermitteln. Laut eines gemeinsamen Forderungspapiers der Deutschen Umwelthilfe und der A4F⁴⁵⁹ mit dem Titel „Gebäudeabriss vermeiden und Bauen im Bestand fördern“ wird ein Lösungsansatz zur Abfallreduktion durch eine „verpflichtende Bauteilsichtung“ gegeben: „Eine in der Planungsphase stattfindende Bauteilsichtung vor dem Rückbau ermöglicht eine Zuschreibung von Bauteilen und Baustoffen dem sinnvollsten Nutzungsweg (Wiederverwendung, hochwertiges Recycling, stoffliche Verwertung) oder, wenn nicht anders möglich, der Verbrennung oder Deponierung. Durch diese Zuschreibungen kann ein selektiver Rückbau effektiv geplant und damit Wertstoffe dem Kreislauf bestmöglich zugeführt werden. So können die massiven Abfallmengen (ca. 55% des deutschen Abfallaufkommens) reduziert werden.“⁴⁶⁰

⁴⁵⁵ Sobek/Heinlein 2022 (wie Anm. 3), S. 163.

⁴⁵⁶ Vgl. Erläuterungen im Glossar.

⁴⁵⁷ Sobek/Heinlein 2022 (wie Anm. 3), S. 163–164.

⁴⁵⁸ Originalquelle aus: Felix Müller u. a., »Urban Mining: Ressourcenschonung im Anthropozän«, 2017, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/uba_broschuere_urbanmining_rz_screen_0.pdf.

⁴⁵⁹ Die Abkürzung steht für Architects for Future.

⁴⁶⁰ Deutsche Umwelthilfe, Architects for Future, *Gebäudeabriss vermeiden und Bauen im Bestand fördern. Gemeinsames Forderungspapier von A4F und DUH*, 2022, S. 4, https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Projektinformation/Energieeffizienz/Gebaeude/Geb%C3%A4udeabriss/A4F_DUH_Forderungspapier_Abrissvermeidung_08122022_final.pdf (abgerufen am 28. Dezember 2023).

Zusammenhang zu den Schnittstellen der Pyramidalen Zirkularität

Eine Sichtung von Betonbauteilen kann maßgeblich mithilfe digitaler Werkzeuge, wie beispielsweise, solche, die zur zerstörungsfreien Diagnostik genutzt werden, erfolgen. Dort ist die Schnittstelle Digitaler Werkzeuge verortet und deren Kopplung mit der Digitalen Zerlegung relevant. Dies leitet zurück zu den Punkten (→4.1.2.7 Wiederverwendung von vorgefertigten Komponenten) und (→4.1.2.8 Rückbaubarkeit und reversible Fügechnik) und damit zur Berücksichtigung einer Rückbaubarkeit durch reversible Fügung und darauf aufbauend einer Wiederverwendung von Betonkomponenten. Entsprechend sollen Verbundkonstruktionen und Komposite künftig vermieden werden. Für Betonkonstruktionen könnte dies die Umsetzung einer sortenreinen Betonmatrix oder vielmehr die Zerlegung der Bestandteile durch geeignete Verfahren bedeuten. Auch die Abfallreduktion wird an unterschiedlichen Schnittstellen der Pyramidalen Zirkularität mitgestaltet.

4.1.2.10 Transport und Regionalität

Der Faktor Transport tritt beim Betonbau in unterschiedlichen Phasen auf. So ist zunächst der Transport der Ausgangsstoffe in der frühen Phase der Betonherstellung relevant. Deutschlandweit besteht eine durchgehend regionalisierte Infrastruktur von Betonwerken, um Transportwege gering zu halten. Laut Angabe der Studie des WWFs „Klimaschutz in der Beton- und Zementindustrie“ erfolgen 75 Prozent der Zementlieferungen im Umkreis von 100 km.⁴⁶¹ Dies ist insbesondere den Transportkosten geschuldet. „Bei Transportbeton verstärkt sich die Relevanz der Transportkosten noch weiter. Bei der dafür benötigten Körnung (Kies bzw. Sand) fallen ähnliche gewichtsbezogene Transportkosten an, stehen allerdings einem Warenwert von nur ca. 5 – 10 €/Tonne gegenüber. Sowohl bei Beton als auch bei Zement ergibt sich somit eine starke finanzielle Motivation die Transportdistanzen zu minimieren, was eine Regionalisierung der Industrie zur Folge hat.“⁴⁶² Der Transport ist ein wesentlicher Kostenfaktor, aber darüber hinaus relevant beim Ausstoß von Emissionen im Bauwesen. Dies fließt aber oftmals nicht vollumfänglich in die Bilanzierung ein. Laut Sobek würden „Energieverbrauch und die Emissionen, welche bei Transportvorgängen während der Herstellung und beim Rückbau von Bauwerken entstehen, [werden] bei der Bilanzierung im Bauwesen häufig nicht erfasst, sondern den Sektoren ‚Mobilität‘ oder ‚Industrie‘ zugeschrieben, d.h. externalisiert. Die wahren Zusammenhänge werden hierdurch verschleiert.“⁴⁶³ Sobek macht darüber hinaus deutlich, welches Ausmaß an Emissionen auch beim Rückbau von Betonkonstruktionen entsteht: „Beim Transport von Betonschutt zu Deponien im Norden Tschechiens oder im Süden von Polen, so wie dies heute beim Anfall von Bauschutt in Süddeutschland häufig vorkommt, wird mehr CO₂ durch den Lkw-Transport emittiert als bei der Herstellung des Betons selbst.“⁴⁶⁴ Diese Aussage macht deutlich, wie wichtig es ist, den Faktor Transport entsprechend über alle Lebensphasen zu gewichten. Für Betonkonstruktionen bedeutet die Reduktion von Masse demzufolge auch eine Reduktion der Emissionen durch den eingesparten Transport, sowohl bei der Herstellung als auch beim Rückbau.

Bei der Verlagerung der Betonfertigung ins Werk werden auf den ersten Blick nicht unbedingt Emissionen und Kosten eingespart. Oftmals fallen beim Transport großformatiger Betonbauteile sogar erhöhte Kosten für Sondertransporte an. Wirtschaftlich betrachtet können diese jedoch durch die effiziente und deutlich verkürzte Bau- und Montagezeit häufig ausgeglichen werden wie von Bertram et al. wie folgt zusammengefasst: „Logistics. In the world of modular construction, coordination and delivery of modules to the site is critical—especially when large 3D units must be moved. The total cost of a project can increase by up to 10 percent in locations with restrictive transport regulations. When considering the use of 3D modules, builders have to ensure that the productivity gains outweigh this cost,

⁴⁶¹ WWF Deutschland 2019 (wie Anm. 353), S. 12.

⁴⁶² Die Quelle bezieht sich auf Daten des Bundeskartellamts (2017): Sektoruntersuchung Zement und Transportbeton.

ebd.

⁴⁶³ Sobek/Heinlein 2022 (wie Anm. 3), S. 261.

⁴⁶⁴ Ebd., S. 262.

carefully weighing wage differentials between the manufacturing facility and the product's end destination, as well as the distance involved in delivery."⁴⁶⁵

Besonders relevant ist der Parameter Transport beim Rückbau. Es sollten keine weiteren Emissionen für die Zerkleinerung und den Transport von Bauschutt in Kauf genommen werden. Vielmehr sollten Bauteile in Gänze Wiederverwendung finden. Beim Transport dieser Elemente werden zwar auch Emissionen verursacht, jedoch entfallen die kompletten negativen Einträge bei der Herstellung. An dieser Stelle ist der Transport demnach anders zu rechtfertigen.

Zusammenhang zu den Schnittstellen der Pyramidalen Zirkularität

Es kann geschlussfolgert werden, dass durch die geforderte Kreislauffähigkeit der Faktor Transport an unterschiedlichen Stellen im Stoffkreislauf von Betonkonstruktionen eine entscheidende Rolle spielt, den es mit abzuwägen gilt. Die Emissionen durch Transport sind demnach an mehreren Schnittstellen innerhalb der Pyramidalen Zirkularität verortet und zu beeinflussen.

⁴⁶⁵ Bertram u. a. 2019 (wie Anm. 32), S. 15.

4.1.2.11 Vorfertigung und Produktivität

Die geforderte Produktivitätssteigerung im Bauwesen kann gemäß Bertram et al. durch eine Vorfertigung und Automatisierung erreicht werden: „Automation is lined up as a next step, and will aim to offer an exponential boost to productivity—moving manufacturing on from being twice as productive compared to traditional construction methods today, towards what they see as a future ten-fold advantage.“⁴⁶⁶ Biermann et al. fassen die Vorteile der Vorfertigung wie folgt zusammen: „Bei der Bemessung und Herstellung von Betonfertigteilen können eine Reihe von Vorteilen genutzt werden, weil die Fertigung unter werksmäßigen Bedingungen mit hoher Qualität und ohne direkte Witterungseinflüsse stattfinden kann. Vor der Auslieferung der Fertigteile erfolgt die Qualitätskontrolle der Bauteile. Bei entsprechender werkseitiger Qualitätskontrolle können beispielsweise die Betondeckung und bei Fertigteilstützen der notwendige Querschnitt reduziert werden. In vielen Fällen werden für Betonfertigteile Betone einer höheren Festigkeitsklasse verwendet. Auch wenn Betone höherer Festigkeitsklassen mehr CO₂ pro m³ Beton bedeuten, kann durch die Reduzierung des Bauteilquerschnitts sowie bessere Ausnutzung der Druckfestigkeit der absolute CO₂-Fußabdruck des Bauteils häufig gesenkt werden.“⁴⁶⁷ Um diese individuellen Anpassungen der Druckfestigkeiten zu ermöglichen, müssen Materialmatrix und Anlagen kontrolliert flexibilisiert werden können. Mit Blick auf die Herstellung von Betonfertigteilen bietet die Vorfertigung eine effiziente und vereinfachte Möglichkeit zur Herstellung funktionsoptimierter Bauteile und damit auch zur Verbesserung der Nachhaltigkeit von Betonkonstruktionen.

Zusammenhang zu Schnittstellen der Pyramidalen Zirkularität

Die Fertigung im Werk begünstigt erstens eine komplementäre, automatisierte Fertigung. Eine solche kontrollierte Fertigung erlaubt präzise Konstruktionen mit geringer Fehlerquote (→3.1.3.2 Schnittstelle Konstruktion – Technik: digitales Bauteil). Zweitens ermöglicht die Vorfertigung darüber hinaus eine flexible und effiziente Anpassung der Anlagentechnik zur Realisierung adaptiver Bauteile. Drittens können durch die digitale Ansteuerung der Werkzeuge kontinuierliche Prozesse im kompletten Kreislauf geschaffen (→3.1.3.1 Schnittstelle Gestaltung – Konstruktion: digitales Planungswerkzeug) werden. Es ergeben sich hierdurch an vielen der dargelegten Schnittstellen Vorteile.

⁴⁶⁶ Ebd., S. 13.

⁴⁶⁷ Biermann u. a. (wie Anm. 427), S. 18.

4.1.2.12 Zeit und Prozess

Die vielfältigen Anforderungen an eine nachhaltige Bauweise müssen schon in einer frühen Planungsphase abgewogen werden und verlangen eine detaillierte und zeitaufwändige Bewertung. Die Umsetzung einer kreislaufgerechten Betonwirtschaft erfordert daher (aktuell noch) einen erhöhten Aufwand. Rosen beschreibt die Phasenverschiebung in dem Maße, dass die Ausführungsplanung vor der Ausschreibung gelöst werden muss: „Die Planung für zirkuläres Bauens benötigt mehr Zeit. Insbesondere in der Ausführungsplanung müssen die Details sorgfältig geplant werden, bevor die Ausschreibung beginnt. Aufgrund von Zeit- und Kostendruck ist es heute üblich, diese beiden Leistungsphasen zu überlagern. Dies führt dazu, dass mit dem Rohbau Fakten geschaffen werden, die beispielsweise eine Anpassung von Bodenaufbauhöhen an zirkuläre Konstruktionen erschweren.“⁴⁶⁸ Der erhöhte Zeitaufwand in der Planung kann durch die erläuterten Vorteile der digitalen Unterstützung beim Einsatz digitaler Werkzeuge, der Umsetzung eines Systems sowie der Einbindung automatisierter Fertigungstechnologien minimiert werden. Allgemein betrachtet werden laut einer Studie von McKinsey aus dem Jahr 2019 „Modular construction: From projects to products“ die Kosten für den erhöhten Aufwand in Phase Null durch Einsparungen durch die Wiederverwendung kompensiert: „While prefabrication increases the onus on getting the design right first time, it offers an opportunity for cost savings; the vast majority of rework costs can typically be avoided, and they are easier to roll out in standardized units.“⁴⁶⁹ Ferner prognostiziert die Studie eine Zeitersparnis in der Herstellung durch die Anwendung modularer Bauweisen im Werk von bis zu 50 % und eine Kostenersparnis von bis zu 20 %.⁴⁷⁰

Mit Blick auf den Werkstoff Beton ist seine Herstellung eng an die Produktionszyklen gekoppelt. Eine wirtschaftliche Fertigung nutzt die Maschinenauslastung optimal aus. Hierbei gibt die notwendige Abbundzeit den Fertigungsrythmus vor. Nach Rückkopplung mit Protagonisten der Betonfertigteilindustrie könnte die Produktionszeit von Betonbauteilen signifikant erhöht werden. Beispielsweise könne mit der Umstellung der Vorspanntechnik auf eine Fertigung mittels einer Umlaufanlage in Abgrenzung zu heutigen Fertigungszyklen im Mehrschichtbetrieb produziert werden. Vor diesem Hintergrund könne die aktuell aufwendige Vorspanntechnologie durch eine neuentwickelte serielle Fertigung verschiedene automatisierte Schritte kombinieren.⁴⁷¹

⁴⁶⁸ Rosen 2022 (wie Anm. 356), S. 91.

⁴⁶⁹ Bertram u. a. 2019 (wie Anm. 32), S. 15.

⁴⁷⁰ Vgl. ebd., S. 1.

⁴⁷¹ Interview bei der Fa. Bremer AG mit Herr Dr. Molter im Mai 2022 in Paderborn.

Zusammenhang zu den Schnittstellen der Pyramidalen Zirkularität

Wie innerhalb des Résumés der Pyramidalen Zirkularität kann eine Kreislauffähigkeit von Betonbauteilen maßgeblich durch die Umsetzung eines Systemansatzes sowie die Einbindung digitaler und automatisierter Werkzeuge gelingen (→3.1.4 Résumé: Kreislauffähigkeit durch digital gestützte Prozesse). Vor diesem Hintergrund spielen die Faktoren Zeit, Produktivität und Materialeinsatz zusammen.

4.2 Betontechnologie: Infraleichtbeton

Die Infraleichtbeton-Technologie, im Folgenden als ILC (Infra Lightweight Concrete) abgekürzt, wird bereits seit über 15 Jahren durch Forschungsaktivitäten an der TU Berlin im Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren – Massivbau unter Prof. Dr. Mike Schlaich, Prof. Regine Leibinger sowie von der Ingenieurgesellschaft Schlaich Bergermann Partner vorangebracht. Bisher wurden mehrere Gebäude mit Infraleichtbeton als Ortbetonkonstruktionen realisiert, wobei jedoch immer eine Zulassung im Einzelfall erforderlich war. Im Jahr 2023 hat die Ausarbeitung einer DAfStb Richtlinie für Ortbeton sowie Fertigteile aus Infraleichtbeton begonnen. Auf spezifische Anforderungen hin kann bereits eine Infraleichtbetonmischung bei Industriepartnern bezogen werden.⁴⁷² Die ILC-Technologie versucht wie die beiden Vergleichstechnologien, einen monolithischen Materialquerschnitt zu erzielen, der unter Verwendung von Leichtzuschlägen einen leichten, porösen Baustoff mit wärmedämmenden Eigenschaften und gleichzeitig einer ausreichenden Druckfestigkeit von bis zu 20 MPa bietet. Der Infraleichtbeton ordnet sich mit einer Trockenrohichte zwischen 550-800 kg/m³ ein. Durch die integrierte Wärmedämmung bietet dieser monolithische Werkstoff ein großes Gestaltungspotenzial. Mit dem ausführlichen Beitrag im „Betonkalender 2022“⁴⁷³ sowie der Publikation „Infraleichtbeton – Entwurf | Konstruktion | Bau“⁴⁷⁴ liegen für ILC umfassende Veröffentlichungen. Im Fokus des folgenden Vergleichs steht die Anwendung des ILC in der Vorfertigung. Innerhalb der von der DBU geförderten Forschung „Vorfabrikation von Fertigteilen aus Infraleichtbeton für den Geschosswohnungsbau (ILVO)“⁴⁷⁵ wurden hierzu detaillierte Ergebnisse erzielt, die als Grundlage für die durchgeführte Synopse herangezogen wurden.⁴⁷⁶ Ebenso bilden die Studie „Bauen mit großformatigen Elementen aus Infraleichtbeton (ILC) – Drei konstruktive Entwurfsvarianten für den Geschosswohnungsbau“⁴⁷⁷ sowie der Schlussbericht „Multifunktionale Leichtbetonbauteile mit inhomogenen Eigenschaften“⁴⁷⁸ eine Datengrundlage.

⁴⁷² Heidelberg Materials AG, »Heidelberger Infraleichtbeton: Der Beton für monolithische Bauweise«, 9. April 2024, <https://www.heidelbergmaterials.de/de/beton-und-fliessestrich/produkte/spezialbetone/infraleichtbeton>.

⁴⁷³ Bergmeister/Fingerloos/Wörner 2022 (wie Anm. 121).

⁴⁷⁴ Claudia Lösch und Philip Rieseberg, »Infraleichtbeton: Entwurf, Konstruktion, Bau«, hg. von Mike Schlaich und Regine Leibinger, Stuttgart 2018.

⁴⁷⁵ Deutsche Bundesstiftung Umwelt, »Vorfabrikation von Fertigteilen aus Infraleichtbeton für den Geschosswohnungsbau«, 3. April 2024, https://www.dbu.de/projekt_32997/01_db_2848.html.

⁴⁷⁶ Aktenzeichen 32997/01; Laufzeit 01.10.2018 - 30.09.2025.

⁴⁷⁷ Anna Mendgen, »Bauen mit großformatigen Elementen aus Infraleichtbeton (ILC) – Drei konstruktive Entwurfsvarianten für den Geschosswohnungsbau«, in: *Bautechnik*, 99 (2022), Nr. 6, S. 441–451, hier S. 442.

⁴⁷⁸ Technische Universität Berlin u. a., *MultiLC - Multifunktionale Leichtbetonbauteile mit inhomogenen Eigenschaften; Mechanische, Bauchemische und Bauphysikalische Untersuchungen. Ausführlicher Sachbericht*, Berlin 2019.

4.2.1 Materialtechnologie

In den aufgeführten Forschungsleistungen werden ein homogener Wandquerschnitt (Abb. 52) und zudem ein inhomogener Wandquerschnitt (Abb. 53) mit zwei tragenden Schalen von 10 cm und einem Kern von 25 cm entwickelt.

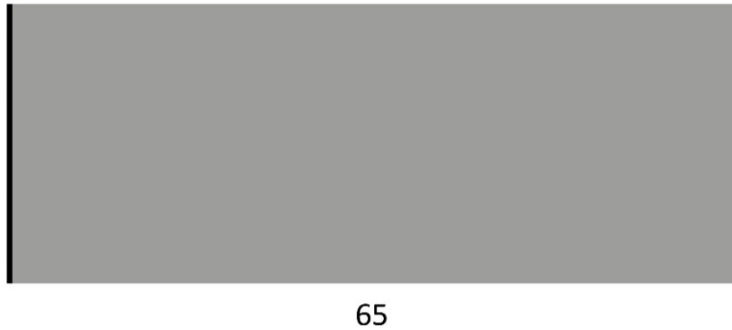


Abb. 52: Schematische Darstellung eines homogenen Bauteilquerschnitts von 65 cm.
Eigene Darstellung

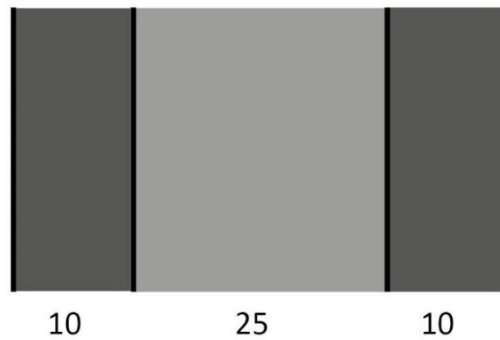


Abb. 53: Schematische Darstellung eines inhomogenen Bauteilquerschnitts 45 cm.
Eigene Darstellung

	Homogen ILC11	Inhomogen ILC12 _{shell}	Inhomogen ILC2 _{core}
Zusammensetzung	Zement, leichte Gesteinskörnung, Wasser, Fließmittel, Stabilisierer, Silikastaub	Zement, leichte Gesteinskörnung, Wasser Fließmittel, Stabilisierer, Silikastaub	Zement, leichte Gesteinskörnung, Wasser Fließmittel, Stabilisierer, Silikastaub
Zement	CEM III/A N – 32,5 LH/NA	CEM III A 42,5 N	CEM III A 42,5 N
Leichtzuschlag	Blähton	Blähton (Liapor) + Blähglas (Liaver)	Blähton (Liapor) + Blähglas (Liaver)
Rohdichte (ofentrocken)	800 kg/m ³	810 kg/m ³	500 kg/m ³
Wärmeleitfähigkeit	0,18 W/mK	0,163 W/mK	0,085 W/mK
Druckfestigkeit	> 13 MPa	> 15 MPa	> 6 MPa

Rahmenbedingungen:
Entwicklung von 2 Referenzmischungen, den homogenen und inhomogenen ILC
Homogene Wand 65 cm, maximaler U-Wert von 0,28 W/m ² K Inhomogene MultiLC-Wand 45 cm (10 cm+25 cm+10 cm), maximaler U-Wert von 0,23 W/m ² K.
Erreichte Rohdichte:
Im Betonkalender 2022 werden im untenstehenden Schaubild Druckfestigkeit und Trockenrohddichte bisher mit ILC realisierter Objekte ins Verhältnis gesetzt und damit die Leistungsfähigkeit abgebildet. Die Rohddichte wird maßgeblich durch den verwendeten Leichtzuschlag gesteuert. Es wird konstatiert, dass industriell hergestelltes Blähglas eine höhere Kornfestigkeit aufweist im Vergleich zu der natürlichen Ressource Blähton oder dem Recyclingmaterial Schaumglasschotter. ⁴⁷⁹ Der ILC ordnet sich mit einer Trockenrohddichte zwischen 550 und 800 kg/m ³ zu den Vergleichstechnologien Gradientenbeton und Aeroleichtbeton im Mittelfeld ein. Ebenso verhält es sich bei der Druckfestigkeit kleiner 13 MPa. Hier erzielt der Gradientenbeton mit 19,5 MPa eine höhere Druckfestigkeit und der Aeroleichtbeton eine geringere Druckfestigkeit von 2,43 MPa. ⁴⁸⁰
Wärmeleitfähigkeit
Mit einer Wärmeleitfähigkeit des Materials von λ 0,18 [W/(m·K)] kann bei einer Schichtdicke von 65 cm ein U-Wert von 0,28 W/(m ² ·K) erreicht werden. Der nach GEG geforderte Richtwert für Außenwände von 0,24 W/(m ² ·K) wird dabei überschritten und kann nach dem Ausgleichsprinzip durch die Anlagentechnik oder eine verbesserte Dämmwirkung anderer Bauteile kompensiert werden um die geltenden Anforderungen an den Primärenergieverbrauch und die Transmissionswärmeverluste einzuhalten. ⁴⁸¹ In der Anschlussforschung wurde mit dem MultiLC ein inhomogener Wandaufbau entwickelt um den Anforderungen nach GEG für Außenwände zu genügen. Mit diesem wurde bei einer Wandstärke von 45 cm der U-Wert kleiner 0,24 W/(m ² ·K) eingehalten.
Zementanteil:
ILC verwendet im Vergleich der drei Betontechnologien als einziger einen klinkerarmen Zement (CEM III B), im Gegensatz zum Gradientenbeton (CEM II) und Aeroleichtbeton (CEM I). Der gefügedichte Beton hat einen geringen Zementanteil von ca. 250 kg/m ³ . > Es besteht weiterer Forschungsbedarf bei der Ökobilanzierung. Um eine Vergleichbarkeit der Technologien zu erreichen, wäre eine Bilanzierung mit gleichen Zementen zielführend, um die direkten Auswirkungen der unterschiedlichen Zemente auf die jeweiligen Ökobilanzen der Betontechnologien aufzuzeigen.

⁴⁷⁹ Mike Schlaich, Alex Hückler und Claudia Lösch, »Infraleichtbeton«, in: Konrad Bergmeister, Frank Fingerloos und Johann Dietrich Wörner (Hg.), *Beton-Kalender 2021. Schwerpunkte: Fertigteile, Integrale Bauwerke (2 Teile)*, Berlin 2021 (*Beton-Kalender 2021*), S. 908–952, hier S. 914–916.

⁴⁸⁰ Abb. aus ebd., S. 916

⁴⁸¹ Schlaich/Hückler/Lösch 2021 (wie Anm. 479), S. 917.

Leichtzuschlag:

Anstelle von Schotter oder Kies werden bei der Produktion dieses Betons Blähton oder der Recyclingstoff Blähglas eingesetzt, so dass ein geringes Gewicht und eine hohe Porosität mit einem hohen Luftanteil erreicht werden. Eine Einbindung von Aerogel wurde nur in den ersten Anfängen im Jahr 2010 erprobt, jedoch nicht weiterverfolgt.

Wasser:

Die Wahl des Zements hat Auswirkungen auf den Hydrationsprozess und die dabei freiwerdende Reaktionsenergie (in [J/g]). Für Leichtbetone gilt, dass durch die geringe Wärmeleitfähigkeit die Hydrationswärme schlechter abgeleitet werden kann, was insbesondere bei einer hohen Abbindegeschwindigkeit eine Rissbildung begünstigt. Um die Anforderungen an das GEG einzuhalten, hat Infraleichtbeton einen relativ großen Wandquerschnitt und somit ein großes Volumen, das abbinden muss. Daher ist die Wahl eines Zements mit geringer Wärmeentwicklung relevant. „Ein Portlandzement (CEM I) entwickelt eine Hydrationswärme von bis zu 525 J/g, wohingegen ein Hochofenzement mit besonders geringer Wärmeentwicklung (CEM III/ A – LH/ NA) nur 235 J/ g erreicht.“⁴⁸²

4.2.2 Fertigungstechnologie

Die ILC-Technologie basiert bisher auf einem klassischen Betoniervorgang, bei dem ein Zwangsmischer mit Schaufel zum Einsatz kommt. Bei der Verarbeitung sind aufgrund der spezifischen Materialmatrix gesonderte Parameter zu beachten. Der Beton wird in Kübeln eingebracht, wobei zu beachten ist, dass der Abstand zur Einbaustelle nicht größer als 1,5 Meter sein darf, um Rückstände an der Oberfläche zu vermeiden. Der Beton wird nicht gepumpt, da dies den Effekt begünstigt, dass Wasser von den Leichtzuschlägen (Blähglas) aufgenommen wird, was negative Auswirkungen auf die Konsistenz und Festigkeit hat.⁴⁸³ „Weder bei Blähton- noch bei Blähglasmischungen empfiehlt es sich nach heutigem Kenntnisstand ILC zu pumpen [...]. Zudem sollten unter Verwendung eines Zwangsmischers die Schaufeln mit einer Kunststoffauskleidung versehen werden, um eine Zerkleinerung der LWA zu vermeiden. Andernfalls erhöht sich mit zunehmender Mischdauer der Feinkornanteil, was die Betoneigenschaften negativ beeinflusst.“⁴⁸⁴ Da die Verwendung von Innenrüttlern das Entmischen bewirkt, wird das Verdichten mit Außenrüttlern oder Stochern empfohlen. Die Verarbeitungszeit bei Vor-Ort Betonagen wird mit 90 Minuten und die Ausschalzeit nach 2-3/1-2 Tagen angegeben.

Die ILC-Technologie ermöglicht durch das klassische Verfahren, auch komplexere Schalungsgeometrien zu nutzen, die zum Beispiel beim Co-Extrusionsprozess der Aeroleichtbeton-Technologie nicht möglich sind. Die Technologie ist bisher nur auf

⁴⁸² Ebd., S. 913.

⁴⁸³ Vgl. ebd., S. 916.

⁴⁸⁴ Ebd., S. 914.

eine Vorfertigung abgestimmt, jedoch noch nicht optimal auf eine Automatisierung der Fertigung ausgerichtet.

4.2.3 Konstruktion

Der Infraleichtbeton verfolgt neben der Entwicklung eines homogenes Wandquerschnitts das Prinzip der Schichtung innerhalb des Wandquerschnitts durch zwei verschiedene Mischungen, auch als inhomogener Wandquerschnitt bezeichnet.⁴⁸⁵ Neben der Dämmfunktion werden dabei zudem eine aktive Dämmung und Kühlung (durch integrierte Kapillarrohrmatten) sowie photokatalytische Deckschichten zum Abbau von Luftschadstoffen angedacht. Diese aktiven Bestandteile sind nicht weiter Gegenstand der Betrachtung. Primär wird der in **Abbildung 53** dargestellte geschichtete Wandaufbau als MultiLC Wand bezeichnet, von 10 cm äußerer Schale, 25 cm innerer Kern und nochmals einer 10 cm äußeren Schale, innerhalb des Vergleichs der drei Betontechnologien herangezogen. „Die speziell entwickelten Rezepturen für Schalen- und Kernbeton ILC12 – D0,80_{shell} und ILC2 – D0,45_{core} weisen Wärmeleitfähigkeiten von 0,163 W/(m·K) und 0,085 W/(m·K) (Messwerte $\lambda_{20^\circ, tr}$) bzw. 0,175 W/(m·K) und 0,098 W/(m·K) (Messwerte, $\lambda_{23^\circ, 80\%}$) auf. Hieraus ergibt sich für eine insgesamt 45 cm dicke MultiLC-Wand ein U-Wert von 0,23 W/(m²·K) bzw. 0,26 W/(m²·K).“⁴⁸⁶ Der Lastabtrag erfolgt vorrangig über die Außenschalen, die kraftübertragend ausgebildet sind und die Wärmedämmung über den leichten Kern.

<p>Bewehrung</p> <p>Als Bewehrung kommt eine konventionelle Stahl-Bewehrung mit einer Überdeckung von 3,5 cm zum Einsatz. Es ist zu berücksichtigen, dass die Bewehrung negative Auswirkungen auf das Recycling und auf den Grad der Automation beziehungsweise die Produktionsgeschwindigkeit hat. Alternative Bewehrungstechnologien wie GFK-Bewehrungen und Carbon- oder Basaltbewehrungen wurden erprobt, da diese korrosionsbeständig sind.⁴⁸⁷ Vollständig unbewehrte Bauteile waren bisher nicht Gegenstand der Forschungen.⁴⁸⁸</p>
<p>Schalungstechnologie</p> <p>In Relation zur gewünschten Oberflächenqualität wurde detailliert das geeignete Schalmaterial untersucht. Dabei kamen unterschiedliche Materialien beispielsweise eine Birkenperrholzplatte mit einer Spezialbeschichtung zum Einsatz. Somit kann die Oberfläche von lunkerfrei und porenarm, aber auch leicht rau bis glatt mit gleichmäßigem Porenbild eingestellt werden.⁴⁸⁹</p>

⁴⁸⁵ Technische Universität Berlin u. a. 2019 (wie Anm. 478).

⁴⁸⁶ Schlaich/Hückler/Lösch 2021 (wie Anm. 479), S. 918.

⁴⁸⁷ Lösch/Rieseberg 2018 (wie Anm. 474), S. 121.

⁴⁸⁸ Alexander Hückler, *Forschungsaustausch Infraleichtbeton*, unter Mitw. von Kirsten Elisabeth Hollmann-Schröter 2024, 8. April 2024.

⁴⁸⁹ Vgl. Lösch/Rieseberg 2018 (wie Anm. 474), S. 146.

Wie auch bei den anderen beiden untersuchten Betontechnologien, wird durch den dämmenden, einschichtigen Materialquerschnitt die konstruktive Ausbildung vereinfacht und eine Fehleranfälligkeit verringert. Zusätzlich ist es bei der Realisierung großformatiger Bauteile forschungsleitend, den Fugenteil und damit auch die Wärmebrücken zu reduzieren und zudem Aufwand, Kosten und Wartung zu minimieren (Abb. 54-56).⁴⁹⁰ Dabei wurden klassische konstruktive Verbindungen mit Mörtelfuge sowie Schraubverbindungen mit BT-Spannschloss erprobt. Mendgen sieht darüber hinaus die Vorteile der geometrischen Verzahnung und stellt die Applikation von Verbindungstechniken aus dem Ingenieurbau in Aussicht. Sie führt beispielsweise das Nut-Feder-Prinzip mit Neoprendichtungsband in Anlehnung an den Tunnelbau an.⁴⁹¹ Im Rahmen der Forschung konnte geschlussfolgert werden, dass im Bereich der Fügung eine Bauteilstärke von 10 cm nicht unterschritten werden sollte, um ein Brechen der Kanten zu vermeiden.⁴⁹² Mendgen schlussfolgert: „Es macht Sinn, Fertigteile aus ILC möglichst ohne Verbindungsmittel zu planen, da ILC nicht ausreichend Zugkraft aufnehmen kann. Standardverbindungselemente für Fertigteile aus Normalbeton lassen sich nicht auf den Werkstoff ILC übertragen.“⁴⁹³ Im Folgenden wird ein Auszug der baukonstruktiven Leitdetails abgebildet, die sich primär auf Ortbetonkonstruktionen beziehen, jedoch auch in Teilen auf vorgefertigte Systeme übertragbar sind:

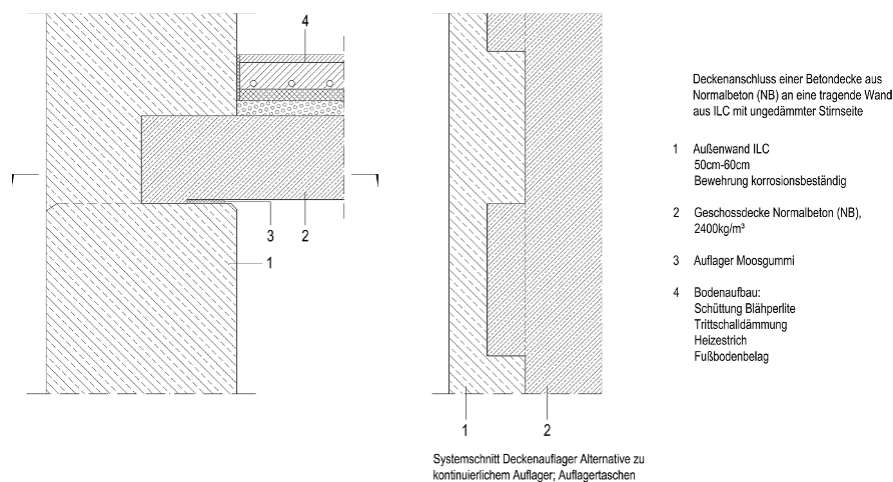


Abb. 54: Deckenanschluss einer Betondecke aus Normalbeton (NB) an eine tragende Wand aus Infraleichtbeton (ILC) mit ungedämmter Stirnseite © ILC⁴⁹⁴

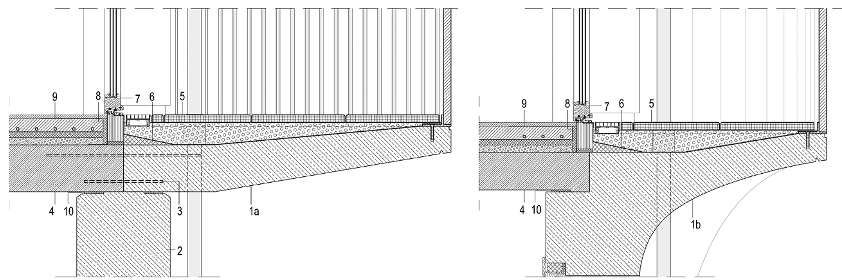
⁴⁹⁰ Vgl. Anna Mendgen, »Entwicklung von Prototypen für Balkone und Loggien aus Infraleichtbeton (ILC) unter Berücksichtigung bauphysikalischer Aspekte und der Anforderungen aus der Fertigung«, in: *Bautechnik*, 100 (2023), Nr. 5, S. 239–249, hier S. 241.

⁴⁹¹ Vgl. ebd., S. 245.

⁴⁹² Vgl. Hückler 2024 (wie Anm. 488).

⁴⁹³ Mendgen 2023 (wie Anm. 490), S. 244.

⁴⁹⁴ Die baukonstruktiven Leitdetails der Abbildungen 54-56 sind in der Monografie *Infraleichtbeton* veröffentlicht (Lösch/Rieseberg 2018 (wie Anm. 474), S. 55–88.



Auskragende Balkonplatte (ILC-Fertigteil) auf einer Außenwand aus Infraleichtbeton, mit Rückverankerung in der Deckenplatte

Auskragende Balkonplatte als Teil einer Außenwand aus Infraleichtbeton, ohne Rückverankerung in der Deckenplatte

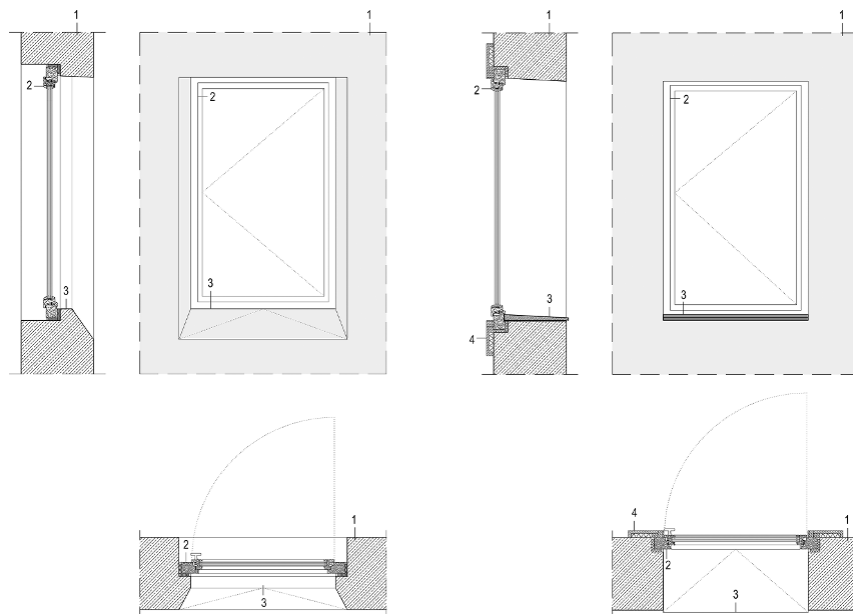
1a Balkonplatte ILC11-D0,80, Dicke: 14cm - 25cm, Bewehrung korrosionsbeständig

1b Balkonbauteil ILC11-D0,80, Bewehrung korrosionsbeständig

- 2 Außenwand ILC, 50cm - 60cm, Bewehrung korrosionsbeständig
- 3 durchgeführte Bewehrung, korrosionsbeständig
- 4 Geschossdecke aus Normalbeton (NB), 2400kg/m³, Bewehrung Betonstahl
- 5 Terrassenaufbau: Abdichtung, Flüssigkunststoff, Kiesbett, Betonstein
- 6 Dämmkell

- 7 Fenster: Holzfenster mit Dreischeibenvergl.
- 8 Randdämmstreifen
- 9 Bodenaufbau Innenraum: Schüttung Bläherlite, Trittschalldämmung, Heizestrich, Fußbodenbelag
- 10 Auflager Moosgummi

Abb. 55: ILC-Balkonplatte mit Rückverankerung in der Deckenplatte links und ohne Rückverankerung rechts © ILC



Fensterposition mittig, mit Fensteranschlag, geneigter Betonfläche und zusätzlichem Fensterblech

Fensterposition innen, mit Fensteranschlag und Formsteinelement

- 1 Außenwand ILC, 50cm - 60cm, Bewehrung korrosionsbeständig
- 2 Fenster: Holzfenster mit Dreischeibenverglasung
- 3 Fensterverblechung mit Neigung im Bereich des horizontalen Fensteranschlags; Fensterbank außen aus hydrophobiertem Sichtbeton

- 1 Außenwand ILC, 50cm-60cm, Bewehrung korrosionsbeständig
- 2 Fenster: Holzfenster mit Dreischeibenverglasung
- 3 Sohlbankelement: Element aus WU - Faserzement
- 4 Fensterrahmen innen: Holz mit Leibungdämmungsplatte 30mm, WLG 0,020, vollflächig verklebt

Abb. 56: ILC-Fensterdetails mit Fensterposition mittig und Fensterposition innen © ILC

4.2.4 Digitales Gestalten

Der Forschungsansatz fußt darauf, die Varianz durch die neuen konstruktiven Möglichkeiten zu verbessern. Dies geschieht nicht nur mit Blick auf die Gestaltung der Bauteile, sondern darüber hinaus in der Gestaltung der Räume und deren Funktionen, die daran angrenzen. Hierbei wird eine neue Art des Entwerfens, nämlich das „bottom-up“ Prinzip verfolgt. „Bei dem hier vorgestellten Forschungsprojekt wurde der Entwurfsprozess umgekehrt. Basierend auf der Idee, dass ein Produkt benötigt wird, bei dem nicht Einschränkung die Gestaltung bestimmt, sondern durch Flexibilität und Modularität individuelle Gestaltung erst ermöglicht wird, wurden verschiedene Elemente entwickelt [...]“⁴⁹⁵ Infralichtbeton vereint dämmende sowie tragende Funktionen innerhalb einer Bauteilschicht. Dies Prinzip wurde genutzt, indem die Geometrie der Fassadenelemente an den Lastenverlauf angepasst wurde (Abb. 57). Das digitale Gestalten wird etabliert, indem das Material, aber auch die Geometrien (der Öffnungen und der Stege) entsprechend der tragkonstruktiven Anforderungen angepasst werden.⁴⁹⁶ Über die verschiedenen Geschosse kam ILC mit unterschiedlichen ILC-Rohdichten von unten nach oben zum Einsatz (ILC 800, 700, 600). Dadurch wurde die Konstruktion in den oberen Geschossen leichter, was reduzierte Lasten sowie einen reduzierten Materialeinsatz bedingt. Dies spiegelt eine Umsetzung des Prinzips der Individualisierten Standardisierung wieder, indem nicht nur ein Bauteil projektspezifisch auf die Anforderungen abgestimmt wird und zum Einsatz kommt, sondern unterschiedliche vorgefertigte Komponenten angepasst an die spezifischen Lasten pro Geschoss kombiniert werden.

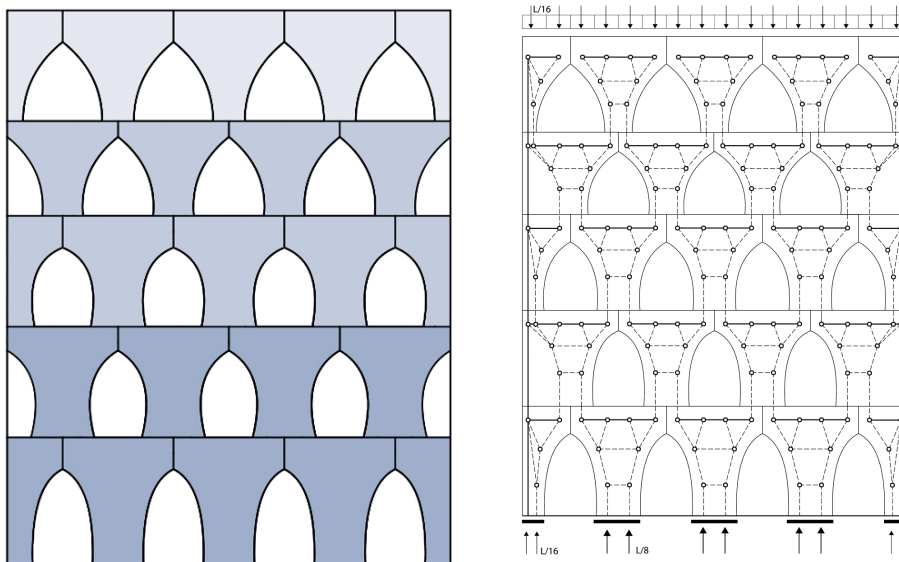


Abb. 57: Staffellung der ILC-Rohdichten nach Geschossigkeit, Stabwerksmodell zur Verdeutlichung des Lastabtrags © ILC⁴⁹⁷

⁴⁹⁵ Mendgen 2022 (wie Anm. 477), S. 442.

⁴⁹⁶ Vgl. ebd., S. 444.

⁴⁹⁷ Die Prinzip Zeichnungen der Abbildungen 56-58 sind in der Monografie *Bauen mit großformatigen Elementen* veröffentlicht.

Als weitere konstruktive Lösung wurden U-Bauteile untersucht (Abb.58). Hierbei wurden die Vorteile des dämmenden Materials genutzt um Vor- und Rücksprünge zu ermöglichen. So können Balkone und Überstände entstehen, ohne Wärmebrücken zu erzeugen. Der Entwurf lässt eine Staffelung und eine Addition zu und generiert damit ein hohes Maß an gestalterischer Varianz. Der Entwurf geht so weit, dass mit einem U-Element ein Entwurf für ein Punkthaus konzipiert wurde. Die Gestaltung greift dabei auf konventionelle Deckenbauteile sowie Glasfassaden zurück.

Kritisch ist anzumerken, dass die homogenen Bauteile so ausgelegt sind, dass sie durchgängig mit einer Wandstärke und aus einem Material konzipiert sind. Dies impliziert eine gewisse Überdimensionierung und damit einen erhöhten Materialeinsatz, da das Bauteil auf den ungünstigsten Lastfall ebenso wie den schlechtesten U-Wert ausgelegt ist. An dieser Stelle besteht weiterer Forschungsbedarf in Richtung einer differenzierteren Auslegung der Bauteile.

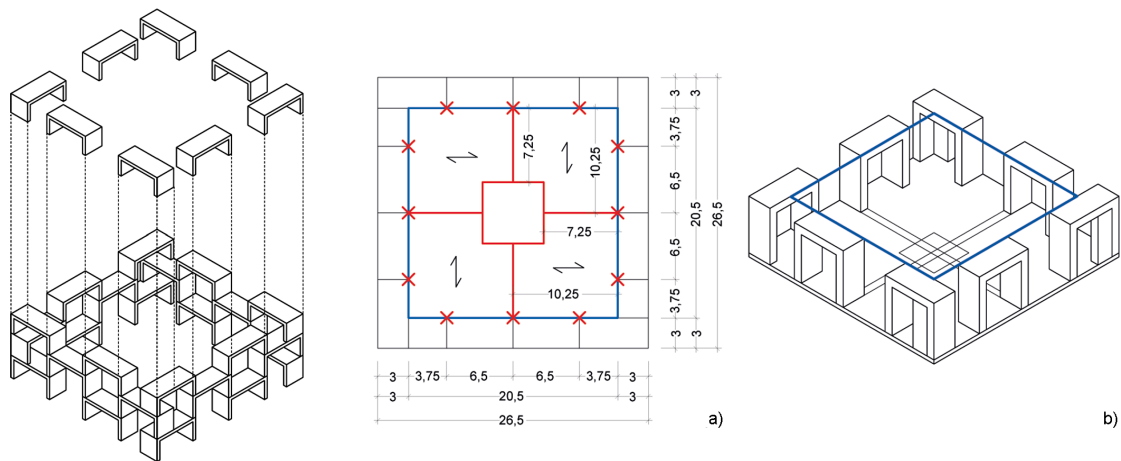


Abb. 58: Punkthaus mit tragender Fassade aus U-Elementen aus ILC © ILC

Ein dritter Ansatz bietet eine komplette Raumzelle aus ILC an, die in Anlehnung an das Prinzip „Habitat 67“ von Architekt Safdie entwickelt wurde. Die Module werden zueinander gedreht und gestapelt und dann ineinander verzahnt. Die Dimensionen und das Gewicht von ungefähr 80 Tonnen entsprechen massiven Raummodulen aus Beton von 10 Zentimetern Stärke. Eine Zerlegung der Raumzellen in einzelne Bauteile wurde angedacht, jedoch wegen der Auswirkungen auf das Ausbaumaß beziehungsweise das Maß der Vorfertigung der Raumzellen nicht weiterverfolgt.

Zwar entfallen aufwendige Konstruktionsdetails und es kann wärmebrückenfrei konstruiert werden. Es zeigt sich jedoch ein äußerst hohes Gewicht und ein erheblicher Materialeinsatz. Es ist anwendungsspezifisch zu prüfen, ob der Ressourceneinsatz optimal zu seiner Leistungsfähigkeit ausgelegt ist. Bei einer Anwendung für reine Außenbauteile ist das Material optimal auf die Anforderungen abgestimmt. Dies zeigt sich im Bereich der Außenwände, Dachkonstruktionen, aber auch bei Auskragungen. Bei einer Addition der Module jedoch bilden die Außenwandkonstruktionen häufig Innenbauteile ab. Dies entspricht nicht den innerhalb der Dissertation vorgestellten Aspekten funktionsoptimierter Bauteile. Die entsprechend den Bauteilanforderungen vorgeschlagene Anpassung der Rohdichte

oder der Materialstärke, die bei den T-Bauteilen vorgenommen wird, könnte auch bei den Raumzellen zielführend sein. Diese Differenzierung würde dann nicht in Abhängigkeit der Geschosse erfolgen, sondern zwischen Innen- und Außenbauteilen unterscheiden. Alternativ könnte eine Kombination aus ILC für fassadenberührende Bauteile und konventionellen Bauteilen im Innern eine ökologisch wie ökonomisch sinnvolle Lösung abbilden. Der Vergleich von drei Fassadentypen „französischer Balkon/T-Element“, „Balkon/T-Element mit Auskrugung“ und „Loggia/U-Element“ (Abb. 59) liefert erste Aussagen zum Verhältnis von Konstruktion, Wirtschaftlichkeit und Funktionalität bei gleichzeitiger Umsetzung eines Gestaltungsanspruchs.⁴⁹⁸

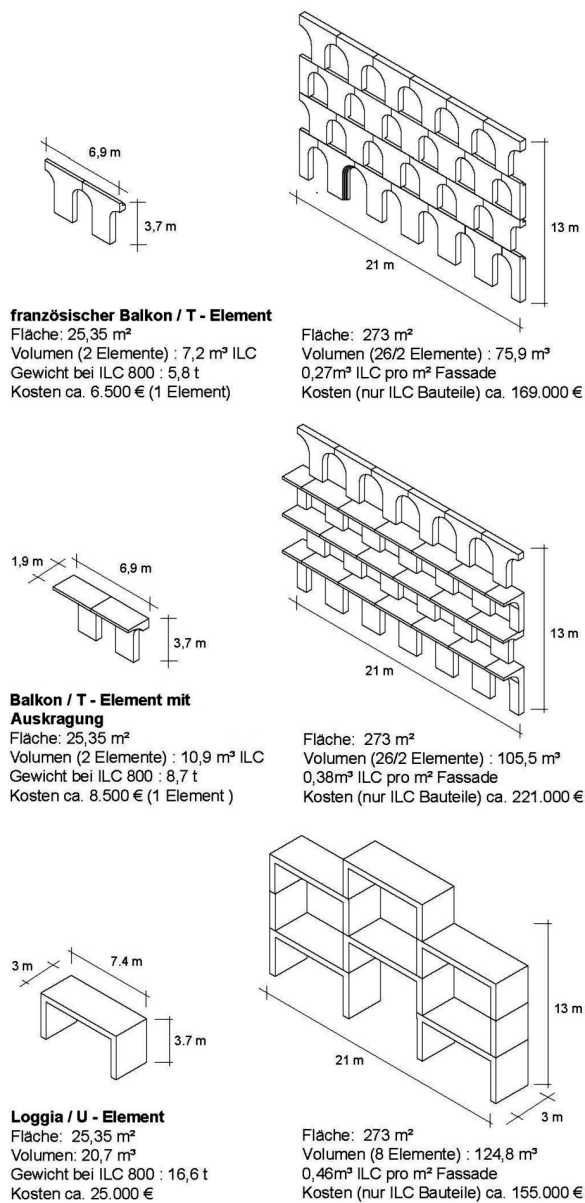


Abb. 59: Vergleich dreier ILC Bauteile (Volumen und Kosten)

© GBJ Geithner Betonmanufaktur Joachimsthal GmbH, ILC⁴⁹⁹

⁴⁹⁸ Vgl. Mendgen 2023 (wie Anm. 490), S. 246.

⁴⁹⁹ Abbildung 14 aus ebd., Originalquelle in: Lösch, C. u a. (2023) Abschlussbericht DBU Forschungsprojekt – ILVO – Vorfabrikation von Fertigteilen aus Infralichtbeton (in Vorb.).

4.2.5 Abgleich der Infraleichtbeton-Technologie anhand des kriteriengeleiteten Prüfrasters

Der folgende Abgleich mit den zwölf aufgestellten Kriterien der Nachhaltigkeitsbewertung von Betonbauteilen verdeutlicht, dass diese allesamt adressiert werden können. Zwei Kriterien davon erfordern weiteren Forschungsbedarf und zwei Kriterien davon werden nur angedacht.

Auf der Grundlage der eigenen wissenschaftlichen Arbeit im Rahmen der Dissertation und der Veröffentlichungen Dritter wie beispielsweise zur Ökobilanzierungen kann festgestellt werden, dass Infraleichtbeton wettbewerbsfähig zu konventionellen Wandkonstruktionen ist.⁵⁰⁰ Ein wichtiger Faktor ist dabei die Lebensdauer (→4.1.2.1 Nutzungsdauer). Im Betonkalender 2021 wird referenziert, dass sich Infraleichtbeton über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren vergleichbar mit konventionellen Bauweisen wie Porenbeton oder Kalksandstein mit Dämmschicht darstellt. Bei einer Verlängerung des Betrachtungszeitraums auf 100 Jahre werden darüber hinaus deutliche Vorteile erkennbar.⁵⁰¹

„Eine exemplarische Bilanzierung des GWPs⁵⁰² von verschiedenen Außenwandkonstruktionen eines achtgeschossigen Referenzgebäudes zeigte, dass eine inhomogene Infraleichtbetonwand [...] bei einem Betrachtungszeitraum von 50 Jahren in vergleichbaren Größenordnungen liegt wie konventionelle Bauweisen. Bei einem Betrachtungszeitraum von 100 Jahren liegt sie günstiger [...], insbesondere aufgrund des nicht notwendigen Austauschs von Dämmsystemen.“⁵⁰³

Der massive Bauteilquerschnitt und damit die Menge an benötigten Ressourcen sticht trotz des leichten Materialgewichts hervor (→4.1.2.2 Reduktion von Masse) und könnte teils optimiert werden beziehungsweise gezielter zum Einsatz kommen. Da sowohl bei der Rohdichte (→4.1.2.3 Reduktion Zementanteil) als auch bei der Druckfestigkeit (→4.1.2.5 Einfluss der Druckfestigkeit) die Technologie vergleichsweise im Mittelfeld liegt, könnten hier weitere Ansätze gefunden werden, um zusätzlich Ressourcen zu schonen. Diese Forderung adressieren die Forschenden durch eine Weiterentwicklung des ILC in Form eines inhomogenen Bauteilquerschnitts (MultiILC), um gezielt höhere Spannungen aufnehmen zu können.⁵⁰⁴ Positiv hervorzuheben ist, dass bereits der klimaeffiziente CEM III zum Einsatz kommt (→4.1.2.4 Substitution Zement).

Ein weiteres Potenzial wird im Upcycling von Abfallstoffen gesehen, indem RC-Anteile wieder als Ressourcen in die Erstellung neuer Betonbauteile einfließen.⁵⁰⁵ Darüber hinaus kann der Infraleichtbeton selbst aufgrund seiner Monomaterialität in einer zweiten Lebensphase als „leicht recycelte Gesteinskörnung in hochwertigen Stoffen“ eingesetzt werden (→4.1.2.6 Recyclinganteil).⁵⁰⁶ Zudem reduziert die

⁵⁰⁰ Mendgen/Schlaich 2021 (wie Anm. 408), S. 337–339.

⁵⁰¹ Schlaich/Hückler/Lösch 2021 (wie Anm. 479), S. 923.

⁵⁰² Die Abkürzung GWP, Global Warming Potential entspricht der deutschen Übersetzung Treibhauspotenzial.

⁵⁰³ Schlaich/Hückler/Lösch 2021 (wie Anm. 479), S. 923.

⁵⁰⁴ Vgl. Mendgen 2023 (wie Anm. 490), S. 244.

⁵⁰⁵ Vgl. Mendgen/Schlaich 2021 (wie Anm. 408), S. 340.

⁵⁰⁶ Ebd., S. 336.

Wiederverwendung ganzer ILC-Komponenten die Abfallmenge zu nahezu 100 Prozent. (→4.1.2.9 Abfallreduktion). Der Faktor Emissionen durch Transport wird in dem Sinne begünstigt, dass die Technologie bereits von Betonherstellern angeboten wird und sich mit der Zulassung der DAfStb-Richtlinie die lokale Verfügbarkeit erhöhen wird (→4.1.2.10 Transport und Regionalität).

Die Wiederverwendung ganzer modular erstellter Bauteile wird von Mendgen in Aussicht gestellt,⁵⁰⁷ allerdings besteht hier weiterer Forschungsbedarf (→4.1.2.7 Wiederverwendung von vorgefertigten Komponenten). Die Forschung zum ILC legt konstruktiv drei Ansätze zur Vorfertigung vor, die den Ausblick geben, dass diese Materialtechnologie einen Beitrag zum vorgefertigten, seriellen Bauen mit großformatigen Elementen für den Gebäudesektor geben kann (→4.1.2.11 Vorfertigung und Produktivität).⁵⁰⁸ Dabei ergeben sich unterschiedliche Potenziale bei den verschiedenen Bauteilgrößen und Funktionen. Die Abstimmung des T-Elementes an den Lastenverlauf und damit die Anpassung der Geometrie sowie der Materialzusammensetzung zeigt in besonderem Maße eine Anwendung des Prinzips der Individualisierten Standardisierung (→4.1.2.2 Reduktion von Masse). Auch die Kombination der U-Elemente mit spezifischen, auf dem Markt bereits verfügbaren, vorgefertigten Bauteilen zeigt einen gewinnbringenden Ansatz. Die U-Elemente werden auseinandergezogen und beispielsweise durch Glasbauteile ergänzt. Dadurch kommt jedes Bauteil entsprechend seiner Leistungsfähigkeit zum Einsatz. Dieses Prinzip verliert bei der dritten Lösung seine Stärke. Bei dem Versuch ein komplettes Raummodul mit ILC zu realisieren, wird zwar eine konstruktiv funktionierende Lösung vorgelegt. Ein Gleichgewicht aus Leistungsfähigkeit und Materialeinsatz wird jedoch noch nicht ausreichend erreicht. Die Forschung könnte durch eine angepasste und überdies differenzierte Vorfertigung optimiert werden. Die ILC-Technologie bietet dafür bereits verschiedene Materialtypen mit unterschiedlichen Festigkeiten und U-Werten an. Im Anwendungsfall Raummodul wäre eine bereits im Forschungsbericht angedachte Zerlegung in verschiedene, vorgefertigte Bauteile mit angepassten Qualitäten zielführend. So könnte zum einen das Gewicht reduziert und zum anderen die Nachhaltigkeit verbessert werden. Die aktuell durch die DBU geförderte Forschung mit dem Titel „Prototyp einer neuartigen, modularen und nachhaltigen Schnellbauschule“⁵⁰⁹ vertieft die Leistung der Kombination verschiedener Fertigteile aus ILC.⁵¹⁰

Die modulare Entwicklung ist abgebildet, es werden reversible Füge-Techniken im Sinne einer Kreislaufwirtschaft in den Anfängen erforscht (→4.1.2.8 Rückbaubarkeit und reversible Füge-Technik) und Anstrengungen zur Wiederverwendung von Komponenten getätigt (→4.1.2.7 Wiederverwendung von vorgefertigten Komponenten). Die Vorfertigungstechnologie und mit ihr die Produktivität sind entsprechend weiterzuentwickeln (→4.1.2.12 Zeit und Prozess). Es ist zu erwarten, dass in Abhängigkeit vom Verfahren die Betonmatrix angepasst

⁵⁰⁷ Vgl. Mendgen 2023 (wie Anm. 490), S. 246.

⁵⁰⁸ Vgl. ebd., S. 247.

⁵⁰⁹ Projektnummer Projekt 37068/01; Förderzeitraum 27.09.2022 - 27.09.2027.

⁵¹⁰ Vgl. Hückler 2024 (wie Anm. 488).

werden muss und sich darüber hinaus Herausforderungen auf Materialebene ergeben werden, die infolgedessen eine Anpassung der Anlagentechnik einfordern.

4.2.6 Résumé: Infraleichtbeton

Für die Betontechnologie Infraleichtbeton können die drei Leitfaktoren wie folgt vor dem Hintergrund einer Individualisierten Standardisierung zusammengeführt werden:

Die Forschung zum Infraleichtbeton wurde aus dem Leitfaktor **Konstruktion** heraus entwickelt. So waren die konstruktiven Details zum wärmebrückenminimierten Anschluss forschungsleitend. Die Materialentwicklung ist durch die Bereitstellung verschiedener Betonrezepturen mit unterschiedlicher Rohdichte weit entwickelt und erlaubt einen projektspezifischen Materialeinsatz. Eine Individualisierte Standardisierung beim Infraleichtbeton kann demnach durch Kombination verschiedener Komponenten mit unterschiedlichen ILC-Rohdichten erreicht werden.

Darüber hinaus zeigt sich der Leitfaktor **Gestaltung** in der Geometrie der ILC-Bauteile, die eine Standardisierung und zugleich Individualisierung erlauben. Durch die Studien zur Modularisierung wird ein hoher/anspruchsvoller Gestaltungsansatz in Abhängigkeit der konstruktiven Anforderungen konzipiert. In diesem Zusammenhang wurde das „bottom-up“ Entwurfsprinzip erläutert. Dabei wird mithilfe digitaler Planungswerkzeuge der Lastenverlauf, die Materialeigenschaften sowie die Gestaltung in Einklang gebracht.

Der Leitfaktor **Technik** mit Umsetzung einer automatisierten Fertigung ist am wenigsten präsent. Die Vorfertigung von Komponenten in Form von Prototypen befindet sich in der Erprobung und könnte in einem nächsten Schritt in Richtung einer automatisierten Fertigung weiterverfolgt werden.

4.3 Betontechnologie: Gradientenbeton

Die Forschung zum Gradientenbeton^{®511} wird bereits seit dem Jahr 2006 am Institut für Leichtbau, Entwerfen und Konstruieren an der Universität Stuttgart erforscht, initiiert unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek und weitergeführt unter Prof. Dr.-Ing. M. Arch. Lucio Blandini. Das Forschungsfeld variiert in der Technologie der Gradierung und unterscheidet in Mikrogradierung (1 – 10 mm) (Abb. 60) und Mesogradierung (10 – 250 mm). Diese Bezeichnung definiert den Maßstab eingebrachter Hohlkörper. Des Weiteren wird die Technologie auf funktioneller Ebene für Schalen- und Raumtragwerke entwickelt, aber auch für Bauteile wie Träger, Decken und Wände erforscht. Unter der Gradierung von Betonbauteilen wird eine „kontinuierliche Änderung der Porosität der Betonmatrix innerhalb des Bauteils“ verstanden (Abb. 61).⁵¹² Dadurch werden die Materialeigenschaften an die spezifische Beanspruchung, den Lastenverlauf im Bauteil und eine definierte Dämmwirkung angepasst. Damit beschreibt es „eine Werkstofftechnologie, bei der gezielt Kavitäten im Inneren der Betonbauteile platziert werden“, was in einer optimierten Materialeffizienz und damit verbesserten Nachhaltigkeit resultiert.⁵¹³ Durch das Prinzip der Gradierung erfolgt eine Individualisierung der Materialität über den Bauteilquerschnitt, in der Forschungsleistung als „multifunktional gradierte Bauteile“ bezeichnet. „Die Gradientenbetontechnologie verspricht, rein mineralische Außenwandbauteile zu realisieren, die alle Anforderungen an Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit, Dauerhaftigkeit und Wärmeschutz erfüllen und dies mit geringeren Wandstärken als bei vergleichbaren leistungsfähigen wärmedämmenden Wandsystemen aus Beton. Die Vorteile liegen in der guten Rezyklierbarkeit, der Massen- und CO₂-Reduktion, dem Gewinn an Nutzfläche und in der Energieeinsparung in allen Phasen des Produktlebenszyklus.“⁵¹⁴

Die Inhalte zum Forschungsprojekt „Entwicklung einer ökologischen und ökonomischen Bauweise durch den Einsatz vorgefertigter multifunktionaler Wandbauteile aus gradiertem Beton“ bilden bei der Synopse die Betrachtungsgrundlage.⁵¹⁵

⁵¹¹ Der Begriff Gradientenbeton[®] ist markenrechtlich geschützt. In der weiteren Textausführung wird auf das Lizenzsymbol verzichtet.

⁵¹² Schmeer u. a. 2020 (wie Anm. 381), S. 10.

⁵¹³ Vgl. ebd., S. 13.

⁵¹⁴ Ebd., S. 12.

⁵¹⁵ Vgl. ebd.



Abb. 60: Geschichteter Porositätsgradient⁵¹⁶ © Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK), Universität Stuttgart

Dichte, E-Modul, Druckfestigkeit



Zuschlag		Leichtzuschlag
Zement		Zement
Wasser		Wasser
Zusatzstoffe		Zusatzstoffe
Zusatzmittel		Porosierungsmittel (Zusatzmittel)
Mischung I	Übergangsbereich →	Mischung II



Luftporengehalt, 1 / Wärmeleitfähigkeit

Abb. 61: Eigenschaftsänderungen der Betongemische durch Dichteanpassung⁵¹⁷ © ILEK

⁵¹⁶ Originalquelle in:
 Pascal Heinz, Michael Herrmann und Werner Sobek, *Herstellungsverfahren und Anwendungsbereiche für funktional gradierte Bauteile im Bauwesen*, Stuttgart 2012 (Forschungsinitiative ZukunftBau F 2811), S. 81.

⁵¹⁷ Originalquelle in:
 Mark Wörner u. a., »Gradientenbetontechnologie: Von der Mischungsentwicklung über den Bauteilentwurf bis zur automatisierten Herstellung«, in: *Beton- und Stahlbetonbau*, 111 (2016), Nr. 12, S. 794–805.

4.3.1 Materialtechnologie

Die Gradierung wurde vor dem Prinzip der Grenzbetrachtung durchgeführt, indem Basismischungen mit unterschiedlichen Eigenschaften für drei Verfahren, das schichtweise Gießen, das Trocken- sowie Nassspritzverfahren entwickelt wurden. Hierbei wurde in zwei Mischungen differenziert, die jeweils verschiedene Anforderungen erfüllen. Während die Betonmatrix MI hochfest ist, ist die andere MII dämmend. Die Zielvorstellung war es, in einem Wandbauteil von 3 Meter Höhe auf 1 Meter Breite einen Wandquerschnitt von kleiner 36,5 Zentimeter mit einem gemittelten Lambda-Wert kleiner 0,07 W/mK zu realisieren, um die Anforderungen an die damals geltende Energieeinsparverordnung EnEV einzuhalten. Schlussendlich wurde das Wandbauteil durch den geschichteten Aufbau mit einer Wandstärke von 26 cm konzipiert werden (Abb. 62).

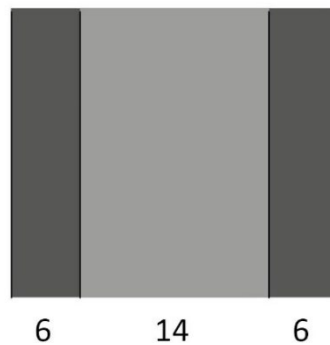


Abb. 62: Schematische Darstellung des geschichteten Bauteilquerschnitts 26 cm. Eigene Darstellung

Verfahren	Nassspritzverfahren		Schichtenweise Gießen	
	Laborproben		Demonstrator	
	MI _{NS} (IWB)-3.1	MII _{NS} (IWB)-4.2	MI _{SG}	MII _{SG} (AM)
Zusammensetzung	Wasser, Fließmittel, 56,0V-% Sand, 44,0V-% Bindemittel	Wasser, Fließmittel, 62,0V-% Sand, 38,0V-% Bindemittel, Porosierungsmittel (Mikrohohlkugeln, Sika-Aer Solid)		
Zement	CEM II	CEM II		
Leichtzuschlag	Blähglas	Blähglas		Aerogel
Rohdichte (ofentrocken)	2.133 kg/m ³ (v. Pumpen) 2.205kg/m ³ (n. Pumpen)	784 kg/m ³ (v. Pumpen) 953kg/m ³ (n. Pumpen)	2080 kg/m ³	210 kg/m ³
Wärmeleitfähigkeit	1,6 W/mK	0,330 W/mK	1,6 W/mK	0,03 W/mK
Druckfestigkeit	69,0 MPa (7d) 90,0 MPa (28d)	19,5 MPa (7d) 26,2 MPa (28d)	57,46 MPa	0,26 MPa

Rahmenbedingungen
Entwicklung von 2 Referenzmischungen MI (tragend) und MII (dämmend) nach dem Prinzip der Grenzbetrachtung. Zielvorgabe: max. Wandquerschnitt 36,5 bei max. U-Wert von 0,21 W/m ² K
Tatsächlich ermittelter Wandquerschnitt 26 cm (6 cm + 14 cm + 6 cm), Abmessungen 3 m hoch, 1 m breit. U-Wert von 1,17 W/m ² K
Erreichte Rohdichte
Im Nassspritzverfahren konnte eine minimale Rohdichte von 900kg/m ³ im ofentrockenen festen Zustand und 1200kg/m ³ im frischen Zustand erreicht werden, daher wurden weiteren Mischungen für das schichtenweise Gießen entwickelt. Die Mischung MII _{SG} (AM) konnte die Anforderungen mit einer Rohdichte von 210 kg/m ³ erfüllen unter der Verwendung von Aerogel.
Wärmeleitfähigkeit
Für die Probekörper, die für das Nassspritzverfahren entwickelt wurden, wurde für das Wandbauteil ein Wärmeleitkoeffizient von Lambda 0,351 W/mK ermittelt und damit die Vorgabe des maximal zulässigen U-Werts < 0,21 W/m ² K von Wandbauteilen nicht eingehalten. Wie beim Infralichtbeton wären Kompensationsmaßnahmen erforderlich. „Im Bereich der Wärmedämmung konnte durch die hohe Wärmeleitfähigkeit der einzelnen Betone leider kein zufriedenstellender U-Wert für das Nassspritzverfahren erreicht werden. Ein gradiertes Bauteil mit einem nass gespritzten Leichtbetonkern würde somit nicht den gültigen energetischen Anforderungen entsprechen. Auch bei anderen untersuchten leichten Betonen [...], die durch das Gießen einbaubar sind, wäre eine Ausführung mit den Abmessungen 6 cm – 14 cm – 6 cm kritisch zu hinterfragen. Die Mischung MIII, IWB(AP) hat zwar eine Wärmeleitfähigkeit von 0,090 W/mK [...], in Kombination mit dem entwickelten Normalbeton MI wäre bei gleichbleibender Stärke der MI-Schichten von 6 cm eine Kernschicht von 40 cm notwendig. Dies würde in einem Wandaufbau von 52 cm resultieren (6+40+6=52).“ ⁵¹⁸ Aus diesem Grund wurde die Materialentwicklung MII _{SG} (AM) nach dem Verfahren des schichtenweisen Gießens weiterentwickelt.
Zementanteil
Durch die Porosierung des Betons, zum einen durch die Verwendung von Leichtzuschlägen und zum anderen durch das Einbringen von Luftporen in die Betonmatrix, kann der Zementanteil CEM II merklich reduziert werden. „Zudem wurde aus ökologischen Gründen der Zementgehalt in den Gemischen reduziert. Um eine gute Förderbarkeit sicherzustellen, wurden alle zementreduzierten Leichtbetonmischungen mit einem hohen Anteil an Flugasche hergestellt. Flugasche hat eine nahezu perfekte runde Kornform und ermöglicht dem erhärtenden Beton infolge der sich einstellenden puzzolanischen Reaktion eine stete zeitliche Zunahme der Festigkeit. Die kugelartige Form und die hohe Feinheit

⁵¹⁸ Schmeer u. a. 2020 (wie Anm. 381), S. 95.

der Flugasche sind zudem vorteilhaft für die Pumpförderung im Hinblick auf das Nassspritzverfahren.“⁵¹⁹

Leichtzuschlag

Während der Forschungstätigkeit wurde die Einbindung verschiedener natürlicher und industriell hergestellter Leichtzuschläge in die Betonrezepturen getestet. Natürliche Leichtzuschläge haben höhere Dichten, bedürfen jedoch keiner weiteren Energiezufuhr. „Erfolgversprechender ist die Verwendung von Blähglas. Bei einem Wasserzementwert von 0,63 und einem volumenspezifischen Einsatz von 85 V-% Blähglas werden Rohdichten zwischen 550 kg/m³ und 750 kg/m³ erreicht [...]. Der Wert der Dichte ist abhängig vom Einsatz und der Wirksamkeit von Luftporenbildnern. Der große Vorteil von Blähglas ist die Oberfläche der einzelnen Partikel. Diese ist durch den Herstellungsprozess geschlossen, wodurch die Wasseraufnahme praktisch ausgeschlossen werden kann. Zudem weist Blähglas die größte Festigkeit im Vergleich zu den anderen vorgestellten Materialien auf. Hierdurch lassen sich Festigkeitswerte von mehr als 8 N/mm² bei einer Dichte von 750 kg/m³ erreichen.“⁵²⁰

Aerogel

Auch die Forschung zum Gradientenbeton erprobte die Einbindung von Aerogel. Aufgrund unterschiedlicher Hemmnisse, wie einer großen Schwindverformung sowie des Effekts der Entmischung, wurde die Einbindung des Aerogels jedoch nicht weiterverfolgt. „Ein ähnliches Bild zeigt sich bei der Verarbeitung von Aerogelen. In den Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass bei der Verwendung von Aerogel in Höhe von 21 M-% bezogen auf die Bindemittelmenge eine Trockenrohichte von ca. 250 kg/m³ erreicht werden kann (MIIL, IWB(A)). Jedoch weist der erhärtete Leichtbeton kaum messbare Festigkeiten auf. Zudem neigt der Leichtbeton zu starker Schwindverformung. Auch hier ist ein Wasserzementwert von mehr als 1 nötig, um eine streichfähige und gefügedichte Struktur zu erhalten. Zudem kommt es zur Entmischung des Aerogelbetons. Um den w/b-Wert zu reduzieren und eine bessere Verarbeitbarkeit zu gewährleisten, müssen mehrere Maßnahmen ergriffen werden. Zum einen wird eine Beimischung eines formbeständigeren Leichtzuschlags wie Perlit oder Blähglas empfohlen. Zum anderen ist auch hier der Einsatz von Luftporenbildner von Vorteil. Zwar sind Luftporen wärmeleittechnisch ungünstiger als Aerogel, der Luftporenbildner erhöht aber die Verarbeitbarkeit des aerogelbasierten Betons. Nichtsdestotrotz ist der Einsatz einer solchen Betonmischung beim Nassspritzen auszuschließen. Aerogel ist ein derart fragiles Leichtkornmaterial, das händisch dem Zementleim untergemischt werden muss. Die Förderung im Pumpschlauch führte aufgrund der hohen Partikelreibung und der daraus resultierenden Zerstörung des Aerogelgranulats am Versuchsstand zu keinem zielführenden Ergebnis für die geprüften Rezepturen.“⁵²¹ Es wurde das Aerogelpulver der Firma Cabot mit einem vergleichsweise groben Korn gewählt. Ein kleineres Korn könnte

⁵¹⁹ Ebd., S. 33.

⁵²⁰ Ebd., S. 34.

⁵²¹ Ebd.

der Zerstörung während des Mischens entgegenwirken. Die Ausführungen zeigen, dass Aerogel im Nassspritzverfahren nicht erfolgreich eingebracht werden konnte. Daher wurde für die Erstellung des Demonstrators im Verfahren des schichtenweisen Gießens mit der Mischung MII_{SG}(AM) weitergearbeitet.

Wasseranteil

Die wasserresistente Oberflächenstruktur des Blähglases hat direkte Auswirkungen auf den erforderlichen Wasseranteil, der während des Anmachprozesses erforderlich ist und damit auf die Druckfestigkeit des Materials. „Im Vergleich zur natürlich gewonnenen und gebrochenen Gesteinskörnung bietet das geblähte Granulat (Blähglas und Blähthon) den Vorteil, dass die Außenhaut prozessbedingt gesintert und somit wasserresistent ist. Dies hat den Vorteil, dass bei der Herstellung von Leichtbeton auf zusätzliches Anmachwasser verzichtet werden kann und nur der wirksame Teil zur Benetzung des Bindemittels und der Leichtkornoberfläche hinzugegeben werden muss. Dadurch muss nur eine geringe Wassermenge bei der Trocknung entweichen und es können höhere Druckfestigkeiten erzielt werden.“⁵²²

⁵²² Ebd., S. 32.

4.3.2 Fertigungstechnologie

Bei der Entwicklung der Fertigungstechnologie wurden zunächst zwei unterschiedliche Verfahren erprobt, zum einen das geschichtete Gießen und zum andern das Sprühverfahren (Abb. 63). Bei letzterem handelt es sich um ein robotisch gestütztes Mehrdüsen-Spritzverfahren, beim dem wiederum ein Trockenspritzverfahren sowie ein Nassspritzverfahren vergleichsweise betrachtet wurden.⁵²³

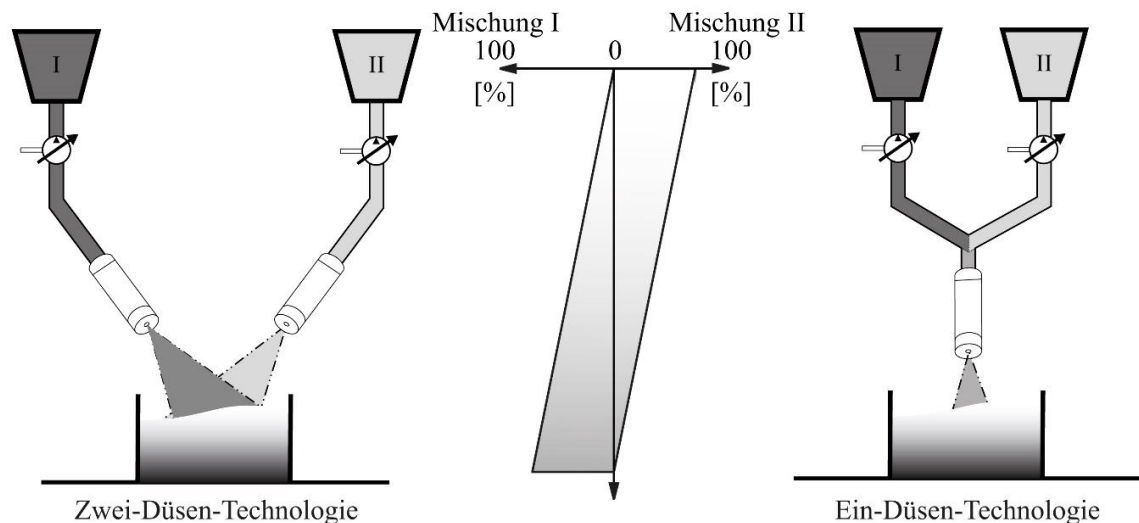


Abb. 63: Gradiertes Sprühen mit der 1- und 2-Düsen-Technologie⁵²⁴ © ILEK

„Beim Trockenspritzverfahren werden zwei Basismischungen MI und MII in je einem Zwangsmischer trocken vorgemischt und den Rotortrockenspritzmaschinen über Fallrohre zugeführt. Der gewünschte Materialstrom wird durch eine Drehzahlregelung der Maschinen und einen definierten Luftvolumenstrom pneumatisch zum Düsenystem gefördert. Vor dem Austritt des Materials an der Düse wird die trockene Ausgangsmischung in Abhängigkeit vom Massestrom und vom w/z-Wert mittels einer Vor- und Hauptbenetzung unter Verwendung eines Flüssigdosiergeräts benetzt. Die Gradierung erfolgt hierbei auf Basis der ‚Zwei-Düsen-Technologie‘. Beim Nassspritzverfahren wird der Frischbeton direkt in den Herstellungsprozess zugeführt, die rheologischen Eigenschaften können in einem vorgelagerten Mischprozess mit hoher Güte eingestellt werden. Über die Regelung der Drehzahl der Schneckenradpumpen wird der Frischbeton im Dichtstrom zu der vorgelagerten Mischeinheit der ‚Ein-Düsen-Technologie‘ gefördert. Zur Manipulation der Betoneigenschaften können den jeweiligen Materialströmen vor der Zusammenführung mittels Hydropumpen Additive zugeführt werden.“⁵²⁵

⁵²³ Die Verfahren wurden innerhalb des SPP 1542 – Leicht Bauen mit Beton „Optimalstrukturen aus funktional gradierten Betonbauteilen“ und „Effiziente automatisierte Herstellung multifunktionaler gradierter Bauteile mit mineralisierten Hohlkörpern“ vorangetrieben.

⁵²⁴Original Bildquelle in:

Wörner u. a. 2016 (wie Anm. 517), S. 17.

⁵²⁵ Schmeer u. a. 2020 (wie Anm. 381), S. 16.

Beide Techniken haben unterschiedlichen Einfluss auf die Betoneigenschaften, im Besonderen die Rohdichte. Während des Forschungsrahmens konnte geschlussfolgert werden, dass während des Trockenspritzverfahrens der hohe Luftdruck den Beton stark verdichtet und somit negativen Einfluss auf die Rohdichte hat und sich somit nicht für die wärmedämmende Mischung MII eignet. Bei der Nassspritztechnologie ergeben sich hier Vorteile. „Mit einer geeigneten Betonrezeptur können die hochfesten Deckschichten der Wandbauteile erstellt werden. In welcher Form eine zerstörungsfreie Applikation der oberen Deckschicht auf eine hochporöse Kernschicht erfolgen kann, bleibt in den Untersuchungen zu ermitteln. In der Verwendung einer Leichtbetonmischung ohne Aerogel oder Schaumstrukturen für die Herstellung der hochporösen Kernzone bzw. der gradierten Übergangszonen wird weiteres Potenzial gesehen.“⁵²⁶ Da der Beton bereits innerhalb 10-15 Minuten erhärtet, können die Schichten innerhalb kurzer Abfolgen appliziert werden. Durch den Einsatz der Maschinenteknologie kann ein sehr hohes Maß der Automation erreicht werden. Es wird darauf hingewiesen, dass die Maschinen sensibel reagieren und einen hohen Reinigungsaufwand mit sich bringen. Dieser muss beim Vergleich der Maschinenteknologien mitberücksichtigt werden.

Das Trockenspritzverfahren wurde aufgrund des hohen Energieaufwandes und der negativen Auswirkungen des erforderlichen Drucks auf die Dichte nicht weiterverfolgt. Auch Aerogel konnte bisher nicht zerstörungsfrei innerhalb beider Spritzverfahrens appliziert werden.

Neben der Materialmischung besteht die Herausforderung in der gezielten Aufbringung (dreidimensionale Orientierung) des Materials. Dazu wurde ein „Mehrachlinearsystem mit drei translatorischen Freiheitsgraden zur Ausführung der Düsenführungsbewegung und einer Parallelkinematik mit sechs Freiheitsgraden zur Umsetzung der Düseneigenbewegung“ entwickelt (Abb. 64).⁵²⁷

⁵²⁶ Ebd., S. 41.

⁵²⁷ Vgl. ebd., S. 17.



Abb. 64: Applikationssystem mit Stewart-Gough-Plattform © ILEK⁵²⁸

Die drei Verfahren werden hinsichtlich der erreichten Eigenschaften (Rohdichte) und des Automatisierungsgrades bewertet. Dabei wird geschlussfolgert, dass sich das Nassspritzverfahren sehr gut zur automatisierten Fertigung eignet. Mit diesem Verfahren können jedoch nur Rohdichten im Bereich von 1500-2200 kg/m³ erzielt werden. Das schichtenweise Gießen dagegen ermöglicht die gewünschten leichten Rohdichten im Bereich von 300-2300 kg/m³, stellt jedoch keinen automatisierten Prozess dar. Die Kernschicht des Demonstrators wurde daher nicht automatisch nach dem Prinzip des schichtenweisen Gießens erstellt. Dies verdeutlicht, wie schwierig es ist, die Materialeigenschaften mit den Ansprüchen an eine automatisierte Fertigung in Einklang zu bringen.

⁵²⁸ Original Bildquelle in:
Wörner u. a. 2016 (wie Anm. 517).

4.3.3 Konstruktion

Der Gradientenbeton verfolgt das Prinzip eines geschichteten Querschnitts. Dabei ist der Wandaufbau wie folgt konzipiert: Auf eine 6 cm starke äußere Schale folgen ein 12 cm innerer Kern und nochmals eine 6 cm äußere Schale. Aufgrund der hohen Druckfestigkeit wirken vorrangig die äußeren Schichten lastabtragend. Dazu wurden erste konstruktive Details während der Forschungsleistung erprobt. Um die Leistungsfähigkeit des Wandquerschnitts zu optimieren, wurde, wie in [Abbildung 65](#) dargestellt, das Prinzip der zwei Außenschalen zu einem T-Querschnitt modifiziert.

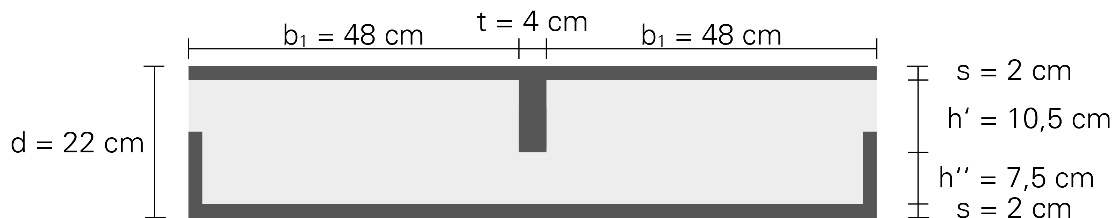


Abb. 65: optimierter Wandquerschnitt © ILEK⁵²⁹

Mit dieser Geometrie verbundene Nachteile bezüglich des Wärmedurchgangs könnten durch eine angepasste Materialmatrix im Stegbereich kompensiert werden. Dieser Forschungsansatz wurde jedoch innerhalb des Forschungsberichts nicht weiter spezifiziert. Grundsätzlich entspricht das Prinzip der funktionsoptimierten Anpassung des Querschnitts über eine unterschiedliche Materialansteuerung der Strategie der Individualisierten Standardisierung.

Bewehrung:

Um die bei Wandbauteilen verhältnismäßig geringen Zugkräfte aufzunehmen, wurde auf eine textile Bewehrung zurückgegriffen. Diese hat den Vorteil, dass sie nicht korrodiert und aufgrund der geringeren erforderlichen Überdeckung ein kleinerer Betonquerschnitt möglich ist. Zudem vermeiden Deckschichtbewehrungen und Schubbewehrungen eine Rissbildung des Materials und stellen einen Verbund der beiden Deckschichten sicher ([Abb. 69](#)). Als Alternative zur Faserbewehrung wurde eine metallische Mikrobewehrung aus Edelstahl erprobt, die bessere Eigenschaften beim Recycling aufweist. Es wurde angestrebt, die Deckschichtbewehrung und vorgeformte Schubbewehrung innerhalb eines automatisierten Verfahrens einzubringen.

Es ist zu beachten, dass die Bewehrung negative Auswirkungen auf das Recycling und auf den Grad der Automation beziehungsweise die Produktionsgeschwindigkeit hat. Zudem ist damit die Vergleichbarkeit der drei Betontechnologien reduziert, da die Thematik der Bewehrung unterschiedlich umgesetzt wird. Die beim Gradientenbeton verwendete Mattenbewehrung setzt funktionale Anforderungen an die Tragfunktion optimal um. Jedoch wird an dieser Stelle das Prinzip des Monomaterials aufgeweicht, was Einfluss auf das Ziel einer

⁵²⁹ Original Bildquelle in Ebd.

sortenreinen Trennung hat. Aus diesen Erkenntnissen heraus könnte die Entwicklung des Gradientenbetons ohne den Einsatz von Bewehrung erforscht werden.

Schalungstechnologie:

Aktuell wird eine konventionelle Betonschalung für die Probekörper verwendet. Eine Kombination mit dem Prinzip der adaptiven Schalung für Fließfertigung, die am ILEK erforscht wird, wäre mit Blick auf eine automatisierte Herstellung von Gradientenbeton zu prüfen.⁵³⁰

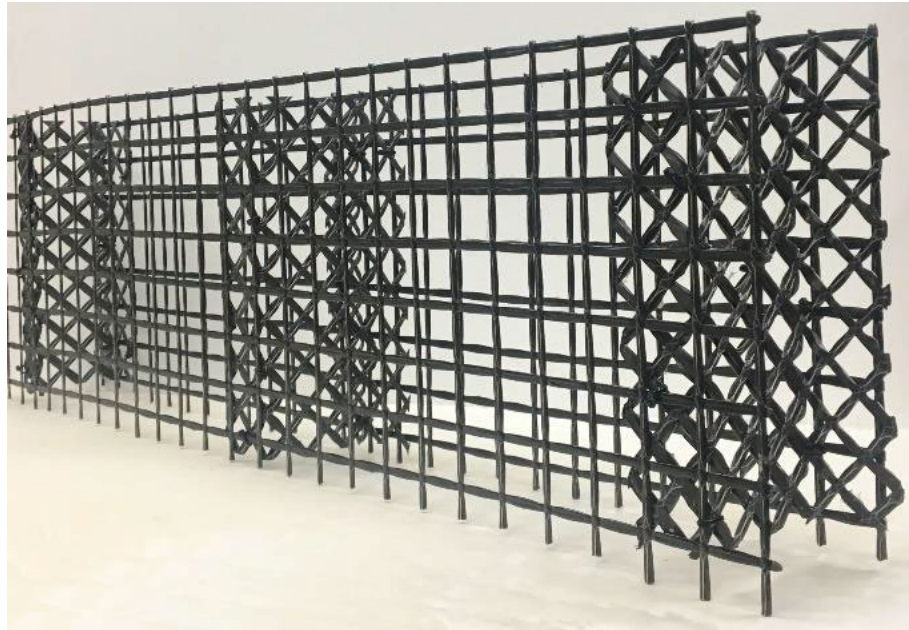


Abb. 66: Kombination von Schub- und Deckschichtbewehrung © ILEK

Über die bisher aufgeführten Aspekte hinaus, gibt die Forschungsleistung einen umfassenden Einblick in die Verbindungstechnik der Tafелеlemente. Teilweise werden in den Forschungsergebnissen bereits Lösungen für reversible Verbindungstechniken erprobt. Allgemein wird unterschieden in eine geometrische Ausbildung der Verbindung, wie punktuelle und linienförmige Verbindung, sowie in eine konstruktive Ausbildung wie die Nassfuge und die Trockenfuge (Abb. 67).

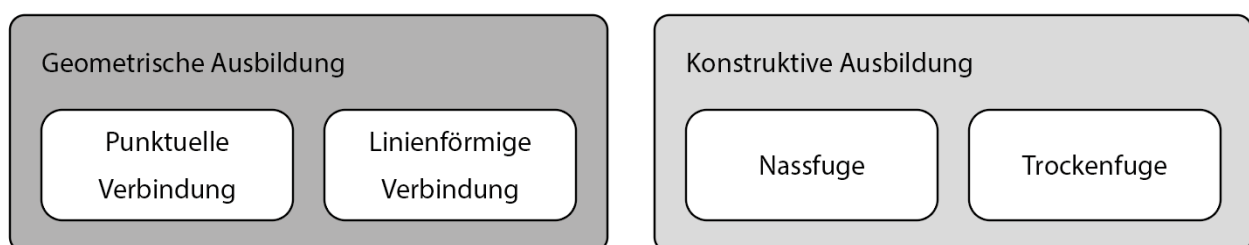


Abb. 67: Einordnung der Verbindungstechniken © ILEK

⁵³⁰ Vgl. Daria Kovaleva u. a., »Rezyklierbare Sandschalungen – Auf dem Weg zur Kreislaufproduktion leichter Betonbauteile«, in: *Beton- und Stahlbetonbau*, 117 (2022), Nr. 5, S. 333–342.

„Die punktuelle Fügung führt aufgrund der konzentrierten Einleitung von Lasten meist zu Spannungskonzentration im Bauteil, ermöglicht jedoch den Einsatz einfach zu montierender, lösbarer Verbindungsmittel. Linienförmige Verbindungen übertragen Lasten, vornehmlich Normal- und Schubkräfte, kontinuierlich über die gesamte Fuge. Dies gewährleistet einen homogenen Spannungs-transfer, ergibt jedoch kleinere Toleranzen. In vertikalen Fugen treten vornehmlich Schubkräfte infolge horizontaler Wind- oder Aussteifungslasten auf. In horizontalen Fugen überwiegen Zug- und Druckkräfte aus den Aussteifungslasten oder vertikale Belastungen durch Decken oder Wände. Exzentrisch an eine Wand angeschlossene Bauteile induzieren zusätzlich Biegemomente in die Wand. Für resultierende Zugkräfte im Beton muss eine zusätzliche Bewehrung vorgesehen werden. Daher liegt das Ziel im Entwurf von Anschlüssen an Wände darin, Lasten möglichst gleichmäßig in Bauteile einzuleiten, so dass diese eine reine Druckbeanspruchungen erfahren. Eine werkstoffgerechte und ressourceneffiziente Ausnutzung des Betons wird so möglich.“⁵³¹

Decke-Wand Anschluss

Erprobt wird die Integration einer von Sobek et al. entwickelten Implantat-Technologie⁵³², die Kräfte punktuell ohne Spannungsspitzen in ein Verbindungselement einleitet (Abb. 68). Die Metallbauteile sitzen in der druckfesteren Außenschale. Die Verbindung kann geringe Zugkräfte aufnehmen. Erprobt wird die Kopplung der Implantate mit der Bauteilbewehrung um die Zugkräfte abzuleiten. Die neuartige Verbindungstechnik konzentriert die Lastübertragung innerhalb weniger Punkte, aber darüber hinaus werden auch die Stellen zum Toleranzausgleich reduziert. Dabei kann der Montageprozess maßgeblich vereinfacht werden.⁵³³

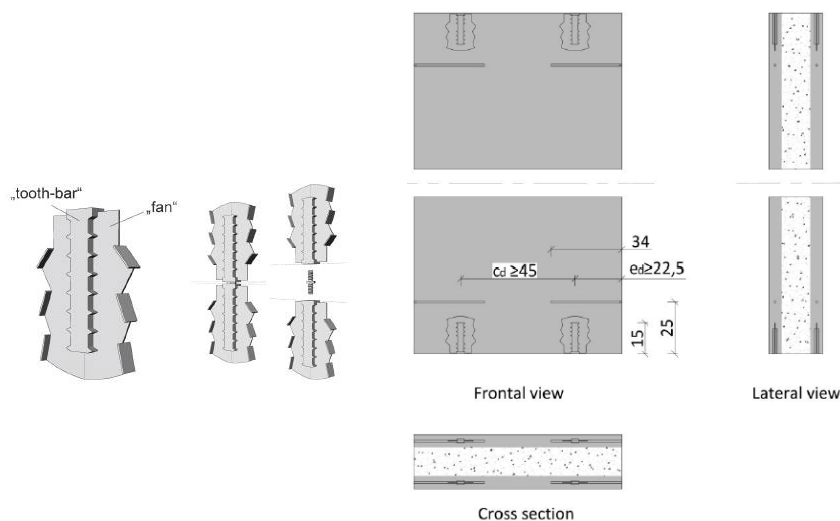


Abb. 68: Weiterentwickelte Implantat-Technologie für Gradientenbauteile © ILEK

⁵³¹ Schmeer u. a. 2020 (wie Anm. 381), 96–97.

⁵³² Vgl. Jan Mittelstädt, »Zur Einleitung lokaler Lasten in dünnwandige Bauteile aus ultrahochfestem Faserfeinkornbeton mittels Implantaten«.

⁵³³ Vgl. Schmeer u. a. 2020 (wie Anm. 381), S. 99.

Horizontaler Wand-Wand- oder Wand-Fundament-Anschluss

Zudem wurde die Einbindung eines klassischen Wandschuh-Verbinders erprobt (Abb. 69). Dieser kann mit einer Ankerlänge von 30 cm, die entstehenden Zug-Kräfte auch in der Fuge aufnehmen. Die Bauteile werden bereits im Herstellungsprozess in die äußere Deckschicht eingelegt.

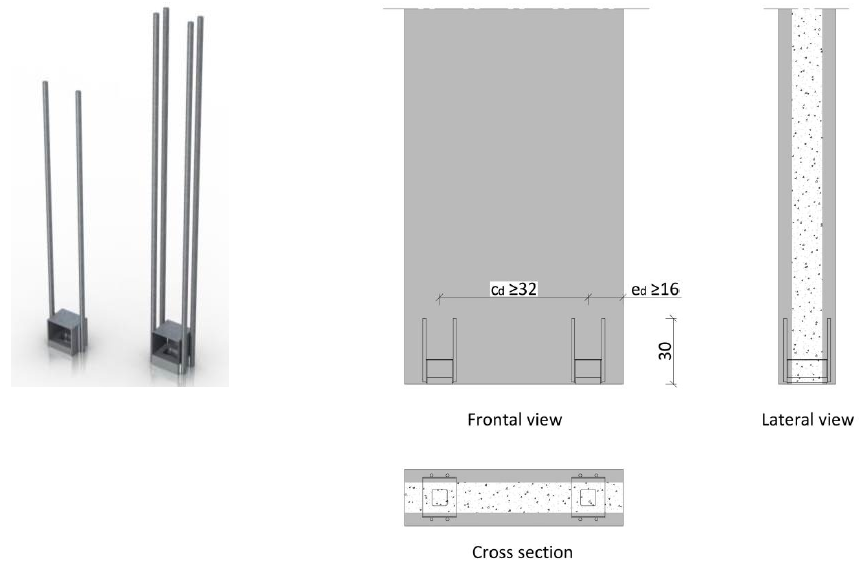


Abb. 69: weiterentwickelter Wandschuh für Gradientenbauteile © ILEK, Peikko Deutschland GmbH

Vertikaler Wand-Wand-Anschluss

Für die vertikale Verbindung der Wandtafeln wurde das Schwalbenschwanz-Prinzip erprobt (Abb. 70). Hier liefert die Firma H-BAU Technik unter dem Produktnamen POWERCON ein Produkt, das über eine Schraubverbindung mittig am Betonbauteil befestigt werden kann. Aufgrund der geringen Rohdichte des Materials ist diese Verbindung jedoch nicht ausreichend stabil. Daher wurde das Bauteil weiterentwickelt, indem eine direkte Verbindung des Metallbauteils mit der Bewehrung erfolgte.

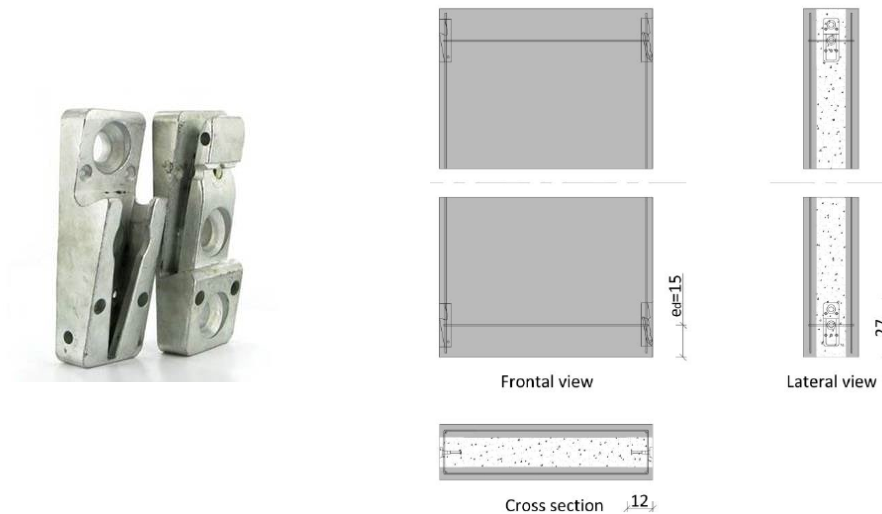


Abb. 70: weiterentwickelte Schwalbenschwanzverbindung POWERCON für Gradientenbauteile © ILEK, H-Bau Technik GmbH

Parallel wurde das für Betonfertigteile zertifizierte System TENLOC^{®534}, das mittels Schlüssel-Schloss Prinzip die Wandelemente aneinanderbindet, erprobt (Abb. 71). Beide Systeme bieten Vorteile für den Montageprozess und die Rezyklierbarkeit.

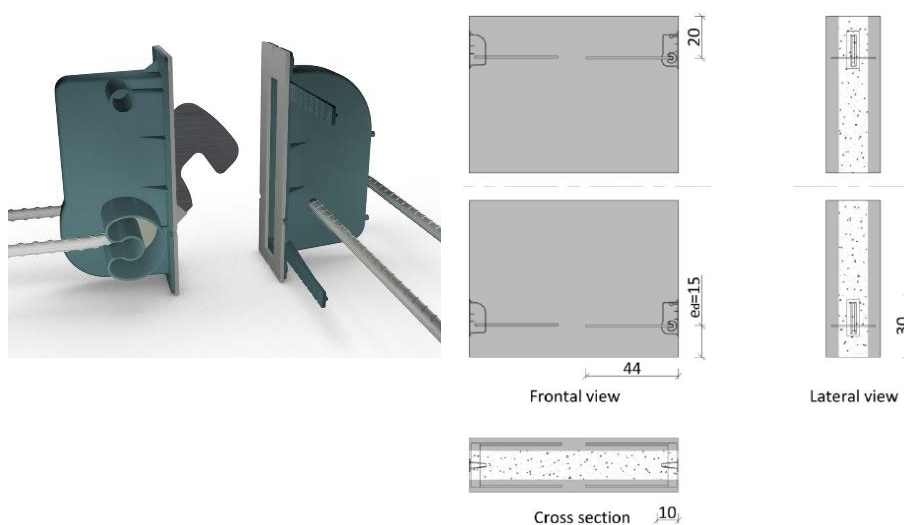


Abb. 71: weiterentwickeltes Schlüssel-Schloss Prinzip TENLOC für Gradientenbauteile © ILEK, Peikko Deutschland GmbH

⁵³⁴ Der Begriff Tenloc[®] ist markenrechtlich geschützt.

Demonstrator:

Auf Basis der konstruktiven Analyse hin wurde ein Demonstrator mit den Abmessungen von 3,00 m Höhe, 1,25 m Breite und 25 cm Dicke realisiert, der auf ein konventionelles Schalungssystem⁵³⁵ abgestimmt wurde (Abb. 72). Für die 5 cm dicken Außenschalen wurde die Mischung MINS(HC)⁵³⁶ verwendet, für den Betonkern von 14 cm Dicke kam die Mischung MIISG(AM) mit Aerogel Anteilen⁵³⁷ und Leichtzuschlägen⁵³⁸ zur Anwendung. „Zur Sicherstellung des Schichtverbundes wurden TZ-Schubgitter aus Glasfaser (Q121/121-AAE-38) der Firma Solidian eingesetzt, welche die schwind- und temperaturabhängigen Dehnungen aufnehmen. Über die Bauteilhöhe wurden vier dieser Gitter im Abstand von 75 cm angeordnet [...], sodass der entsprechende Nachweis [...] eingehalten ist. Die beiden Deckschichten wurden mit je einer Lage des textilen Glasfasergeleges bewehrt, um die Schubkräfte flächig in die Deckschichten einzuleiten.“⁵³⁹ Zur Erprobung der konstruktiven Fügung kamen eine Wandschuhe sowie das TENLOC®-Verriegelungssystem⁵⁴⁰ und Sandwichtransportanker zum Einsatz.



Abb. 72: Demonstrator der Gradientenbetonwand © ILEK

⁵³⁵ Schalungssystems StarTec der Firma Mev.

⁵³⁶ Hochfester Beton der HeidelbergCement AG.

⁵³⁷ Granulat P300 der Firma Cabot.

⁵³⁸ Mikrohohlkugeln der Firma Sika.

⁵³⁹ Schmeer u. a. 2020 (wie Anm. 381), S. 118.

⁵⁴⁰ Produkte der Firma Peikko.

4.3.4 Digitales Gestalten

Der Begriff der Gestaltung kann in dem Sinne erweitert werden, als dass der Gradientenbeton stark auf eine Funktionsoptimierung entwickelt wurde und daher Material sowie Bauteil mit Hilfe digitaler Planungstools gestaltet werden. Unter dem Konzept der funktionalen Gradierung wird die Eigenschaft verstanden, mehrere Funktionen innerhalb eines rein mineralischen Bauteils zu vereinen, auch als Ein-Material-Technologie bezeichnet (Abb. 73). Beim Gradientenbeton fungieren die äußeren Deckschichten als tragende Schicht, sie bieten zudem den Witterungsschutz und dienen ebenso als Gestaltungsmittel. Der innere Kern übernimmt die Dämmfunktion. Eine Bewehrung zwischen beiden Schichten dient zur Herstellung des Verbundes untereinander.⁵⁴¹

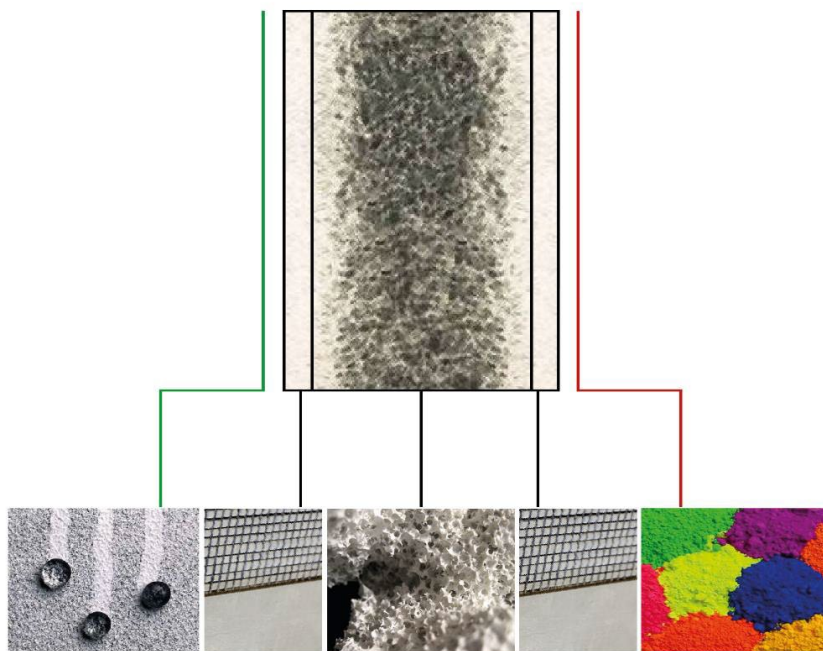


Abb. 73: Konzeptioneller Aufbau einer multifunktionalen Gradientenwand © ILEK

Die Auslegung der Bauteile erfolgt nach der „Pareto-Optimierung“⁵⁴². „Der Bauteilentwurf und damit verbunden die Materialverteilung kann als mathematisches Optimierungsproblem formuliert werden. Die Zielfunktion der Massenreduktion kann als die zu minimierende Wandstärke bzw. das zu minimierende Bauteilgewicht definiert werden. Dieses Optimierungsproblem ist unter Einhaltung der Nebenbedingungen in Form der Gewährleistung von Tragfähigkeit, Wärmeschutz sowie Feuchteschutz etc. zu lösen. Die Lösung dieses mehrkriteriellen Problems kann mit Hilfe der Pareto-Optimierung erfolgen. Hierzu sind allerdings den einzelnen Zielen bzw. Anforderungen Gewichtungsfaktoren zuzuordnen, um ein gemeinsames Ziel zu erreichen, das nicht zwingendermaßen dem Optimum für einzelne Aspekte entspricht. Zur Reduktion der Komplexität erfolgt

⁵⁴¹ Schmeer u. a. 2020 (wie Anm. 381), S. 19.

⁵⁴² Benannt nach dem Ökonomen und Soziologen Vilfredo Pareto versteht die Verbesserung eines multikriteriellen Problems, ohne eine Eigenschaft zu verschlechtern.
Vgl. auch <https://de.wikipedia.org/wiki/Pareto-Optimum>

der Entwurf nur für die beiden Hauptzielgrößen Tragfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit. Vereinfachend kann dadurch der Entwurf einer multifunktional gradierten Wand in zwei separate Optimierungsprobleme aufgeteilt werden: die Ermittlung der minimalen Wanddicken zum einen zur Einhaltung der Tragfähigkeit und zum anderen zur Wärmedämmung [...]. In einem nachgelagerten Entwurfsschritt werden die sekundären Ziele wie Feuchteschutz, Schallschutz und Brandschutz überprüft und die Materialverteilung gegebenenfalls angepasst.“⁵⁴³ Diese Form der iterativen Analyse, Gewichtung und Optimierung kann idealerweise mithilfe digitaler Werkzeuge und innerhalb einer digitalen Prozesskette erfolgen, um die Komplexität der multifaktoriellen Anforderungen für die Planerinnen und Planer handhabbar zu gestalten.

4.3.5 Abgleich der Gradientenbeton-Technologie anhand des kriteriengeleiteten Prüfrasters

Der folgende Abgleich mit den zwölf aufgestellten Kriterien der Nachhaltigkeitsbewertung von Betonbauteilen verdeutlicht, dass diese allesamt adressiert werden können. Zwei Kriterien davon erfordern weiteren Forschungsbedarf und zwei Kriterien werden nur angedacht.

Gradientenbeton bietet im Vergleich der drei Betontechnologien die höchste Druckfestigkeit und durch die Bewehrung insgesamt ein hohes Leistungsvermögen. Wengleich dies einen relativ höheren Zementeinsatz bedingt, wird dieser in absoluten Werten durch die Einsparung von 60-70 Prozent Masse aufgrund des geringeren Materialquerschnitts kompensiert (→4.1.2.2 Reduktion von Masse).⁵⁴⁴ Wie sich dieser Sachverhalt in der Ökobilanz detailliert darstellt, sollte weiter untersucht werden. In diesem Zusammenhang sind zwei Aspekte hervorzuheben. Zum einen wird bereits klimaeffizienter CEM II Zement verwendet (→4.1.2.4 Substitution Zement). Zum anderen könnten in Abhängigkeit von der Nutzung auch Wandquerschnitte mit einer geringeren Rohdichte und Druckfestigkeit entwickelt werden, vergleichbar mit den Systemen Infraleichtbeton und Aerogelbeton, um Überdimensionierungen zu vermeiden (→4.1.2.3 Reduktion Zementanteil und →4.1.2.5 Einfluss der Druckfestigkeit). Bisher konnten die erforderlichen U-Werte für Wandbauteile im automatisierten Nassspritzverfahren nicht eingehalten werden. Im Forschungsbericht wird bereits darauf hingewiesen, dass die Entwicklung sehr leichter mineralischer Schäume „mit hinreichender Festigkeit“ und „minimalem Schwinden“ zielführend sein könnte.⁵⁴⁵ Hier gibt es einen Querverweis zu der erprobten Forschung im Feld des Aeroleichtbetons.

Anteile von Rezyklat entsprechend des Kriteriums wurden bisher noch nicht in die Materialmatrix des Gradientenbetons integriert (→4.1.2.6 Recyclinganteil). Dies könnte in einer Anschlussforschung erprobt werden. Ein Potenzial hinsichtlich des Kriteriums Rückbaubarkeit stellt die Entwicklung reversibler Fügeverfahren dar. Dies wird aktuell in Ansätzen erforscht, beispielsweise mittels Spannschlössern

⁵⁴³ Schmeer u. a. 2020 (wie Anm. 381), S. 63.

⁵⁴⁴ Vgl. ebd., S. 9.

⁵⁴⁵ Ebd., S. 37.

(→4.1.2.8 Rückbaubarkeit und reversible Fügechnik). Eine Wiederverwendung ganzer Komponenten wird damit in Aussicht gestellt (→4.1.2.7 Wiederverwendung von vorgefertigten Komponenten) und könnte die beschriebenen Möglichkeiten zur Abfallreduktion bieten (→4.1.2.9 Abfallreduktion). Da es sich in der aktuellen Forschung um eine prototypische Entwicklung handelt, wurde bisher auf konstruktiver Ebene noch keine Aussage getroffen, inwiefern die Bauteile nach ihrer Nutzung als ganze Komponenten in einen weiteren Lebenszyklus geführt werden könnten (→4.1.2.7 Wiederverwendung von vorgefertigten Komponenten).

Der Gradientenbeton erprobt im Vergleich der drei Betontechnologien die automatisierte Fertigung am weitesten und stellt diese in Relation zur Materialmatrix. Materialzusammensetzungen und Verfahren bedingen sich direkt. Die Versuche zeigen, wie wichtig es ist, die beiden Einflussfaktoren zusammen zu betrachten, da sie sich gegenseitig stark beeinflussen oder auch teils nicht kompatibel sind. Dies zeigt sich beim Gradientenbeton besonders bei der Herstellung Betone geringerer Rohdichte, die bisher nur im Verfahren des schichtenweisen Gießens erstellt werden konnten.

Generell können die Prozesskette und damit auch der Faktor Zeit durch die Fertigungstechnologie des Spritzverfahrens optimiert werden (→4.1.2.12 Zeit und Prozess). Ebenso kann durch das Prinzip der Gradierung die Vorfertigung von Wandbauteilen umgesetzt werden, was die Produktivität im Bauwesen steigern kann (→4.1.2.11 Vorfertigung und Produktivität). Insgesamt zeigen sich nachweislich die Vorteile der digital gestützten Nachhaltigkeit (→3.1.4 Résumé: Kreislauffähigkeit durch digital gestützte Prozesse).

Offen bleibt zum jetzigen Zeitpunkt, wie eine Marktreife für diese Hochleistungsbauteile erreicht werden kann. Aufgrund der maximalen Individualisierung der Bauteilstruktur lässt sich aktuell nur eine Zulassung im Einzelfall erwirken. Ein möglicher Weg könnte die Zertifizierung von Typenbauteilen sein. Diese Herangehensweise begrenzt jedoch wiederum die Möglichkeit zum Unikat. An dieser Stelle wird erneut deutlich, welche Herausforderungen sich beim Versuch ergeben, Individualisierung und Standardisierung optimal austariert ins Verhältnis zu setzen. Um die Möglichkeiten der neuen Technologie vollumfänglich nutzen zu können bedarf es der Etablierung neuartiger Zulassungsverfahren.

4.3.6 Résumé: Gradientenbeton

Für die Betontechnologie Gradientenbeton können die drei Leitfaktoren wie folgt vor dem Hintergrund der Individualisierten Standardisierung zusammengeführt werden: Es wird deutlich, dass sich die Forschung aus den gestalterischen und technischen Anforderungen heraus entwickelt hat, somit aus den Leitfaktoren **Technik** und **Konstruktion**. Ziel war es durch eine Fertigungstechnologie auf konstruktive Anforderungen hin multifunktional gradierte Querschnitte digital zu konzipieren und daraufhin zu realisieren. Digitale Planungswerkzeuge und automatisierte Fertigungsverfahren wirken hier integral zusammen. Das Mehrdüsen-Spritzverfahren erlaubt die Zuführung von Materialzusammensetzungen mit unterschiedlichen Dichten. Diese gezielte, funktionsoptimierte Materialansteuerung und die Applikation im dreidimensionalen Raum stellen eine Form des individualisierten Materialauftrags dar, bei dem gezielt Ressourcen eingespart werden können. Das Verfahren setzt einen hohen Automatisierungsgrad um und lässt die Integration weiterer Komponenten zur Fügung innerhalb des Fertigungsprozesses zu, so dass es ein Beispiel für die unter →2.2.4 geforderte komplementäre Fertigung darstellt. Mit Bezug auf den Leitfaktor **Konstruktion** erlaubt das Prinzip der Gradierung eine maximale Anpassung an konstruktive Anforderungen und damit die Erstellung adaptiver Komponenten. So können verschiedene Bauteile wie Träger, Platten oder Schalen gradiert werden. Im Forschungsprojekt zur Herstellung der Gradientenbetonwand erfolgte die Materialverteilung mittels „Pareto-Optimierung“ mit den Hauptzielgrößen Tragfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit. Die Art der Gradierung variiert in Abhängigkeit von den aufgestellten Anforderungen und ist je nach Bauaufgabe neu zu definieren.

Es wurde ein digital gesteuertes automatisiertes Verfahren entwickelt, mit dem individuelle Bauteilquerschnitte, die auf spezifische Basismaterialien zurückgreifen, komponiert werden können. Auch dieses Vorgehen kann als eine Art des digitalen **Gestaltens** von Material und Bauteil bezeichnet werden. Es geht dabei nicht primär um das Erlangen einer ablesbaren gestalterischen Varianz mit Blick auf die Umsetzung einer architektonischen Qualität, sondern eher um die Gestaltung von individuellen Bauteilquerschnitten innerhalb des Produktionsprozesses zur Steigerung der konstruktiven Qualität. Das Prinzip der Gradierung könnte jedoch auch ähnlich des Rosenstein Pavillons⁵⁴⁶ genutzt werden, um eine ablesbare gestalterische Varianz zu realisieren. Diese bedarf eines innovativen Schalungssystems. Die Forschung zur Sandschalung am ILEK könnte hier in Kombination einen Lösungsansatz bieten, die anvisierte Individualisierte Standardisierung vollumfänglich abzubilden.⁵⁴⁷

⁵⁴⁶ Werner Sobek, Daria Kovaleva und Oliver Gericke, »Perforierte Betonschalen«, in: *ce/papers*, 3 (2019), Nr. 2, S. 89–93, hier S. 91.

⁵⁴⁷ Vgl. Kovaleva u. a. 2022 (wie Anm. 530).

4.4 Betontechnologie: Aeroleichtbeton

Im Folgenden wird das Forschungsprojekt „Aerogel – Entwicklung von Hybridbeton-Elementen mit Aerogel-Schaumbetonkern“⁵⁴⁸ dargestellt. Die Entwicklung erfolgte in Kooperation der Firma Housefabrik GmbH⁵⁴⁹, Kassel und des Lehrstuhls Baukonstruktion der TU Dortmund⁵⁵⁰, der zum Zeitpunkt der Projektdurchführung durch Prof. Ansgar Schulz und Benedikt Schulz geleitet wurde. Nach deren Ruf an die TU Dresden wurde das Forschungsprojekt durch die Juniorprofessur REB (zum Zeitpunkt der Projektdurchführung geleitet durch Jun. Prof. Dr.-Ing. Jutta Albus) übernommen. Die Autorin war maßgeblich für die Antragstellung verantwortlich und bei der Durchführung des Forschungsprojektes als Projektleiterin tätig. Die Forschungsergebnisse wurden durch die Autorin gemeinsam mit Frau Prof. Dr.-Ing. Jutta Albus in mehreren Veröffentlichungen publiziert.^{551,552,553,554,555}

⁵⁴⁸ Forschungsprojekt beim BMWi im Zeitraum vom 1. November 2017 bis zum 31. März 2020.

⁵⁴⁹ 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.

⁵⁵⁰ An dem Forschungsprojekt waren über die Autorin hinaus am Lehrstuhl Baukonstruktion die Mitarbeiterin Dr.-Ing. Tanja Skottke sowie der Mitarbeiter Dipl.-Ing. Felix Lowin über die komplette Laufzeit beschäftigt. Die beschriebenen Inhalte, zu denen die Autorin selbst beigetragen hat, stammen zu großen Teilen aus dem Abschlussbericht.

⁵⁵¹ Vgl. Jutta Albus und Kirsten Elisabeth Hollmann-Schröter, »Prototypical approach for an individualized standardization process in the context of intelligent construction and automation«, in: *Architecture, Structures and Construction*, 3 (2023), Nr. 2, S. 275–287.

⁵⁵² Vgl. Albus/Hollmann-Schröter 2022 (wie Anm. 156).

⁵⁵³ Jutta Albus und Kirsten E. Hollmann-Schröter, »Innovative Aerogel-Technologie zur energetischen Optimierung von Betonbauten und Effizienzsteigerung von Bauabläufen: Hybrid-Betonsystem für den Wohnungsbau«, in: *BWI - BetonWerk International*, 04 (2020), S. 32–50.

⁵⁵⁴ Dies., »Aeroleichtbetontechnologie – Implementierung eines Systemgedankens für den Wohnungsbau«, in: *punktum.betonbauteile*, 06 (2020), S. 29–31.

⁵⁵⁵ Albus u. a. 2021 (wie Anm. 11), S. 171–172.

4.4.1 Materialtechnologie

„Das modulare System basiert auf der Entwicklung einer spezifischen Materialzusammensetzung und deren Materialschichtung in Form von zwei dünnen nano-optimierten UHPC-Deckschichten mit einer wasserdichten Sichtbetonoberfläche und einem hochisolierenden und trotzdem tragfähigen Leichtbetonkern (Abb.74). Als Zuschlag wird erstmals Aerogel als Pulver in den schnellhärtenden Leichtbetonkern eingemischt. Mit der Einbindung der Aerogel-Technologie in den Fertigungsprozess ist es möglich, Hybridbeton-Paneele in einem Endlosprozess herstellen zu können und gleichzeitig in einem monolithischen Element alle Anforderungen an Statik, Brandschutz, Dichtigkeit und Wärmedämmung zu vereinen. Die entwickelte Fügechnik ermöglicht es, die vorgefertigten Wand-, Boden- und Decken-Paneele zu geschosshohen Räumen zu verbinden.“⁵⁵⁶

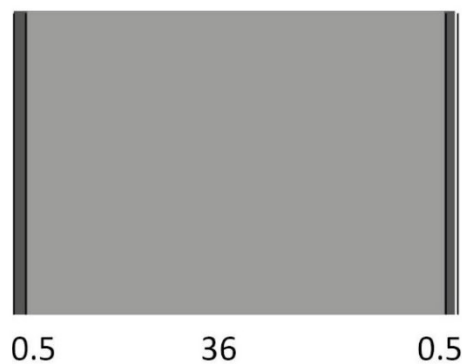


Abb. 74: Schematische Darstellung des hybriden Bauteils mit einem Querschnitt von 37 cm.

Eigene Darstellung

	PM12 A+L ⁵⁵⁷
Zusammensetzung	Zement, Gesteinsmehl, Aerogel, Leichtzuschlag, spezifischer Fasern, Wasser, Fließmittel, Schaum, Sand, Bindemittel
Zement	CEM I
Leichtzuschlag	Blähglas, Aerogel
Rohdichte (ofentrocken)	550kg/m ³
Wärmeleitfähigkeit	0,088 W/mK
Druckfestigkeit	0,67 MPa (nach 15 Min) 1,75 MPa (7d) 2,43 MPa (28)

⁵⁵⁶ Hollmann-Schröter 2021 (wie Anm. 15), S. 171.

⁵⁵⁷ Die genaue Materialzusammensetzung fällt unter die Geheimhaltungserklärung.

Rahmenbedingungen
5 mm UHPC-Deckschicht, 36 cm Aeroleichtbetonkern, 5 mm UHPC-Deckschicht. Zielvorgabe: max. U-Wert von 0,24 W/m ² K nach GEG einhalten.
Erreichte Rohdichte
Im Projekt konnte mit einer Trockenrohichte von 550 kg/m ³ und einer Druckfestigkeit von 2,43 MPa (nach 28 Tagen) eine deutliche Verbesserung im Vergleich zu bisher untersuchten pumpfähigen Leichtbetonen erzielt werden. Ein wesentlicher Vorteil der Matrix ist die schnelle Aushärtungszeit von 0,67 MPa nach 15 Minuten und 1 MPa nach 60 Minuten. Die durch die verringerte Dichte erreichte Reduktion von Masse führt zur Reduktion von Emissionen beim Transport sowohl der Rohstoffe als auch fertiger Bauteile.
Wärmeleitfähigkeit
Mit der endgültigen Materialzusammensetzung wird die erforderliche Wärmeleitfähigkeit von 0,088 W/mK bei einer Druckfestigkeit von 2,43 MPa erreicht. Das Monomaterial erfüllt damit die aktuellen europäischen Normen für Wandkonstruktionen bei einer Dicke von 37 cm. Dabei wird der maximal zulässige Wärmedurchgangskoeffizient von 0,24 W/(m ² K) unterschritten.
Zementanteil
Beim Schaumbeton war die Strategie, den Zementanteil zu reduzieren und durch Luft, Aerogel und leichte Zuschlagstoffe zu ersetzen. In den Testreihen kam noch der klimaintensivere CEM I Portlandzement zum Einsatz. Hier erscheint eine alternative Entwicklung mit CEM II möglich und zielführend. Es besteht weiterer Forschungsbedarf in der Durchführung einer einheitlichen Ökobilanzierung der drei Systeme, um den Einfluss der unterschiedlichen Zemente zu eruieren.
Aerogel und Wasseranteil
Aerogel ⁵⁵⁸ ist ein hochdämmendes Material. Die verwendeten Leichtzuschläge (Blähglas) unterstützen die Isolationseigenschaften sowie die statischen Eigenschaften zusätzlich (Abb. 75). Eine der Herausforderungen der Produkt- und Prozessentwicklung war es, die hydrophoben Eigenschaften des Aerogels mit den Standardbestandteilen einer Betonmischung zu kontrollieren. Der inhärente Eigenschaftskonflikt verschärft sich bei der Entwicklung von Schaumbeton im Vergleich zu herkömmlichem Betonen, da die schaubildenden Zusatzmittel, Aerogel und Leichtzuschläge, interagieren aufgrund des Wasserbedarfs und der mechanischen Auswirkungen im Produktionsprozess. Sie beeinflussen direkt die Dichte, die Fließfähigkeit und schließlich die Festigkeit des Betons. Mittels einer Vielzahl von Probekörpern wurde die optimale Materialmischung definiert. ⁵⁵⁹ Weiterer Forschungsbedarf besteht in der Einbindung alternativer Aerocele

⁵⁵⁸ In diesem Anwendungsfall ist das Aerogelpulver ein hochporöser Festkörper auf Silicat-Basis der Firma Cabot.

⁵⁵⁹ Die genaue Materialzusammensetzung ist Teil der Geheimhaltungserklärung des Forschungstätigkeit und kann daher an dieser Stelle nicht veröffentlicht werden. Bei Bedarf bitte Rücksprache mit der Firma G.tecz Engineering GmbH aufnehmen.

beispielsweise auf Ligninbasis, wie sie an der Technischen Universität Hamburg (TUHH) erforscht werden.^{560,561,562}

Schrumpfen

Ein problematisches Verhalten des Materials äußert sich darin, dass die Matrix die unterschiedlichen Eigenspannungen nicht aufnehmen kann und es durch das Schrumpfen zur Rissbildung kommt. Schnellerhärtende Betone, aber auch Temperaturunterschiede bei Bauwerken jungen Alters, begünstigen dieses Verhalten und somit muss bei der Aeroleichtbetonentwicklung darauf besonderes Augenmerk gelegt werden.



Abb. 75: Hybridbeton-Elemente mit UHPC-Deckschicht und Aerogel-Schaumbeton © G.tecz Eneineering GmbH

⁵⁶⁰ Lignin basierte Aerogele werden in der Forschungsgruppe „Nanoporöser Materialien“ um Jun. Prof. Dr.-Ing. Pavel Gurikov erforscht und von der Firma Aerogel-it GmbH vertrieben.

⁵⁶¹ Vgl. Hamburg University of Technology, Institute of Thermal Separation Processes, »Tailor Made Nanoporous Material for Advanced Applications«, <https://www.tuhh.de/v8/research/fields-of-research/nanoporous-materials> (abgerufen am 13. April 2025).

⁵⁶² Vgl. Marc Fricke, »Bioaerogele«, <https://www.aerogel-it.de/> (abgerufen am 13. April 2024).

4.4.2 Fertigungstechnologie

„Die komplette Fertigungseinheit ist in mobilen Containern (Abb. 76) untergebracht und erlaubt so, wenn erforderlich, eine lokale Produktion und darüber hinaus die Nutzung regional verfügbarer Ressourcen. Dies wird besonders relevant bei der Einbindung von Rezyklaten. Das Herstellungsverfahren ist als linearer, endloser Produktionsprozess konzipiert, der vollständig automatisiert ausgeführt wird.“⁵⁶³ Die Produktionsmaschine passt anhand der zuvor eingespeisten digitalen Informationen mit einer verstellbaren Schalung die Plattengeometrie in allen drei Dimensionen - Länge, Breite und Materialstärke - an, so dass Parameter aus Entwurf, Bauphysik und Konstruktion zusammengebracht werden können.

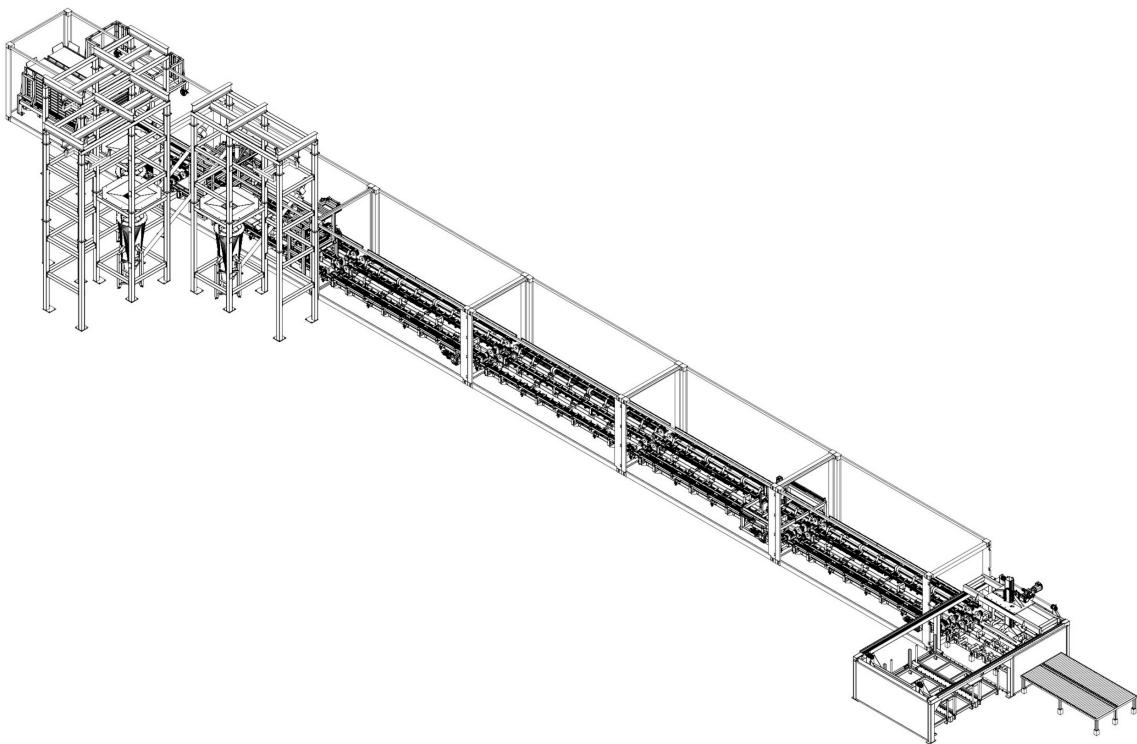


Abb. 76: Mobiles Produktionslayout in Containern © Gtecz Engineering GmbH

Der Wandquerschnitt mit erheblich reduzierter Elementdicke wird in einem horizontal ausgeführten Co-Extrusionsverfahren geschichtet erstellt (Abb. 77). Die Maschine ist so konzipiert, dass die Schalungen mit offener Oberseite, auf einem Förderband gefügt werden (Abb. 78). Magnetische Kontakte dienen zur Ausrichtung der Schalungselemente in einer Endlosschleife. Da der Aeroleichtbeton für die maschinelle Verarbeitung auf diesen Anlagen der Extrusionseinheit automatisiert zugeführt werden soll, sind bestimmte Vorgaben an die Materialeigenschaften wie Konsistenz, Fließverhalten, Viskosität (Abb. 79) und Abbindegeschwindigkeit maßgebend, wobei eine gewisse Variabilität bei der Synchronisation der Materialkonsistenz besteht. Die einzelnen Materialbestandteile sind mit einer Mischeinheit verbunden, die in den Extrusionsformprozess integriert ist und welche

⁵⁶³ Hollmann-Schröter 2021 (wie Anm. 15), S. 171.

je nach Bedarf automatisch betrieben werden kann. Eine spezifische Materialkonsistenz und die schnelle Aushärtung ermöglichen eine Aufbringung der unterschiedlichen Schichten in einem Nass-in-Nass-Verfahren.

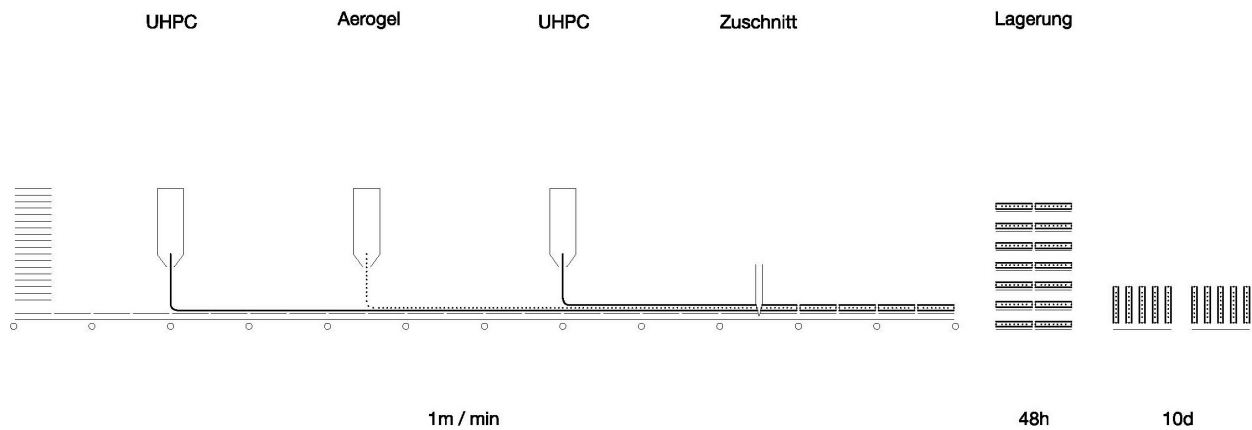


Abb. 77: Schichtenweises Aufbringen der Materialmatrix © TU Dortmund, Lehrstuhl Baukonstruktion, Juniorprofessur REB (Lowin)

Somit kann bei einer Produktionsgeschwindigkeit von 1m/min und einer beispielhaften Paneelbreite von 1,4 m eine Größenordnung von 84 m² in einer Stunde gefertigt werden. Nachdem die Materialschichtung abgeschlossen ist, werden die Betontafeln nach einem in Bezug zur Aushärtung stehenden Vorschub durch eine Säge automatisiert in gewünschte Elementlängen getrennt. Nach nur 15 Minuten ist der Aeroleichtbeton durch die schnell aushärtende Materialzusammensetzung ausreichend fest und kann ausgeschalt werden. Eine Kennzeichnung mit RFID-Codes gekennzeichnet erlaubt eine Identifikation und intelligente Logistik im gesamten Lebenszyklus.

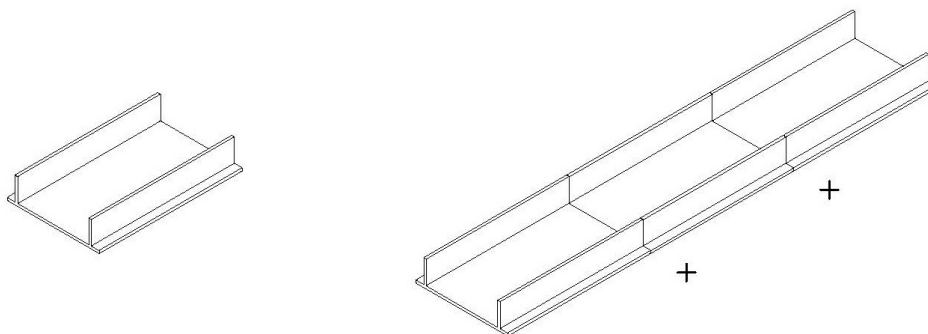


Abb. 78: Kopplung der offenen Schalungen über Magnetkontakte © TU Dortmund, Lehrstuhl Baukonstruktion, Juniorprofessur REB (Lowin)



Abb. 79: Materialmatrix © G.tecz Engineering GmbH

4.4.3 Konstruktion

Die Forschungsleistung visiert mit einem Baukasten aus Wand-, Decken- und Bodentafeln (Abb. 80) eine systematisierte, wirtschaftliche Lösung an, die für den mehrgeschossigen Wohnungsbau ebenso wie den Bürosektor geeignet ist. Vor dem Hintergrund, dass ein hoher Vorfertigungsgrad schnellere Planungs- und Bauprozessen ermöglicht, war darüber hinaus die Anpassbarkeit des Systems besonderer Forschungsgegenstand. Die Paneeldimensionen sollten den Projektanforderungen entsprechend konzipiert werden können – ganz im Sinne einer Individualisierten Standardisierung.⁵⁶⁴ In diesem Fall bedeutet das, dass der Produktionsprozess konstant bleibt, jedoch Paneeldimensionen, Materialbeschaffenheit sowie gestalterische Parameter flexibel automatisiert zusammengestellt werden können. So wird ein adaptives System geschaffen, das sich konstruktiv, bauphysikalisch und gestalterisch variabel darstellt.

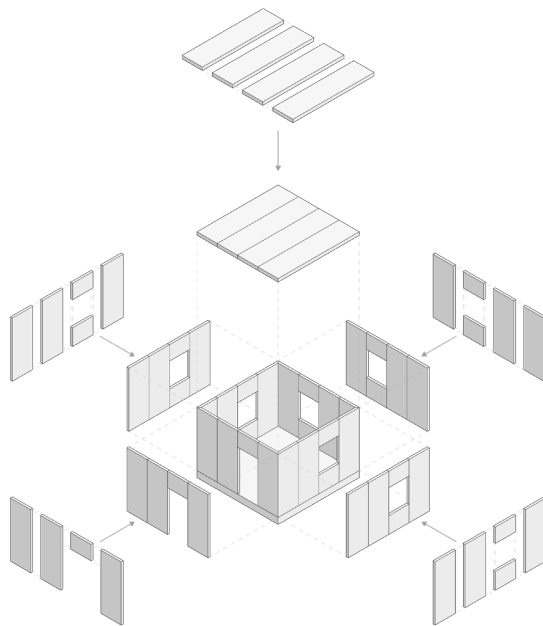


Abb. 80: Systembaukasten mit individuellen Gestaltungsmerkmalen

© G.tecz Engineering GmbH

Konform zur Individualisierten Standardisierung können ebenso die Fügepunkte an die unterschiedlichen konstruktiven sowie bauphysikalischen Anforderungen angepasst werden (Abb. 81). Im Laufe des Forschungsprojektes wurde das Prinzip der hybriden Betontafelbauweise zu einem systematisierten offenen Systembaukasten erweitert, wobei die Aeroleichtbeton-Wände mit üblichen vorgefertigten Betonbauteilen, wie präfabrizierten Deckenkonstruktionen, kombiniert wurden.

In der gewählten Kombination aus Aeroleichtbetonkomponenten und Fertigteilen können Nachhaltigkeitspotenziale und wirtschaftliche Aspekte besser berücksichtigt werden, da die verschiedenen Fertigteilssysteme ihren Eigenschaften entsprechend

⁵⁶⁴ Vgl. Albus/Hollmann-Schröter 2022 (wie Anm. 156).

optimal eingesetzt werden. Letztlich führt ein hoher Vorfertigungsgrad zu schnelleren Planungs- und Bauprozessen. Mit der neuen Technologie können Materialeigenschaften, insbesondere die Wärmeleitfähigkeit, projektspezifisch eingestellt werden - dies kann als digitale Materialeigenschaft bezeichnet werden (→3.1.3.3 Schnittstelle Gestaltung – Technik: digitales Material). „Durch seine homogene Dämmwirkung über den gesamten Elementquerschnitt ermöglicht der Aeroleichtbeton vereinfachte Anschlüsse, die Wärmebrücken verhindern (Abb. 82).“⁵⁶⁵

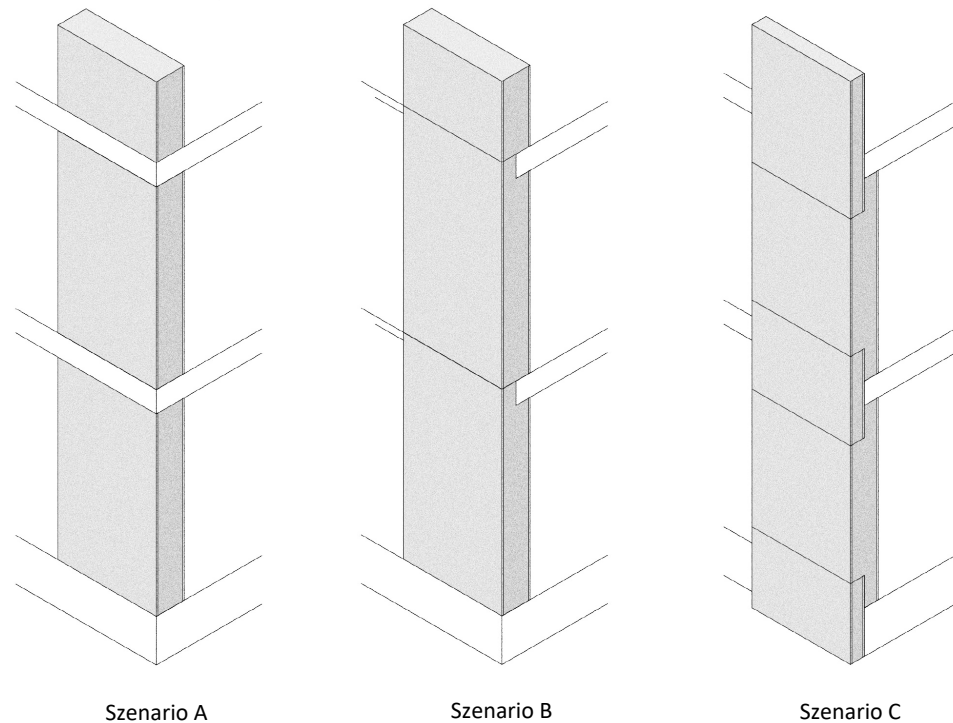


Abb. 81: Varianz in den Konstruktionsprinzipien

© TU Dortmund, Lehrstuhl Baukonstruktion, Juniorprofessur REB (Lowin)

Die **Abbildung 81** zeigt drei verschiedene Verbindungsprinzipien im Bereich der Wand-Boden- und Wand-Decken-Anschlüsse:

Das Szenario A zeigt Wandpaneele und Deckenplatten jeweils aus Aeroleichtbeton. Da beide Bauteile ähnliche Dämmeigenschaften haben, können die Deckenplatten mit ungedämmter Stirnseite ausgeführt werden. So werden Wärmebrücken eliminiert und die Detaillierung erheblich vereinfacht.

Szenario B kombiniert Wandpaneele aus Aeroleichtbeton mit konventionellen Betonfertigteildecken. Der Falzanschluss wird durch das Einlegen von Formteilen in die Schalung im automatisierten Prozess realisiert. Der Anteil des Aerogels ist auf die geringste Bauteilqualität im Bereich des Deckensturzes abgestimmt, um Kondensation im Bereich dieser Wärmebrücke zu verhindern. Dies impliziert wiederum bezogen auf das gesamte Wandbauteil eine überdimensionierte Menge an Aerogel im Wandbereich.

⁵⁶⁵ Ebd., S. 3.

Szenario C verwendet die Kombination aus Aeroleichtbeton mit konventionellen Fertigteildecken und separaten Bauteilen mit verbesserten Dämmeigenschaften an der Außenseite des Deckenanschlusses. In diesem Fall ist der höhere Aerogelanteil auf dieses Bauteil beschränkt. Diese Ausführung stellt somit eine mineralische stirnseitige Dämmung der Deckenplatte mit der gleichen Oberflächenqualität wie die Wandpaneele selbst dar. Dieses Prinzip zeigt die Möglichkeit, maßgeschneiderte Materialien bedarfsorientiert zu produzieren, in diesem Fall ein Wandbauteil und ein Sonderbauteil mit höheren Dämmeigenschaften und geringeren statischen Anforderungen.

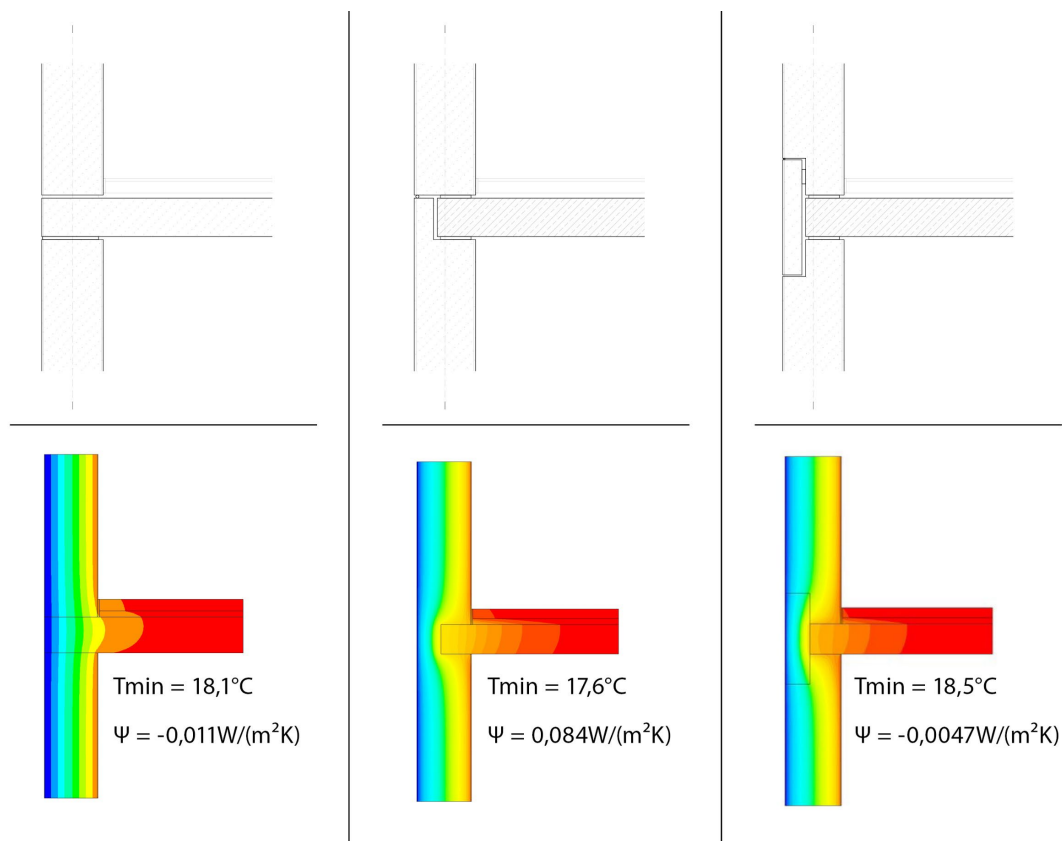


Abb. 82: Gegenüberstellung der Anschlussdetails unter Berücksichtigung der thermografischen Darstellung

© TU Dortmund, Lehrstuhl Baukonstruktion, Juniorprofessur REB (Skottke)

Im Rahmen der Forschung wurden verschiedene Verbindungsprinzipien entwickelt, an einem Demonstrator (Abb. 83) realisiert und in einem Langzeit-Monitoring bezüglich bauphysikalischer und konstruktiver Aspekte überwacht. Außerdem wurden an diesem Versuchsstand verschiedene Klebstoffe, ein Zweikomponentenkleber und ein UHPC-Kleber, getestet und bewertet (Abb. 84).

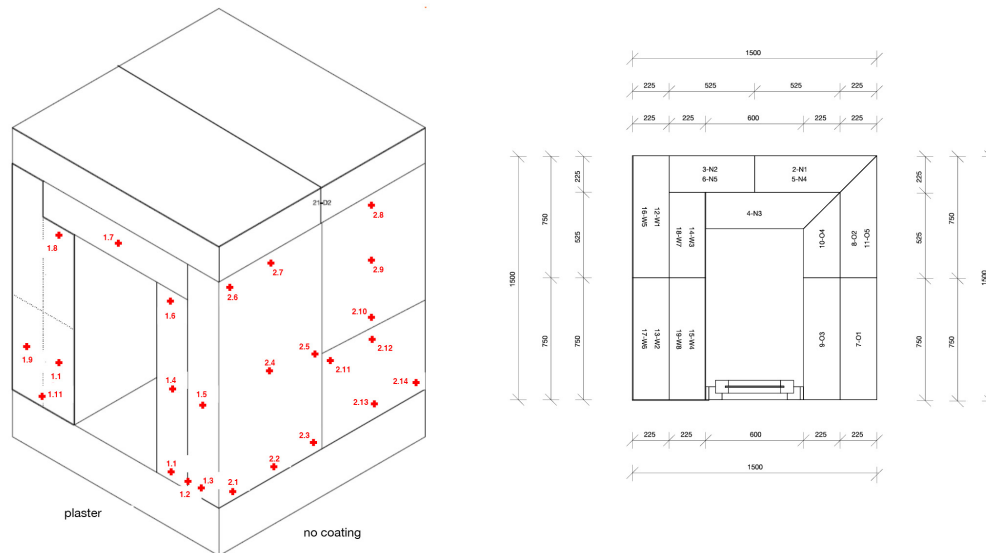


Abb. 83 Konzipierung des Demonstrators © TU Dortmund, Lehrstuhl Baukonstruktion, Juniorprofessur REB (Lowin)



Abb. 84: Demonstrator zum Langzeit-Monitoring der Bauphysik, Statik und Verbindungstechnik © TU Dortmund, Lehrstuhl Baukonstruktion. Eigene Darstellung

4.4.4 Digitales Gestalten

Neben den aufgrund seiner Formfreiheit großen gestalterischen Möglichkeiten von Beton erlaubt genau diese Formbarkeit des Monomaterials mit zusätzlicher Funktionalität eine projektspezifische Anpassung. Diese Aspekte wurden durch die automatisierte Fertigung zusammengeführt. „Durch intelligente Konstruktionsprinzipien und Füge-techniken, die zwar modular, aber nicht als monotone Repetition ablesbar sind, kann hochwertige Architektur generiert werden. Die Forschung zielt darauf ab, durch die Einbindung digitalisierter Entwurfsprinzipien und einer automatisierten Fertigung die Probleme bisheriger Standardisierungsprozesse zu überwinden.“⁵⁶⁶

Eine Einbindung digitaler Werkzeuge wurde beispielsweise für die Bilanzierung der Wärmebrücken genutzt, um damit die spezifischen Materialanforderungen zu definieren. Darauf aufbauend wurden die Materialmatrix unter Berücksichtigung des Aerogelanteils und der Schichtenaufbau aufeinander abgestimmt. Projektspezifisch können durch die Forschungstätigkeit sowohl Wanddicke, Schichtenaufbau als auch Paneel-Dimensionen innerhalb des Produktionsprozesses definiert werden. Ebenso können im Fertigungsprozess Schalungsmatrizen eingelegt werden oder diese mit zusätzlichen Leisten und Formteilen ergänzt werden, um projektspezifische Oberflächen zu erzeugen (Abb. 85). Die Möglichkeiten, individuelle Oberflächenmuster und -reliefs zu generieren, kann eine architektonische Qualität und kreative Umsetzung fördern.

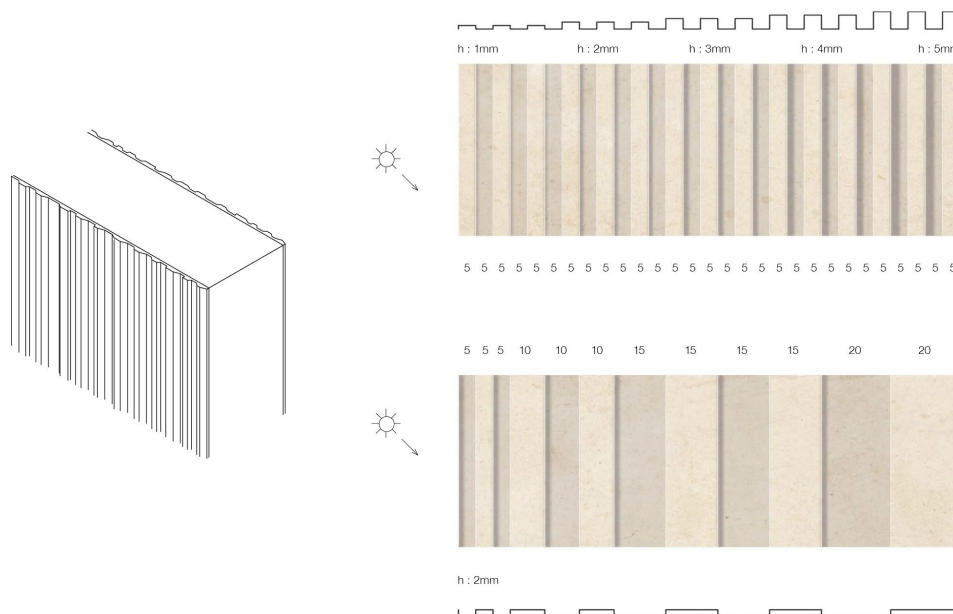


Abb. 85: Individualisierte Oberflächengestaltung des mehrschichtigen Wandaufbaus

© TU Dortmund, Lehrstuhl Baukonstruktion, Juniorprofessur REB (Lowin)

⁵⁶⁶ Vgl. Hollmann-Schröter 2021 (wie Anm. 15), S. 173.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde die automatisierte Integration projektspezifisch angepasster Schalungen und Bewehrungselemente in die Fertigungsumgebung konzeptionell angedacht.⁵⁶⁷ Eine entsprechende Umsetzung wäre Gegenstand einer Anschlussforschung, um durch eine verlustfreie Überführung des digitalen Gestaltens in die Produktion Systemlösungen mit individuellen Gestaltungsmerkmalen zu realisieren. Das System könnte so weiterentwickelt werden, sodass auch bewehrte Lösungen je nach statischen Anforderungen in den Prozess integriert werden. Eine projektbezogene Farbcodierung kann mithilfe digitaler Steuerungssysteme umgesetzt werden. Durch eine verlustfreie Überführung des digitalen Gestaltens in die Produktion können so Systemlösungen mit individuellen Gestaltungsmerkmalen realisiert werden. Ein weiterer Faktor, den die Individualisierte Standardisierung begünstigt, ist eine gestalterische Varianz, die die Dauerhaftigkeit steigert.

4.4.5 Abgleich der Aeroleichtbeton-Technologie anhand des kriteriengeleiteten Prüfrasters

Der folgende Abgleich mit den zwölf aufgestellten Kriterien der Nachhaltigkeitsbewertung von Betonbauteilen verdeutlicht, dass diese grundsätzlich adressiert werden können. Davon werden acht bereits umfassend berücksichtigt, vier erfordern weiteren Forschungsbedarf.

Das Konzept der synchronen Abstimmung von Konstruktion, Fertigung und Gestaltung zielt darauf ab, die Nachhaltigkeit übergreifend zu verbessern.

Bei der Entwicklung des Monomaterials standen die Reduktion des Rohstoff- und Energieverbrauchs sowie eine hohe Leistungsfähigkeit in Bezug auf Wartung und Recyclingfähigkeit im Vordergrund. Das hochresistente Wandmaterial gewährleistet eine sehr lange Lebensdauer und bietet eine dauerhafte und solide Konstruktion. Aufgrund der wasserbeständigen und dichten UHPC-Oberfläche werden die Kosten für die Instandhaltung reduziert (→4.1.2.1 Nutzungsdauer). Wegen der konsequenten Sortenreinheit ist eine Kreislauffähigkeit gegeben. Die Betonmatrix wurde explizit ohne die Verwendung von Bewehrungsstahl konzipiert, um ein effizientes Recycling zu gewährleisten (→4.1.2.8 Rückbaubarkeit und reversible Füge-technik). Wegen seines hybriden Schichtaufbaus aus einer UHPC-Deckschicht und einem isolierenden Aerogel-Schaumbetonkern trägt der Aeroleichtbeton zu einer deutlichen Reduzierung des Materialeinsatzes bei und damit zu einem um circa ein Drittel verminderter Zementanteil im Vergleich zu Normalbeton. So kann ein gutes Gleichgewicht aus geringer Rohdichte (→4.1.2.3 Reduktion Zementanteil) und Druckfestigkeit (→4.1.2.5 Einfluss der Druckfestigkeit) hergestellt werden. Darüber hinaus könnte die Ökobilanz der Bauteilmatrix durch die Einbindung eines klinkereffizienten Zementes (→4.1.2.4 Substitution Zement) und durch die Integration von Recyclinganteilen (→4.1.2.5 Recyclinganteil) deutlich verbessert

⁵⁶⁷ Aufgrund des Insolvenzverfahrens vom 22.03.2018 der Firma Housefabrik GmbH innerhalb des laufenden Forschungsprojektes konnte die Anlagentechnik im Verlauf der Forschung nicht weiterentwickelt werden. Aus diesem Grund konnte weder die Schalungstechnik erprobt noch Prototypen der Oberflächengestaltung realisiert werden.

werden- An dieser Stelle besteht weiterer Forschungsbedarf. Auf Bauteilebene ist kritisch anzumerken, dass die zunächst angedachte nasse, irreversible Fügung der Komponenten untereinander einer zirkulären Bauweise nicht gerecht wird. Dieser Tatsache ist zudem geschuldet, dass die Wiederverwendung ganzer Bauteile bisher nicht abbildbar ist. Somit ergeben sich sowohl mit Blick auf eine reversible Fügetechnik (→4.1.2.8 Rückbaubarkeit und reversible Fügetechnik) als auch darauf aufbauend eine Bauteilweiterverwertung (→4.1.2.7 Wiederverwendung von vorgefertigten Komponenten) weitere Forschungsbedarfe. Entsprechend ist die Abfallreduktion durch Wiederverwendung bisher nur konzipiert, aber nicht weiter erforscht. (→4.1.2.9 Abfallreduktion).

Mit Blick auf die Nachhaltigkeitskriterien im Zusammenhang mit der Fertigung ist die gewählte Verfahrenstechnologie positiv zu bewerten. Durch eine echte Vor-Ort-Produktion innerhalb einer mobilen Produktionslinie können circa 90 Prozent lokaler Rohstoffe verwendet werden und eine optimierte Logistik sichergestellt werden, dies insbesondere dann, wenn Abbruchmaterial lokal vorhanden ist (→4.1.2.10 Transport und Regionalität). Gleichwohl wird durch die Vorfertigung und hochwertige Materialverarbeitung die notwendige Präzision einer Fertigteilbauweise erreicht, die eine effiziente Montage vor Ort unterstützt.

Forschungsgegenstand war die Entwicklung eines automatisierten Co-Extrusionsverfahrens. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass die Ergänzung mit robotergestützter Prozesstechnik darüber hinaus zu einem höheren Automatisierungsgrad und einer Steigerung der Produktivität führen könnte. (→4.1.2.12 Zeit und Prozess). So könnten, wie eingangs erläutert, beispielsweise Montageanker oder Elemente, die eine reversible Fügetechnik erlauben, direkt in den Fertigungsprozess automatisiert integriert werden (→4.1.2.8 Rückbaubarkeit und reversible Fügetechnik), wie auch eine Nachbearbeitung der Platten innerhalb des Produktionsprozesses automatisiert erfolgen.

4.4.6 Résumé: Aeroleichtbeton

Für die Betontechnologie Aeroleichtbeton können die drei Leitfaktoren wie folgt vor dem Hintergrund der Individualisierten Standardisierung zusammengeführt werden: Es wird deutlich, dass sich die Forschung aus den Leitfaktoren **Technik** und **Konstruktion** heraus entwickelt hat. Die Einbindung des Aeroleichtbetons in ein automatisiertes, kontinuierliches Herstellungsverfahren kann einen hohen Serienfaktor erreichen. Das Verfahren ermöglicht eine effiziente Produktion, Montage und Installation der geschosshohen Betonplatten, die den vielfältigen Anforderungen an leistungsfähige und rezyklierbare Bauteile gerecht werden. Die Forderung nach einer komplementären Fertigung (→2.2.4 Résumé: *Forderung einer komplementären Fertigungsstrategie*) wird in dem Sinne umgesetzt, als dass durch Kombination der Mischmodule ein individualisierter Materialauftrag in unterschiedlichen Schichten erfolgen kann. Des Weiteren wird die Integration weiterer Schritte in den Fertigungsprozess, wie das Einlegen von Transportankern, oder von Bewehrung in Aussicht gestellt. Auch das automatisierte Schneiden ist konzipiert und in das Verfahren integriert.

Die Relevanz des Leitfaktors **Konstruktion** zeigt sich maßgeblich in der Umsetzung adaptiver Komponenten (→2.3.4 Résumé: *Adaptive Konstruktionssysteme als Mittelweg aus Standardisierung und Individualisierung*). Die Strategie der Individualisierte Standardisierung wird durch die Anpassbarkeit von Wanddicke, Schichtenaufbau und Paneel-Dimensionen innerhalb des entwickelten Konstruktionssystems abgebildet. Dies kann durch die Variation der Schalungsgeometrien innerhalb des Fertigungsprozesses realisiert werden.

Ein weiterer Schwerpunkt der Forschung liegt in der Einbindung des Leitfaktors **Gestaltung** in Form der digitalen Konzeption von Materialanforderungen und konstruktiver Umsetzung. Die individualisierten Wandaufbauten werden in Abhängigkeit von den konstruktiven und bauphysikalischen Anforderungen mithilfe digitaler Werkzeuge komponiert und erlauben eine direkte Überführung digitaler Daten in die Fertigung (→2.4.4 Résumé: *Auswirkungen digitaler Werkzeuge auf Prozesskontinuität und Nachhaltigkeit*). An der Schnittstelle Gestaltung und Technik wird somit ebenfalls eine Form der Individualisierung ermöglicht. Die dafür erforderliche Kopplung der Maschine an die digitalen Werkzeuge ist im Forschungsprojekt nur konzeptionell angelegt. Dadurch ist die Schnittstelle Gestaltung und Konstruktion und damit die Anbindung eines digitalen Planungstools an den Produktionsprozess bisher nur projektiert.

Die automatisierte Materialeinstellung durch eine Variation der Zuschlagstoffe wie des Aerogelanteils wird ebenso in Aussicht gestellt, jedoch noch nicht innerhalb der Forschung maschinell im Fertigungslayout, sondern als Prototyp getestet.

Einen weiteren wesentlichen Aspekt einer Individualisierung innerhalb des Systems bietet die Möglichkeit der visuellen Gestaltbarkeit der Oberflächen und Farbigkeit der Wandpaneele.

Durch den Ansatz der Zusammenführung von Prozessen und Leitfaktoren werden allgemein gesprochen funktionsoptimierte Betonbauteile geschaffen, die

zudem eine gestalterische Varianz implementieren. Es zeigen sich auch bei der Aeroleichtbetontechnologie nachweislich die Vorteile der digital gestützten Nachhaltigkeit (→3.1.4 Résumé: Kreislauffähigkeit durch digital gestützte Prozesse). Damit werden Strategien und Methoden für einen individuelleren und dennoch ökologisch und ökonomisch orientierten Bauprozess generiert.

4.5 Zusammenfassung Synopse

Im Anschluss an die separate Betrachtung der Systeme nach den aufgestellten Kriterien kann nun eine wertvolle Synthese erfolgen. Das zu Beginn aufgezeigte Defizit, dass Forschungen meist aus lediglich einem Schwerpunkt der drei Leitfaktoren heraus initiiert werden, bestätigt sich auch bei den analysierten Betontechnologien. Die Zielstellung, dass die Systeme durch die Gegenüberstellung voneinander lernen können, kann bestätigt werden und wird im Folgenden ausgeführt. Die Synopse zeigt, dass sich jeder Forschungsansatz durch individuelle Stärken auszeichnet. Es soll dabei als Chance begriffen werden, diese jeweiligen Vorteile auf die anderen Systeme übertragen zu können. Anhand der entsprechenden Analyse der Leitfaktoren kann aufgezeigt werden, dass die Strategie der Individualisierten Standardisierung und damit das bewusste ins Verhältnis setzen der drei Leitfaktoren gewinnbringend für die allgemeine Forschung sein kann.

Projektspezifische Gewichtung der Kriterien

Anhand der dargestellten Kriterien zur Nachhaltigkeitsbewertung von Betonkonstruktionen wurden die untersuchten Betontechnologien mit jeweils 1 bis 3 Punkten bewertet (→ 4.1.2 Kriterien zur Nachhaltigkeitsbewertung von Betonkonstruktionen). In den Abbildungen 86-88 ist im direkten Vergleich der drei Technologien die Bandbreite zum Erreichen der Punkte ausgewiesen und eine Bewertung vorgenommen. Daraus ist ablesbar, welches der drei betrachteten Systeme gemäß Analyse der Autorin den definierten Nachhaltigkeitsanforderungen des jeweiligen Kriteriums am meisten entspricht.

Kriteriengruppe Materialtechnologie (Abb.86):

Nachhaltigkeitsfaktor	Infraleichtbeton	Gradientenbeton	Aeroleichtbeton	Bewertungsmaßstäbe
Materialtechnologie	1. Nutzungsdauer			Lebensdauer in Jahren
	3 Lebensdauer > 50 Jahre	3 Lebensdauer > 50 Jahre	3 Lebensdauer > 50 Jahre	1 < 20 Jahre 2 > 20 < 50 Jahre 3 > 50 Jahre
	2. Reduktion Masse			Bauteilquerschnitt in cm
	1 45 cm (65 cm)	3 26 cm	2 37 cm	1 > 46 cm 2 > 40 < 45cm 3 < 39 cm
	3. Reduktion Zementanteil			gemittelte Rohdichte in kg/m³
	2 2,43+A3:K28 Mpa 637 kg/m³ (800 kg/m³)	1 1406 kg/m³	3 602 kg/m³	1 > 1000 kg/m³ 2 > 700 < 1000 kg/m³ 3 < 700 kg/m³
4. Substitution Zement			Zementklasse	
3 CEM III	2 CEM II	1 CEM I	1 CEM I 2 CEM II 3 CEM III	
5. Einfluss der Betonfestigkeit			mittlere Druckfestigkeit in Mpa	
2 10 MPa	3 42 MPa	1 2,43 MPa	1 < 5 Mpa 2 > 5 < 10 Mpa 3 > 10 Mpa	
6. Recyclinganteil			RC-Anteil	
3 erprobt	1 konzeptioniert	1 konzeptioniert	1 Konzeptioniert 2 Prototyp Status 3 Umsetzung	

Abb. 86: Synopse der Kriterien 1-6 mit Schwerpunkt auf die Materialtechnologie. Eigene Darstellung

Allen drei Betontechnologien haben den Vorteil der integrierten Wärmedämmung innerhalb der Monomaterialität gemein und können mit einer Lebensdauer von mehr als 50 Jahren in die Bewertung einfließen. Die drei monolithischen Betontechnologien grenzen sich daher von anderen Materialien, aber auch von mehrschichtigen Betonkonstruktionen mit separater Dämmschicht positiv ab. Ein exakter Vergleich der drei Betontechnologien ist schon aufgrund der geringfügig unterschiedlichen Zielsetzungen nicht deckungsgleich möglich. Die Forschung zum **Gradientenbeton** verfolgt das unter (→4.1.2.5 Einfluss der Druckfestigkeit) dargelegte Prinzip, den Wandquerschnitt stark zu minimieren, also die Masse eingesetzter Ressourcen zu reduzieren, und dafür einen Beton mit hoher Druckfestigkeit unter Verwendung eines höheren Zementanteils einzusetzen. Im Vergleich der Systeme ist der Materialquerschnitt mit 26cm am geringsten. Die funktionale Schichtung in zwei 6 cm starke Schalen und einen 14 cm dicken Kern unterstützt das Prinzip der Gradierung und weist dadurch einen gezielten Materialeinsatz auf. Zudem begünstigt die Bauteilschichtung den Lastabtrag, so dass sehr hohe Druckfestigkeiten von gemittelt 42 MPa erzielt werden können. Die gemittelte Rohdichte⁵⁶⁸ liegt mit 1406 kg/m³ relativ hoch und erfüllt mit der daraus resultierenden Wärmeleitfähigkeit nicht die Anforderungen an Außenwandbauteile nach GEG⁵⁶⁹. Die Forschung zum **Aeroleichtbeton** versucht konträr dazu, in Anlehnung an unbewehrte Systemwandelemente aus Porenbeton, einen mit bestehenden klassischen Wandsystemen vergleichbaren Materialquerschnitt zu realisieren. Die Druckfestigkeit liegt bei diesen Vergleichssystemen bei einer Rohdichte von nur 350 kg/m³ bei 1,8 MPa in der Anwendung als ungedämmte Außenwand.⁵⁷⁰ Der Aeroleichtbeton erreicht mit seiner gemittelten Rohdichte von 602 kg/m³ eine Druckfestigkeit von 2,43 MPa. Die Deckschichten dienen als Oberflächenveredelung und übernehmen eine Schutzfunktion, sie tragen jedoch keine Lasten ab. Die Forschungsleistung des **Infraleichtbetons** verfolgt das gleiche Ziel, mittels einer geringen gemittelten Rohdichte von 637 kg/m³ beim inhomogenen und 800 kg/m³ beim homogenen Querschnitt den Zementanteil zu reduzieren. Dies impliziert, dass der Zementeintrag durch die relativ geringe Trockenrohddichte niedriger ist, die Materialmatrix jedoch einen größeren Wandquerschnitt bedingt und damit insgesamt einen erhöhten Ressourceneinsatz und entsprechend auch Zementeinsatz zur Folge hat. Infolgedessen ist beim Infraleichtbeton positiv hervorzuheben, dass bereits der klinkereffiziente CEM III zum Einsatz kommt und ebenso Rezyklat-Anteile eingebunden werden. Auch Infraleichtbeton ist mit einer gemittelten Druckfestigkeit von bis zu 10 MPa im Vergleich zum Aeroleichtbeton relativ hoch ausgelegt. Infraleichtbeton ist bereits in unterschiedlichen

⁵⁶⁸ Die Rohdichte eines C25/30 beträgt 2400kg/m³. Ein Beton mit einer Rohdichte kleiner 800 kg/m³ gilt als Infraleichtbeton.

⁵⁶⁹ Nach Gebäude-Energie-Gesetz ist für Außenwandflächen nach Modernisierungsmaßnahmen ein U-Wert von 0,24 W/m²K einzuhalten. Nach dem Vereinfachten Nachweisverfahren für zu errichtende Wohngebäude ist ein U-Wert von 0,20 W/m²K für Außenwandflächen einzuhalten (§ 31 Absatz 1, Anlage 5).

⁵⁷⁰ Xella Porenbeton Schweiz AG, »Ytong Systemwand: Elementierte Massivbauweise in Bestzeit«, https://baustein.xella.ch/media/ressources/Ytong_Systemwandelemente_CH.pdf (abgerufen am 8. Mai 2024).

Rohdichteklassen erhältlich und kann dadurch auch an die Bauaufgabe angepasst werden.

Dieses Spannungsfeld zeigt, dass die Entwicklungen der verschiedenen Verfahrenstechniken aus unterschiedlichen Anforderungen heraus entstanden sind. Materialentwicklung und Fertigungsverfahren sind dabei eng miteinander verknüpft. Das Spritzverfahren der Gradientenbeton-Technologie schränkt beispielsweise die Herstellung einer geringeren Rohdichte ein, ist dafür aber zur effizienten und zielgerichteten Materialapplikation einer weniger leichten Betonmatrix geeignet. Die Einbindung eines Aerogels in den Fertigungsprozess konnte beim Spritzverfahren nicht realisiert werden. Die Aeroleichtbetontechnologie wurde entgegen der Herangehensweise beim Gradientenbeton dagegen genau aus der Zielsetzung heraus entwickelt, einen besonders leichten Schaumbeton innerhalb eines Endlosverfahrens zu extrudieren.

Es kann geschlussfolgert werden, dass die Materialentwicklung und damit die Festlegung des Verhältnisses aus Druckfestigkeit, Zementeinsatz und Masse in direkter Abstimmung mit der konkreten Bauaufgabe erfolgen sollte. Aus Sicht der Autorin wäre es ein interessanter Forschungsansatz, mit den spezifischen Stärken der jeweiligen Forschungsleistungen in den Austausch zu gehen. Entsprechend der von der Autorin geforderten komplementären Fertigung ([→2.2.4 Résumé: Forderung einer komplementären Fertigungsstrategie](#)) könnte beispielsweise der Co-Extrusionsprozess mit dem Spritzbetonverfahren des Gradientenbetons kombiniert werden, um so Lastabtrag und gleichermaßen Dämmfunktion optimal zu kombinieren. Ferner könnte die Materialmatrix der Schaum- und Deckschichten hinsichtlich der Einbindung von R-Anteilen und bezüglich des Zementeinsatzes verbessert werden. Die innerhalb der Aeroleichtbeton-Technologie erprobte Einbindung des Aerogels könnte vertieft werden mit Blick auf die Integration von Lignin basierten Aerogelen. Es ist zu prüfen, ob sich dadurch die Materialquerschnitte der Technologien optimieren lassen. So wie der Gradientenbeton und Infraleichtbeton ohne den Einsatz von Bewehrung erforscht werden könnten, wäre auch die automatisierte Implementierung einer Bewehrung beim Aeroleichtbeton weiterzuverfolgen. Die Darstellung weist auf, dass es im Bauwesen nicht nur einen Lösungsweg gibt. Vielmehr stehen vielfältige Mittel bereit, um Bauteile den spezifischen Anforderungen entsprechend zu konstruieren. Hierbei sind stets die verschiedenen multifaktoriellen Anforderungen gegeneinander abzuwägen, um eine maßgeschneiderte Lösung anzubieten.

Kriteriengruppe Konstruktion (Abb.87):

Nachhaltigkeitsfaktor		Infraleichtbeton	Gradientenbeton	Aeroleichtbeton	Bewertungsmaßstäbe
Konstruktion	7. Wiederverwendung von Komponenten	1 angedacht	1 angedacht	1 angedacht	Wiederverwendung 1 Konzeptioniert 2 Prototypstatus 3 Umsetzung
	8. Rückbaubarkeit/rev. Fügechnik	1 Modular-über Fügung keine Aussage	3 Einlegeanker	1 irreversibel Prototyp	Reversibilität 1 Konzeptioniert 2 Prototypstatus 3 Umsetzung
	9. Abfallreduktion	1 konzipiert	1 konzipiert	1 konzipiert	Abfallreduktion 1 Konzeptioniert 2 Prototypstatus 3 Umsetzung

Abb. 87: Synopse der Kriterien 7-9 mit Schwerpunkt auf die Konstruktion. Eigene Darstellung

Die konstruktive Fügung ist im Forschungsgebiet der **Gradientenbeton-Technologie** am weitesten entwickelt. Hier wurden bereits unterschiedliche Prinzipien getestet und in das Bauteil integriert und erprobt. Der Gradientenbeton betrachtet in unterschiedlichen Forschungen auch unterschiedliche Bauteile, wie Träger, Decken oder Schalen. Die Forschung zum Wandbauteil variiert bisher jedoch noch nicht in der Geometrie. Dies liegt darin begründet, dass die Fertigung auf einem vordefinierten Schaltisch ausgeführt wird. Dies impliziert, dass der Materialauftrag in hohem Maße automatisiert erfolgt und die Materialanordnung innerhalb des Bauteils entsprechend individualisiert wird. Die Paneeldimensionen dagegen sind jedoch bisher noch nicht adaptiv ausgebildet. Die Wandtafeln sind so konzipiert, dass sie jedoch als ganze Bauteile wiederverwendet werden könnten. Die **Infraleichtbeton-Technologie** ist sehr weit entwickelt mit Blick auf klassische Fügepunkte und setzt dabei durch das dämmende Monomaterial einen den wärmebrückenminimierten Anschluss um. Eine reversible Fügechnik wird innerhalb eines Forschungsprojektes weiterentwickelt, ist jedoch noch nicht veröffentlicht. Eine Stärke dieses Verfahrens liegt sicherlich in der Konzeptionierung unterschiedlicher Bauteilgeometrien in der Fassadengestaltung, die auf den Lastverlauf abgestimmt sind. In diesem Bereich wird eine Varianz in der Modularstellung abgebildet, die sich von den beiden anderen Systemen abhebt und Übertragungspotenzial bietet. Die **Aeroleichtbeton-Technologie** ist aufgrund der Fokussierung auf eine irreversible Fügung hinsichtlich einer Rückbaubarkeit im Prototypbau am wenigsten weit entwickelt. Hier besteht wie im Forschungsbericht bereits ausgewiesen weiterer Entwicklungsbedarf. Eine Stärke wird darin gesehen, zusätzliche Komponenten oder auch Schalelemente in den Fertigungsprozess zu integrieren, um eine Trockenfügung zu ermöglichen. Diese Potenziale sollten weiter ausgearbeitet werden, um eine Bauteilwiederverwendung zu ermöglichen.

Kriteriengruppe Fertigungstechnologie (Abb.88):

Nachhaltigkeitsfaktor	Infraleichtbeton	Gradientenbeton	Aeroleichtbeton	Bewertungsmaßstäbe
Fertigung				Produktionsstandort in km
				1 > 70 km
				2 < 20km > 70 km, regional
10. Transport und Regionalität	2 Betonfertigteilwerke	1 Spezialfabrik	3 Produktion auf grüner Wiese	3 < 5km, vor-Ort
			Maschinentechologie	
			1 Konzeptioniert	
			2 Prototypstatus	
			3 Umsetzung	
11. Vorfertigung und Produktivität	1 keine automatisierte Fertigung/Modul	3 Trocken-Naßspritzverfahren	2 Co-Extrusionsanlage im Prototypstatus	Ausschalungszeitraum
			1 nach Tagen	
			2 nach Stunden	
			3 nach Minuten	
12. Zeit und Prozess	1 nach Tagen	2 nach Stunden	3 Endlosprozess, nach 15 Min.	

Abb. 88: Synopse der Kriterien 10-12 mit Schwerpunkt auf die Fertigung. Eigene Darstellung

Abschließend werden die drei Kriterien im Kontext der Fertigung betrachtet. Die Fertigungsanlage des **Aeroleichtbetons** ist so konzipiert, dass durch die mobile, in Container integrierte Anlagentechnik, in nächster Nähe zum Bauplatz gefertigt werden kann. Dazu wären temporär geeignete Flächen anzumieten. Zukünftig könnte auch eine Kooperation mit Betonfertigteilwerken anvisiert werden, die die Anlagentechnik nutzen und so die Logistik und den Transport abwickeln könnten. Die Anlagentechnik zum **Gradientenbeton** ist bisher noch an eine Werksumgebung gebunden. Es wurde im vorangehenden Vergleich eine Transportdistanz von mehr als 70 km angenommen, da die Technologie noch sehr spezifisch und wenig verbreitet ist. Einen wichtigen Faktor zur Nutzbarkeit des **Infraleichtbetons** stellt die Tatsache dar, dass das Material bereits auf dem Markt erhältlich und mit Zulassung im Einzelfall zum Einsatz kommen kann. Zudem befindet sich die DAfStb-Richtlinie zur Regelung der unterschiedlichen ILC-Mischungen in der Ausarbeitung, so dass davon ausgegangen werden kann, dass zukünftig mehr Betonhersteller diesen Werkstoff in unterschiedlichen Rohdichten anbieten können. Damit minimieren sich auch die Transportwege und der lokale Ressourceneinsatz könnte erhöht werden.

Bei einem Vergleich des Maßes der Automatisierung, ist zu schließen, dass das Spritzverfahren zur Erstellung des **Gradientenbetons** am weitesten erprobt ist. Durch die Kombination der verschiedenen Düsen kann das Material äußerst zielgerichtet lokalisiert werden. Aufgrund des erforderlichen Drucks können jedoch nicht beliebige Mischungen erzeugt werden. Zudem ist die Technologie reinigungsintensiv. Die Anlagentechnik zur Fertigung des **Aeroleichtbetons** bietet ein hohes Maß an Automatisierung. Unterschiedliche Materialmischungen können automatisiert über die Mischmodule eingebracht werden. In der Forschung stand die Anlagentechnik nicht zur Weiterentwicklung zur Verfügung⁵⁷¹, und es besteht hier weiterer Forschungsbedarf. Dennoch konnte die Aeroleichtbetonmatrix maschinell gefertigt und bemessen werden. Der **Infraleichtbeton** ist aktuell noch nicht an einen automatisierten Prozess gekoppelt, sondern wird als Betonfertigteil nach klassischen

⁵⁷¹ Aufgrund des Insolvenzverfahrens vom 22.03.2018 der Firma Housefabrik GmbH innerhalb des laufenden Forschungsprojektes konnte die Anlagentechnik im Verlauf der Forschung nicht weiterentwickelt werden. Die Arbeitspakete des Kooperationspartner wurde von der Firma G.tecz Engineering GmbH übernommen.

Schalverfahren erstellt. Dies resultiert in Ausschalzeiten von mehreren Tagen. Der Fertigungsprozess bietet demnach beim Gradientenbeton mit einer Ausschalzeit von Stunden und dem Aeroleichtbeton mit einer Erhärtung nach bereits 15 Minuten erhebliche Vorteile durch die Produktionsgeschwindigkeit. Besonders die Aeroleichtbetontechnologie kann durch den Zeitgewinn eine erhebliche Produktivitätssteigerung bewirken⁵⁷².

Da die Kriterien untereinander und in Abhängigkeit der Bauaufgabe einen unterschiedlichen Einfluss haben, sollte jeweils projektspezifisch die Gewichtung der Kriterien festgelegt werden. Auch wenn es somit nicht zielführend erscheint, eine Gesamtaddition der vergebenen Punkte vorzunehmen, ist es interessant festzustellen, dass die Summe der erreichten Punkte bei jeder Technologie mit einer Gesamtpunktzahl von 20 bis 21 Punkten sehr nah beieinander liegt. Die ausgewogene Punkteverteilung belegt die Annahme, dass zwar jedes System Stärken und Schwächen aufweist (Abb. 89), insgesamt aber die geforderten Aspekte gewinnbringend in Relation gesetzt werden.

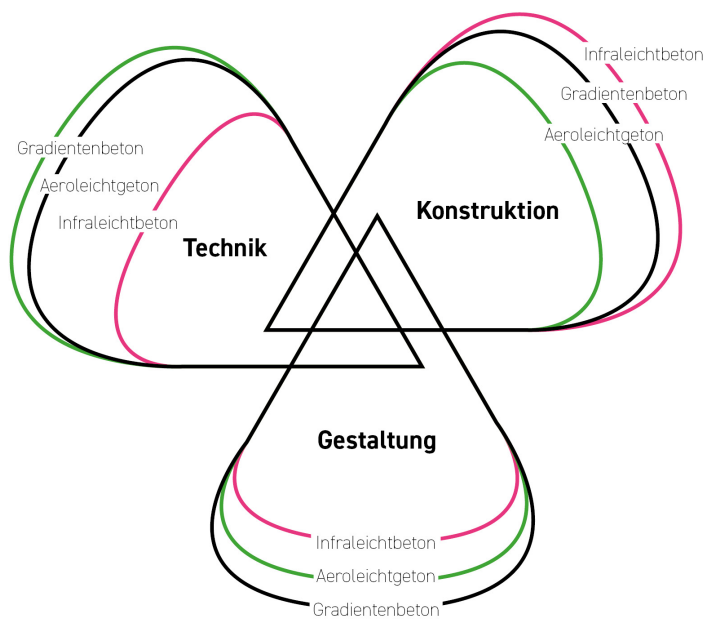


Abb. 89: Überlagerung der Betontechnologien nach Leitfaktoren. Eigene Darstellung

⁵⁷² Diese gesteigerte Produktivität kann nur umgesetzt werden, wenn damit ein der Fertigungsgeschwindigkeit entsprechendes logistisches Konzept verknüpft ist.

4.6 Annahmenkritik

Gewichtung der Kriterien

Die gleiche Gewichtung der sehr unterschiedlichen Kriterien wurde von der Autorin bewusst gewählt, um abzubilden, welche Forschung in welchem Bereich jeweils den Schwerpunkt legt oder bereits weit oder weniger weit entwickelt ist. Grundlegend zeigt sich, dass die Systeme die eingangs aufgestellten Kriterien für Wandsysteme abbilden. Da das gewählte Vorgehen einen großen Spielraum in der Anwendung lässt und damit einen möglichen Anlass zu Kritik bietet, sollte dies in einer anschließenden Forschungstätigkeit weiter ausdifferenziert werden. So bietet sich beispielsweise eine Diskussion im Rahmen einer Expertenkommission der drei Forschergruppen an, um Rückschlüsse zu diskutieren und Erfahrungen auszutauschen. Insbesondere bei der Gewichtung der Kriterien besteht weiterer Entwicklungsbedarf. Entsprechend wären Annahmen, die in einer solchen Kommission zu treffen wären, innerhalb eines notwendigen Aushandlungsprozesses abzusichern und die Vollständigkeit des Kriterien Bilds zu überprüfen. Die Kontakte zu den Forschenden wurden bereits im Vorfeld durch die Autorin initiiert und könnten in diesem Sinne intensiviert werden.

Ganzheitliche Bilanzierung

Die vorgeschaltete detaillierte Betrachtung zeigt, dass sich die Systeme in ihrer Wandstärke und Festigkeit und dem Einsatz von Bewehrung und Ressourcen unterscheiden. Eine vollumfängliche Bilanzierung aller Parameter ist im Umfang der Dissertation nicht gegeben und wird für die grundsätzliche Zielsetzung nicht als erforderlich betrachtet, wird jedoch als notwendig für eine vertiefende Forschungsleistung anvisiert. Bezogen auf den gesamten Lebenszyklus hinsichtlich Materialverbrauch, Produktion und Transport, konnte durch die Forschung des Infraleichtbetons, aber auch der Aeroleichtbetontechnologie innerhalb der Bilanzierung bestätigt werden, dass sich die CO₂-Bilanz im Vergleich zu anderen Wandkonstruktionen erheblich verbessert. Die nachstehende [Abbildung 90](#) veranschaulicht beispielsweise, dass die Aeroleichtbetonwand im Vergleich zu alternativen Wandkonstruktionen eine geringere Umweltbelastung aufweist.⁵⁷³

⁵⁷³ Betrachtet man den abiotischen Verbrauch an fossilen Brennstoffen, der auf die Ressourcenschonung hinweist, so liegen die Werte für die Aeroleichtbetonmischung mit 223 MJ am niedrigsten im Vergleich mit den betrachteten Wandaufbauten.

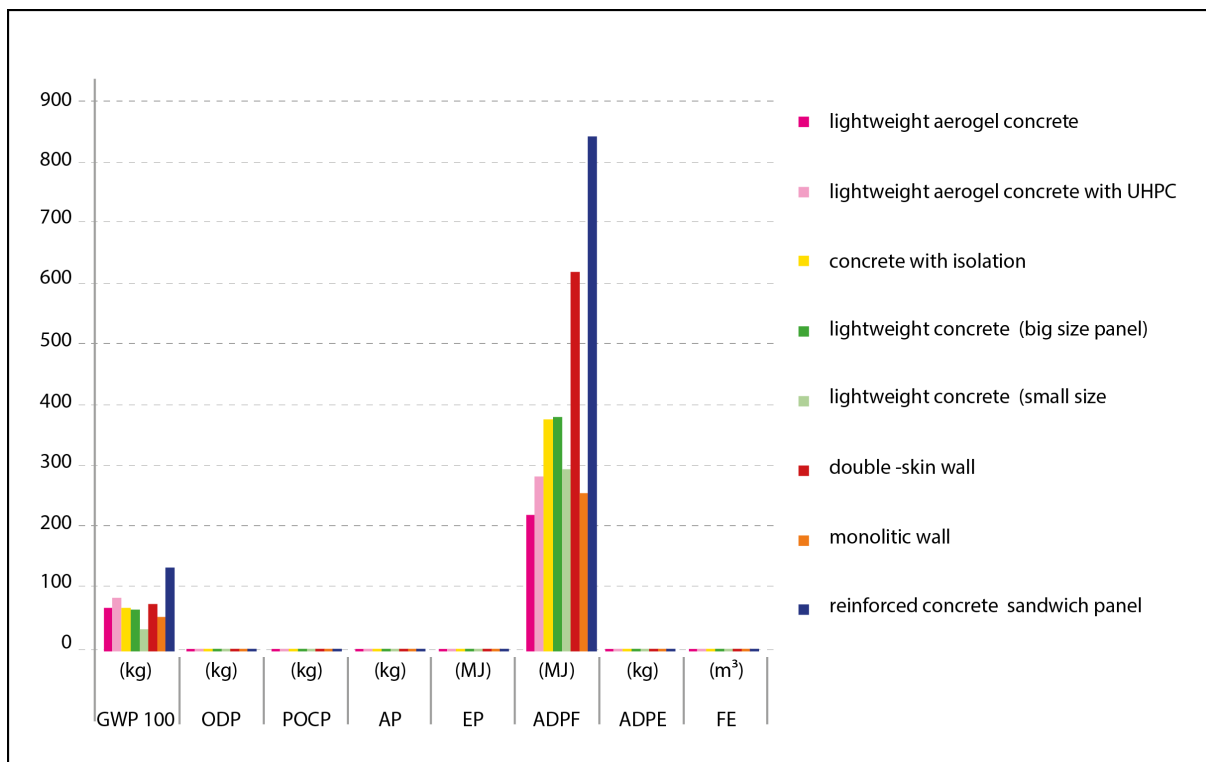


Abb. 90: Ökobilanzierung von Wandbauteilen im Vergleich im Rahmen der Aeroleichtbetonforschung

© TU Dortmund, Lehrstuhl Baukonstruktion, Juniorprofessur REB (Skottke)

Die Ergebnisse der Dissertation stützen sich auf Bilanzierungsergebnisse des durchgeführten Forschungsprojekts zum Aeroleichtbeton sowie die veröffentlichten Forschungsergebnisse der verglichenen Technologien. Als weiterführender Forschungsschritt, und um eine bessere Vergleichbarkeit der Bilanzierungsergebnisse der drei Betontechnologien zu erhalten, wäre es wünschenswert, die Bilanzierungsmethodik zum Forschungsprojekt Aeroleichtbeton um die Bilanzierungsergebnisse des Infraleichtbetons und des Gradientenbetons zu erweitern. Im Rahmen der Dissertation konnte diese Leistung nicht erbracht werden, sie wird jedoch als weiterer notwendiger Forschungsschritt betrachtet.

Zum einen würde dadurch eine tatsächliche Vergleichbarkeit der Bilanzierungsergebnisse geschaffen, zum anderen könnten anhand dieser Ergebnisse direkte Rückschlüsse zu Materialtechnologie, Konstruktion und Fertigung erfolgen. Auch eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, die bei der Forschung zum Gradientenbeton bereits vorliegt, würde die Vergleichbarkeit der Systeme erhöhen. Durch den übergeordneten Vergleich der Systeme werden nun Punkte offengelegt, die in der jeweiligen Forschung getestet oder optimiert werden könnten. Durch einen übergeordneten, interdisziplinären Austausch würde in einer Expertenkommission eine extreme Sensibilisierung für die einzelnen Faktoren der Verbesserung der Nachhaltigkeit geschaffen werden können.

Die unter Kapitel (→3.1.4 **Résumé: Kreislauffähigkeit durch digital gestützte Prozesse**) dargestellten theoretischen Potenziale zur Verbesserung der Nachhaltigkeit durch zirkuläre Bindung der neuartigen Schnittstellen entsprechend des Prinzips der Pyramidalen Zirkularität wurden aufgezeigt. Eine Berechnung von CO₂-Äquivalenten aus den sich ergebenden Vorteilen ist aktuell nicht möglich, stellt jedoch einen wesentlichen weiteren Forschungsbedarf dar. Ein erster Schritt wäre es, die dargestellten Bausteine im Sinne der pyramidalen Zirkularität anhand der Synopse der drei Betontechnologien in dieser Hinsicht an realen Projekten zu ermitteln und zu vervollständigen.

Im anschließenden Kapitel wird ein weiterer Aspekt, nämlich der Zusammenhang aus Flexibilität, konstruktiver Masse und Lebensdauer, als weiteres Potenzial von Betonkonstruktionen bei der Umsetzung der Strategie der Individualisierten Standardisierung vertieft.

Kapitel V | Ergebniszusammenführung

5.1 Potenziale anpassungsfähiger Betonkonstruktionen

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

5.1.1 Dauerhaftigkeit durch Flexibilität

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

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

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

⁵⁷⁵ Vgl. Geraedts 2016 (wie Anm. 198).

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

5.1.2 Emissionen im Zusammenhang zwischen Masse und Flexibilität

Folgend wird die Flexibilität von Gebäuden in Beziehung gesetzt zur eingebrachten konstruktiven Masse. Gosling und Tingley differenzieren vor dem Ziel einer Reduktion von Emissionen zwischen einem Gleichgewicht von Masse der Konstruktion und Flexibilität der Struktur. Sie unterscheiden dabei zwei Strategien, die kurzfristige sowie die langfristige Reduktion von CO₂-Emissionen: Bei der kurzfristigen Reduktion der Emissionen wird die Masse reduziert und Material mit geringerem CO₂-Fußabdruck verwendet. Bei der langfristigen Reduktion der Emissionen wird die Lebensdauer durch eine gesteigerte Flexibilität erhöht.⁵⁷⁷ „The results show that the short-term embodied carbon emissions can be reduced by limiting structural mass, rejecting rationalisation, and selecting materials with a lower embodied carbon content. They also show that the long-term embodied carbon emissions can be reduced by potentially extending the building’s lifespan through nearly doubling its flexibility. Most importantly, the results show that it is possible to reduce both the short- and long-term embodied carbon emissions of the structure simultaneously, so long as structural efficiency and flexibility are considered simultaneously at the primary design stage.“⁵⁷⁸

Viele der innerhalb der Dissertation vorgeschlagenen zwölf Kriterien zur Verbesserung der Nachhaltigkeit von Betonkonstruktionen beziehen sich vorrangig auf eine kurzfristige CO₂-Reduktion (→4.1.2 Kriterien zur Nachhaltigkeitsbewertung von Betonkonstruktionen). Beton hat darüber hinaus in Abgrenzung zu den meisten der im Bauwesen verfügbaren Materialien durch seine überdurchschnittlich lange Lebensdauer das Potenzial, bei entsprechender Planung Gebäudestrukturen generieren zu können, die flexibel auf Nutzungsänderungen eingehen können. Dieser Ansatz spiegelt sich entsprechend in den zwei Kriterien (→4.1.2.7 Wiederverwendung von vorgefertigten Komponenten) und (→4.1.2.8 Rückbaubarkeit und reversible Fügechnik) wider. Eine Berücksichtigung dieser Kriterien kann die dargelegte langfristige Reduktion von Emissionen bewirken.

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

⁵⁷⁶ Vgl. Heidrich u. a. 2017 (wie Anm. 196), S. 296.

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

⁵⁷⁸ Ebd.

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

5.1.3 Planerische Umsetzung der Strategie der Individualisierten Standardisierung

Die Tatsache, dass sich die aktuell angesetzten Maßnahmen zur Verbesserung der Nachhaltigkeit von Betonkonstruktionen oftmals auf die kurzfristige Reduktion von CO₂-Emissionen beziehen, resultiert aus der Notwendigkeit, eine schnelle Umweltwirkung herbei zu führen. Die entsprechenden Effekte sind zudem bilanzierbar und somit in Werten abbildbar. Überdies zeigen die eingangs in diesem Kapitel aufgezeigten Zusammenhänge von Gebäudeflexibilität, dass eine langfristige Reduktion der CO₂-Emissionen vergleichsweise schwierig umzusetzen ist und eine Ablesbarkeit der Wirksamkeit nicht rational und umgehend erfolgen kann. Jedoch sind gerade langfristige Maßnahmen vor dem Hintergrund der Kreislauffähigkeit bereits in der Planung von Betonkonstruktionen notwendig um diese dauerhaft und nutzungsflexibel auszulegen. Diesen Aspekt adressiert die Dissertation mit der Einführung des Prinzips der Pyramidalen Zirkularität und gibt eine Handlungsempfehlung zur Umsetzung der Kreislauffähigkeit. Tiel et al. fassen die Herausforderungen an die Entwurfsstrategie wie folgt zusammen: „Um Beton [darüber hinaus] möglichst lange im Kreislauf zu halten, muss die Designstrategie Langlebigkeit durch den Entwurf dauerhafter, nutzerflexibler und resilienter Bauwerke umgesetzt werden. Diese Designstrategien lassen sich nicht immer gemeinsam konfliktfrei umsetzen. So sind zerlegbare, standardisierte Bauprodukte häufig mit einer redundanten Materialnutzung verbunden, während materialeffiziente Strukturen nicht immer wiederverwendbar sind.“⁵⁸⁰ Auch wenn die Schaffung einer Flexibilität einen größeren Planungsaufwand, Überdimensionierung, erhöhte Kosten oder größeren Materialeinsatz – und damit verbunden eine Erhöhung der kurzfristigen Emissionen – mit sich bringen kann, kann sich die Auslegung über den gesamten Lebenszyklus gewinnbringend darstellen. „‘Over-designing’ was identified in 8/11 of the research papers analysed for the Flexibility Strategy Spreadsheet. This suggests that increasing the up-front embodied carbon cost of the case study design can be outweighed by the potenzial long-term benefits if the in-built flexibility is exploited during the building’s life.“⁵⁸¹

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

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

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

⁵⁸⁰ Thiel u. a. 2023 (wie Anm. 295), S. 266.

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

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

5.2 Defizite in Bezug auf die Umsetzung der Leitstrategie

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

5.2.1 Dysbalancen durch gegeneinander wirkende Parameter

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

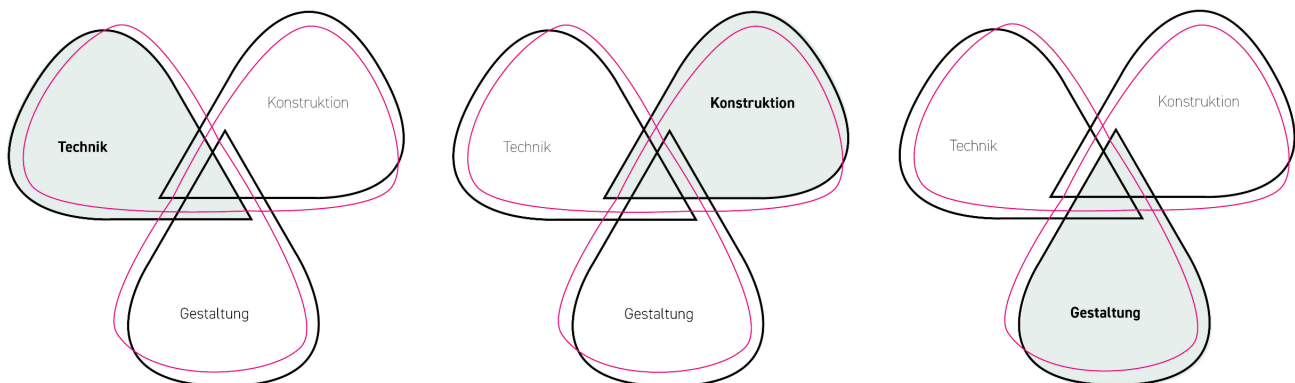


Abb. 91: Darlegung der Dominanz eines Leitfaktors im Gesamtgefüge. Eigene Darstellung

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

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

5.2.2 Fehlende Standards aufgrund der Notwendigkeit einer relatierten Gewichtung

Das Austarieren der Leitfaktoren, das stete Ins-Verhältnis-Setzen von kurzfristigen und langfristigen Maßnahmen zur CO₂-Einsparung und die Entscheidungsfindung zur Anwendung eines Maßes der Anpassungsfähigkeit bei der Umsetzung eines Systemansatzes stellen einen komplexen Prozess dar, der den Planerinnen und Planern bereits in der Entwurfsphase abverlangt wird (→5.1 Potenziale anpassungsfähiger Betonkonstruktionen). Dafür gibt es bisher jedoch kein standardisiertes Vorgehen. Geraedts fordert in einem vergleichbaren Zusammenhang einen einheitlichen Standard zur Bewertung der Flexibilität ein, ähnlich bestehender Verfahren zur Bewertung der Nachhaltigkeit und stellt dazu folgende Frage: "Would it be possible to develop a similar standard for the adaptive capacity of buildings?"⁵⁸²

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

⁵⁸² Geraedts 2016 (wie Anm. 198), S. 579.

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

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

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

5.2.3 Status der Anwendung einer Individualisierten Standardisierung

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

⁵⁸³ Thiel u. a. 2023 (wie Anm. 285), S. 272.

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

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

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

5.2.4 Forschungsförderung als Weichensteller

Gründe für eine zögerliche Transformation liegen mitunter an der unterschiedlichen Triebkraft der wesentlichen Akteurinnen und Akteure - der Industriepartner auf der einen Seite und der Forschungseinrichtungen auf der anderen Seite. Diese Brücke könnte geschlossen werden, indem auch Förderprogramme beide Seiten konsequent zusammenführen. „Angesichts des enormen, breitgefächert Forschungsbedarfs erscheint neben einer Erhöhung der Fördermittel die Entwicklung einer ressortübergreifenden Forschungsstrategie sinnvoll, um die Ressourcen möglichst zielgerichtet einsetzen und Synergien nutzen zu können. Benötigt werden insbesondere langfristig orientierte Programme, die Folgeprojekte ermöglichen und ausreichende Sachmittel umfassen, damit Demonstratoren und Prototypen realisiert werden können.“⁵⁸⁸ Aktuell sind in der Förderlandschaft in dem Sinne Mängel zu verzeichnen, als dass Förderprogramme, wie beispielsweise die Bundesförderung Serielle Sanierung⁵⁸⁹, explizit nur mittelständische Unternehmen fördern und auf die

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

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

⁵⁸⁶ Vgl. Voit 2023 (wie Anm. 302), S. 22.

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

⁵⁸⁸ Ebd.

⁵⁸⁹ Das Förderprogramm wurde aufgrund finanzieller Defizite aktuell von der Bundesregierung pausiert.

Automatisierung des produzierenden Gewerbes fokussieren. Kooperationen mit Hochschulen und Forschungseinrichtungen werden nicht forciert, obwohl diese Verknüpfung beider Partner angesichts der Komplexität der Herausforderungen zielführend wäre, um eine übergeordnete Betrachtungsweise und Innovationen zu ermöglichen. Aufgrund der Dringlichkeit, Lösungen für den Klimanotstand zu entwickeln und einen hohen Innovationsgehalt anzustreben, sollten Förderverfahren, die eine Kooperation zwischen Wirtschaft und Forschung im Blick haben, wie beispielsweise Zukunft Bau⁵⁹⁰, daher durch höhere Fördervolumen forciert werden. Durch kürzere Bearbeitungszeiten bei der Bewilligung könnte die Umsetzung der Forschungsprojekte darüber hinaus beschleunigt werden.

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

5.3 Fazit

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

5.3.1 Synthese der aufgestellten Theorien

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

1. Schritt: Erkennen der Leitfaktoren

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

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

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

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

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

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

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

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

2. Schritt: Zusammenführung der Leitfaktoren unter einer geeigneten Gewichtung

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

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

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

In Abgrenzung zu früheren, autoritären Standardisierungsprozessen⁵⁹¹ ergibt sich durch die Umsetzung einer Individualisierten Standardisierung für die Planenden aktuell wieder die Chance, als selbstbestimmte Schlüsselfiguren innerhalb eines demokratischen Prozesses fungieren zu können. Die damit verbundene zusammenführende Rolle muss erkannt und angenommen werden. Erst dadurch können die prognostizierten Ziele, erhöhte Effizienz (ökonomischer Fortschritt), architektonische Varianz (gestalterischer Fortschritt) und Kreislauffähigkeit (ökologischer Fortschritt), für das Bauwesen und insbesondere für Betonkonstruktionen erreicht werden (Abb. 2).

3. Schritt: Überführung der Leitfaktoren in den Kreislauf

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

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

5.3.2 Wertschätzung monolithischer Betonkonstruktionen

Forschungsleitendes Ziel der Arbeit ist es, Nachhaltigkeitspotenziale von Betonkonstruktionen zu identifizieren und zu bewerten, um schlussendlich eine Strategie zur Verbesserung der Nachhaltigkeit aufzuzeigen. Die sich ergebenden Vorteile bei der Umsetzung der Individualisierten Standardisierung können im [Kapitel IV](#) anhand von Betonkonstruktionen dargelegt werden. Untersuchungsgegenstand sind monolithische Wandkonstruktionen mit Dämmwirkung, die automatisiert gefertigt werden, eine konstruktive Anpassungsfähigkeit abbilden und eine gestalterische Varianz bereitstellen. Die zuvor resümierten Inhalte der Einbindung der Leitfaktoren in Form komplementärer Fertigung, adaptiver Komponenten sowie digitaler Planungswerkzeuge können im Vergleich der drei monolithischen Betontechnologien Infraleichtbeton, Gradientenbeton und Aeroleichtbeton abgebildet und Rückschlüsse auf die Notwendigkeit einer Gewichtung abgeleitet werden. Zudem werden anhand der aufgezeigten Verfahrens-, Konstruktions- und Entwurfsprinzipien am Beispiel der Betonforschung weitere Stärken hervorgehoben. Die Qualitäten des Wertstoffs Betons aufgrund seiner Dauerhaftigkeit und Tragfähigkeit rechtfertigen, gepaart mit dem richtigen Maß an Flexibilität, weiterhin dessen gezielte Verwendung. Im Gegenzug wird die klare Forderung gestellt, Materialien auf Basis ihres Nachhaltigkeitspotenzials einzusetzen ([→4.1.2.1 Nutzungsdauer](#)). Aus diesem Grund wurden die zwölf Kriterien zur Nachhaltigkeitsbewertung von Betonkonstruktionen aufgestellt ([→4.1.2 Kriterien zur Nachhaltigkeitsbewertung von Betonkonstruktionen](#)). Bei der Anwendung des Prüfrasters ist es relevant, besonders die langfristigen wie kurzfristigen Maßnahmen zur CO₂-Reduktion gegeneinander abzuwägen ([→5.1 Potenziale anpassungsfähiger Betonkonstruktionen](#)). Neben der Anpassung des Werkstoffes an sich und damit der Umsetzung kurzfristiger Verbesserungsmaßnahmen stellt der Baustoff Beton bezogen auf eine mögliche Lebenszyklusverlängerung und Wiederverwendung von Bauteilen und damit der Umsetzung langfristiger Verbesserungsmaßnahmen einen erheblichen Wert dar. Diesen gilt es durch optimierte Prozesse zu schützen und zu reaktiveren. Der synoptische Vergleich der drei Betontechnologien legt die Unterschiede und Schwerpunkte offen und zeigt an den zentralen Stellen Optimierungspotenziale auf. Dabei werden wesentliche Ansatzpunkte und Schlüsselfaktoren aufgezeigt, und es wird empfohlen, diese innerhalb einer Expertenkommission aus den drei Forschungsteams weiter zu erarbeiten ([→4.5 Zusammenfassung Synopse](#)). Die Arbeit befürwortet diese monolithischen Bauweisen und stellt klar heraus, welche Vorteile ihre Verwendung haben kann ([→1.2.3 Eingrenzung monolithische Betonbauweisen](#)). An dieser Stelle wird jedoch auch darauf hingewiesen, dass aus Sicht der Autorin darüber hinaus weitere Materialien und Bauweisen erforscht werden müssen, um eine umfassende Nachhaltigkeitsstrategie zu verfolgen. Im anschließenden [Kapitel VI](#) wird daher das Übertragungspotenzial der aufgestellten Theorien aufgezeigt.

5.3.3 Neuordnung der Entwurfsmethodik durch konstruktive und prozessuale Systematisierungsansätze

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

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

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

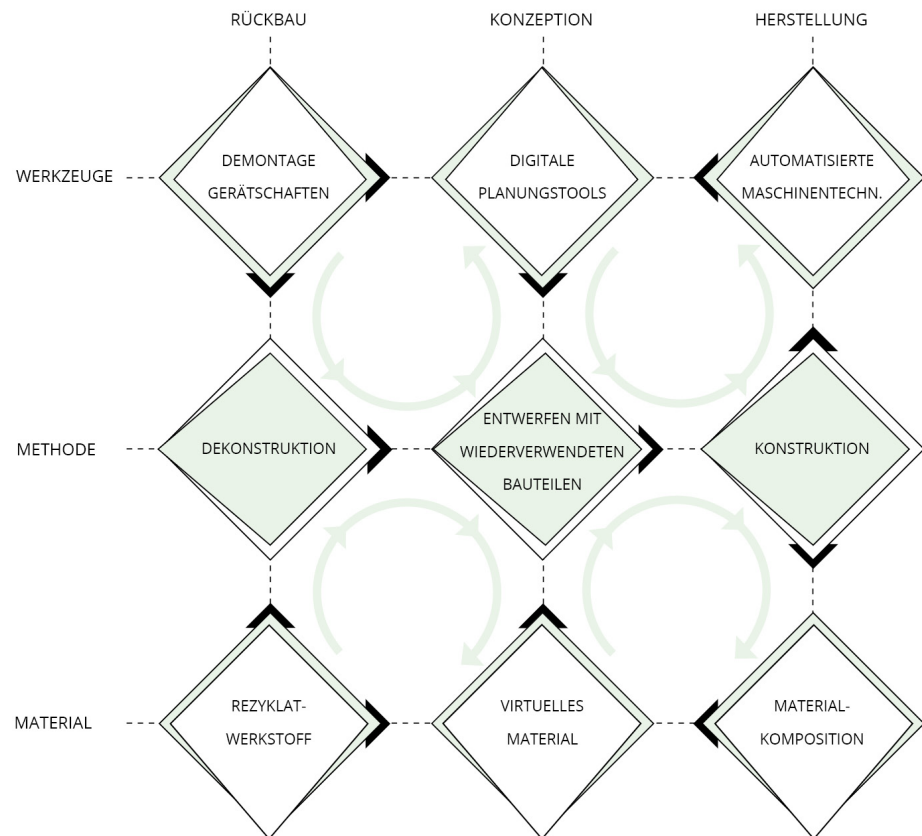


Abb. 92: Angepasste Entwurfsmethodik durch neue Rahmenbedingungen in der Materialverfügbarkeit. Eigene Darstellung

Experimentelle Forschung für konstruktiven Fortschritt

Die Kultur des Fortschritts lebt primär von der Qualität der Idee, die einen zukunftsorientierten Lösungsansatz für das konstatierte Problem bereitstellt. Ein solcher wird mit der vorgelegten Dissertation und den zwei gebildeten Theorien vorgestellt. Essenziell bei der Vielzahl der zusammengetragenen Aspekte ist, dass die aufgezeigten Forschungsergebnisse alsbald angewendet werden. Um dies zu erreichen, ist eine kooperative Forschung⁵⁹³ zwingend erforderlich. Durch die zentrale Stellung der Planerinnen und Planer als Inkubatoren für sozio-kulturelle, ökonomische und ökologische Herausforderungen kann die Architekturproduktion durch die dargelegte experimentelle Forschung konstruktiven Fortschritt generieren und bisher unbekannte Tätigkeitsfelder erschließen.

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

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

Kapitel VI | Forschungstransfer der Theoriebildungen

Die von der Autorin gewählte Methodik der Verknüpfung prozessualer und konstruktiver Betrachtungen zeigt im nun folgenden Forschungstransfer seinen Mehrwert dadurch, dass die Arbeit umfassende und breite Ansätze zur Übertragbarkeit bietet. Im Forschungsdesign wurde erläutert, dass die Dissertation stets allgemeingültige Kriterien aufstellt, die dann anhand des Betonsektors überprüft werden. Diese Herangehensweise erlaubt einen Transfer in eben diesen zwei Betrachtungsebenen. Zum einen wird eine Übertragbarkeit der Theorien auf anderen Bauweisen und Materialien möglich (→6.1 Übertragung der Leittheorie auf andere Bauweisen und Materialien). So wird zum einen anhand des aktuell laufenden Forschungsprojektes MZD die Übertragung auf hybride Konstruktionen geleistet. Zum anderen wird eine Übertragbarkeit der ausgemachten Potenziale von Betonkonstruktionen auf den Umgang mit Bestandsstrukturen aufgezeigt (→6.2 Übertragung der Leittheorie auf den Anwendungsfall Bestandsstrukturen). So wird anhand des Forschungskonzeptes ReActivate die Individualisierte Standardisierung in eine Sanierungsstrategie überführt.

6.1 Übertragung der Leittheorie auf andere Bauweisen und Materialien

Die eingangs vorgenommene Eingrenzung der Untersuchungsebenen auf monolithische Betonkonstruktionen (→1.2.3 Eingrenzung monolithische Betonbauweisen) kann ohne weiteres nochmals erweitert werden, indem die Arbeitsthese in andere Bauweisen beziehungsweise Materialien übersetzt wird. Um dem Klimanotstand entgegenzuwirken, muss die Forschungslandschaft breit aufgestellt sein und der Transfer in die Praxis erleichtert werden. Die zwischenzeitliche Rohstoffknappheit und schwankende Preise für den Rohstoff Holz machen bewusst, dass es mit Blick auf unvorhersehbare Entwicklungen sinnvoll ist, in Alternativen zu denken und eine Unabhängigkeit der Märkte zu schaffen. Die oft gegeneinander ausgespielten Baustoffe Holz und Beton werden nach Einschätzung der Autorin im Bausektor zukünftig beide ihre Daseinsberechtigung haben.

Naheliegender ist im ersten Schritt eine Übertragung auf den natürlichen Werkstoff Lehm, der aufgrund seiner ähnlich fließfähigen Materialeigenschaften Parallelen zu Betonwerkstoffen hinsichtlich seiner damit einhergehenden Formbarkeit und Verarbeitbarkeit, aber auch seiner Massivität bietet. Es böte sich daher an, in einem weiteren Schritt Lehmwerkstoffe entsprechend der synchronen Umsetzung der drei Leitfaktoren zu untersuchen und dadurch Nachhaltigkeitspotenziale zu erschließen.

Mit Blick auf andere für das Bauwesen wichtige Baustoffe, wie beispielsweise Holz, soll im Folgenden deutlich gemacht werden, inwiefern sich in Abhängigkeit des Werkstoffs die materialtypischen Prozesse ändern. Da Holz, anders als Beton, kein fließfähiger Werkstoff ist, stehen im Holzbau andere Fertigungsverfahren zur Verfügung. Dennoch können die aufgestellten Anforderungen an eine komplementäre Fertigungsstrategie (→2.2.4), die Umsetzung adaptiver Systeme (→2.3.4) sowie die Einbindung assoziativer Planungswerkzeuge (→2.4.4) auch für diese Bauweisen zielführend sein.

Anhand des nachfolgend dargestellten Forschungsprojekts „Modular – Zirkulär – Digital (MZD)“, welches auf die Stärkung der hybriden Bauweise abzielt, werden weitere Übertragungsmöglichkeiten reflektiert. Die Ausführungen beschreiben, was dieses Projekt zur Umsetzung des Ansatzes beitragen kann.

6.1.1 Forschungsprojekt: hybride Systembaukonstruktion „Modular – Zirkulär - Digital (MZD)“

Anhand des Forschungsprojekts „Digital - Modular – Zirkulär (MZD)“⁵⁹⁴, das unter der Leitung von Frau Prof. Dr.-Ing. J. Albus, der Juniorprofessur Ressourceneffizientes Bauen (REB) beziehungsweise nach Berufung an die Hochschule Bochum der Professur Entwerfen und Konstruieren. Nachhaltiges Bauen (EKNB) durchgeführt wird, soll reflektiert werden, dass eine pyramidale, zirkuläre Anwendung der drei Leitfaktoren ebenfalls eine zielführende Handlungsstrategie zur Verbesserung der Nachhaltigkeit hybrider Konstruktionen abbildet. Bei dem Forschungsprojekt handelt es sich um eine kooperative Forschung zwischen dem Unternehmen Design-to-Production als Experten digitaler Planungsmethoden, dem ausführenden Unternehmen Solid.Modulbau GmbH mit Expertise in der Realisierung modularer Gebäude und der TU Dortmund als hochschulgebundene Forschungseinrichtung aus dem Lehrgebiet des ressourceneffizienten Bauens.⁵⁹⁵ Durch den Ruf von Frau Prof. Jutta Albus an die Hochschule Bochum wurde das Forschungsprojekt ab 09/2023 an die HSBO übertragen. Die Mitarbeiterkonstellation konnte konstant bleiben. Bei der Entwicklung der Forschungsergebnisse sind neben Prof. Dr.-Ing. Albus maßgeblich die Autorin sowie Gavin Hope und Nurcan Akca⁵⁹⁶ beteiligt.

Während bei der vorangegangenen Forschung zum Aeroleichtbeton die Leitidee der Individualisierten Standardisierung an einem monolithischen Betonbauteil erprobt wurde, kann anhand der aktuellen Forschung MZD die Übertragung der Strategie auf den Gebäudemaßstab und die Entwicklung einer hybriden Bauweise erfolgen.

Das Ziel, ein zukunftsfähiges Konzept für den individualisierten Systembau zu entwickeln, basiert auf einer ganzheitlichen Optimierung von Planungs- und Ausführungsprozessen, Konstruktions- und Herstellungsweisen sowie des Materialeinsatzes. Auf der Grundlage einer mineralischen Konstruktionsmethode soll innerhalb einer integralen Planung die Ressourceneffizienz des Baustoffs Beton über den gesamten Lebenszyklus dargestellt werden. Dabei wird angestrebt, den Anteil von Beton im Gesamtgefüge maßgeblich zu reduzieren, und nur dort einzusetzen, wo die spezifische Leistungsfähigkeit des Betons gefordert ist. Daher stellt die Forschungsleistung die Entwicklung von vorgefertigten Bauteilen oder Baugruppen in Hybridbauweise in den Fokus. Damit verbunden soll sich eine höhere gestalterische Varianz und konstruktive Flexibilität ergeben. Dies soll zur Verbesserung der nachhaltigen Nutzung von Gebäuden beitragen⁵⁹⁷, indem eine höhere Akzeptanz, eine entsprechend längere Nutzung und flexible Umnutzung

⁵⁹⁴ DBU „Modular – Zirkulär – Digital: Individualisierbare Standardisierung – Ganzheitlicher Modulbaukasten zum Erreichen nachhaltiger Planungskonzepte und hoher planerischer Flexibilität“ (10/20222-09/2024).

Die dargelegten Forschungsergebnisse stellen einen Zwischenstand zum Zeitpunkt des dritten Zwischenberichtes dar.

⁵⁹⁵ Die Inhalte dieses Kapitels basieren zum Teil auf Textbausteinen der Antragstellung des DBU Forschungsprojektes zu welcher die Autorin beigetragen hat, sowie auf der Veröffentlichung zum Beitrag der Konferenz „sustainable built environment (sbe22)“, an welcher die Autorin vorgetragen hat.

⁵⁹⁶ Cengiz Kabalakli war als WHF im Zeitraum von 10/2022-09/2023 ebenfalls an dem Projekt beschäftigt.

⁵⁹⁷ Albus/Hollmann-Schröter 2022 (wie Anm. 156), S. 5.

ermöglicht werden. Aus einer längeren Nutzungsdauer kann resultieren, dass Baustoffe langfristig gebunden bleiben.

Ausgehend von einem adaptiv-assoziativen Bausystem werden in einer Planungsleistung vorgefertigte, dreidimensionale Raummodule aus Boden und Wand mit Tafелеlementen und linearen Elementen systematisch kombiniert (Abb. 93) und im Hinblick auf eine automatisierte Produktion baukonstruktiv entwickelt. So kann eine große Bandbreite an Lösungsansätzen für mehrgeschossige Gebäudetypologien bereitgestellt werden.⁵⁹⁸

Die Forschung adressiert wie unter Kapitel ([->5.1 Potenziale anpassungsfähiger Betonkonstruktionen](#)) erläutert, dass zum einen eine kurzfristige Reduktion von CO₂-Emissionen bei der Bilanzierung relevant ist. Dies soll im Wesentlichen durch die Reduktion des Volumenanteils der Betonbauteile um ungefähr 50 Prozent erreicht werden sowie durch die spezifische Materialentwicklung. Zum anderen soll eine langfristige Reduktion von CO₂-Emissionen durch die Implementierung eines Flexibilisierungsfaktor umgesetzt werden. Dieses Gleichgewicht kann durch die Kombination - Modul und Tafel - erreicht werden.

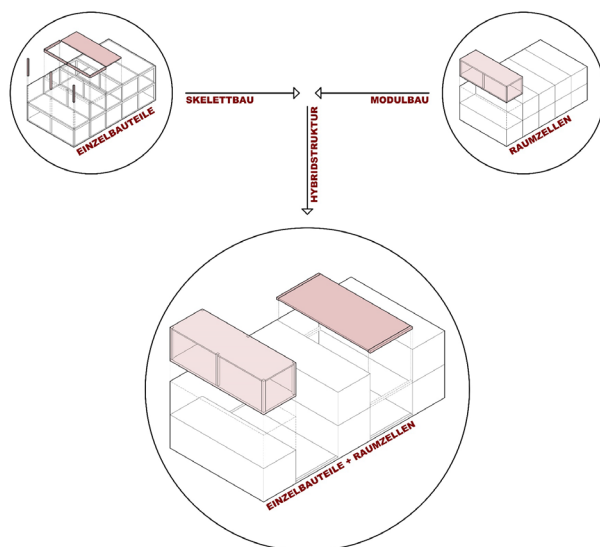


Abb. 93: Kombination von zweidimensionalen Bauteilen und dreidimensionalen Raummodulen © HSBO (Hope)

⁵⁹⁸ Ebd.

6.2 Übertragung der Leittheorie auf den Anwendungsfall Bestandsstrukturen

In den bisherigen Ausführungen der Dissertation wurde erläutert, wie die Verknüpfung der drei Leitfaktoren in der Strategie der Individualisierten Standardisierung den Rahmen für konkrete Projekte und Fortschritte zur Verbesserung der Nachhaltigkeit im Bauwesen bilden kann. Dabei wurde die Bedeutung des kreislaufgerechten Bauens hervorgehoben und methodisch an die aufeinander aufbauende Pyramidale Zirkularität gekoppelt. All diese Ausführungen beziehen sich bis hierher vorwiegend auf Nebausysteme. Vor dem Hintergrund des zum Großteil unsanierten Gebäudebestands in Deutschland soll der Blick auf Sanierungskonzepte erweitert werden, der einen wesentlichen Faktor zum Erreichen der Klimaziele darstellt. Die Bestandsgebäude befinden sich in einem energetisch schlechten Zustand, laut Statistik betrifft das die Gebäude, die vor 1995 gebaut wurden und das sind ungefähr 80 Prozent der Gebäude in Deutschland.⁵⁹⁹ Im Jahr 2023 wurde eine Sanierungsquote von etwa 1 Prozent erreicht. Um die gesetzten Ziele eines klimaneutralen Gebäudebestands bis 2050 zu erreichen, müsste folgendes eintreten: „Hierfür ist nach gängigen Berechnungen eine Erhöhung der energetischen Sanierungsrate von jährlich etwa 1 % auf 2 bis 3 % erforderlich, um den Bestand einmal komplett in 50 bzw. 40 Jahren zu sanieren.“⁶⁰⁰ Bisher bestehen hier unzulängliche Lösungsansätze, um den eingangs erläuterten Mängeln entgegenzuwirken. Stricker et al. sehen zudem folgende Verschiebung „Die Wertschätzung der Bestandsbauten wird ansteigen: Was bisher als Steckenpferd der Denkmalpflege und des Heimatschutzes abgetan werden konnte, gewinnt künftig an Unterstützung aus sehr rationalen ökologischen und ökonomischen Überlegungen.“⁶⁰¹ Bei einer Bestandsaufnahme wird deutlich, dass bestehende Gebäude- und Infrastrukturen oft nicht anschlussfähig sind, um die geforderte Kreislauffähigkeit von Strukturen zu realisieren. Aktuell erfolgt eher der Abriss, nach dem Prinzip „Downcycling vor Wiederverwendung“. Aufgrund der aktuellen Mangellage an Rohstoffen, Energie und Wohnraum gewinnen Bestandsstrukturen jedoch maßgeblich an Bedeutung. „Nicht unerwartet zeigte sich einmal mehr, dass die effizienteste Form, Bauteile wiederzuverwenden, darin besteht, Bauwerke gar nicht erst abzureißen, sondern umzubauen und neu zu nutzen. Ein Großteil der Grauen Energie von Gebäuden liegt in ihrer Primärstruktur. Dies allein sollte uns dazu bewegen, mit dem Bestand einen sorgsameren Umgang zu pflegen.“⁶⁰² Im Folgenden wird dargelegt, wie die Strategie der Individualisierten Standardisierung auch als geeignete Methode für den Umgang mit Bestandsstrukturen bieten kann.

⁵⁹⁹ Vgl. Statistische Ämter des Bundes und der Länder: Wohngebäude nach Baujahr, Ergebnisse der Gebäude- und Wohnungszählung 2011, <https://www.statistikportal.de/de/wohngebäude-nach-baujahr> (Zugriff am: 30. Mai. 2023).

⁶⁰⁰ Vgl. Stefan Rein (Hg.), *Datenbasis zum Gebäudebestand. Zur Notwendigkeit eines besseren Informationsstandes über die Wohn- und Nichtwohngebäude in Deutschland*, Bonn 2016 (BBSR-Analysen kompakt 2016,9), S. 5, http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/AnalysenKompakt/2016/ak-09-2016-dl.pdf?__blob=publicationFile&v=2.

⁶⁰¹ Sondegger 2021 (wie Anm. 392), S. 287.

⁶⁰² Ebd., S. 286.

6.2.1 Forschungskonzept: Sanierungsverfahren ReActivate

Die projektierte Forschungsleistung ReActivate⁶⁰³ wird herangezogen, um darzulegen wie eine Umsetzung der Strategie der Individualisierten Standardisierung auf ein neuartiges Sanierungsverfahrens übertragen werden kann. Die Innovation steckt in der übergeordneten Herangehensweise, die durch eine Zusammenführung der Leitfaktoren Technik, Konstruktion und Gestaltung signifikant optimierte Betonkonstruktionen zur Anwendung im Sanierungssektor ermöglicht.⁶⁰⁴

Der ganzheitliche Lösungsansatz der Forschungs idee verfolgt die Bereitstellung eines systematisierten Verfahrens für die energetische Sanierung von Bestandsbauten. Die Materialtechnologie in Form einer mineralischen, hochdämmenden Vorsatzschale soll so konzipiert werden, dass sie ohne notwendige Gerüststellung und schalungsfrei bedarfsgerecht appliziert werden kann. Diese lokal verortete Produktion und automatisierte Montage einer maßgeschneiderten mineralischen Dämmschicht schont Ressourcen bei Arbeitskräften, Herstellung, Abfall und Energieverbrauch. Damit kann die projektierte Forschungsleistung eine Verbesserung für den Klimaschutz erzielen. Der projektierte Forschungsansatz soll mittels digitaler Planungswerkzeuge und der Etablierung digitaler Schnittstellen eine neue Dimension für die Bestandssanierung mit erheblicher Breitenwirkung erreichen. Der Begriff des digitalen Materials, wie unter (→3.1.3.3 Schnittstelle Gestaltung – Technik: digitales Material) erläutert, könnte mit diesem Forschungskonzept in die Bauausführung transferiert werden. Die Anlagentechnologie könnte so erstmalig eine standardisierte, aufgrund der Einbindung von Robotik jedoch gleichzeitig individuelle Sanierungsstrategie für den Gebäudebestand liefern.

⁶⁰³ „Re-Activate - Automatisiert. Adaptiv. Kreislaufgerecht

Serielles Sanierungsverfahren für den Gebäudebestand mit RC-Aeroleichtbeton“ ist eine maßgeblich eigens vorangetriebene Forschungs idee, die als Kooperationsprojekt bei dem Förderprogramm KMU innovativ eingereicht, jedoch abgelehnt wurde. Geplante Kooperationspartner waren die Fa. G.tecz Engineering GmbH, Concrete Robotics GmbH und Surap.

⁶⁰⁴ Die folgenden textlichen und bildlichen Inhalte, zu denen die Autorin maßgeblich selbst beigetragen hat, basieren auf den Inhalten der Antragstellung, die gemeinsam mit Frau Prof. Dr.-Ing. J. Albus entwickelt wurde.

6.3 Ausblick eines ganzheitlichen Szenarios

Mit den Erkenntnissen der Dissertation wagt die Autorin einen Blick auf ein Zukunftsszenario. Eine exemplarische Abbildung des gesamten pyramidalen Settings der kreislauffähigen Erstellung und des Urban Mining gerechten Rückbaus kann abschließend wie folgt zusammengefasst werden:

Um die Anforderungsparameter einer Bauaufgabe in den Planungsprozess zu überführen, miteinander in Beziehung zu setzen, und diese schließlich für die Planerinnen und Planer zugänglich zu machen, wird über ein digitales Entwurfswerkzeug ein Projekt im Sinne eines ganzheitlichen Prozesses vorbereitet (→digitales Planungswerkzeug). Dieses wird über die einzelnen Leistungsphasen bis hin zur (teil-)automatisierten Fertigung entwickelt. Eine neuartige, digital gestützte Nachhaltigkeit auf Basis digitaler Planungstools führt zu effizienteren Bauweisen, denn auf diese Weise können Konstruktions- und Fügetechniken prozessual adaptiert und Materialien gezielter eingesetzt und funktionsoptimiert verwendet werden (→digitales Material). Dies bedingt eine nennenswerte Verbesserung der Ressourceneffizienz von Beginn an.

Neben einer integralen Planungsentwicklung ist der Einsatz von Fertigungsverfahren, die den digitalen Transfer von der Planung in die automatisierte Produktion ermöglichen, eine wichtige Komponente, die eine effiziente Gebäuderealisierung fördert (→digitales Detail). Neben intelligenten Fertigungsverfahren muss eine ganzheitliche Planung auf den Materialverbrauch und damit auf dessen Funktionalität fokussieren, um den Verbrauch an Rohstoffressourcen zu reduzieren und die Wiederverwertbarkeit zu erleichtern. Daher ist ein Fokus auf Zirkularität im gesamten Ressourcenmanagement und den begleitenden Prozessen erforderlich.

Darüber hinaus muss für eine kreislauffähige Bauwirtschaft der kontinuierliche Übergang zum Rückbau von Beginn an mitgedacht werden. Durch eine reversible Fügetechnik kann nach der Lebensdauer ein geordneter Rückbau erfolgen (→digitale Zerlegung). Systematisierte Bauteile können dabei besser in ein Materialkataster zurückfließen und mithilfe digitaler Planungswerkzeuge wieder in neuen Entwurfsprozessen Anwendung finden (→digitaler Neuentwurf). Die kontinuierliche Anbindung von Prozessen, zuerst die Vermittlung und später der Zugriff zu bestehenden Materialkatalogen (→digitale Kataster), wird durch eine umgesetzte digitale Nachhaltigkeit unterstützt.

Kapitel VII | Anhang

7.1 Glossar

Adaptivität/Adaptive Struktur

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.⁶⁰⁵ Innerhalb der Dissertation wird Adaptivität auch als Synonym zum Begriff Anpassungsfähigkeit verwendet. 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.

Aerogel

Betrachtungsgegenstand innerhalb der Dissertation sind die Silikat-Aerogele in Form von Aerogel Pulver. Das hochdämmende Granulat mit einer geringen Wärmeleitfähigkeit existiert in verschiedenen Korngrößen und ist hydrophob. „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.“⁶⁰⁶ Silicat-Aerogele sind nicht giftig.

Anpassungsplanung

Die Möglichkeit zur Anpassungsfähigkeit gebauter Strukturen muss in den meisten Fällen bereits in der Konzeptionierung von den Planerinnen und Planern bedacht werden. Vgl. (→2.3.1.5 Erfolgsfaktor gezielte Anpassungsplanung).

Downcycling

Downcycling bezeichnet ein Recycling von Abfällen, die im weiteren Lebenszyklus auf niedrigerer Stufe als der ursprünglichen Verwendung zum Einsatz kommen.

Einstofflichkeit

⁶⁰⁵ Vgl. Heidrich u. a. 2017 (wie Anm. 196), S. 287.

⁶⁰⁶ Nils Mölders, »Aerogel-Dämmstoff für die Bauindustrie und den Leichtbau«, 2024, <https://www.umsicht.fraunhofer.de/de/projekte/aerogel-daemmstoff-neuer-herstellungsprozess.html> (abgerufen am 7. Juli 2024).

Eine Einstofflichkeit bezeichnet ein System, das aus Teilen derselben Stoffgruppe besteht. „In den letzten Jahren wurden [nun] Bauweisen erprobt, die die Rückkehr zur Einstofflichkeit möglich erscheinen lassen: Gebäude aus leistungsfähigen Leichtbetonen (Dammbeton) oder aus Massivholzsystemen zeigen, wie Tragkonstruktion und bauphysikalische Anforderungen wieder in einem Material zusammengeführt werden können. Sie entwickeln durch die Ablesbarkeit der Konstruktion darüber hinaus auch besondere ästhetische Qualitäten. Das Recycling der verwendeten Baustoffe wird dabei erleichtert – allerdings nur bei weitgehendem Verzicht auf Zusatzstoffe. Der Rückbau gestaltet sich bei einer einstofflichen Konstruktion in der Regel einfach und damit auch wirtschaftlich vorteilhaft, da eine aufwendige manuelle Demontage und Sortierung nur in geringem Maße oder gar nicht erforderlich ist.“⁶⁰⁷

Entflechtung

Entflechtung bezeichnet die separate Konstruktion und Anordnung von beispielsweise Bauteilen und/oder technischen Komponenten entsprechend ihrer Funktion und Leistungsfähigkeit. So können Komponenten entsprechend unterschiedlicher Lebenszyklen rückgebaut oder ersetzt werden. „Konsequente Systemtrennung geniert die Fähigkeit zur Anpassung an zukünftige Nutzungsszenarien.: [...].“⁶⁰⁸

Extrudierbarkeit

Der Begriff kommt aus dem Lateinischen „extrudare“ und bedeutet hinausstoßen. Im Betonbau bezeichnet die Extrudierbarkeit eine rheologische Eigenschaft und damit das Fließverhalten und die Verformbarkeit des Frischbetons zum Zeitpunkt des Austretens aus dem Druckkopf. Bei der Extrusion wird ein Material durch eine formgebende Öffnung, den Extruder herausgedrückt.⁶⁰⁹ So wird die Konsistenz des Betons an den Prozess der Extrusion angepasst und auf die Düsenöffnung eingestellt.

⁶⁰⁷ Markus Binder und Petra Riegler-Floors, »Einstoffliche Bauweisen«, in: Annette Hillebrandt u. a. (Hg.), *Atlas Recycling. Gebäude als Materialressource*, München 2021 (*Edition Detail*), S. 102–107, hier S. 102.

⁶⁰⁸ Eva Stricker u. a. (Hg.), *Bauteile wiederverwenden. Ein Kompendium zum zirkulären Bauen*, Zürich 2021, S. 236.

⁶⁰⁹ Vasilic 2023 (wie Anm. 82), S. 12.

Life Cycle Assessment (LCA)

LCA ist der englische Begriff für die Durchführung einer Ökobilanz. Dabei werden alle potenziellen Umweltwirkungen und die Energiebilanz von Produkten, Verfahren und Dienstleistungen innerhalb einer systematischen Analyse über den gesamten Lebensweg erfasst. „Das prinzipielle Vorgehen bei der Durchführung einer Ökobilanz setzt sich zum einen aus der Analyse der Stoff- und Energieströme des gesamten Produktsystems inklusive aller beteiligten Prozesse entlang des Lebensweges eines Produktes zusammen und zum anderen aus der systematischen Erfassung der Emissionen in Luft, Wasser und Boden sowie der Natur entnommene Ressourcen, die in der sogenannten Sachbilanz abgelegt werden. Im Anschluss erfolgt im Rahmen der »Wirkungsabschätzung« die Auswertung der potenziellen Umwelteffekte wie Treibhauseffekt, Sommersmog, Versauerung, Überdüngung etc.“⁶¹⁰

Materialgerechtigkeit

Eine Materialgerechtigkeit bezeichnet den Einsatz eines einzigen Materials in Abstimmung auf dessen Leistungsfähigkeit mit Bezug auf den Einsatz. „Konstruktion, die aus den intrinsischen Qualitäten eines Materials oder Bauteils entwickelt sind.“⁶¹¹

Recycling

Recycling bezeichnet die Rückführung von Baustoffen und -teilen in den Stoffkreislauf, die zuvor als Abfall eingestuft wurden. „Kommt es dabei zum Formverlust, wird der Begriff Verwertung verwendet, differenziert in Wiederverwertung (gleicher Produktionsprozess) und Weiterverwertung (anderer Produktionsprozess mit minderwertigerem Ergebnis). Analog dazu wird der Begriff Wiederverwendung als erneute Verwendung zum gleichen Zweck definiert, Weiterverwertung dagegen als erneute Verwendung zu einem anderen, minderwertigeren Zweck.“⁶¹²

Urban Mining

„Urban Mining bezieht sich nicht allein auf die Nutzung der innerstädtischen Lager, sondern befasst sich vielmehr mit dem gesamten Bestand an langlebigen Gütern. Darunter fallen beispielsweise Konsumgüter wie Elektrogeräte und Autos, aber auch Infrastrukturen, Gebäude, Ablagerungen und Deponien. Wir sind umgeben von einem vom Menschen gemachten Lager in Höhe von über 50 Milliarden Tonnen an Materialien. Noch wächst dieses anthropogene Lager Jahr für Jahr um weitere zehn Tonnen pro Einwohner an. [...]In Hinblick auf einen zunehmenden internationalen Wettbewerb um die knappen Rohstoffe der Erde kann die Nutzung von Sekundärrohstoffen aus heimischen Quellen dazu beitragen, die natürlichen Ressourcen der

⁶¹⁰ Robert Ilg, »Ökobilanzierung: Eine Methodik für den gesamten Lebensweg«, 2024, <https://www.ibp.fraunhofer.de/de/kompetenzen/ganzheitliche-bilanzierung/methoden-ganzheitliche-bilanzierung/oekobilanzierung.html>.

⁶¹¹ Stricker u. a. 2021 (wie Anm. 608), S. 236.

⁶¹² Ebd., S. 341.

Erde zu schonen und so die Lebensgrundlagen bestehender und zukünftiger Generationen zu sichern.“⁶¹³

Urban-Mining-Index

Der Urban-Mining-Index bezeichnet die von Rosen entwickelte Systematik zur quantitativen Bewertung der Kreislaufkonsistenz von Baukonstruktionen in Neubauplanungen. Bei diesem Vorgehen werden „über den gesamten Lebenszyklus alle eingehenden Materialein und alle daraus entstehenden Wert- und Abfallstoffe berechnet und nach den Qualitätsstufen ihrer Nachnutzung bewertet“. ⁶¹⁴ Dabei wird in Materialien, die in offenen Kreisläufen geführt werden unterschieden. Diese gehen nur zur Hälfte in die Bewertung ein. Die Materialien, die in geschlossenen Kreisläufen geführt werden, gehen hingegen voll in die Bewertung mit ein.⁶¹⁵

⁶¹³ Ittershagen 2017 (wie Anm. 352), S. 1–2.

⁶¹⁴ Vgl. Rosen 2021 (wie Anm. 368).

⁶¹⁵ Rosen 2022 (wie Anm. 356), S. 89.

7.2 Literaturverzeichnis

- 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).
- Albus, J. 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, Nr. 1 (2022), S. 1–10.
- Albus, Jutta, Prefabrication and automated processes in residential construction, Berlin 2018.
- Albus, Jutta, »Stand der Technik«, in: Jutta Albus u. a. (Hg.), Systematisierte Planungs- und Bauprozesse. Hintergründe, Strategien und Potenziale industrieller Vorfertigungstechnologien, Stuttgart 2021, S. 101–159.
- Albus, Jutta u. a., Systematisierte Planungs- und Bauprozesse. Hintergründe, Strategien und Potenziale industrieller Vorfertigungstechnologien, Stuttgart 2021.
- Albus, Jutta und Hans Drexler, »Prefab MAX - Die Potentiale vorgefertigter Konstruktionssysteme im kostengünstigen Wohnungsbau«, in: Barbara Schönig, Justin Kadi und Sebastian Schipper (Hg.), Wohnraum für alle?!, Bielefeld 2017, S. 298–332.
- Albus, Jutta und Kirsten E. Hollmann-Schröter, »Aeroleichtbetontechnologie – Implementierung eines Systemgedankens für den Wohnungsbau«, in: punktum.betonbauteile, Nr. 06 (2020), S. 29–31.
- Albus, Jutta und Kirsten E. Hollmann-Schröter, »Innovative Aerogel-Technologie zur energetischen Optimierung von Betonbauten und Effizienzsteigerung von Bauabläufen: Hybrid-Betonsystem für den Wohnungsbau«, in: BWI - BetonWerk International, Nr. 04 (2020), S. 32–50.
- Albus, Jutta und Kirsten Elisabeth Hollmann-Schröter, »Prototypical approach for an individualized standardization process in the context of intelligent construction and automation«, in: Architecture, Structures and Construction, 3, Nr. 2 (2023), S. 275–287.
- Angst, Marc, Guido Brandi und Eva Stricker, »Fallstudie K.118: Entwurf und Konstruktion«, in: Eva Stricker u. a. (Hg.), Bauteile wiederverwenden. Ein Kompendium zum zirkulären Bauen, Zürich 2021, S. 213–264.
- Anton, Ana u. a., »Fast Complexity: Additive Manufacturing for Prefabricated Concrete Slabs«, in: Freek P. Bos u. a. (Hg.), Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication. Digital Concrete 2020, Cham 2020 (RILEM bookseries Volume 28), S. 1067–1077.
- Baukreisel e.V., »Baukreisel: Kollektiv für Transforamtion und Gestaltung«, <https://baukreisel.org/> (abgerufen am 23. April 2024).
- Bedarf, Patrick u. a., »Foamwork: Challenges and strategies in using mineral foam 3D printing for a lightweight composite concrete slab«, in: International Journal of Architectural Computing, 21, Nr. 3 (2023), S. 388–403.
- Bergmann, Christian, Prozesse entwerfen. Eine Strategie für die Zukunft des Bauens, Berlin/Boston 2019.
- Bergmeister, Konrad, Frank Fingerloos und Johann-Dietrich Wörner (Hg.), »Beton-Kalender:: Nachhaltigkeit, Digitalisierung, Instandhaltung.«, unter Mitw. von Frank Dehn und Udo Wiens, Berlin/München/Düsseldorf 2022.
- Bertalanffy, Ludwig von, General system theory. Foundations, development, applications, 17. Aufl., New York, N.Y 2009.
- Bertram, Nick u. a., »Modular construction: From projects to products«, New York, 2019, <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/business%20functions/operations/our%20insights/modular%20construction%20from%20projects%20to%20products%20new/modular-construction-from-projects-to-products-full-report-new.pdf> (abgerufen am 27. Dezember 2023).
- Bertschek, Irene, Thomas Niebel und Jörg Ohnemus, »Beitrag der Digitalisierung zur Produktivität in der Baubranche«, 2019.
- Bhooshan, Shajay u. a., »The Striatum bridge«, in: Architecture, Structures and Construction, 2, Nr. 4 (2022), S. 521–543.
- Biermann, Julian u. a., »Nachhaltig bauen mit Beton: Klimaeffizient. Ressourcenschonend. Energiesparend«, <https://betonshop.de/media/wysiwyg/PDF/Nachhaltig-bauen-mit-Beton-2023.pdf> (abgerufen am 7. April 2024).
- Binder, Markus und Petra Riegler-Floors, »Einstoffliche Bauweisen«, in: Annette Hillebrandt u. a. (Hg.), Atlas Recycling. Gebäude als Materialressource, München 2021 (Edition Detail), S. 102–107.
- Biscopig, Michaela, Diethelm Boslod und Markus Brunner, »Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung - R-Beton«, in: Zement-Merkblatt Betontechnik, S. 1–8.
- Blanco, Jose Luis u. a., »Making modular construction fit«, 2023, <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/making-modular-construction-fit#/> (abgerufen am 28. Dezember 2023).
- Blandini, Lucio, 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.
- 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.

- Bos, Freek P. u. a. (Hg.), »Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication: Digital Concrete 2020«, Cham 2020 (RILEM bookseries Volume 28).
- Braun, Steffen u. a., FUCON 4.0 - Nachhaltiges Bauen durch digitale und parametrische Fertigung, Stuttgart 2019 (Forschungsinitiative Zukunft Bau F 2995).
- Building Material Scout GmbH, »Building Material Scout: Ihre Service-Plattform für nachhaltige Bauprodukte«, <https://building-material-scout.com/> (abgerufen am 21. April 2024).
- Bund Deutscher Architektinnen und Architekten BDA, »Glossar: Typisierung, Vorfertigung, serielles Bauen«, in: der architekt, Nr. 2 (2019), S. 22–23.
- 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.
- 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).
- Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, »ÖKOBAUDAT: Informationsportal Nachhaltiges Bauen«, <https://www.oekobaudat.de/> (abgerufen am 18. April 2024).
- Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, »Ökobilanz: 2.4 Lebenszyklusphase«, <https://www.wecobis.de/en/service/sonderthemen-info/gesamttext-oekobilanz-zwischen-den-zeilen-info/grundlage-der-oekobilanz.html> (abgerufen am 21. April 2024).
- Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, »Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)«, 2023, <https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/bewertungssystem/> (abgerufen am 18. April 2024).
- Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, »Das Qualitätssiegel«, 2024, <https://www.qng.info/qng/> (abgerufen am 18. April 2024).
- Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, »Zukunft Bau: Fördern Fordern Entwickeln«, 2024, <https://www.zukunftbau.de/> (abgerufen am 18. Mai 2024).
- Buswell, R. A. u. a., »A process classification framework for defining and describing Digital Fabrication with Concrete«, in: Cement and Concrete Research, 134 (2020), S. 106068.
- Carpo, Mario, »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.
- Caviezel, Nott, »www.bauteilclick.ch: nachhaltige Bauteilbörsen« (2009).
- Chusid, Jeffrey M., »Preserving the Textile Block at Florida Southern College«, New York 2009, S. 1–44.
- Claypool, Mollie u. a., »Print«, in: dies. (Hg.), Robotic building. Architecture in the age of automation, Munich 2019 (Edition Detail), S. 38–47.
- Concular GmbH, »Concular: Messbar kreislaufgerecht in die Zukunft«, <https://concular.de/> (abgerufen am 21. April 2024).
- Conrads, Ulrich und Manfred Sack (Hg.), »Otto Steidle«, unter Mitw. von Otto Steidle, Braunschweig 1985 (Reißbrett 3).
- Constanzi, Chris Borg, »History – The development of additive manufacturing in construction«, in: Oliver Tessmann u. a. (Hg.), Print architecture!, Baunach, Germany 2022, S. 29–50.
- Cornelsen Verlag GmbH, »Duden: System«, <https://www.duden.de/rechtschreibung/System> (abgerufen am 21. April 2024).
- Dehn, Frank und Udo Wiens, »Beton«, in: Konrad Bergmeister (Hg.), Beton-Kalender 2022. Schwerpunkte: Instandsetzung, Beton und Digitalisierung, unter Mitw. von Frank Fingerloos und Johann-Dietrich Wörner, Newark 2022 (Beton-Kalender Ser), S. 2–156.
- Deutsche Bundesstiftung Umwelt, »Vorfabrikation von Fertigteilen aus Infraleichtbeton für den Geschosswohnungsbau«, 3. April 2024, https://www.dbu.de/projekt_32997/01_db_2848.html.
- Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen - DGNB e.V., »Das wichtigste zur DGNB Zertifizierung«, <https://www.dgnb.de/de/zertifizierung/das-wichtigste-zur-dgnb-zertifizierung/ueber-das-dgnb-system> (abgerufen am 17. April 2024).
- Deutsche Umwelthilfe, Architects for Future, »Gebäudeabriss vermeiden und Bauen im Bestand fördern: Gemeinsames Forderungspapier von A4F und DUH«, 2022, https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Projektinformation/Energieeffizienz/Gebaeude/Geb%C3%A4udeabriss_e/A4F_DUH_Forderungspapier_Abrissvermeidung_08122022_final.pdf (abgerufen am 28. Dezember 2023).

- DFG Deutsche Forschungsgemeinschaft, »SPP 2187: Adaptive Modulbauweisen mit Fließfertigungsverfahren - Präzisionsschnellbau der Zukunft«, <https://gepris.dfg.de/gepris/projekt/402702316?context=projekt&task=showDetail&id=402702316> (abgerufen am 28. April 2024).
- Diehl, Daniela, »Ein Haus in 140 Stunden: 3D-Druck auf dem Bau«, 2023, <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/digitales/3d-drucker-groesstes-haus-europas-100.html> (abgerufen am 4. Mai 2024).
- Eckert, Piet und Wim Eckert (Hg.), »Ontologie der Konstruktion: Raumwirkung in der Architektur«, Zürich 2024.
- EPEA GmbH - Part of Drees & Sommer, »Gemeinsam die Welt von morgen gestalten Mit dem Cradle to Cradle-Pionier und Gemeinsam die Welt von Morgen gestalten mit dem Innovationspartner _EPEA« (abgerufen am 19. April 2024).
- Europäische Kommission, »CORDIS - Forschungsergebnisse der EU: Horizon 2020 Reusing precast concrete for a circular economy«, 29. Mai 2024, <https://cordis.europa.eu/project/id/958200/de>.
- 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).
- Frampton, Kenneth, »The Text-Tile Tectonic«, in: Robert McCarter (Hg.), Frank Lloyd Wright. A primer on architectural principles, New York, N.Y. 1991, S. 124–149.
- Fraunhofer UMSICHT, »Nils Mölders über den Hochleistungs-Dämmstoff: »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).
- Fricke, Marc, »Bioaerogele«, <https://www.aerogel-it.de/> (abgerufen am 13. April 2024).
- 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_serieller-und-modularer-wohnungsbau-2.0_rahmenvereinbarung.pdf (abgerufen am 29. Dezember 2023).
- 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>.
- Geier, Sonja, Dissertation Technische Universität München 2018.
- Geraedts, Rob, »FLEX 4.0, A Practical Instrument to Assess the Adaptive Capacity of Buildings«, in: Energy Procedia, 96 (2016), S. 568–579.
- Gillott, Charles u. a., »Developing Regenerate: A circular economy engagement tool for the assessment of new and existing buildings«, in: *Journal of Industrial Ecology*, 27, Nr. 2 (2023), S. 423–435.
- Glock, Christian, »Digitalisierung im konstruktiven Bauwesen«, in: *Beton- und Stahlbetonbau*, 113, Nr. 8 (2018), S. 614–622.
- Goldmann, Marion, »Betondruck: Deutschlands erstes Wohnhaus aus dem 3D-Drucker«, in: DAB Deutsches Architektenblatt.
- Gosling, S. und D. D. Tingley, »Optimising the Balance Between Flexibility and Structural Mass for Lower Short- and Long-Term Embodied Carbon Emissions in Mass Housing«, in: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1078, Nr. 1 (2022), S. 1–11.
- Hack, Norman 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.
- Hamburg University of Technology, Institute of Thermal Separation Processes, »Tailor Made Nanoporous Material for Advanced Applications«, <https://www.tuhh.de/v8/research/fields-of-research/nanoporous-materials> (abgerufen am 13. April 2025).
- Hannemann, Christine, Die Platte. Industrialisierter Wohnungsbau in der DDR, Braunschweig/Wiesbaden 1996.
- Haselsteiner, Edeltraud (Hg.), »Robuste Architektur Lowtech Design«, München 2022.
- Heidelberg Materials AG, »Heidelberger Infralichtbeton: Der Beton für monolithische Bauweise«, 9. April 2024, <https://www.heidelbergmaterials.de/de/beton-und-fliessestrich/produkte/spezialbetone/infralichtbeton>.
- Heidrich, Oliver u. a., »A critical review of the developments in building adaptability«, in: *International Journal of Building Pathology and Adaptation*, 35, Nr. 4 (2017), S. 284–303.
- Heinlein, Frank, *Recyclable by Werner Sobek*. German/ English edition, Stuttgart 2019.
- Heinz, Pascal, Michael Herrmann und Werner Sobek, *Herstellungsverfahren und Anwendungsbereiche für funktional gradierte Bauteile im Bauwesen*, Stuttgart 2012 (Forschungsinitiative ZukunftBau F 2811).
- Heisel, Felix und Dirk E. Hebel (Hg.), »Urban Mining und kreislaufgerechtes Bauen: Die Stadt als Rohstofflager«, Stuttgart 2021.

- Helmus, Manfred und Holger Kesting, »BIM zur Optimierung von Stoffkreisläufen im Bauwesen«, in: Annette Hillebrandt u. a. (Hg.), Atlas Recycling. Gebäude als Materialressource, München 2021 (Edition Detail), S. 32–33.
- Hemmerling, Marco und Boris Bähre, Building Information Modeling – Theorie und Praxis. Integrale Architekturplanung, Basel 2019.
- Hemmerling, Marco und Boris Bähre, Informierte Architektur. Building Information Modelling für die Architekturpraxis, Basel 2020.
- Hemmerling, Marco, Jens Böke und Frank Püchner, »Digitales Entwerfen und Konstruieren«, in: Produktentwicklung Architektur. Visionen, Methoden, Innovationen, Basel 2013, S. 140–147.
- Hemmerling, Marco und Luigi Cocchiarella, Informed Architecture. Computational Strategies in Architectural Design, Cham 2018.
- Heuer, Andreas, »Ortbetondecken vs. Spannbeton-Fertigdecken: Auswirkung auf die Ökobilanz eines Gebäudekomplexes«, 2023, https://www.dw-systembau.de/downloads.html?file=files/downloads/Nachhaltigkeit/HTW%20Berlin_%C3%96kobilanzierung_Ortbetondecken%2Bvs.%2Bspannbeton-Fertigdecken.pdf (abgerufen am 7. April 2024).
- Hillebrandt, Annette u. a. (Hg.), »Atlas Recycling: Gebäude als Materialressource«, München 2018 (Edition Detail).
- Hillebrandt, Annette, »Architekturkreisläufe – Urban-Mining-Design«, in: Annette Hillebrandt u. a. (Hg.), Atlas Recycling. Gebäude als Materialressource, München 2021 (Edition Detail), S. 10–15.
- Hillebrandt, Annette, »Kreisläufe schließen«, in: Felix Heisel und Dirk E. Hebel (Hg.), Urban Mining und kreislaufgerechtes Bauen. Die Stadt als Rohstofflager, Stuttgart 2021, S. 49–64.
- Hillebrandt, Annette und Johanna-Katharina Seggewies, »Recyclingpotenziale von Baustoffen«, in: Annette Hillebrandt u. a. (Hg.), Atlas Recycling. Gebäude als Materialressource, München 2021 (Edition Detail), S. 58–101.
- Hnilica, Sonja, Der Glaube an das Große in der Architektur der Moderne. Großstrukturen der 1960er und 1970er Jahre, Zürich 2018.
- Hollmann-Schröter, Kirsten, »Innovation durch neue Planungswerkzeuge und Vorfertigungstechnologien«, in: Jutta Albus u. a. (Hg.), Systematisierte Planungs- und Bauprozesse. Hintergründe, Strategien und Potenziale industrieller Vorfertigungstechnologien, Stuttgart 2021, S. 161–196.
- Hollmann-Schröter, Kirsten E., »Gefügte Räume«, in: Piet Eckert und Wim Eckert (Hg.), Ontologie der Konstruktion. Raumwirkung in der Architektur, Zürich 2024, S. 214–239.
- Horx, Matthias, Oona Horx-Strathern und Christiane Varga (Hg.), »50 Insights: Zukunft des Wohnens«, unter Mitw. von Matthias Horx, Oona Horx-Strathern und Christiane Varga, Frankfurt 2017 (Trendstudie).
- Hückler, Alexander, »Forschungsaustausch Infralichtbeton«, unter Mitw. von Kirsten Elisabeth Hollmann-Schröter 2024, 8. April 2024.
- Ilg, Robert, »Ökobilanzierung: Eine Methodik für den gesamten Lebensweg«, 2024, <https://www.ibp.fraunhofer.de/de/kompetenzen/ganzheitliche-bilanzierung/methoden-ganzheitliche-bilanzierung/oekobilanzierung.html>.
- 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>.
- International Energy Agency (IEA), World Business Council on Sustainable Development (WBCSD), Cement Sustainability Initiative, »Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry«, 2018, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/cbaa3da1-fd61-4c2a-8719-31538f59b54f/TechnologyRoadmapLowCarbonTransitionintheCementIndustry.pdf> (abgerufen am 5. August 2023).
- Ittershagen, Martin, Urban Mining. Rohstoffquellen direkt vor der Haustür, unter Mitw. von Martin Ittershagen 2017.
- Kainz, Joachim, Zimmermann, Gregor, Die Zukunft des Bauens, Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft, Interview von Hollmann-Schröter, Kirsten E., Albus, Jutta, digital, 7. Februar 2024.
- Kehl, Christoph, Matthias Achternbosch und Christoph Revermann, Innovative Technologien, Prozesse und Produkte in der Bauwirtschaft. Endbericht zum TA-Projekt, Berlin 2022 (Arbeitsbericht / TAB, Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag Nr. 199).
- Klinkenbusch, Claudia, »Perfektionierte Herstellung: Konrad Wachsmann und die unvollendete Revolution«, in: der architekt, Nr. 02 (2019), S. 38–43.
- Kloft, Harald u. a., »Reinforcement strategies for 3D-concrete-printing«, in: Civil Engineering Design, 2, Nr. 4 (2020), S. 131–139.
- Kloft, Harald u. a., »TRR 277: Additive manufacturing in construction«, in: Civil Engineering Design, 3, Nr. 4 (2021), S. 113–122.
- Kocijan, Matijas, »Digitalisierung im Bauwesen«, in: ifo Schnelldienst, 71, Nr. 01 (2018), S. 42–45, <https://www.ifo.de/publikationen/2018/aufsatz-zeitschrift/digitalisierung-im-bausektor> (abgerufen am 18. Januar 2024).

- Koren, Yoram, The global manufacturing revolution. Product-process-business integration and reconfigurable systems, Hoboken, N.J. 2010 (Wiley series in systems engineering and management).
- Kossak, Florian (Hg.), »Otto Steidle: bewohnbare Bauten: = Otto Steidle: structures for living«, Zürich 1994.
- Kovaleva, Daria u. a., »Rezyklierbare Sandschalungen – Auf dem Weg zur Kreislaufproduktion leichter Betonbauteile«, in: Beton- und Stahlbetonbau, 117, Nr. 5 (2022), S. 333–342.
- Krippner, Roland, »Der Systemgedanke in der Architektur - Bausysteme aus Stahlbeton von Angelo Mangiarotti«, in: Beton- und Stahlbetonbau, 94, Nr. 11 (1999), S. 476–482.
- Küpfer, C. u. a., »Environmental and economic analysis of new construction techniques reusing existing concrete elements: two case studies«, in: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1078, Nr. 1 (2022), S. 12013.
- Kyjanek, Ondrej u. a., Mensch-Roboter-Kooperation im Holzbau: Potentiale für die Vorfertigung, Stuttgart 2020 (Forschungsinitiative Zukunft Bau F 3180).
- Lanwer, Jan-Paul u. a., »Jointing Principles in AMC—Part 1: Design and Preparation of Dry Joints«, in: Applied Sciences, 12, Nr. 9 (2022), S. 4138.
- Läufer, Jonas und Conrad Riesch, WPF - MATERIAL EINSATZ WANDEL. Optimal Reuse Case (ORC), Dortmund 2023.
- Lemcke, Julia, »BIM-Datenaustausch: Wie er in der Praxis gelingt«, 3. November 2022, <https://www.bauen-aktuell.eu/bim-datenaustausch-wie-er-in-der-praxis-gelinkt-a-84c72431887f5cad6c39ef058e9b2fcf/> (abgerufen am 28. April 2024).
- Losch, Edward, »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.
- Lösch, Claudia und Philip Rieseberg, »Infraleichtbeton: Entwurf, Konstruktion, Bau«, hg. von Mike Schlaich und Regine Leibinger, Stuttgart 2018.
- Lüking, Tim (Hg.), »Monolithisch bauen: Eine Bestandsaufnahme«, Graz 2017.
- Madaster Germany GmbH, »madaster – die Plattform: für Bestandserhalt, nachhaltige Planung und Industrial ReUse«, <https://madaster.de/> (abgerufen am 21. April 2024).
- Mangiarotti, Angelo, »Industrialisiertes Bauen und Nutzerbeteiligung = Construction industrialisée et participation de l'utilisateur = Industrialized building and user participation«, in: Bauen + Wohnen = Construction + habitation = Building + home :, 31, Nr. 6 (1977), S. 225–227.
- Manny, Agemar u. a., »Modularisierung für den skalierbaren Betonbau: Baukastenentwicklung und Schnittstellenkonzeption«, in: Betonwerk international, 2023, Nr. 4, S. 34–35.
- Manny, Agemar, Lothar Stempniewski und Albert Albers, »Adaptive Modulbauweisen mit Fließfertigungsverfahren: 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).
- Mark, Peter u. a., »Vom Handwerk zur individualisierten Serienfertigung«, in: Bautechnik, 98, Nr. 3 (2021), S. 243–256.
- materialnomaden gmbh, »Materialnomaden: circular design & architecture«, <https://www.materialnomaden.at/about/> (abgerufen am 21. April 2024).
- McDonough, William und Michael Braungart, Cradle to cradle. Remaking the way we make things, New York, NY 2002.
- Mechtcherine, Viktor u. a., CONPrint3D-Ultralight - Herstellung monolithischer, tragender Wandkonstruktionen mit sehr hoher Wärmedämmung durch schalungsfreie Formung von Schaumbeton, Stuttgart 2020 (Forschungsinitiative Zukunft Bau F 3181).
- Melenbrink, Nathan 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.
- Mendgen, Anna, »Bauen mit großformatigen Elementen aus Infraleichtbeton (ILC) – Drei konstruktive Entwurfsvarianten für den Geschosswohnungsbau«, in: Bautechnik, 99, Nr. 6 (2022), S. 441–451.
- Mendgen, Anna, »Entwicklung von Prototypen für Balkone und Loggien aus Infraleichtbeton (ILC) unter Berücksichtigung bauphysikalischer Aspekte und der Anforderungen aus der Fertigung«, in: Bautechnik, 100, Nr. 5 (2023), S. 239–249.
- Mendgen, Anna und Mike Schlaich, »Infraleichtbeton für den Geschosswohnungsbau – Zusammenfassung und Vergleich des Forschungsstands zu GWP und thermischen Speichereffekten«, in: Bauphysik, 43, Nr. 5 (2021), S. 335–346.
- Meyer, Lars, »Green means lean – der Weg zur „Klimaneutralen Betonbaustelle“ – Nachhaltiges Bauen mit Beton heißt auch konsequent Lean Construction«, in: Beton- und Stahlbetonbau, 117, Nr. 5 (2022), S. 366–374.
- Mittelstädt, Jan, Zur Einleitung lokaler Lasten in dünnwandige Bauteile aus ultrahochfestem Faserfeinkornbeton mittels Implantaten; 2015.

- Mölders, Nils, »Aerogel-Dämmstoff für die Bauindustrie und den Leichtbau«, 2024, <https://www.umsicht.fraunhofer.de/de/projekte/aerogel-daemmstoff-neuer-herstellungsprozess.html> (abgerufen am 7. Juli 2024).
- Molter, Matthias, Assessment Betonforschung, Interview von Kirsten E. Hollmann-Schröter, Paderborn, 11. Mai 2022.
- Moravánsky, Ákos, »Der Kreislauf der Bausteine - Stichworte zu einer Ökologie des Bauens«, in: Eva Stricker u. a. (Hg.), Bauteile wiederverwenden. Ein Kompendium zum zirkulären Bauen, Zürich 2021, S. 17–31.
- Mostert, C. u. a., »Urban Mining for Sustainable Cities: Environmental Assessment of Recycled Concrete«, in: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 588, Nr. 5 (2020), S. 52021.
- Mostert, Clemens H. u. a., »Neubau aus Rückbau: Wissenschaftliche Begleitung der Planung und Durchführung des selektiven Rückbaus eines Rathauses aus den 1970er-Jahren und der Errichtung eines Neubaus unter Einsatz von Urban Mining (RückRat)«, BBSR-Online-Publikation, Bonn, <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2021/bbsr-online-15-2021-dl.pdf?blob=publicationFile&v=3>.
- Müller, Anette, Baustoffrecycling. Entstehung - Aufbereitung - Verwertung, Wiesbaden 2018 (SpringerLink Bücher).
- Müller, Christoph, »Konzepte zur Herstellung von ressourceneffizienten Betonen am Beispiel Zement«, in: Beton, Nr. 9 (2019), S. 311–314.
- Müller, Felix u. a., »Urban Mining: Ressourcenschonung im Anthropozän«, 2017, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/uba_broschuere_urbanmining_rz_screen_0.pdf.
- Müller, Kerstin, »Das Lesen und Weiterschreiben der gebauten Umwelt«, in: Felix Heisel und Dirk E. Hebel (Hg.), Urban Mining und kreislaufgerechtes Bauen. Die Stadt als Rohstofflager, Stuttgart 2021, S. 65–78.
- Müller, Martin, »Fachkräfteengpässe im Bauhandwerk beeinträchtigen zunehmend den Wohnungsbau«, Nr. 221, 12. August 2018, <https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/Konzernthemen/Research/PDF-Dokumente-Fokus-Volkswirtschaft/Fokus-2018/Fokus-Nr.-221-August-2018-Fachkraefteengpaesse-im-Bauhandwerk.pdf> (abgerufen am 17. Mai 2023).
- Nagel, Reiner und David Kasperek, »Ohne Bezug zum Ort geht es nicht: Möglichkeiten und Grenzen von Typ und Serie«, in: der architekt, Nr. 2 (2019), S. 51–55.
- Nagler, Florian u. a., Einfach Bauen. Ganzheitliche Strategien für energieeffizientes, einfaches Bauen - Untersuchung der Wechselwirkung von Raum, Technik, Material und Konstruktion, Stuttgart 2019 (Forschungsinitiative Zukunft Bau F 3151).
- Nagler, Florian (Hg.), »Einfach Bauen: Ein Leitfaden«, Basel 2022.
- Nowak, Matthäus Johann, »Monotonie und Maßstab von Großwohnsiedlungen – Nachwirkungen«, in: Jutta Albus u. a. (Hg.), Systematisierte Planungs- und Bauprozesse. Hintergründe, Strategien und Potenziale industrieller Vorfertigungstechnologien, Stuttgart 2021, S. 34–36.
- Oesterreich, Thuy Duong und Frank Teuteberg, »Industrie 4.0 in der Wertschöpfungskette Bau – Ferne Vision oder greifbare Realität?«, in: Stefan Reinheimer (Hg.), Industrie 4.0. Herausforderungen, Konzepte und Praxisbeispiele, Wiesbaden 2017 (Edition HMD Ser), S. 71–89.
- OMA, »OMA OFFIC WORK: Norra Tornen«, <https://www.oma.com/projects/norra-tornen> (abgerufen am 28. April 2024).
- Oswald, F., R. Riewe und M. Raudaschl, »Hook-and-Loop fastener – application for the technical building equipment«, in: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 323, Nr. 1 (2019), S. 12124.
- Pawlitschko, Roland, »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.
- Petri, Jörg, »Digital Stones for Re-build: Digitaler Stein für nachhaltige Rekonstruktionen«, <https://www.newdigitalcraft.com/CARVINGS> (abgerufen am 14. April 2024).
- PricewaterhouseCoopers GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft., »Baubranche aktuell Wachstum 2020: Digitalisierung und BIM«, 2018, <https://www.pwc.de/de/industrielle-produktion/baubranche-aktuell-wachstum-2020-maerz-2018.pdf> (abgerufen am 23. März 2024).
- Raudaschl, Matthias Technische Universität Graz, <https://diglib.tugraz.at/download.php?id=6110fd7f6240e&location=browse> (abgerufen am 20. September 2023).
- Reckli GmbH, »Norra Tornen – »Innovationen Tower«: Brutalismus neu gedacht«, Norra Tornen – »Innovationen Tower« (abgerufen am 28. April 2024).
- Rein, Stefan (Hg.), »Datenbasis zum Gebäudebestand: Zur Notwendigkeit eines besseren Informationsstandes über die Wohn- und Nichtwohngebäude in Deutschland«, Bonn 2016 (BBSR-Analysen kompakt 2016,9).

- Rhoné, Jim, »SOLILQUID: Large 3D printing in suspension«, <https://soliquid.io/> (abgerufen am 23. April 2024).
- Rietz, Andreas, Juliane Jäger und André Hempel, Serielles 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.
- Rimoldi, Alessia, Zsuzsa Amina Koubaa und BiBM, »Herausforderung 2050: Mehr Betonfertigteiltbauten für einen Bestand mit reduzierten CO2-Emissionen«, in: BWI - BetonWerk International, 4 (2018), S. 8, <https://www.cpi-worldwide.com/de/journals/artikel/54207> (abgerufen am 16. Mai 2024).
- Rippmann, M. u. a., »Design, fabrication and testing of discrete 3D sand-printed floor prototypes«, in: Materials Today Communications, 15 (2018), S. 254–259.
- Rosen, Anja, Urban Mining Index. Entwicklung einer Systematik zur quantitativen Bewertung der Kreislaufkonsistenz von Baukonstruktionen in der Neubauplanung, Stuttgart 2021.
- Rosen, Anja, »Die Ökonomie des Urban Mining: Das Modellprojekt Rathaus Korbach«, in: Dirk Hebel, Felix Heisel und Ken Webster (Hg.), Besser - Weniger - Anders Bauen. Kreislaufgerechtes Bauen und Kreislaufwirtschaft, Basel 2022, S. 80–91.
- Rosendahl, Philipp L., »Engineering: Structural design for Additive Manufacturing«, in: Oliver Tessmann u. a. (Hg.), Print architecture!, Baunach, Germany 2022, S. 81–91.
- Rotor asbl-vzw, »Rotor is a cooperative design practice that Rotor is a cooperative design practice that investigates the organisation of the material environment«, <https://www.rotordb.org/en> (abgerufen am 21. April 2024).
- Ruhr Universität Bochum, »SPP 2187: Adaptive Modulbauweisen mit Fließfertigungsverfahren - Präzisionsschnellbau der Zukunft«, <https://www.ruhr-uni-bochum.de/spp2187/index.html.de> (abgerufen am 23. April 2024).
- Rumpf, Philipp, »Modellhafte Konzipierung - Abbildung durchgängig digitaler Prozesse«, unter Mitw. von Kirsten Hollmann-Schröter 2024, 29. September 2024.
- Salet, Theo A. M., »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).
- Schaich, Mike, Alex Hückler und Claudia Lösch, »Infraleichtbeton (ILC)«, in: Konrad Bergmeister, Frank Fingerloos und Johann-Dietrich Wörner (Hg.), Beton-Kalender 2021. Schwerpunkte: Fertigteile; Integrale Bauwerke (2 Teile), Berlin 2021 (Beton-Kalender 202).
- Scheurer, Fabian, »Materialising Complexity«, in: Architectural Design, 80, Nr. 4 (2010), S. 86–93.
- Schlaich, Mike, Alex Hückler und Claudia Lösch, »Infraleichtbeton«, in: Konrad Bergmeister, Frank Fingerloos und Johann Dietrich Wörner (Hg.), Beton-Kalender 2021. Fertigteile, Integrale Bauwerke 2021, S. 908–952.
- Schmeer, Daniel u. a., Entwicklung einer ökologischen und ökonomischen Bauweise durch den Einsatz vorgefertigter multifunktionaler Wandbauteile aus gradiertem Beton, Stuttgart 2020 (Forschungsinitiative ZukunftBau F 3194).
- Schmidt, Christian, Management komplexer IT-Architekturen 2009.
- Schmidt, Hartwig, »Wendepunkt(e) im Bauen - Von der seriellen zur digitalen Architektur«, in: Bautechnik, 87, Nr. 5 (2010), S. 300–301.
- Schneider, Daniela, »Einfach intelligent konstruieren: Kreislaufgerechte Konstruktionen zur Ressourcenschonung und langfristigen Kostenersparnis.«, in: Felix Heisel und Dirk E. Hebel (Hg.), Urban Mining und kreislaufgerechtes Bauen. Die Stadt als Rohstofflager, Stuttgart 2021, S. 124–132.
- Schutter, Geert de u. a., »Vision of 3D printing with concrete — Technical, economic and environmental potentials«, in: Cement and Concrete Research, 112 (2018), S. 25–36.
- Simons, Harald, »Frühjahrgutachten Wohnimmobilien 2024«, in: ZIA Zentraler Immobilien Ausschuss e.V. (Hg.), Frühjahrgutachten Immobilienwirtschaft 2024 des Rates der Immobilienweisen 2024, S. 195–220.
- Sinclair, Brian R., Somayeh Mousazadeh und Ghazaleh Safarzadeh, »Agility, Adaptability + Appropriateness: Conceiving, Crafting & Constructing an Architecture of the 21st Century«, in: Enquiry The ARCC Journal for Architectural Research, 9, Nr. 1 (2012), S. 35–42.
- Sobek, Werner, »Für mehr Menschen mit weniger Material bauen«, in: Felix Heisel und Dirk E. Hebel (Hg.), Urban Mining und kreislaufgerechtes Bauen. Die Stadt als Rohstofflager, Stuttgart 2021, S. 23–32.
- Sobek, Werner, Non nobis - über das Bauen in der Zukunft—Band 2. Über die Randbedingungen des Zukünftigen, Stuttgart 2023 (Sobek, Werner. Non nobis - über das Bauen in der Zukunft Band 2).
- Sobek, Werner und Frank Heinlein, Ausgehen muss man von dem, was ist, Stuttgart 2022 (Non nobis – über das Bauen in der Zukunft / Werner Sobek Buch 1).

- Sobek, Werner, Daria Kovaleva und Oliver Gericke, »Perforierte Betonschalen«, in: *ce/papers*, 3, Nr. 2 (2019), S. 89–93.
- Soliquid, großformatiger 3D-Druck in Flüssigkeit, Interview von Ann-Katrin L., 27. Juni 2019.
- Sondegger, Andreas, »Bauteile wiederverwenden - ein Ausblick«, in: Eva Stricker u. a. (Hg.), *Bauteile wiederverwenden. Ein Kompendium zum zirkulären Bauen*, Zürich 2021, S. 283–288.
- Stevens, Marcus, »Die unerwartete Leichtigkeit des S[t]eins«, in: Tim Lüking (Hg.), *Monolithisch bauen. Eine Bestandsaufnahme*, Graz 2017, S. 144–153.
- Stricker, Eva u. a. (Hg.), »Bauteile wiederverwenden: Ein Kompendium zum zirkulären Bauen«, Zürich 2021.
- Sulzer, Peter, *Jean Prouvé œuvre complète = Jean Prouvé complete works*, Basel 2005 (3).
- Summary Architecture, »Ci3 – Center for Industrial Innovation and Business Incubator«, <https://summary.pt/works/ci3-center-for-industrial-innovation/> (abgerufen am 15. Mai 2024).
- Summary Architecture, »Gomos System«, <https://summary.pt/works/gomos-system/> (abgerufen am 28. April 2024).
- Technische Universität Berlin u. a., *MultiLC - Multifunktionale Leichtbetonbauteile mit inhomogenen Eigenschaften; Mechanische, Bauchemische und Bauphysikalische Untersuchungen. Ausführlicher Sachbericht*, Berlin 2019.
- Technische Universität Braunschweig, Institut für Tragwerksentwurf, »AMC TRR 277: Additive Manufacturing in Construction«, <https://amc-trr277.de/> (abgerufen am 23. April 2024).
- 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/fertigteil_2_0/fertigteile_2_0.en.jsp (abgerufen am 20. Mai 2024).
- 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).
- Tersluisen, Angèle u. a., *Untersuchung zeitgemäßer, monolithischer Wandaufbauten hinsichtlich bauphysikalischer, ökologischer und ökonomischer Eigenschaften. Abschlussbericht*, Stuttgart 2018 (Forschungsinitiative Zukunft Bau F 3064).
- Tessman, Oliver 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.
- Tessmann, Oliver u. a. (Hg.), »Print architecture!«, Baunach, Germany 2022.
- The University of Sheffield, »Regenerate Circular Economy Tool«, 2021, <https://regenerate.urbanflows.ac.uk/about/> (abgerufen am 28. März 2024).
- Thiel, Charlotte u. a., »Strategien zur Implementierung der Kreislaufwirtschaft beim Bauen mit Beton«, in: *Beton- und Stahlbetonbau*, 118, Nr. 4 (2023), S. 261–274.
- Ullmann, Gerhard, »Zeit des Bauens, Zeit des Alterns – Ein frühes Wohnbauexperiment von Otto Steidle und Partner in der Genter Straße in München«, in: *db*, Nr. 2 (1993), S. 104–112.
- Van Berkel, Ben und Caroline Bos, *UN Studio. Design models; architecture, urbanism, infrastructure*, London 2006.
- Vasilić, Ksenija (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).
- Verein Deutscher Zementwerke e.V., »Zementindustrie im Überblick 2022/2023«, Berlin, 2022, https://www.vdz-online.de/fileadmin/wissensportal/publikationen/zementindustrie/zementindustrie_ueberblick/VDZ_Zementindustrie_im_Ueberblick_2022-2023.pdf (abgerufen am 5. August 2023).
- Voit, Corinna, »Datenaustausch: IFC für Simplebim: Die Zukunft des open BIM-Managements«, in: *Bauen aktuell Building Information Modelling und Gebäudeautomation*, Nr. 05 (2023), S. 22–23.
- Wautelet, Thibaut, »Exploring the role of independent retailers in the circular economy: a case study approach« Unpublished 2018, 10.13140/RG.2.2.17085.15847.
- Wachsmann, Konrad (Hg.), »Wendepunkt im Bauen«, Stuttgart 1989.
- Wachsmann, Konrad, *Wendepunkt im Bauen*, mit einem Vorwort von Fritz Haller, Stuttgart 1989.
- Walz, Arnold, *digitale Prozessketten*, Interview von Kirsten Hollmann-Schröter, 14. November 2019.
- Webster, Ken, »Prinzipien der Kreislaufwirtschaft«, in: Dirk Hebel, Felix Heisel und Ken Webster (Hg.), *Besser - Weniger - Anders Bauen. Kreislaufgerechtes Bauen und Kreislaufwirtschaft*, Basel 2022, S. 24–27.

- Weger, Daniel 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.
- Wikipedia, »Boundary Representation«, https://de.wikipedia.org/wiki/Boundary_Representation (abgerufen am 20. Mai 2024).
- Winter, Stefan u. a., Bauen mit Weitblick. Systembaukasten für den industrialisierten sozialen Wohnungsbau, Stuttgart 2019.
- Witt, Elke und Christian Anton (Hg.), »Additive Fertigung: Entwicklungen, Möglichkeiten und Herausforderungen: Stellungnahme«, Halle (Saale)/Mainz/München 2020 (Stellungnahme / Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina).
- Wong, Liliane, Adaptive reuse in architecture. A typological index, Basel 2023.
- Wörner, Mark u. a., »Gradientenbetontechnologie: Von der Mischungsentwicklung über den Bauteilentwurf bis zur automatisierten Herstellung«, in: Beton- und Stahlbetonbau, 111, Nr. 12 (2016), S. 794–805.
- WWF Deutschland, »Klimaschutz in der Beton- und Zementindustrie: Hintergrund und Handlungsoptionen«, Berlin, 2019, https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF_Klimaschutz_in_der_Beton-_und_Zementindustrie_WEB.pdf (abgerufen am 5. Mai 2022).
- Xella Porenbeton Schweiz AG, »Ytong Systemwand: Elementierte Massivbauweise in Bestzeit«, https://baustein.xella.ch/media/ressources/Ytong_Systemwandelemente_CH.pdf (abgerufen am 8. Mai 2024).
- Yang, Sheng u. a., »Development and applicability of life cycle impact assessment methodologies«, in: Life Cycle Sustainability Assessment for Decision-Making 2020, S. 95–124.

7.3 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Mängel im Bauwesen (links) und sich daraus ergebende Forschungslücken (rechts). Eigene Darstellung	4
Abb. 2: drei Leitfaktoren. Eigene Darstellung	9
Abb. 3: Definition der Leitfaktoren, die eine Individualisierte Standardisierung ausmachen. Eigene Darstellung	10
Abb. 4: Zusammenhang aus Leitfaktoren und sich durch die synchrone Umsetzung ergebender Fortschritt. Eigene Darstellung	11
Abb. 5: Anforderungen an die monolithischen Konstruktionen. Eigene Darstellung	18
Abb. 6: Differenzierung von übergeordneter Betrachtung und Fokus auf Betonkonstruktionen. Eigene Darstellung	19
Abb. 7: Verflechtung von Hilfsmitteln, Vorgang und Material in Korrelation zum Lebenszyklus. Eigene Darstellung	26
Abb. 8: Bedeutung des Leitfaktors Technik innerhalb des Dreiklangs. Eigene Darstellung	29
Abb. 9: Kombiniertes Fertigungsverfahren einer Betonfertigdecke mit dem SC3DP Verfahren © ITE Institut für Tragwerksentwurf, TU Braunschweig	38
Abb. 10: Wandkonstruktion aus spezifischen 3-D gedruckten Geometrien mit geschlossenen Hohlräumen © Klaudius Henke	41
Abb. 11: CONPrint3D®-Druckkopf © TU Dresden	42
Abb. 12: Herstellungsaufbau des ersten 3-D gedruckten Hauses in Deutschland, Beckum © Guido Kirchner, Peri 3D Construction GmbH	44
Abb. 13: Modulare Fügung der 3D gedruckten Elemente, Striatu-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	45
Abb. 14: Montage der vorgefertigten 3-D-Druck Elemente, Milestones © 3dprintedhouse	47
Abb. 15: Kombination von drei Prozessschritten zur Erstellung des Shotcrete Demonstrators © ITE Institut für Tragwerksentwurf, TU Braunschweig	49
Abb. 16: Co-Extrusions-Technologie, Aeroleichtbeton © G.tecz Engineering GmbH	52
Abb. 17: Bedeutung des Leitfaktors Konstruktion innerhalb des Dreiklangs. Eigene Darstellung	57
Abb. 18: Zusammenführung fester Grundmodule zur Struktur (bottom-up) beziehungsweise Modularisierung einer Struktur in neue Module (top-down) © Patrick Forman	62
Abb. 19: Frank Lloyd Wright, Ennis House, textile blocks, Los Angeles, 1924 © Alan M. Pavlik	71
Abb. 20: Mangiarotti, Morassuti, Favini, Chiesa di Nostra Signora della Misericordia, Baranzate di Bollate, 1957 © Marco Introini	74
Abb. 21: Steidle, Thut und Thut, Wohnanlage Genter Straße, München, 1972 © Klaus Kinold-Stiftung Architektur+Fotografie	76
Abb. 22: Arge Summacumfemmer Büro Juliane Greb, Wohnhaus San Riemo, München, 2020 © Florian Summa	77
Abb. 23: FAR frohn&rojas, Wohnregal, Berlin, 2019 © David von Becker	78
Abb. 24: Fraktaler Charakter der Standardisierungsmethoden am Beispiel einer Gebäudekonstruktion aus Stahlbetonbauteilen © Agemar Manny	83
Abb. 25: Schematische Darstellung der standardisierten Schnittstelle © Institut für Massivbau IMB des KIT, Agemar Manny	84
Abb. 26: Wohnhochhaus in vorgefertigter Betonbauweise, Reinier de Graaf/OMA, Norra Tornen, Stockholm, 2020 © Photo by Laurian Ghinitoiu, courtesy of OMA	85
Abb. 27: Isometrische Darstellung der Sandwichbauteile und des Prinzips der Stapelung © OMA	86
Abb. 28: SUMMARY Studio, "infrastructure-structure-architecture", La Biennale di Venezia 2016, Italien © Tiago Casanova	88
Abb. 29: SUMMARY Studio, 1000sqm prefab, Vale de Cambra, Portugal © Fernando Guerra FG+SG	89
Abb. 30: SUMMARY Studio, Ci3 – Center for Industrial Innovation and Business Incubator, Arouca, Portugal © SUMMARY	90
Abb. 31: Neuartige Zusammenführung von Standardisierung und Individualisierung. Eigene Darstellung	92
Abb. 32: Bedeutung des Leitfaktors Gestaltung innerhalb des Dreiklangs. Eigene Darstellung	97
Abb. 33: Topologisches Beschreibungsmodell © Design-to-Production	110
Abb. 34: Abbildung der diagrammatischen Prozesskette "real-digital" © DDU	112
Abb. 35: selektiver Rückbau von Betonkomponenten am Campus Lichtwiese © Malcom Unger, DDU	113

Abb. 36: Digitale Abstimmungen der Anforderungen an die Materialmatrix. Eigene Darstellung _____	115
Abb. 37: Leitfaktoren in zeitlicher Abhängigkeit. Eigene Darstellung _____	126
Abb. 38: Systemerweiterung zirkuläres Entwerfen – Urban Mining-gerechter Rückbau. Eigene Darstellung _____	127
Abb. 39: Verbesserung der Nachhaltigkeit aus Effizienz- und Effektivitätsansprüchen © EPEA GmbH, Drees und Sommer _____	128
Abb. 40: Zusammenschau der Einflussfaktoren zur Umsetzung einer digital gestützten Nachhaltigkeit. Eigene Darstellung _____	132
Abb. 41: Nachhaltigkeitspotenzial durch digitales Planungswerkzeug. Eigene Darstellung _____	134
Abb. 42: Nachhaltigkeitspotenziale durch digitales Bauteil. Eigene Darstellung _____	136
Abb. 43: Nachhaltigkeitspotenziale durch digitales Material. Eigene Darstellung _____	138
Abb. 44: Nachhaltigkeitspotenziale durch digitale Zerlegung. Eigene Darstellung _____	140
Abb. 45: Nachhaltigkeitspotenziale durch digital gestützten Neuentwurf. Eigene Darstellung _____	143
Abb. 46: Nachhaltigkeitspotenzial digitales Kataster. Eigene Darstellung _____	145
Abb. 47: Zusammenschau Nachhaltigkeitspotenziale. Eigene Darstellung _____	149
Abb. 48: Rippmann Floor System (RFS) © Block Research Group, ETH Zürich _____	156
Abb. 49: Optimierung des Treibhauspotenzials durch klimaeffizientere Zemente © Anna Mendgen und Mike Schlaich _____	159
Abb. 50: Ebenen der Wiederverwendung © Baukreisel e.V. _____	164
Abb. 51: Ergebnis aus der Lehrveranstaltung „Material – Einsatz – Wandel“ © Dina Suberg, Leona Wiemers _____	165
Abb. 52: Schematische Darstellung eines homogenen Bauteilquerschnitts von 65 cm. Eigene Darstellung _____	176
Abb. 53: Schematische Darstellung eines inhomogenen Bauteilquerschnitts 45 cm. Eigene Darstellung _____	176
Abb. 54: Deckenanschluss einer Betondecke aus Normalbeton (NB) an eine tragende Wand aus Infraleichtbeton (ILC) mit ungedämmter Stirnseite © ILC _____	180
Abb. 55: ILC-Balkonplatte mit Rückverankerung in der Deckenplatte links und ohne Rückverankerung rechts © ILC _____	181
Abb. 56: ILC-Fensterdetails mit Fensterposition mittig und Fensterposition innen © ILC _____	181
Abb. 57: Staffelung der ILC-Rohdichten nach Geschossigkeit, Stabwerksmodell zur Verdeutlichung des Lastabtrags © ILC _____	182
Abb. 58: Punkthaus mit tragender Fassade aus U-Elementen aus ILC © ILC _____	183
Abb. 59: Vergleich dreier ILC Bauteile (Volumen und Kosten) © GBJ Geithner Betonmanufaktur Joachimsthal GmbH, ILC _____	184
Abb. 60: Geschichteter Porositätsgradient © Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK), Universität Stuttgart _____	190
Abb. 61: Eigenschaftsänderungen der Betongemische durch Dichteanpassung © ILEK _____	190
Abb. 62: Schematische Darstellung des geschichteten Bauteilquerschnitts 26 cm. Eigene Darstellung _____	191
Abb. 63: Gradiertes Sprühen mit der 1- und 2-Düsen-Technologie © ILEK _____	195
Abb. 64: Applikationssystem mit Stewart-Gough-Plattform © ILEK _____	197
Abb. 65: optimierter Wandquerschnitt © ILEK _____	198
Abb. 66: Kombination von Schub- und Deckschichtbewehrung © ILEK _____	199
Abb. 67: Einordnung der Verbindungstechniken © ILEK _____	199
Abb. 68: Weiterentwickelte Implantat-Technologie für Gradientenbauteile © ILEK _____	200
Abb. 69: weiterentwickelter Wandschuh für Gradientenbauteile © ILEK, Peikko Deutschland GmbH _____	201
Abb. 70: weiterentwickelte Schwalbenschwanzverbindung POWERCON für Gradientenbauteile © ILEK, H-Bau Technik GmbH _____	202
Abb. 71: weiterentwickeltes Schlüssel-Schloss Prinzip TENLOC für Gradientenbauteile © ILEK, Peikko Deutschland GmbH _____	202
Abb. 72: Demonstrator der Gradientenbetonwand © ILEK _____	203
Abb. 73: Konzeptioneller Aufbau einer multifunktionalen Gradientenwand © ILEK _____	204
Abb. 74: Schematische Darstellung des hybriden Bauteils mit einem Querschnitt von 37 cm. Eigene Darstellung _____	210
Abb. 75: Hybridbeton-Elemente mit UHPC-Deckschicht und Aerogel-Schaumbeton © G.tecz Engineering GmbH _____	212
Abb. 76: Mobiles Produktionslayout in Containern © Gtecz Engineering GmbH _____	213
Abb. 77: Schichtenweises Aufbringen der Materialmatrix © TU Dortmund, Lehrstuhl Baukonstruktion, Juniorprofessur REB (Lowin) _____	214

Abb. 78: Kopplung der offenen Schalungen über Magnetkontakte © TU Dortmund, Lehrstuhl Baukonstruktion, Juniorprofessur REB (Lowin)	214
Abb. 79: Materialmatrix © G.tecz Engineering GmbH	215
Abb. 80: Systembaukasten mit individuellen Gestaltungsmerkmalen © G.tecz Engineering GmbH	216
Abb. 81: Varianz in den Konstruktionsprinzipien © TU Dortmund, Lehrstuhl Baukonstruktion, Juniorprofessur REB (Lowin)	217
Abb. 82: Gegenüberstellung der Anschlussdetails unter Berücksichtigung der thermografischen Darstellung © TU Dortmund, Lehrstuhl Baukonstruktion, Juniorprofessur REB (Skottke)	218
Abb. 83: Konzipierung des Demonstrators © TU Dortmund, Lehrstuhl Baukonstruktion, Juniorprofessur REB (Lowin)	219
Abb. 84: Demonstrator zum Langzeit-Monitoring der Bauphysik, Statik und Verbindungstechnik © TU Dortmund, Lehrstuhl Baukonstruktion. Eigene Darstellung	219
Abb. 85: Individualisierte Oberflächengestaltung des mehrschichtigen Wandaufbaus © TU Dortmund, Lehrstuhl Baukonstruktion, Juniorprofessur REB (Lowin)	220
Abb. 86: Synopse der Kriterien 1-6 mit Schwerpunkt auf die Materialtechnologie. Eigene Darstellung	225
Abb. 87: Synopse der Kriterien 7-9 mit Schwerpunkt auf die Konstruktion. Eigene Darstellung	228
Abb. 88: Synopse der Kriterien 10-12 mit Schwerpunkt auf die Fertigung. Eigene Darstellung	229
Abb. 89: Überlagerung der Betontechnologien nach Leitfaktoren. Eigene Darstellung	230
Abb. 90: Ökobilanzierung von Wandbauteilen im Vergleich im Rahmen der Aeroleichtbetonforschung © TU Dortmund, Lehrstuhl Baukonstruktion, Juniorprofessur REB (Skottke)	232
Abb. 91: Darlegung der Dominanz eines Leitfaktors im Gesamtgefüge. Eigene Darstellung	239
Abb. 92: Angepasste Entwurfsmethodik durch neue Rahmenbedingungen in der Materialverfügbarkeit. Eigene Darstellung	249
Abb. 93: Kombination von zweidimensionalen Bauteilen und dreidimensionalen Raummodulen © HSBO (Hope)	254

Kirsten E. Hollmann-Schröter

absolvierte ihr Architekturstudium an der Bauhaus-Universität Weimar sowie an der IUAV in Venedig. Anschließend war sie neun Jahre im Architekturbüro UNStudio in Amsterdam tätig. Sie ist selbstständige Architektin und Energie-Effizienz-Expertin. Seit 2015 lehrt und forscht sie als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl Baukonstruktion der TU Dortmund. Schwerpunkte Ihrer Tätigkeit sind dabei die Verknüpfung von digitalem Gestalten, intelligenten Konstruktionen und automatisierter Produktion im ressourceneffizienten Bauen.

Dieses Buch stellt eine übergeordnete Nachhaltigkeitsstrategie für den Betonsektor vor, die das Bauwesen insgesamt wesentlich beeinflussen kann. Im Mittelpunkt steht die Entwicklung einer übergeordneten Planungsstrategie für anpassungs- und kreislauffähige Konstruktionen, die durch die synchrone Umsetzung der drei Leitfaktoren Technik, Konstruktion und Gestaltung geprägt wird. Den Unterschied zu bisherigen Herangehensweisen bildet dabei das austarierte Ins-Verhältnis-Setzen dieser Leitfaktoren zusammen mit der Bildung einer ausgewogenen Balance aus Standardisierung und Individualisierung. Die Theorie der Individualisierten Standardisierung verbindet Standardisierungsmaßnahmen mit projektspezifischer Flexibilität und schafft so die Grundlage für effizientere, variantenreiche und nachhaltige Bauprozesse. Die zentrale Erkenntnis ist, dass für jede Bauaufgabe das richtige Verhältnis von Systematisierung und projektspezifischer Anpassung gefunden werden muss. Nur so können die angestrebten Ziele – erhöhte Effizienz, architektonische Vielfalt und Kreislauffähigkeit – erreicht werden. Ein besonderer Fokus liegt auf der Überführung der Leitfaktoren in einen kreislaufgerechten Rahmen, die sogenannte Pyramidale Zirkularität. Die Methodik bietet Planerinnen und Planern eine Handlungsstrategie, um nachhaltige Prozesse gezielt zu etablieren und die drei zentralen Parameter in Einklang zu bringen.

Die Arbeit zeigt auf, warum Betonkonstruktionen sich besonders für die Umsetzung der Strategie der Individualisierten Standardisierung eignen, um die Kreislauffähigkeit von Betonkonstruktionen maßgeblich zu verbessern. Die Synopse dreier Betontechnologien – Infraleichtbeton, Gradientenbeton und Aeroleichtbeton –, die als monolithische Wandkonstruktionen mit Dämmwirkung automatisiert gefertigt werden und eine konstruktive sowie gestalterische Variabilität bieten, zeigt Umsetzungspotenziale der Strategie der Individualisierten Standardisierung.

Dieses Werk ist eine wertvolle Ressource für Planerinnen und Planer und alle, die aktiv an einem Paradigmenwechsel für das Bauwesen mitwirken möchten. Es zeigt, wie durch systemische Herangehensweisen, Digitalisierung und Automatisierung der Bausektor nachhaltiger, effizienter und flexibler gestaltet werden kann.

ISBN 978-3-7388-1015-8



9 783738 810158

Fraunhofer IRB | Verlag