

Grundlagen des 3D-Drucks im Betonbau: Empfehlungen für die Praxis

Agemar Manny und Frank Dehn

Zusammenfassung

Mehrere Unternehmen konnten bereits erste Projekte mit additiven Fertigungsverfahren zur Herstellung von tragenden Wandscheiben im Wohnungsbau realisieren. Hierbei wurden entweder Schalungen aus Beton oder Mörtel gedruckt, anschließend Ortbeton in diese eingefüllt und dadurch zusammengesetzte Querschnitte hergestellt oder massive Wandquerschnitte mit voller Dicke des Querschnitts schichtweise in mehreren Arbeitsschritten gedruckt. In diesem Beitrag werden Ausführungsarten von Wandquerschnitten vorgestellt, die in der Praxis bereits angewendet wurden. Außerdem wird erläutert, welche Prüfungen an frischem und festem Beton oder Mörtel durchgeführt werden müssen, um diese neuartigen und regelungsbedürftigen Lösungen für die Herstellung tragender Wände ver- und anwenden zu können. Anschließend wird das Tragverhalten ausgewählter 3D-gedruckter Wände bzw. Wandquerschnitte erläutert. In den abschließenden Empfehlungen für planende und ausführende Unternehmen werden erste Erfahrungen hinsichtlich der Bewertung von Abweichungen in Bezug auf die derzeit gültigen Regelwerke aufgezeigt. Hierdurch soll eine breitere und raschere Anwendung von 3D-gedrucktem Beton bzw. Mörtel ermöglicht werden.

Schlagwörter: 3D-Druck, Beton, Mörtel, Wand, Tragverhalten, Bemessungsvorschlag

Abstract

Various companies have already realised their first projects with additive manufacturing technologies for the production of load-bearing walls in residential construction. In these projects, either the formwork was printed with concrete or mortar, then in-situ concrete was poured into them and thereby a composite cross-section was produced or solid walls with full cross-sectional height were printed layer by layer in several steps. This article presents different types of wall cross-sections that have already been used in practice. In addition, it is described which tests must be carried out on fresh and hardened concrete or mortar in order to be able to utilise and apply these innovative solutions, which require regulation, for the production of load-bearing walls. The load-bearing behaviour of selected 3D-printed walls respectively wall cross-sections is then explained. In the concluding recommendations for planning and construction companies, first experiences regarding the assessment of non-conformities in relation to the currently valid regulations are presented. The aim of these recommendations is to facilitate a broader and more rapid application of 3D-printed concrete and mortar.

Keywords: 3D printing, concrete, mortar, wall, load-bearing behaviour, design concept

1 Einleitung

Wandscheiben im Wohnungsbau werden derzeit überwiegend in Mauerwerksbauweise errichtet [1, 2], wobei die Herstellung von Mauerwerk eine arbeitsintensive Baumethode darstellt. Im vergangenen Jahrzehnt wurden automatisierte Fertigungsverfahren entwickelt, die in einem additiven Prozess die Herstellung unbewehrter und bewehrter Bauteile aus Beton oder Mörtel ermöglichen [3, 4]. Durch die Automatisierung ist einerseits eine Verringerung der physischen Belastung des Personals bei der Ausführung und andererseits eine Verbesserung des Bauprozesses mit einer Integration digitaler Modelle möglich. Für die automatisierte Fertigung tragender Wandscheiben besteht daher ein hohes Marktpotenzial [1].

Die Entwicklung neuer Technologien bringt meist nicht nur Vorteile mit sich. Bei einem Abweichen von bestehenden Regelwerken müssen zunächst Anforderungen und Grenzen für die Verwendung und die Anwendung neuartiger Bauprodukte und Bauarten festgelegt werden. Die größte Hürde für die rasche Markteinführung von mit einem 3D-Druck-Verfahren hergestellten unbewehrten, tragenden Bauteilen und Bauwerken aus Beton oder Mörtel ist das Fehlen von Regelwerken für die Ausführung und Bemessung [3]; dies beinhaltet auch Anforderungen an die Zusammensetzung und die Eigenschaften des frischen und festen Materials für die Errichtung standsicherer, gebrauchstauglicher und dauerhafter Tragwerke.

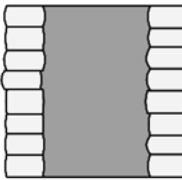
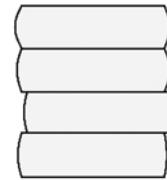
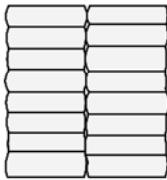
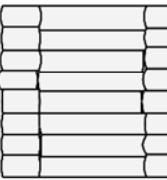
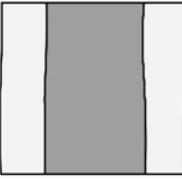
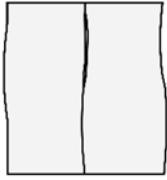
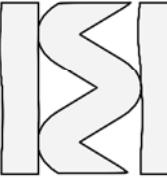
Mit den bestehenden Fertigungsverfahren können verschiedenartige Bauteile hergestellt werden. In den letzten Jahren wurden bei einzelnen Pilotprojekten in Deutschland tragende und nichttragende Bauteile, überwiegend Wände, aus 3D-gedrucktem Beton oder Mörtel hergestellt (z. B. [5-7]). Die Unterschiede in den Herstellungsverfahren führen zu unterschiedlichen Anforderungen und Nachweisen an den Beton oder Mörtel und die damit hergestellten Bauteile. Grundsätzlich sind für Bauprodukte Verwendbarkeitsnachweise und für Bauarten Anwendbarkeitsnachweise zu erbringen. In diesem Beitrag werden lediglich unbewehrte, tragende Wände betrachtet.

2 Ausführungsarten 3D-gedruckter Bauteile

Bei der additiven Fertigung kann zwischen unterschiedlichen Fertigungsverfahren (z. B. Extrusion, Partikelbett-Binden, Spritzen) und dem Ort der Herstellung der Bauteile (In-situ, Ex-situ) differenziert werden [3]. Im Folgenden wird lediglich die Extrusion, d. h. die Materialablage unter Druck durch eine formgebende Öffnung, mit einer In-situ-Herstellung der Betonbauteile näher betrachtet. Der Fokus liegt auf den Unterschieden auf der Bauteilebene sowie auf den am Markt verfügbaren Druckverfahren.

Bei allen derzeit in Deutschland ausgeführten, öffentlich bekannten 3D-Druck-Pilotprojekten wurden tragende oder nichttragende Wandquerschnitte oder Schalungen, in die anschließend Ortbeton eingefüllt wurde, mittels Extrusion vor Ort hergestellt. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht verschiedener Quer- und Längsschnitte von Wänden, bei denen mindestens ein Teil davon mit einem 3D-Druck-Verfahren hergestellt wird.

Tab. 1: Übersicht und beispielhafte Ausschnitte verschiedener Ausführungsarten

Art	A	B	C	D
Herstellung	Druck einer Schalung, Einfüllen von Ortbeton	Druck des Querschnitts, ein Streifen	Druck des Querschnitts, mehrere Streifen	Weitere Querschnittsformen (Beispielhafte Darst.)
Querschnitt				
Längsschnitt				

Bei allen in Tabelle 1 gezeigten Ausführungsarten wird Beton oder Mörtel durch eine Düse extrudiert und entlang eines zuvor definierten Pfads schichtweise abgelegt (gedruckt). Bei der Ausführungsart A wird nicht der Wandquerschnitt, sondern eine Schalung gedruckt, anschließend in diese Beton eingefüllt und hierdurch ein Querschnitt hergestellt. Bei der Ausführungsart B wird der gesamte massive Wandquerschnitt schichtweise aufgetragen, während bei den Ausführungsarten C und D ein zusammengesetzter Querschnitt bestehend aus mehreren Querschnittsstreifen gedruckt wird.

Neben den verschiedenen Arten der Ausführung des Wandquerschnitts bestehen auch unterschiedliche Möglichkeiten der Extrusion des Betons oder Mörtels. Auf dem Markt sind bereits verschiedene 3D-Druck-Technologien verfügbar, bei denen die Form des Druckkopfs, die Richtung der Extrusion, das verwendbare Material und der Druckprozess variieren (vgl. Abb. 1). Beim Druckprozess wird zwischen Verfahren mit einer und mehreren Materialkomponenten differenziert. Bei einem 2-komponentigen Verfahren erfolgt beispielsweise eine Nachdosierung von Zusatzmitteln unmittelbar vor der Extrusion nahe oder im Druckkopf, um die Eigenschaften des frischen und des späteren festen Materials gezielt anpassen zu können. Darüber hinaus bestehen an die 3D-Druck-Technologien unterschiedliche Bedingungen bei der Anwendung (z. B. Größe des druckbaren Bereichs). Abbildung 1 zeigt zwei beispielhafte 3D-Druck-Verfahren mit unterschiedlichen Druckköpfen, Extrusionsrichtungen und Druckprozessen.

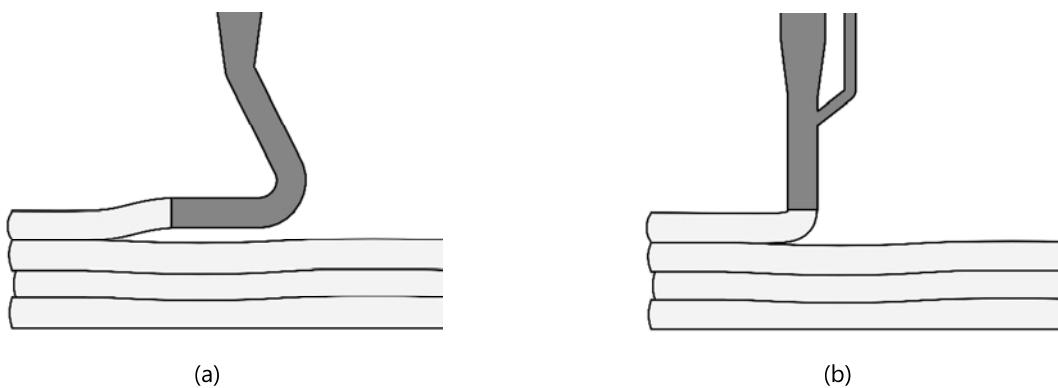


Abb. 1: Beispielhafte Darstellung verschiedener 3D-Druck-Verfahren: (a) Druckkopf mit horizontaler Extrusionsrichtung, (b) Druckkopf mit vertikaler Extrusionsrichtung und seitlicher Nachdosierung von Zusatzmitteln

Neben der Ausführung verschiedener Querschnitte mit dazugehörigen 3D-Druck-Verfahren bestehen in der Praxis bereits Erfahrungen mit unterschiedlichen Materialien; von Beton nach Norm über feinkörnige Betone und Mörtel bis hin zu 3-komponentigen Mörteln mit der Zugabe von Polymermischungen und Aktivatoren. Grundsätzlich bestehen abhängig von der Ausführungsart des Wandquerschnitts und des 3D-Druck-Verfahrens unterschiedliche Anforderungen an das zu extrudierende Material. Es liegt zudem eine spezifische Wechselbeziehung zwischen Extrudat und Extruder vor. Tabelle 2 führt grundlegende Prüfungen am frischen und festen Material sowie Messungen der Umgebungsbedingungen auf, die mindestens bei der Erstherstellung durchzuführen sind, um die Eignung des frischen und festen Materials für den 3D-Druck nachzuweisen.

Tab. 2: Prüfungen am frischen und festen Material sowie weitere Messungen

Frisches Material	Festes Material
Konsistenz der Mischung, Ausbreitmaß, Fließfähigkeit	Rohdichte des festen Betons oder Mörtels
Konsistenz bei der Extrusion, Extrudierbarkeit	Druckfestigkeit
Grünstandfestigkeit	E-Modul
Temperatur der Luft	Frost-Tau-Widerstand
Temperatur des frischen Materials	Verbund- / Scherfestigkeit der Fugen
Rohdichte des frischen Betons oder Mörtels	Ggf. Biegezug- / zentr. Zugfestigkeit
Luftporengehalt	Ggf. Kriechen, Schwinden, Dauerstandverhalten

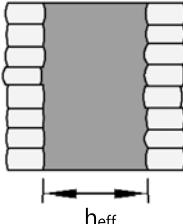
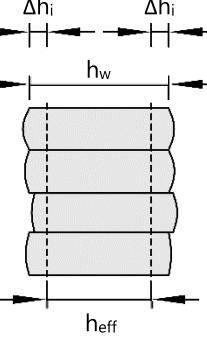
Bei der Prüfung der Extrudierbarkeit sind aufgrund der prozessspezifischen Charakteristik ggf. vom Hersteller eigens entwickelte Prüfverfahren anzuwenden. Es ist insbesondere darauf zu achten, dass eine gleichmäßige Extrusion ohne Lunker, Lufteinschlüsse oder Unterbrechungen des Materialflusses mit einer gleichbleibenden Qualität erfolgt. Bei der Bestimmung der Eigenschaften sind gemäß Tabelle 2 neben konventionell geschalteten Proben stets auch gedruckte und mittels Kernbohrung hergestellte Proben zu untersuchen. Dabei ist zu beachten, dass eine Verdichtung der geschalteten Proben analog zu den gedruckten Proben erfolgt. Abhängig von der Funktion einer 3D-gedruckten Wand (Außenwand, Innenwand) sind unter Umständen weitere Prüfungen durchzuführen; hier kann beispielsweise die Wasseraufnahme genannt werden.

Bei der Auswahl eines 3D-Druck-Verfahrens für ein Bauvorhaben sind u. a. die individuellen Parameter des Systems, die Anforderungen an das Material und die Anwendungsbedingungen zu beachten.

3 Tragverhalten 3D-gedruckter Wandquerschnitte

Der Überblick über den Stand der verschiedenen Ausführungsarten zeigt die Vielfalt der bestehenden Technologien und der Möglichkeiten bei der Herstellung von 3D-gedruckten Betonbauteilen und Bauwerken auf. Um im Nachfolgenden Empfehlungen für die Herstellung und Bemessung von mit einem 3D-Druck-Verfahren hergestellten Wänden mit den vorgestellten Ausführungsarten (vgl. Tab. 1) formulieren zu können, wird zunächst das Tragverhalten der Querschnitte näher betrachtet. Tabelle 3 gibt einen Überblick über die ausgewählten Ausführungsarten mit den unterschiedlichen Querschnitten, die voll oder teilweise tragend sind, sowie Empfehlungen zum Ansatz der effektiven Dicke des Querschnitts für die rechnerische Nachweisführung bei einer exzentrischen Druckbelastung. Die Ausführungsart D (vgl. Tab. 1) wird aufgrund der möglichen geometrischen Varianten und dem nur wenig erforschten Tragverhalten des gesamten Querschnitts sowie der einzelnen Querschnittsstreifen nicht weiter betrachtet.

Tab. 3: Tragverhalten des Querschnitts und Bemessung 3D-gedruckter Wände

Art	A	B	C
Herstellung	Druck einer Schalung, Einfüllen von Ortbeton	Druck des Querschnitts, ein Streifen	Druck des Querschnitts, mehrere Streifen
Tragender Querschnitt	Nichttragende Schalung, tragender Ortbetonquerschnitt (Kern)	Ein tragender Querschnittsstreifen	- ¹⁾
			
Effektive Dicke des Querschnitts	$h_{\text{eff}} = h$ (Ortbetonquerschnitt)	$h_{\text{eff}} = h_w - 2 \cdot \Delta h_i$	- ¹⁾
Bemessung	Nach Eurocode 2, Kapitel 12	Nach Eurocode 0, Anhang D	Nach Eurocode 0, Anhang D
¹⁾ Aufgrund der geringen verfügbaren Datenmenge können hier keine Angaben gemacht werden.			

Das Tragverhalten 3D-gedruckter Bauteile hängt von der Ausführungsart, der Geometrie der Bauteile und dem verwendeten Beton oder Mörtel ab. Diese drei Aspekte sind bei der Nachweisführung unter Berücksichtigung der Einwirkungen zu beachten.

Bei der Ausführungsart A (vgl. Tab. 1 und 3) ist unter Vernachlässigung der Tragfähigkeit der gedruckten Schalungsstreifen grundsätzlich eine Bemessung nach Eurocode 2 [8, 9] für den tragenden Betonkern unter Verwendung eines Betons nach DIN 206-1 in Verbindung mit DIN 1045-2 möglich. In einem solchen Fall liegt lediglich eine Abweichung von DIN 1045-3 mit der Verwendung einer nicht geregelten Schalung (gedruckte

Schalungsstreifen) vor. Die effektive Dicke des Querschnitts entspricht hierbei der Dicke des Ortbetonquerschnitts (Kern), wobei Toleranzen bzw. Abweichungen der Druckschichten und die daraus resultierende tatsächliche Dicke des Querschnitts zu beachten sind. Für den Bauzustand ist zu berücksichtigen, dass an die gedruckten Schalungen Anforderungen gemäß einer vorübergehenden Bemessungssituation bestehen; es sind entsprechende Nachweise zu führen. Es muss beispielsweise der Widerstand der gedruckten Schalungsstreifen unter dem einwirkenden Frischbetondruck nachgewiesen werden.

Mit dem Druck eines vollständigen Querschnitts, Ausführungsart B (vgl. Tab. 1 und 3), wird ein Bauteil hergestellt, das derzeit nach keiner gültigen Norm bemessen werden kann; jedoch ist grundsätzlich eine versuchsgestützte Bemessung nach Eurocode 0 möglich. Es sind Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit für die vertikale zentrische und/oder exzentrische Belastung und die kombinierte vertikale sowie horizontale Belastung in Scheiben- und Plattenrichtung zu führen. Zudem ist das Brandverhalten zu untersuchen. Einzelne Nachweise können alternativ in Anlehnung an den Eurocode 2 geführt werden (z. B. Schubkraftübertragung in den Fugen), wenn die relevanten Einflussgrößen für das jeweilige Widerstandsmodell bekannt sind und die Konformität dieser Einflussgrößen gemäß den einschlägigen Regelwerken nachgewiesen wurde. Erforderlichenfalls sind Annahmen zu treffen, die nachweislich auf der sicheren Seite liegen, damit das nach Eurocode 0 geforderte Sicherheitsniveau stets erreicht wird. Für die rechnerische Nachweisführung ist eine effektive Dicke des Querschnitts h_{eff} (vgl. Tab. 3) zu ermitteln, die aus Erfahrungen und Vorinformationen, d. h. aus Vermessungen und der geometrischen Streuung, errechnet werden kann, wenn geometrische Abweichungen vorliegen, die größer sind als die in den Bemessungsmodellen der einschlägigen Normen berücksichtigten Abweichungen oder Variationskoeffizienten.

Für die Ausführungsarten C und D (vgl. Tab. 1), Querschnitte, die sich aus mehreren gedruckten Streifen in einer geradlinigen oder freien Form zusammensetzen, bestehen in der Literatur (z. B. [10, 11]) nur wenige Kenntnisse zum Tragverhalten. Ein Ansatz zur Berücksichtigung einer effektiven Dicke des Querschnitts für die Bemessung kann aufgrund der geringen Datenmenge und den unterschiedlichen geometrischen Varianten daher nicht formuliert werden. Bei der Ausführungsart C mit einer geradlinigen Anordnung der Querschnittsstreifen ist im ungünstigsten Fall von lediglich einem tragenden Streifen auszugehen.

Grundsätzlich sind bei der Herstellung eines Bauwerks Vermessungen tragender Bauteile durchzuführend, um Abweichungen vom Nennquerschnitt, die größer als die Maßtoleranzen nach DIN 18202 [12] und DIN EN 13670 [13] sind zu erfassen. Der Einfluss solcher Abweichungen ist in Bezug auf die Tragfähigkeit zu beurteilen.

4 Empfehlungen für die Praxis und Schlussfolgerungen

Die Herstellung von unbewehrten, tragenden Betonwänden, die mit Beton oder Mörtel ohne Nachverdichtung und ohne die Verwendung einer Schalung ausgeführt werden, sowie die Herstellung von tragenden Betonschalungen, in die Ortbeton eingefüllt wird, ist derzeit noch nicht normativ geregelt. Die Herstellung und Bemessung solcher Wände oder Schalungen mit einem 3D-Druck-Verfahren erfüllen daher nicht die allgemeinen Anforderungen, die in den Landesbauordnungen verankert sind, bzw. die Anforderungen der technischen Baubestimmungen der Länder.

Bei einem einzelnen Bauvorhaben bedarf es daher einer Zustimmung im Einzelfall (ZiE) und einer vorhabenbezogenen Bauartgenehmigung (vBg), um diese regelungsbedürftigen Lösungen ver- und anwenden zu können [14]. Die Beantragung einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (abZ) und einer allgemeinen Bauartgenehmigung (aBG) beim Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) ist für die deutschlandweite Anwendung dieses innovativen Herstellverfahrens erforderlich. Darüber hinaus besteht auf europäischer Ebene die Möglichkeit eine europäische technische Bewertung (ETA) zu erwirken [3].

Um eine Aussage über die Konformität von mit 3D-Beton-Druckverfahren hergestellten Wänden in Bezug auf die einschlägigen technischen Regelwerke treffen zu können, sind Anforderungen an das Material und die herzustellenden Bauteile zu formulieren; insbesondere dann, wenn Bauteile mit einem nicht nur vorrübergehend tragenden Querschnitt vorliegen, die nicht vollständig nach Eurocode 2 bemessen werden können. In einem solchen Fall sind Untersuchungen auf der Material- und Bauteilebene durchzuführen. Weitere Empfehlungen für die Planung und Durchführung von Projekten mit additiven Fertigungsverfahren können [3] entnommen werden.

Die Bewertung von Abweichungen von Regelwerken wird mit zunehmender Anzahl an Abweichungen schwieriger; unter Umständen ist eine Bewertung von Abweichungen überhaupt nicht möglich. Um eine Aussage zur Konformität treffen zu können, sind experimentelle Untersuchungen erforderlich. Mit einer zunehmenden Anzahl an Abweichungen findet zudem eine Verschiebung von einer Bewertung für die Anwendung zu einer Grundlagenforschung statt. Eine praktische Anwendung der Ergebnisse und Erkenntnisse ist gegebenenfalls erst dann möglich, wenn alle relevanten Einflussgrößen untersucht wurden. Bei der Entwicklung neuartiger Bauprodukte und Bauarten wird daher grundsätzlich empfohlen, möglichst wenige Abweichungen von den aktuell anzuwendenden Regelwerken anzustreben und dies im Entwicklungsprozess zu berücksichtigen, um den technischen, zeitlichen und finanziellen Aufwand für den Nachweis der Ver- und Anwendbarkeit eines neuen Bauprodukts oder einer neuen Bauart möglichst gering zu halten. Für das 3D-Drucken mit Beton wird in diesem Zusammenhang empfohlen, einen Beton nach Norm zu verwenden, damit lediglich Abweichungen von den Regelwerken in Bezug auf die Ausführung und die Bemessung vorliegen. Das Trag- und Verformungsverhalten 3D-gedruckter Bauteile unter den verschiedenen Einwirkungen ist zukünftig ausführlich zu erforschen. Die Überführung der Ergebnisse in Regelwerke ermöglicht die breitere Anwendung von 3D-gedrucktem Beton oder Mörtel.

Abschließend werden drei Forschungsfragen formuliert, wobei die Antworten von wesentlicher Bedeutung für die praktische Anwendung 3D-gedruckter Bauteile sind:

- Sind Anpassungen der Widerstandsmodelle gemäß Eurocode 2 für den Nachweis 3D-gedruckter Bauteile möglich und/oder welche weiteren Einflussgrößen sind zwingend zu berücksichtigen; und können Bauteile und Tragwerke aus Mörtel ebenfalls nachgewiesen werden?
- Kann eine effektive Dicke des Querschnitts bei aus mehreren Streifen zusammengesetzten Querschnitten bei der Bemessung angesetzt werden oder ist lediglich eine versuchsgestützte Bemessung nach Eurocode 0 möglich?
- Welchen Einfluss hat die fehlende Nachverdichtung bzw. der fehlende Energieeintrag auf den Verbund zwischen den Druckschichten und damit auch auf das Tragverhalten eines Bauteils; insbesondere bei einer horizontalen Einwirkung?

5 Literatur

- [1] Näther, M., Nerella, V. N., Krause, M., Kunze, G., Mechtcherine, V., Schach, R. (2017) Beton-3D-Druck - Machbarkeitsuntersuchungen zu kontinuierlichen und schalungsfreien Bauverfahren durch 3D-Formung von Frischbeton. Abschlussbericht. Forschungsinitiative Zukunft Bau F 3024. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.
- [2] Statistisches Bundesamt (2022) Bauen und Wohnen - Baufertigstellungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden (Neubau) nach überwiegend verwendetem Baustoff. Lange Reihen ab 2000.
- [3] Mechtcherine, V., Kuhn, A., Mai, I., Nerella, V. N., Weger, D., Ivaniuk, E., Wiens, U. (2024) Additive Fertigung mit Beton - Leitfaden für die Planung und die Durchführung von Projekten. Beton- und Stahlbetonbau 119, 4, 290–310, doi=10.1002/best.202400005.
- [4] Schutter, G. de, Lesage, K., Mechtcherine, V., Nerella, V. N., Habert, G., Agusti-Juan, I. (2018) Vision of 3D printing with concrete – Technical, economic and environmental potentials. Cement and concrete research 112, 25–36, doi=10.1016/j.cemconres.2018.06.001.
- [5] Die Landesregierung Nordrhein-Westfalen (2021) Ministerin Scharrenbach: 3D-Druck-Haus in Beckum sorgt für positiven Druck in der Baubranche. <https://www.land.nrw/pressemitteilung/ministerin-scharrenbach-3d-druck-haus-beckum-sorgt-fuer-positiven-druck-der>. Zugriff am 18.01.2025.
- [6] Heidelberg Materials AG (2024) Schlüsselübergabe für Europas größtes 3D-gedrucktes Gebäude. Heidelberg Materials liefert 333 Tonnen 3D-Druckbeton. Pressemitteilung. Zugriff am 18.01.2025.
- [7] STRABAG SE, Marketing (2024) Ein Haus aus einem Druck: Putzmeister und ZÜBLIN präsentieren ersten Massivbau mit tragenden Betonwänden aus dem 3D-Drucker. Presse-Information Nr.: 2015. Zugriff am 18.01.2025.
- [8] DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04. Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau. Beuth Verlag GmbH, Berlin, doi=10.31030/1946465.
- [9] DIN EN 1992-1-1:2011-01. Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC2010. Beuth Verlag GmbH, Berlin, doi=10.31030/1723945.
- [10] Mohammed, A. A., Al-Tamimi, A. K., Al-Abdwais, A. H. (2024) Structural performance of 3D concrete printed load-bearing walls. doi=10.1007/s40964-024-00914-4.
- [11] Daungwilailuk, T., Pheinsusom, P., Pansuk, W. (2021) Uniaxial load testing of large-scale 3D-printed concrete wall and finite-element model analysis. Construction and Building Materials 275, 122039, doi=10.1016/j.conbuildmat.2020.122039.
- [12] DIN 18202:2019-07. Toleranzen im Hochbau - Bauwerke. Beuth Verlag GmbH, Berlin, doi=10.31030/3061349.
- [13] DIN EN 13670:2011-03. Ausführung von Tragwerken aus Beton. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [14] Deutsches Institut für Bautechnik. Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ)/ Allgemeine Bauartgenehmigung (aBG). <https://www.dibt.de/de/wir-bieten/zulassungen-etas-und-mehr/abz-abg>. Zugriff am 18.01.2025.

6 Autoren

Dr.-Ing. Agemar Manny

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Gotthard-Franz-Straße 3
76131 Karlsruhe
agemar.manny@kit.edu

Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Gotthard-Franz-Straße 3
76131 Karlsruhe
frank.dehn@kit.edu