

Additive Fertigung mit Beton – Leitfaden für die Planung und die Durchführung von Projekten

Dieser Leitfaden, erstellt von der Arbeitsgruppe „Digitaler Betonbau durch additive Fertigung“ des Deutschen Ausschusses für Stahlbetonbau (DAfStb), dient als umfassende Ressource zur Unterstützung von Planung und Durchführung additiver Fertigungsprojekte im Betonbau in Deutschland. Er richtet sich an Architekten, Planer, Antragsteller, Materialhersteller, Bauunternehmen und weitere am Bau Beteiligte. Nach einer kurzen Vorstellung der Klassifizierung, Terminologie und Methoden der additiven Fertigung werden rechtliche Aspekte und Genehmigungsverfahren beleuchtet, um eine nahtlose Integration dieser Technologie in die Baupraxis zu gewährleisten. Der Leitfaden behandelt die Einordnung additiver Fertigungsmethoden mit Beton in das Bauordnungsrecht, erläutert den Ablauf von Genehmigungsverfahren und bietet Orientierungshilfen zur Abstimmung von Zuständigkeiten bei Projekten. Er geht auf technische Regeln für die Bemessung und Konstruktion von Tragwerken ein, insbesondere bei additiv hergestellten Wänden, und behandelt konstruktive Aspekte der Bewehrung. Ein wichtiger Bestandteil sind Beton- und Bauteilprüfungen, einschließlich der Methoden zur Probenherstellung sowie Prüfverfahren für Frisch- und Festbeton, was den Leitfaden zu einem hilfreichen Werkzeug für Fachleute im Bereich des digitalen Betonbaus macht.

Stichworte Betonbau; additive Fertigung; 3D-Betondruck; Projektplanung; Zulassungsverfahren; Materialprüfung; Bemessung

1 Einleitung

Additive Fertigungstechnologien für Bauelemente haben sich im letzten Jahrzehnt rasant entwickelt [1]. Additive Fertigung mit Beton, auch als 3D-Betondruck (engl.: 3D Concrete Printing, 3DCP) bekannt, ermöglicht eine effektive Verbindung zwischen digitaler Planung und digitaler Fertigung im Bauwesen [2]. Im allgemeinen Kontext der digitalen Fertigung mit Beton (DFB) ermöglichen diese Technologien Lösungen für langjährige Herausforderungen, einschließlich stagnierender Produktivität, begrenzter geometrischer Freiheit, langsamer Baugeschwindigkeiten, hoher Unfall- und Verletzungsraten auf Baustellen sowie hoher Baukosten [1]. Neben Hunderten von Forschungsprojekten, die sich weltweit mit der Entwicklung von 3D-Betondruck befassen, gibt es eine zunehmende Anzahl von realen Anwendungen, einschließlich 3D-gedruckten Brücken [3] und Wohngebäuden [4].

Additive manufacturing with concrete – guidance for planning and implementation of projects

This guideline, created by the DAfStb Working Group “Digital Concrete Construction through Additive Manufacturing,” serves as a comprehensive resource to support the planning and implementation of additive manufacturing projects in concrete construction. It is intended for architects, planners, applicants, material manufacturers, construction companies, and other parties involved in construction. After a brief introduction to the classification, terminology, and methods of additive manufacturing, legal aspects and approval procedures are highlighted to ensure seamless integration of this technology into construction practice. The guide addresses the integration of additive manufacturing methods with concrete into construction law, explains the approval process, and offers assistance for coordinating responsibilities in projects. It addresses technical rules for the design and construction of structures, particularly for walls produced by additive manufacturing, and covers constructive aspects of reinforcement. An important component is concrete and component testing, including methods for sample preparation and testing procedures for fresh and hardened concrete, making the guide a useful tool for professionals in the field of digital concrete construction.

Keywords concrete construction; additive manufacturing; 3D concrete printing; project planning; approval procedure; material testing; dimensioning

Auch in Deutschland konnten bereits mehrere Pilotprojekte realisiert werden. Jedoch sind noch etliche Hürden zu nehmen, bevor die additive Fertigung mit Beton umfassend in die Baupraxis überführt werden kann. Die vermutlich größte Hürde ist das Fehlen des schlüssigen und zuverlässigen Regelwerks für die Planung und Durchführung von Projekten, bei denen Betonbauteile und Betonbauwerke durch additive Fertigung hergestellt werden. Dieser Leitfaden wurde durch ein Autorenteam aus der DAfStb-Arbeitsgruppe „Digitaler Betonbau durch additive Fertigung“ mit dem Ziel erstellt, die Planung und Durchführung von solchen Projekten zu unterstützen. Insofern schreibt dieser Beitrag den DAfStb-Sachstandsbericht „Digitaler Betonbau durch additive Verfahren – Sachstand und Forschungsbedarf“ [5], der im November 2021 in dieser Zeitschrift veröffentlicht wurde, und die Ausführungen im Heft 53 „Digitale Fertigung im Betonbau: Grundsätze, Definitionen und mögliche Anwendungsfelder“ [6] des Deutschen Beton- und Bautechnik-Vereins E.V. mit dem Ziel fort, Architekten, Planern,

Antragstellern für Genehmigungsverfahren, Genehmigungsstellen, Herstellern, Bauunternehmen und anderen Baubeteiligten Hilfestellung bei der Umsetzung von Projekten mit dieser neuen innovativen Technologie zu geben.

2 Klassifizierung, Begriffe und Bauweisen der additiven Fertigungsverfahren

2.1 Klassifizierung

Unter additiver Fertigung mit Beton werden verschiedene Verfahren verstanden, bei denen aus einem hydraulisch erhärtenden Bindemittel (in der Regel Zement) unter Verwendung von weiteren Komponenten (Betonzusätze, Gesteinskörnung) und einer computergesteuerten Drucktechnik (sog. CNC-Fertigungsverfahren) Bauteile oder Bauwerke aus Beton, oftmals schichtweise gemäß einem digitalen Plan, hergestellt werden. Die DAfStb-Arbeitsgruppe „Digitaler Betonbau durch additive Verfahren“ hat auf der Grundlage der RILEM-Klassifikation [7] in [5] einen Klassifizierungsrahmen für additive Betonfertigungsverfahren festgelegt (Bild 1). Der Klassifizierungsrahmen ist so konzipiert, dass er:

- das breite Spektrum der Anwendungsfälle der additiven Fertigung mit Beton umfasst,
- auf anerkannten Definitionen und Rahmenwerken von Materialumformungs- und Montageprozessen basiert und
- versucht, möglichst auf bestehende Normen aufzubauen oder diese zu übernehmen.

Die Fertigung und werkseitige Vorfertigung erfordern eine Formgebung des Materials, beinhalten häufig aber auch umfangreiche und baupraktisch etablierte Möglich-

keiten zur Verbesserung der Eigenschaften durch Behandlung der Oberflächen. Die Formgebung kann durch formative, subtraktive oder additive Verfahren bzw. deren Kombinationen erreicht werden. Diese Begriffe bezeichnen die Hauptprozessklassen. Dieser Leitfaden befasst sich ausschließlich mit den additiven Betonfertigungsverfahren.

Bei der additiven Fertigung wird der Beton oder Mörtel kontinuierlich aufgetragen, bis die endgültige Form erreicht ist. DIN EN ISO 17296-2 [8] kennt sieben additive Verfahrensklassen, von denen die drei häufigsten in der additiven Fertigung mit Beton verwendet werden:

- **Extrusion** (auch bzw. engl.: material extrusion) steht für die Prozess-Unterklasse, bei der Material zu einer Düse gefördert, durch die Düse geformt und CNC-gestützt abgelegt wird;
- **Selektives Binden**, oft auch als Partikelbett-Binden (engl.: particle-bed binding) bezeichnet, wobei loses Material durch lokal begrenztes Ein- bzw. Aufbringen einer fließfähigen Phase selektiv gebunden wird;
- **Spritzen** (engl.: material jetting) ähnelt dem Spritzbetonverfahren mit der Besonderheit, dass Auftragsort und Auftragsmenge CNC-gesteuert sind.

Je nach Bauteil und Bauteilexposition sind Oberflächenbehandlung, Beschichtung oder Verkleidung notwendig, um bestimmte Funktionen wie besonders hohe Dauerhaftigkeit, eine spezielle ästhetische Wirkung oder einen ausreichenden Feuerwiderstand zu erzielen. Hauptprozess-Klassen sind hierbei Reinigung und Nachbehandlung sowie Beschichtung und Verkleidung. Für Bauteile und Bauwerke, die dem Bauordnungsrecht unterliegen (vgl. Abschn. 3), kommt derzeit insbesondere die additive Fertigung mittels Extrusion, Spritzen oder durch selektives Binden infrage, da diese Verfahren den größten

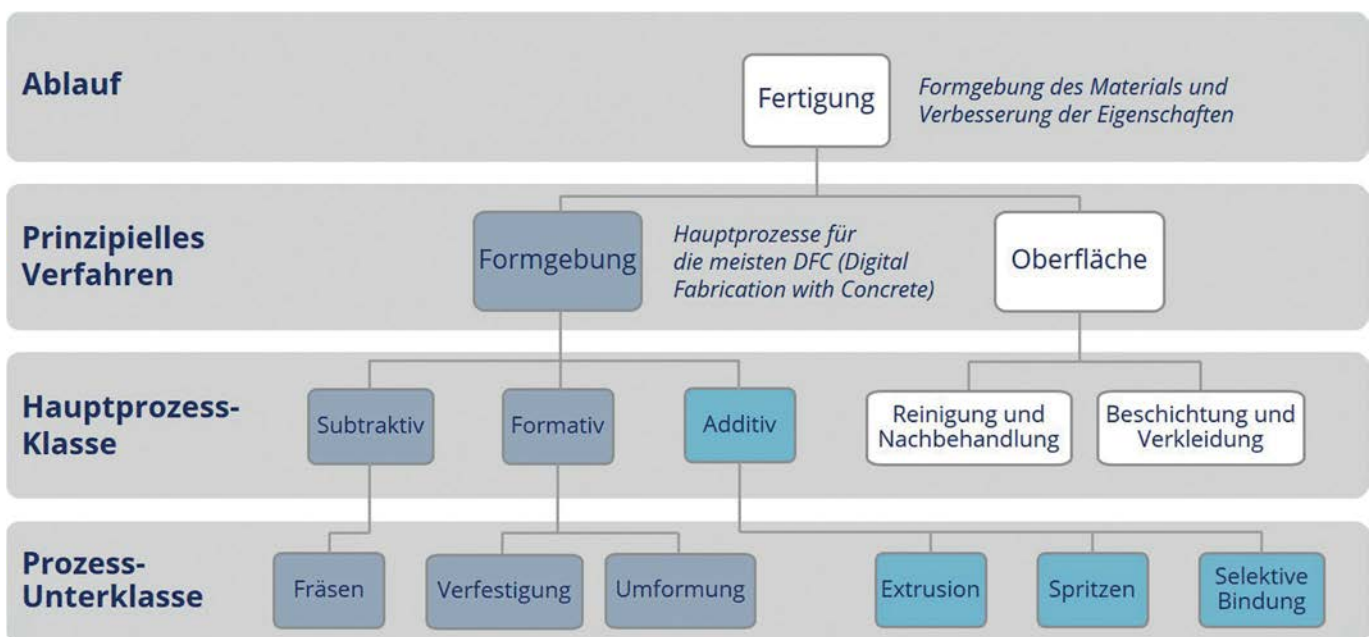


Bild 1 Klassifikation für digitale Fertigungsverfahren mit Beton (additive Verfahren sind in Blau hervorgehoben) [5] nach [7]
Classification framework for digital fabrication with concrete (additive methods highlighted in blue) [5] according to [7]

Technologiereifegrad (TRL = Technology Readiness Level) erreicht haben [6].

2.2 Begriffe und Definitionen

Zum besseren Verständnis werden in diesem Abschnitt die für die additive Fertigung mit Beton maßgebenden Begriffe definiert, die in diesem Leitfaden verwendet werden. Weitere Definitionen können z.B. [6] entnommen werden.

Additive Fertigung (AF, AM): Prozess zur Herstellung von Betonbauteilen oder Betonbauwerken durch automatisiertes Ablegen von Betonsträngen (Extrusion, Spritzen) oder Binden von Partikelschichten mit/von Beton oder Mörtel. Die additive Fertigung von Betonbauteilen wird häufig auch als „3D-Druck“ bezeichnet.

Extrusion: Prozess der additiven Fertigung, bei dem Beton bzw. Mörtel gezielt durch eine Düse oder Öffnung aufgetragen wird.

Extrudierbarkeit: Fähigkeit des Betons oder Mörtels, durch eine Düse oder Druckkopf abgegeben zu werden.

Statische Fließgrenze: Rheologische Eigenschaft des Frischbetons oder -mörtels. Die statische Fließgrenze entspricht einer Spannung, die auf den Beton angewendet werden muss, um das Fließen einzuleiten. Unterhalb dieser Spannung verhält sich das Material wie ein elastischer Festkörper. Wenn die angelegte Spannung größer als die Fließgrenze ist, fließt das Material und verhält sich wie eine viskose Flüssigkeit.

Inline-Kontrolle: Kontinuierliche Kontrolle der Beton- oder Mörtel Eigenschaften während des Druckprozesses.

Partikelbett: Loses Material, das durch kontrolliertes Einbringen einer Flüssigkeit selektiv gebunden wird.

Selektives Binden (selektive Binding, Partikelbett-Binden, Partikelbett-3D-Drucken): Prozess der additiven Fertigung, der auf dem kontrollierten Eindringen einer Flüssigkeit in ein Partikelbett basiert, indem ein flüssiges Bindemittel oder Aktivator gezielt auf Partikel aufgebracht wird, damit diese sich verbinden.

(Form-)Stabilität/Aufbaubarkeit/Grünstandfestigkeit: Fähigkeit des Betons oder Mörtels, beim 3D-Drucken die vorgegebene Form unter zunehmender Auflast beizubehalten.

Technologiereifegrad (TRL): Von der NASA entwickelte Skala zur Bewertung des Entwicklungsstands von neuen Technologien auf der Basis einer systematischen Analyse.

Verarbeitungszeit: Zeitraum, in dem Beton oder Mörtel kontinuierlich durch die Düse abgegeben wird, ohne zu stoppen oder zu verstopfen.

2.3 Additive Fertigung im Bauwesen

Die additive Fertigung ermöglicht neue und innovative Konstruktionen. Bis dato wurden bereits einige Bauprojekte realisiert (vgl. Abschnitt 3 in [5]), wobei sich das Extrusionsverfahren bisher als bevorzugte Variante für großformatige Bauteile oder auch Gesamtbauwerke etabliert hat, vgl. z.B. [2]. Derzeit gewinnen jedoch auch die auf Spritzen und selektives Binden basierten Verfahren schnell an baupraktischer Bedeutung. Der digitale Druckprozess kann direkt auf der Baustelle (in situ) oder, im Falle von vorgefertigten Bauteilen, auch im Werk (ex situ) erfolgen.

- **In situ:** Bei der In-situ-Herstellung werden derzeit vorzugsweise ein- oder zweidimensionale Druckglieder als schalungslose Konstruktionselemente ausgeführt. Hierbei kann eine auf den Druckprozess abgestimmte Topologie umgesetzt werden, z.B. einfach oder auch doppelt gekrümmte Wände oder Stützen mit über die Stützenlänge variablen Querschnittsabmessungen. Ein wesentliches Augenmerk muss bei der In-situ-Herstellung auf die prozess- und ausführungsspezifischen Randbedingungen gelegt werden (z.B. Ablegegeschwindigkeit, Grünstandfestigkeit, Größe der Druckabschnitte, geometrische Maßhaltigkeit), durch die die bemessungsspezifischen Kenngrößen ggf. entscheidend beeinflusst werden (z.B. Fugencharakteristik (frisch-in-frisch, „kalte Fuge“ (cold joint)), Anisotropie etc.).
- **Ex situ:** In der werksmäßigen Ex-situ-Herstellung kann das Spektrum der additiv gefertigten Konstruktionselemente u.a. auf komplexere und feiner aufgelöste Bauteile erweitert werden. Neben der maschinellen Ausstattung sind im Werk auch Vorteile hinsichtlich der Materialqualität (Durchgängigkeit von Frisch-in-frisch-Fugen, geringere Heterogenität und Anisotropie) und ein besserer Schutz vor Witterungseinflüssen (Sonneneinstrahlung, Wind, Regen, Temperaturschwankungen) vorhanden, die sich u. a. in einer geringeren Streuung der Materialkenngrößen und der Maßabweichungen widerspiegeln. Auf dieser Grundlage lassen sich zielgerichtet feingliedrige, form- und kraftflussoptimierte Bauelemente mit hoher Tragfähigkeit herstellen, die zu leichten und filigranen Strukturen im Werk oder auf der Baustelle zusammengefügt werden können.

Beim Fügen von Betonbauteilen aus der additiven Fertigung (vor allem ex situ) können grundsätzlich die in der Baupraxis üblichen Fügeelemente verwendet werden (Bewehrungskörbe, Dübel, ISO-Körbe etc.). In einigen Fällen ist eine Nachbearbeitung erforderlich, um die notwendige Qualität der Oberfläche zu erreichen.

3 Einordnung der additiven Fertigung mit Beton in das Bauordnungsrecht

3.1 Allgemeines

Bei der Weiterentwicklung von Innovationen wie der additiven Fertigung mit Beton ist in vielen Fällen das Bauordnungsrecht zu beachten, insbesondere dann, wenn die Erfüllung von Grundanforderungen an Bauwerke beachtet werden muss. Im Anhang I der EU-BauPVO [9] gliedern sich diese Grundanforderungen wie folgt:

- A 1 Mechanische Festigkeit und Standsicherheit,
- A 2 Brandschutz,
- A 3 Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz,
- A 4 Sicherheit und Barrierefreiheit bei der Nutzung,
- A 5 Schallschutz,
- A 6 Wärmeschutz.

In Deutschland ist das Baurecht Ländersache. Das heißt, dass jedes einzelne Bundesland eine Landesbauordnung (LBO) hat. Es gibt bundesweit eine Musterbauordnung (MBO) [10], an der sich die Bundesländer orientieren können oder die die Bundesländer einführen können. Die Musterverwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB) [11] ist eine bauordnungsrechtlich relevante Veröffentlichung des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt). Sie führt die Technischen Regeln für die Planung, Bemessung und Ausführung von Bauwerken und für Bauprodukte in einem Dokument zusammen. Sie greift die materiellen Anforderungen der Bauordnung auf und konkretisiert diese, indem sie auf Technische Regeln von allgemeiner Gültigkeit verweist und zusätzliche Anwendungsregeln beschreibt. Weder für den Beton, der derzeit in der Regel von den einschlägigen Normen abweicht, noch für Bauteile oder ganze Bauwerke, die durch additive Fertigung hergestellt werden, existieren derzeit eingeführte Technische Regeln. Die MVV TB [11] enthält für diese Fälle konkrete Hinweise: *„Sofern von der maßgebenden technischen Regel abgewichen wird, ist für Bauprodukte eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung oder eine Zustimmung im Einzelfall und für Bauarten eine allgemeine oder vorhabenbezogene Bauartgenehmigung erforderlich.“* Eine Übersicht zu Genehmigungen bzw. Nachweisen ist beim Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) [12] gegeben:

a) Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ)

In der abZ werden die bauaufsichtlich relevanten Eigenschaften des Bauprodukts, die Verwendungsbereiche sowie die Aspekte Verarbeitung, Transport, Lagerung, Kennzeichnung und Übereinstimmungsbestätigung geregelt.

b) Allgemeine Bauartgenehmigung (aBG)

Die Bauordnungen der Bundesländer zielen auf die Sicherheit von Bauwerken ab. Um diese zu gewährleisten, kann es notwendig sein – zusätzlich zu den Produkteigen-

schaften – Aspekte des Zusammenfügens von Bauprodukten zu baulichen Anlagen zu regeln. Das ist zum Beispiel der Fall, wenn sich wichtige Eigenschaften einer baulichen Anlage erst aus dem Zusammenwirken verschiedener Bauprodukte ergeben.

c) Zustimmung im Einzelfall (ZiE) und vorhabenbezogene Bauartgenehmigung (vBG)

Wenn ein regelungsbedürftiges Bauprodukt nur für ein einzelnes Bauvorhaben verwendet werden soll, kann statt einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung eine Zustimmung im Einzelfall beantragt werden. Analog ist für regelungsbedürftige Bauarten im Einzelfall eine sogenannte vorhabenbezogene Bauartgenehmigung zur Verfügung. Beispiele aus der Anwendung der additiven Fertigung mit Beton sind z. B. in [5] enthalten.

d) Europäische Technische Bewertung (ETA)

Eine Europäische Technische Bewertung kann erwirkt werden, wenn ein Produkt europaweit vermarktet werden soll. Die ETA ist ein Produktleistungsnachweis, der zur CE-Kennzeichnung führt. Mit der ETA können auch Bauprodukte, die nicht vollständig von einer harmonisierten Norm erfasst sind, im gesamten Europäischen Wirtschaftsraum, in der Schweiz und der Türkei vertrieben werden.

Die Ausführungen im Folgenden beziehen sich auf den nationalen Bereich.

3.2 Ablauf von Genehmigungsverfahren

3.2.1 Allgemeines

Bei Genehmigungsverfahren steht als Erstes die Anfrage. Gegebenenfalls ist ein telefonisches oder persönliches Beratungsgespräch zu führen, bei dem auch die Frage der zuständigen Behörde angesprochen werden kann. Allgemeine Hinweise zu Genehmigungsverfahren gibt es auf den Websites des DIBt [12] und der zuständigen Ministerien der Bundesländer.

Nachdem durch die Anfrage die zuständige Behörde geklärt ist, erfolgt die Antragstellung. Der Antrag für vorhabenbezogene Genehmigungen ist bei der zuständigen Baubehörde bzw. Landesbaubehörde zu stellen. Bundeslandabhängig sind verschiedene Behörden erste Ansprechpartner, in Sachsen und Baden-Württemberg beispielsweise jeweils die Landesstelle für Bautechnik. Häufig lässt sich über das Internet die Institution für eine Antragstellung finden. Beispielhaft wird auf die Regelung der Antragstellung im Land Berlin hingewiesen, vgl. [13]. Antragstellungen von allgemeinen Bauartgenehmigungen oder allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen sind an das DIBt zu richten. Die Anträge werden in entsprechenden Sachverständigenausschüssen des DIBt beraten und zielgerichtete Prüfprogramme entwickelt.

Die Dauer von Genehmigungsverfahren hängt von der Objektanzahl und -komplexität ab. Bei Einzelvorhaben (ZiE, vBG) ist die Dauer kürzer, weil der Bezug auf ein oder mehrere gleichartige Bauprojekt(e) eingegrenzt ist. Ergebnisse aus Zustimmungen im Einzelfall (ZiE) und vorhabenbezogenen Bauartgenehmigungen (vBG) können genutzt werden, um in einem nächsten Schritt allgemeine Genehmigungsverfahren (abZ oder aBG) anzustrengen, die dann deutschlandweit angewendet werden dürfen. Entsprechend dauert die Erteilung von abZ oder aBG länger, weil die zugehörigen Prüfprogramme und Nachweise in der Regel umfassender sind. Beim ersten 3D-gedruckten Haus in Beckum (vgl. z.B. [5]) hat das Verfahren von der Anfrage bis zur Erteilung der ZiE elf Monate gedauert.

Für einen geordneten und zügigen Ablauf der Antragstellung sollten folgende prinzipielle Gesichtspunkte berücksichtigt werden:

- a) Aufklärung von Baubeteiligten (Architekten, Planer, Bauunternehmer u. a.) zu den folgenden Themen:
 - Landesbauordnung LBO
 - Verwendbarkeitsnachweise
 - Wann benötigt man eine ZiE oder aBG?
 - Wieviel Planungsvorlauf ist erforderlich?
 - Auf welche Beteiligten kommt welche Aufgabe zu?
- b) Weitestgehende Verwendung von genormten Baustoffen und Bauprodukten: Jede Abweichung von genormten Bauprodukten, Bauteilen oder Bauarten führt aufgrund von zusätzlichen Prüfungen und Nachweisen zu einer Verlängerung beim Gesamtablauf eines Bauvorhabens und muss entsprechend eingeplant werden.
- c) Generelle Erfahrungen aus anderen Genehmigungsverfahren nutzen, z. B.:
 - Die Durchführung von Abstimmungsgesprächen im Vorfeld der Antragstellung.
 - Eine Projektsteuerung ist wichtig. Es wird ein Koordinator benötigt, der fachkompetent ist und einen Überblick über das Verfahren und den Zeitplan hat.
 - Die Qualität der vorgelegten Unterlagen ist allgemein wichtig; dies gilt insbesondere für die Gutachten von fachkundigen Personen, die mit dem Genehmigungsgegenstand sehr gut vertraut sind.
 - Die Ausführungspläne sollten ausreichend ausführlich und präzise sein.
 - Ein Sachverstand der Hersteller (z. B. für den 3D-Beton) ist unbedingt erforderlich.
- d) Amtshilfe nutzen: Eine Verkürzung der Genehmigungsdauer ist durch Amtshilfe zwischen Bundesländern möglich. Bereits durchgeführte Versuche sind gegebenenfalls von einem Projekt auf das andere Projekt (von einem Bundesland auf das andere) übertragbar.

e) Festlegung der Zuständigkeiten und der Zusammenarbeit: Die Festlegung der Zuständigkeiten kann durch eine tabellarische Darstellung unterstützt werden (Beispiel Tab. 1). Eine solche Tabelle ist für das jeweilige Bauvorhaben anzupassen. Wesentliche Punkte für die Zusammenarbeit sind:

- Aufgeschlossenheit aller Beteiligten gegenüber neuen Technologien
- Wille zur Zusammenarbeit
- Vertrauen zum Gutachter
- Transparenz des Gutachtens

3.2.2 Additive Fertigung mit Beton

Aus den Erfahrungen mit Zustimmungen im Einzelfall (ZiE) oder vorhabenbezogenen Bauartgenehmigungen (vBG) für die ersten in Deutschland additiv gefertigten Häuser kann eine Dauer von sechs Monaten bis ca. zwei Jahren für diesen Genehmigungsweg angegeben werden [14]. Allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen oder allgemeine Bauartgenehmigungen liegen zum Zeitpunkt der Veröffentlichung dieses Beitrags noch nicht vor. Tab. 1 gibt eine Orientierungshilfe zur Abstimmung der Zuständigkeiten bzw. Aufgabenverteilungen bei der Planung und der Ausführung von Projekten zur additiven Fertigung mit Beton (beispielhafte Darstellung). Die Darstellung macht deutlich, dass von Projektbeginn an intensive Abstimmungen mit verschiedenen Verantwortlichen und Mitwirkenden erforderlich sind. Bei 3D-gedruckten Gebäuden beeinflussen sich der Entwurf, die Drucktechnologie und das Material gegenseitig. Somit muss für jedes Gebäude ein Herstellungs-konzept erarbeitet werden. Das Herstellungs-konzept beinhaltet u. a. einen auf den Druckprozess abgestimmten architektonischen Entwurf, verfahrenstechnische Details, wie die Düsengeometrie und Interlayerzeit, oder die zu erwartenden Umgebungsbedingungen (wie Temperatur, Wind, direkte Beregnung etc.), die sich auf die Materialzusammensetzung oder die bauseitig erforderliche Ausstattung auswirken können (Bild 2).

Bisher gibt es noch keine einheitlichen Prüfregeln oder Normen für 3D-gedruckte Bauteile. Jedoch können, sobald das Herstellungs-konzept bekannt ist, Analogien zu vorhandenen, „verwandten“ Regelwerken genutzt oder angepasst werden, um ein (Nachweis-)Konzept für eine Genehmigung eines Projekts zu entwickeln (vgl. Abschn. 4, 5). Aus geplanten oder bereits durchgeführten ZiE/vBG zur additiven Fertigung mit Beton (vgl. z.B. [14,15]) wurden bereits Konzepte aus Prüfungen an Kleinproben und großformatigen Bauteilen und Koppung mit der Bemessung und der Drucktechnologie entwickelt, die bei den Genehmigungsverfahren angewendet werden können (vgl. Abschn. 4).

Tab. 1 Orientierungshilfe zur Abstimmung von Zuständigkeiten und Aufgabenverteilungen bei Projekten zur additiven Fertigung mit Beton (Beispiel)
Guidance for coordinating responsibilities and task allocations in additive manufacturing projects with concrete (an example)

Aufgabe	Bauherr	Antragsteller	Architekt/ Planer	Tragwerksplaner	Gutachter	Genehmigungsbehörde	Prüfstatiker	Bauausführender	Hersteller ^a	Überwacher
Projektidee	V	V								
Prüfung auf Regelwerkabweichung		V	V	V	V	V	V		V	
Antragstellung	M	V		M						
Entwurf des Nachweis- und Prüfkonzpts				M	V	M				
Versuchsausführung (Kleinproben und großformatige Bauteile)				M	V	M		M	M ^b	
Gutachtenerstellung					V					
Tragwerksplanung				V						
Prüfstatik							V			
Bauausführung				M				V	(V)	M
Bau- und Fertigteileüberwachung					M					V

V: Verantwortung

M: Mitwirkung

Hinweis: Die Tabelle ist projektbezogen anzupassen.^a Hersteller: Darunter sind die Hersteller von Bewehrung, 3D-Beton, Fertigteilen usw. zu verstehen.^b Der Hersteller stellt üblicherweise die Proben her und der Gutachter überwacht den Vorgang.

3.2.3 Verkehrswegebau

Bei öffentlichen Verkehrsanlagen im Straßenbau und dem damit verbundenen Brückenbau ist der Baulastträger gemäß Bundesfernstraßengesetz zuständig für das Genehmigungsverfahren. Hier können bei Zustimmungen im Einzelfall Landesstellen für Bautechnik Amtshilfe leisten. Bei privaten Verkehrsanlagen ist im Zweifelsfall mit diesen Stellen zu klären, wer zuständig ist. Vor oder bei Antragsingang ist zu prüfen, ob und wenn ja, worin die Abweichungen vom gängigen Regelwerk (z. B. Technische Baubestimmungen, Normen, Zulassungen, Richtlinien) bestehen und was abgeklärt werden muss. Dies ist zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Leitfadens für Bauteile aus der additiven Fertigung mit Beton gegeben, da einschlägige Standards fehlen.

4 Bemessung und Konstruktion

4.1 Allgemeine Möglichkeiten in der Bemessung und Konstruktion

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, eine Genehmigung additiv hergestellter Betonbauteile zu erhalten:

- Rechnerische Beurteilung anhand vorhandener technischer Regeln (Abschn. 4.2) und Bemessungs- und Konstruktionsprinzipien (Abschn. 4.3 und 4.4),
- Versuchsgestützten Bemessung nach Anhang D von DIN EN 1990 [16] (Abschn. 4.2),
- Auf Grundlage von Erfahrungen (erteilte ZiE, aBG), abZ und aBG.

4.2 Technische Regeln

Die Bemessung und Konstruktion von Tragwerken aus Beton bzw. Mauerwerk basieren hauptsächlich auf dem Eurocode 2 [17] in Verbindung mit dem nationalen Anhang [18] und dem Eurocode 6 [19] in Verbindung mit

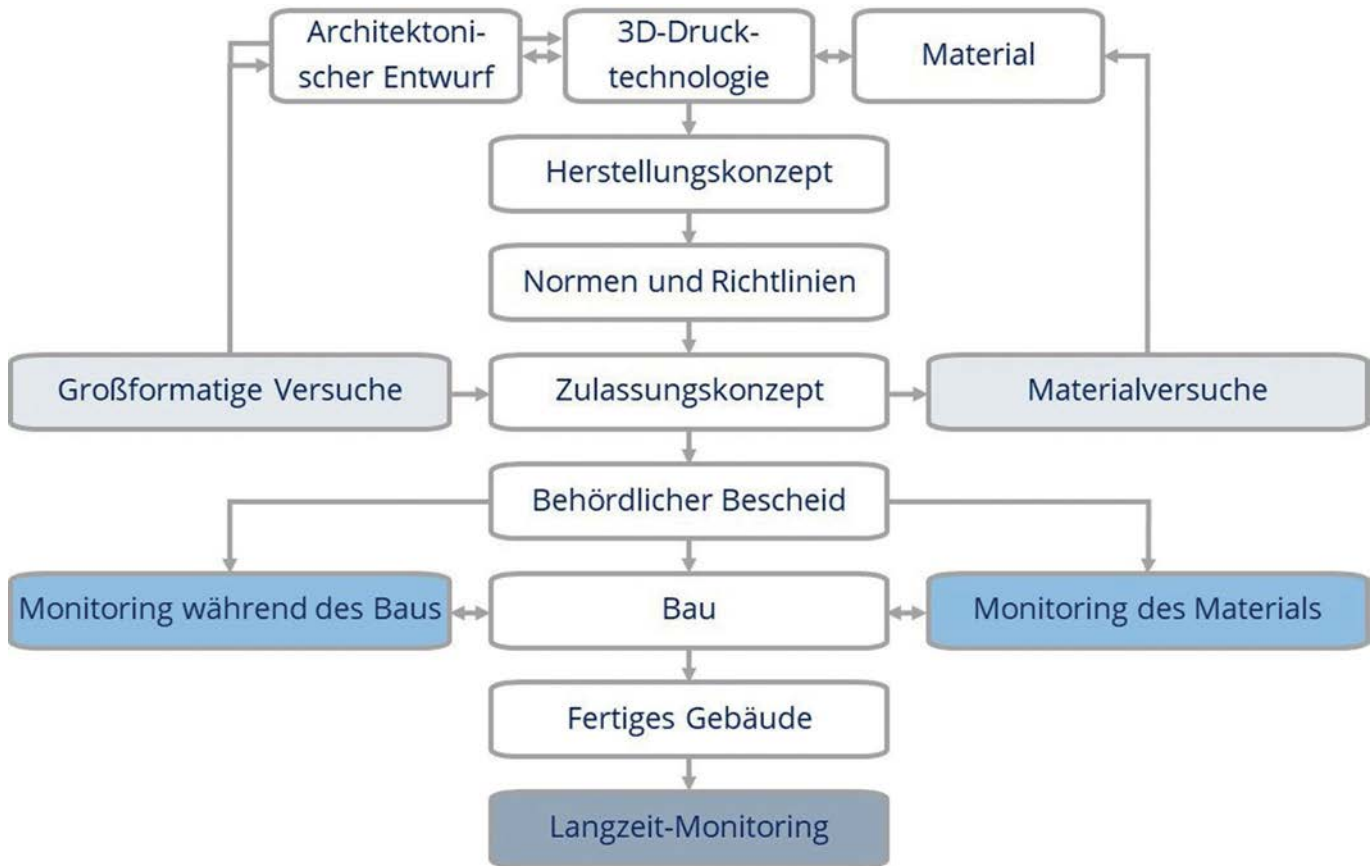


Bild 2 Generelles Vorgehen und Konzept bei ZIE/vBG für Projekte der additiven Fertigung [15]
 General procedure and concept for project-related approvals (ZIE) or project-related construction technique permits (vBG) for additive manufacturing projects [15]

dem nationalen Anhang [20]. Leistungsorientierte Ansätze für Bauart- und Produktneuentwicklungen sind durch die versuchsgestützte Bemessung in DIN EN 1990 Anhang D [16] gegeben. Dieser Anhang beinhaltet Hinweise für eine versuchsgestützte Bemessung.

Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit sind:

- Funktion des Tragwerks oder eines seiner Teile unter normalen Gebrauchsbedingungen oder
- Wohlbefinden der Nutzer oder
- Erscheinungsbild des Bauwerks.

Eigenschaften von Baustoffen, Bauprodukten und Bauteilen sind

Charakteristische Werte, Mittelwerte, Nennwerte.

Entwurf und Berechnung mit Versuchsunterstützung.

Versuche können notwendig sein, wenn

- keine zutreffenden Modelle zur Verfügung stehen,
- Serienbauteile eingesetzt werden sollen,
- Annahmen beim Entwurf überprüft werden sollen.

Verschiedene Versuchsarten sind im Anhang D.3 von DIN EN 1990 [16] angegeben. Besonders relevante Versuchsarten sind:

- **Direkte Bestimmung der Tragfähigkeit oder Gebrauchstauglichkeit**, z.B. für Brandbelastung, Ermüdungslasten oder Anpralllasten.
Bestimmung bestimmter Baustoffeigenschaften unter bestimmten Prüfbedingungen, z.B. Versuche mit neuen Baustoffen.
- **Verringerung von Unsicherheiten** bei den Einwirkungen, z.B. durch Windkanaluntersuchungen.
Verringerung von Unsicherheiten hinsichtlich bestimmter Größen der Widerstandsmodelle, z.B. Dach- oder Deckenkonstruktionen.
- **Kontrollversuche** zur Überprüfung der Qualität gelieferter Produkte, z.B. Seilprüfung für Brücken oder Betonwürfelprüfung.
Versuche während der Ausführung zur Bestätigung der Eigenschaften nach Einbau, z.B. Pfahlprüfungen oder Seilkraftprüfungen. Kontrollprüfungen zur genaueren Bestimmung der Eigenschaften des Tragwerks nach der Fertigstellung, z.B. zur Bestimmung der elastischen Verformung, Eigenfrequenzen oder Dämpfung.

Der Anhang D von DIN EN 1990 [16] ist in Deutschland nicht bauaufsichtlich eingeführt, kann prinzipiell aber für Bauteilprüfungen aus der additiven Fertigung im Rahmen von Genehmigungsverfahren angewendet werden.

4.3 Bemessung

4.3.1 Allgemeines

Die besonderen Gegebenheiten des schichtenweisen Aufbaus der gedruckten Betonbauteile müssen bei der Bemessung berücksichtigt werden. Dabei müssen neben den herstellungsbedingten Einflussfaktoren insbesondere auch die Interaktionen zwischen der Ablegereihenfolge bzw. -richtung und der späteren Beanspruchungsrichtung berücksichtigt werden. Grundsätzlich kann zwischen bemessungsrelevanten Aspekten im Bauzustand und im Endzustand unterschieden werden, wobei Nachweise im Bauzustand eine wesentlich größere Bedeutung als beim konventionellen Betonbau erhalten. Ein Klassifizierungsdiagramm hinsichtlich der zu beachtenden Aspekte für ausgewählte Besonderheiten bei der Bemessung von additiv hergestellten Wänden ist in Bild 3 dargestellt.

4.3.2 Bauzustand

Wesentliche Aspekte in der Bemessung für den Bauzustand sind:

- **Stabilität:** Durch den Wegfall einer seitlich stützenden Schalung verhält sich das additiv herzustellende Bauteil im Bauzustand empfindlicher gegenüber äußeren Einwirkungen. Besondere Beachtung ist dem Stabilitätsnachweis im Bauzustand unter horizontalen Einwirkungen (z.B. aus Wind) zu schenken. Hier kommt es bei der sich kontinuierlich verändernden Bauhöhe im Druckprozess zu einem sich stetig verändernden statischen System mit zeitlich veränderlichen (jungen) Betoneigenschaften und sich daraus ergebenden Widerstandsgrößen. Außerdem kann es bei einem zu

schnellen Baufortschritt zu einem plastischen Materialversagen oder Ausknicken eines Bauteils durch unzureichende Festigkeit bzw. Elastizitätsmodul des noch nicht erhärteten Betons kommen.

- **Maßgenauigkeit:** Die Maßgenauigkeit wird durch den Bauablauf und die herstellungs- bzw. roboterspezifischen Abweichungen beim Ablegen beeinflusst. Ein wichtiger Aspekt sind die eingepprägten Verformungen infolge des Eigengewichts, bei denen z.B. die unteren, aber noch jungen Betonschichten durch das Eigengewicht der oberen Schichten belastet und plastisch verformt werden [21–23]. Weiterhin können Maßgenauigkeiten durch ungleichmäßigen Materialaustrag entstehen.
- **Verformungsverhalten:** Gedruckte Betonbauteile weisen aufgrund mehlkornreicher Betonzusammensetzung, eines frühen Aussetzens der Trocknung und meist geringer effektiver Bauteildicke deutlich höhere frühe Schwind- und Kriechverformungen im Vergleich zu herkömmlich hergestellten Betonbauteilen auf. Die hohe Schwindneigung (plastisches Schwinden und frühes Trocknungsschwinden) ist insbesondere auch im Hinblick auf mögliche Rissbildung zu berücksichtigen.
- **Verbundfuge:** Wenn Bauteile abschnittsweise hergestellt werden bzw. im Falle von Druckunterbrechungen, sind die erreichten Materialkennwerte des gedruckten Betons (z.B. Biegezugfestigkeit) zu berücksichtigen. Auch eine Klassifizierung des Fugentyps ist vorzunehmen („kalte Fuge“ (cold joint) oder „Frisch-in-frisch“-Fuge). Bemessungsansätze sind hierzu bereits vorhanden und in [24] zu finden.

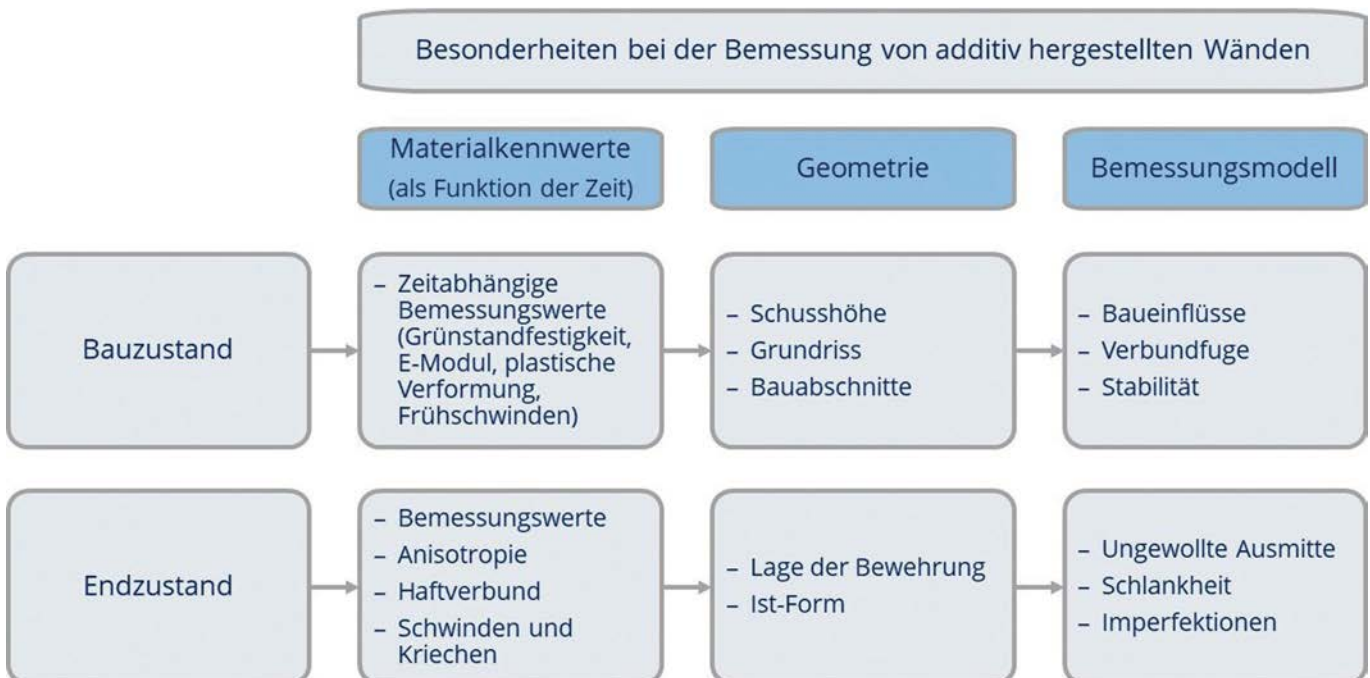


Bild 3 Klassifizierungsdiagramm für ausgewählte Besonderheiten bei der Bemessung von additiv hergestellten Wänden, in Anlehnung an [5]
Classification diagram for selected special features in the design of additively manufactured walls, based on [5]

4.3.3 Endzustand

Wesentliche Aspekte in der Bemessung für den Endzustand sind:

- **Anisotropes mechanisches Verhalten.** Ähnlich wie im Mauerwerkbau ergibt sich infolge des schichtenweisen Aufbaus ein anisotropes mechanisches Verhalten (vgl. Abschn. 5.1), welches sich in den Bemessungsmodellen (z.B. durch Modifikation der Druckspannungs-Dehnungs-Linie des Betons) widerspiegeln muss [21,25]. In diesem Zusammenhang hat die Güte des Haft- bzw. Schichtenverbunds eine große Bedeutung bzw. Schwach- und Fehlstellen wirken sich entsprechend tragmindernd aus.
- **Imperfektionen.** Aufgrund des schichtenweisen Aufbaus im 3D-Betondruck könnte es zu einer unplanmäßigen und ungewollten Lotabweichung im Bauteil kommen. Sofern dies nicht durch prozessspezifische Maßnahmen verhindert bzw. ausgeglichen werden kann, müssen solche Imperfektionen z.B. bei der Bemessung eines Druckglieds berücksichtigt werden.
- **Festbetoneigenschaften.** Die mechanischen Kennwerte des additiv hergestellten Festbetons sind prozessbedingt durch den schichtenweisen Aufbau des Bauteils andere als bei konventioneller Herstellung. Dies äußert sich u.a. in modifizierten Rechenwerten für die anisotropen Betoneigenschaften und angepassten Faktoren zur Berücksichtigung von Langzeit- und Dauerstandeinflüssen. Ebenso müssen die Auswirkungen auf bekannte Berechnungsgrundlagen und Bemessungsmodelle berücksichtigt werden und können ggf. zu Anpassungen in den Grenzzustandsgleichungen führen (u.a. vergrößerte Teilsicherheitsbeiwerte, reduzierter Betontraganteil im Querkraftmodell etc.).

4.3.4 Weitere Besonderheiten der Bemessung von additiv hergestellten Betonbauteilen

Weitere Aspekte, die in der Bemessung zu berücksichtigen sind und zu einer Anpassung der bestehenden Normenansätze führen könnten, sind:

- Herstellungsspezifische Streuung der Festbetoneigenschaften des gedruckten Betons mit Modifikation des Bemessungswerts der Betondruckfestigkeit (u.a. Teilsicherheitsbeiwert auf der Materialeite, Dauerstandeinfluss)
- Abstimmung der Kenngrößen für das zeitabhängige Betonverhalten im Hinblick auf die Verwendung von feinkörnigen Mörteln (z.B. ausgeprägteres Kriech- und Schwindverhalten)
- Einfluss der Betonqualität und Druckprozessgestaltung auf den Verbund zwischen Beton und Bewehrung
- Einfluss der Fugenqualität im Hinblick auf die Dauerhaftigkeitsbemessung, vor allem in Bezug auf den Korrosionsschutz der Bewehrung durch die Betondeckung

- Zusammenwirken von gefügten 3D-gedruckten Modulen und Anpassung der Fugengeometrie an die Art der Kraftübertragung
- Anforderungen einer ausreichenden Betondeckung hinsichtlich des Korrosions- und Brandschutzes
- Untersuchungen zu den Verbundeigenschaften in Abhängigkeit von der Bewehrungsart sowie Lage im gedruckten Beton.

4.4 Konstruktive Aspekte der Bewehrung

4.4.1 Bewehrungsmaterialien

Grundsätzlich sind Beton- oder Spannstähle (Stäbe und Matten) für die Verwendung in Stahlbeton und Spannbeton nach den einschlägigen Normen (z.B. DIN 488-1 [26]), allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen oder ETA für die additive Fertigung von Betonbauteilen geeignet. Nichtmetallische Bewehrung aus Carbon, Glas oder Basalt kann auch eingesetzt werden. Bewehrungselemente sind dabei in der Regel Stäbe und biaxiale Bewehrungsgitter. Die Richtlinie „Betonbauteile mit nichtmetallischer Bewehrung“ [27] enthält im Teil 2 die entsprechenden Bewehrungsprodukte und im Teil 4 Empfehlungen für Prüfverfahren zur Feststellung der Eignung zur Verwendung nichtmetallischer Bewehrung in Betonbauteilen. Erste allgemeine Zulassungen für Carbonbewehrung (Stäbe und Gelege) stehen kurz vor der Veröffentlichung. Für Stäbe aus Glasfasern gibt es schon seit längerem allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen für die Verwendung im Betonbau.

4.4.2 Bewehrte Bauteile

Derzeit sind additiv hergestellte Bauteile oftmals vertikal druckbeanspruchte Wände. Diese können meist analog zu unbewehrten Beton- und Mauerwerkswänden ohne statisch erforderliche Bewehrung ausgeführt werden [28]. Allgemein sollte bei additiv hergestellten Bauteilen im Vergleich zum konventionellen Betonbau die Bewehrung möglichst reduziert oder vermieden werden, da die Einbringung aufgrund der speziellen rheologischen Frischbetoneigenschaften und komplexer Prozesstechnik sehr herausfordernd sein kann. Zu bemerken ist, dass Bewehrung bei der additiven Fertigung für den Herstellungsprozess notwendig sein kann, ohne dass diese für den Tragfähigkeitsnachweis im Endzustand statisch erforderlich ist. Für additiv gefertigte Bauteile mit statisch erforderlicher Bewehrung können unterschiedliche Bewehrungsstrategien entsprechend Bild 4 zur Anwendung kommen. Diese Klassifizierung der Bewehrungsintegration verwendet den Zeitpunkt des Einbringens der Bewehrung als das wichtigste Unterscheidungskriterium:

- 1) während des Mischens (gilt nur für Faserbewehrung),
- 2) während der Formgebung des Betons (in diesem Fall ist die Bewehrungsintegration ein Teilprozess des additiven Fertigungsverfahrens),

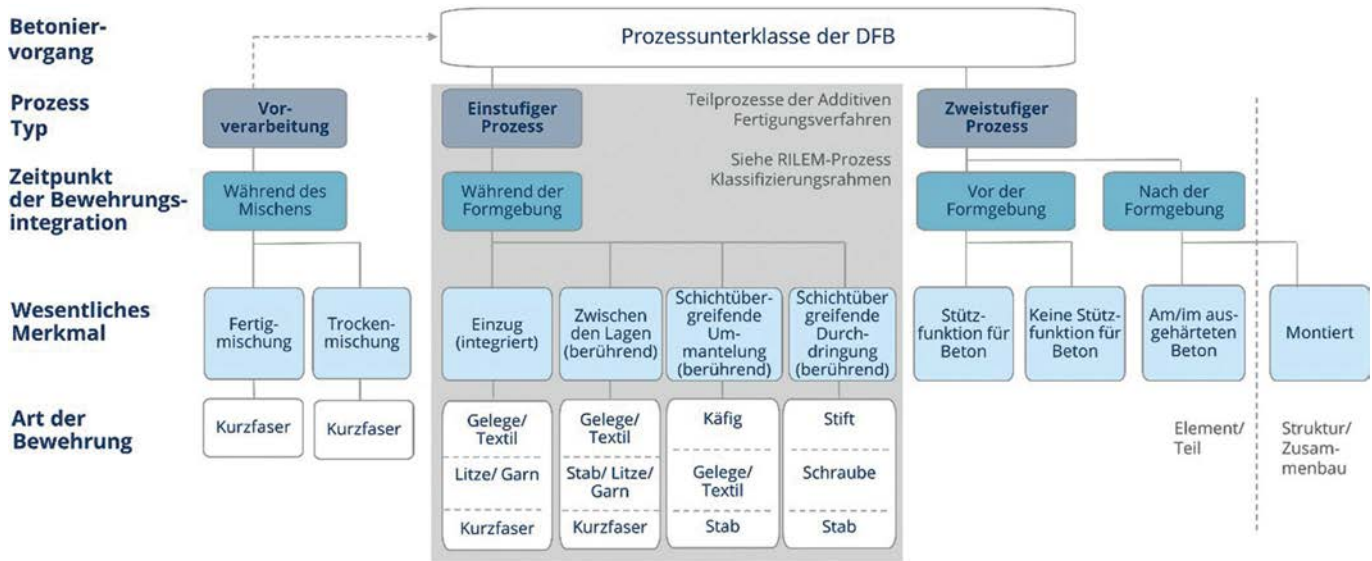


Bild 4 Kombinatorische Vielfalt für die additive Fertigung von bewehrten Betonbauteilen [5]
Combinatorial diversity for additive manufacturing of reinforced concrete components [5]

- 3) vor der Formgebung des Betons, und
- 4) nach der Formgebung des Betons.

Bei den Ansätzen 3) und 4) handelt es sich um zweistufige Prozesse, bei denen die Platzierungen des Betons und der Bewehrung voneinander zeitlich getrennt sind. Die Wahl von Bewehrungsart, -material und -position hat einen großen Einfluss auf die Gestaltungsmöglichkeiten des additiven Fertigungsverfahrens und beeinflusst insbesondere die Technologien zur Integration der Bewehrung und die damit verbundenen Prozesseigenschaften (Bild 4). Diese prozessspezifischen Merkmale werden ausführlich in [29] erläutert. Die relevantesten prozessspezifischen Eigenschaften sind: a) die Kontinuität der Bewehrung, b) die Orientierung der Bewehrung bzw. des Bauteils, c) die Automatisierbarkeit der Bewehrungsintegration, d) die geometrische Freiheit, die der jeweilige Ansatz erlaubt, e) die erreichbare Prozessgeschwindigkeit, f) die Robustheit des Prozesses (diese nimmt im Allgemeinen mit zunehmender Komplexität ab), und g) der technologische Reifegrad.

Basierend auf den oben genannten Eigenschaften kann die Bewehrung in viele Kategorien eingeteilt werden, einschließlich kontinuierlicher oder diskontinuierlicher Bewehrung, voll- oder halbautomatischer Bewehrung oder manuell integrierter Bewehrung usw. Im Allgemeinen gilt jedoch, dass die Bewehrung im DFB im Gegensatz zum konventionellen Stahlbetonbau abhängig vom angewendeten Verfahren nur teilweise vor dem Betonieren eingebracht werden kann und die Bewehrungsintegration entweder mit dem Fortschreiten der additiven Herstellung einhergehen oder nachträglich an/eingebracht werden muss (Bild 4). Weitere Hinweise können [5,29] entnommen werden.

5 Beton- und Bauteilprüfungen

5.1 Allgemeines

Bei der Ermittlung der Materialeigenschaften muss beachtet werden, dass es sich um eine geschichtete Bauweise handelt, die ein mehr oder weniger ausgeprägtes anisotropes und heterogenes Materialverhalten zeigen kann. Dies erfordert die Ermittlung der Materialeigenschaften in mindestens zwei bzw. in allen drei Raumrichtungen (Bild 5).

Bei der Durchführung und Auswertung von Versuchen zur Ermittlung von Materialeigenschaften sollte auch ein möglicherweise auftretender Skaleneffekt berücksichtigt werden, der beispielsweise in [14] beim Vergleich von kleinformigen Probekörpern und der Prüfung ganzer Wandelemente festgestellt wurde. Darüber hinaus spielen Funktion und Lastabtrag der Bauteile eine entscheidende Rolle bei der Auswahl der Prüfrichtungen und der zu untersuchenden Material- und Bauteileigenschaften. Bei den ausgewählten Prüfverfahren sind die Besonderheiten mit Bezug zur Anordnung des Prüfkörpers und der Orientierung zu beachten [30].

In [30] wurde das in Bild 5 dargestellte Bezeichnungssystem vorgeschlagen, welches bei der Prüfung der Richtungsabhängigkeit zu verwenden ist. Die Richtungen in Bezug auf die Druckrichtung werden dabei durch Buchstaben u, v und w angegeben. Die komplette Bezeichnung einer Probe besteht aus zwei Buchstaben, die durch einen Punkt getrennt sind. Der erste Buchstabe gibt die Achse einer Normalkraft oder die Achse der Rotation für eine Biegebelastung an, während der zweite Buchstabe die Längsachse der Probe, falls vorhanden, angibt. Dieser Ansatz ergibt insgesamt neun mögliche Richtungen für nichtkubische Proben. Für kubische Proben würden sie auf die bisher bekannten drei Richtungen reduziert werden. Die jeweiligen Richtungen werden für die Materialprüfung nicht gleichermaßen relevant sein. Bei-

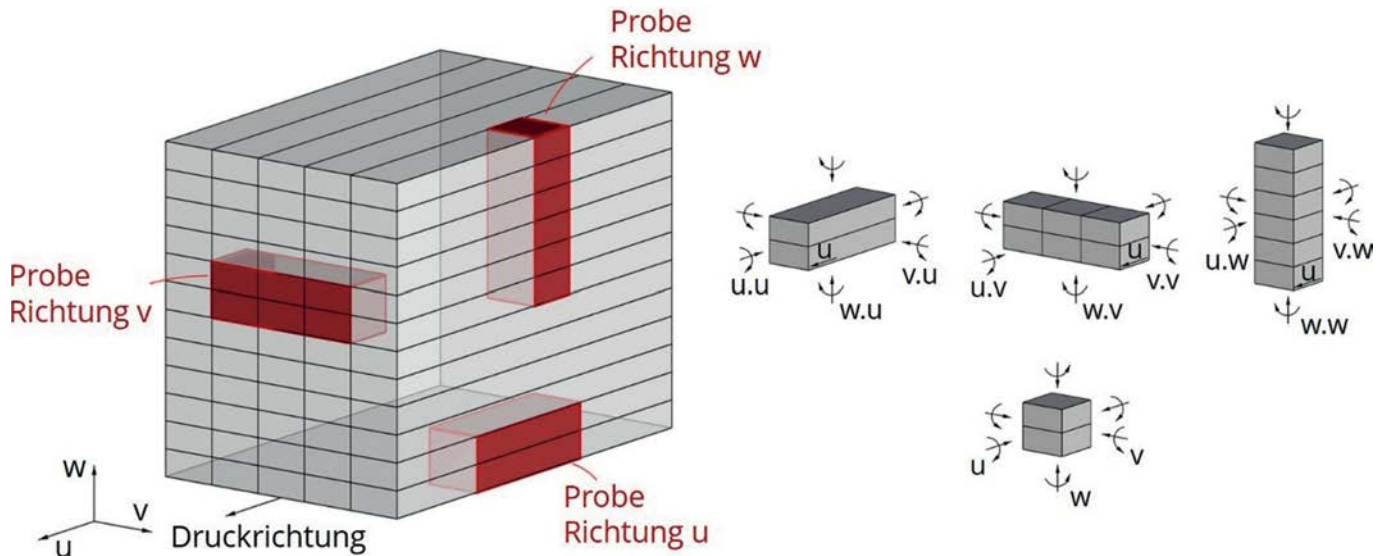


Bild 5 Orientierung für die Entnahme von Proben aus großformatigen Bauteilen zur Berücksichtigung der Anisotropie bei additiver Fertigung [30]
 Scheme for extracting samples from large-format components to take anisotropy in additive manufacturing into account [30]

spielweise ist es unwahrscheinlich, dass es für praktische Zwecke erforderlich ist, die Biegefestigkeit eines gedruckten Mörtelbalkens in jeder der neun Richtungen zu bestimmen.

5.2 Zusammensetzung der Betone

Bei der additiven Fertigung von Betonbauteilen werden spezielle Betonzusammensetzungen verwendet, die für diesen Prozess optimiert sind. Diese Betonzusammensetzungen unterscheiden sich oftmals von herkömmlichen Betonen nach DIN 1045-2 [31] insbesondere hinsichtlich ihrer rheologischen Eigenschaften. Die Zusammensetzung von Beton für die additive Fertigung von Betonbauteilen hängt von verschiedenen Faktoren ab, wie zum Beispiel dem Druckverfahren, der Größe und Form des Bauteils sowie den Anforderungen an die mechanischen Eigenschaften des Endprodukts. In der Regel enthalten Betone für die additive Fertigung einen hohen Zementanteil, einen hohen Anteil feiner Gesteinskörnung und speziell auf den Druckvorgang abgestimmte Betonzusätze (Zusatzmittel, Zusatzstoffe, Fasern).

5.3 Bauordnungsrechtliche Einordnung der Betone

Bisherige Auswertungen zeigen, dass die bei der additiven Fertigung verwendeten Betone in der Regel von der DIN 1045-2 [31] abweichen. Dies liegt im Wesentlichen daran, dass die Eigenschaften des Betons und die jeweilige Fertigungstechnik stets aufeinander abgestimmt sein müssen und die DIN 1045-2 nicht für die additive Fertigung entwickelt wurde. In der Zulassungspraxis des DIBt werden im Sachgebiet „03 Betontechnologie“ verschiedene Zulassungen für Ausgangsstoffe oder auch Betone erteilt (vgl. [32]).

In DIN 1045-2 ist durch Angabe von europäischen oder nationalen Normen eindeutig geregelt, welche Zemente,

Gesteinskörnungen, Zusatzmittel, Zusatzstoffe und Fasern allgemein für die Herstellung von Beton nach DIN 1045-2 geeignet sind. Werden für Beton in der additiven Fertigung von den genannten technischen Regeln abweichende Ausgangsstoffe verwendet, so werden entsprechende Verwendbarkeitsnachweise, z. B. in Form von allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen, für diese Ausgangsstoffe erforderlich. Das trifft z. B. für bisher nicht geregelte Bindemittel-Compounds zu. Sinnvoll ist es daher, bei Beton für die additive Fertigung Ausgangsstoffe nach den einschlägigen Normen zu verwenden, bei denen die Grundeignung durch langjährige Erfahrung bereits gegeben ist.

Gleiches gilt auch für Grenzwerte oder Anforderungen an die Betonzusammensetzung in der DIN 1045-2. Werden bei Beton für die additive Fertigung wesentliche Grenzwerte der Norm über- oder unterschritten, kann eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für den von DIN 1045 abweichenden Beton erforderlich werden, um z. B. die Dauerhaftigkeit für die geplanten Expositionsklassen nachzuweisen. Denkbar sind hier beispielsweise vorkonfektionierte Trockenbetongemische mit Zulassung zur Herstellung von (Feinkorn-)Beton für die additive Fertigung. Wird z. B. der höchstzulässige Mehlkorngehalt (Kornanteil $\leq 0,125$ mm) nach DIN 1045-2:2008 überschritten, so können sich ggf. bemessungsrelevante Werkstoffeigenschaften ändern. Bei sehr hohen Mehlkorngehalten sollten Festbetoneigenschaften wie E-Modul, Schwinden und Kriechen daraufhin überprüft werden, ob die vorhandenen Ansätze in DIN EN 1992-1-1 [17] (E-Modul und Kriechen) bzw. in der DAfStb-Richtlinie „Herstellung und Verwendung von zementgebundenem Vergussbeton und Vergussmörtel“ (Schwinden) unverändert angewendet werden können. Mit DIN 1045-2:2023-08 entfallen die zulässigen Obergrenzen an den Mehlkorngehalt, was bei Beton für den 3D-Druck eine Erleichterung darstellt.

Für Beton oder Spritzbeton, der für die additive Fertigung verwendet werden soll, empfiehlt der DAfStb, den Normbereich nach DIN 1045-2 nicht zu verlassen. Dieser Weg wird bereits von einigen Firmen beschritten, um damit an die langjährige praktische Erfahrung mit dem genormten Baustoff anzuknüpfen und allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen für den Beton und ggf. die verwendeten Ausgangsstoffe zu vermeiden..

5.4 Prüfung von Frischbeton

Nahezu alle beim 3D-Betondruck relevanten Teilprozesse werden maßgeblich durch die rheologischen Eigenschaften des Frischbetons beeinflusst. Einige geeignete Charakterisierungsmethoden für die Entwicklung und Überwachung von druckbaren Frischbetonrezepturen während der Verarbeitungs- und Ruhephase sind in [5] beschrieben. In Tab. 2 sind mit Angabe der Eignung für die Erstprüfung, die werkeigene Produktionskontrolle und die Prüfung auf der Baustelle (inkl. Inline) Prüfverfahren für den Frischbeton zusammengestellt, die in den verschiedenen Genehmigungsverfahren Anwendung finden können und die bereits in einer technischen Regel oder Veröffentlichung beschrieben sind. Dabei kommen sowohl etablierte als auch speziell für den 3D-Betondruck entwickelte Verfahren zur Anwendung. Unterschiedliche Druckverfahren und Druckmaterialien erfordern die gezielte Auswahl geeigneter Prüfverfahren, die gegebenenfalls noch nicht in Normen oder anderen Technischen Regeln abgebildet sind. Nicht alle Verfahren sind mit hinreichender Praxiserfahrung belegt.

Bei der Anwendung von Tab. 2 sind folgende Hinweise zu beachten:

- Nicht alle Prüfungen müssen für jeden Anwendungsfall der additiven Fertigung durchgeführt werden; die Auswahl der Frischbetonprüfverfahren ist stets projektspezifisch vorzunehmen.
- Der Umfang der Prüfungen ist in der Regel größer als nach den gängigen Frischbetonprüfnormen für Beton; der Umfang muss projektspezifisch festgelegt werden.
- Es sollte projektspezifisch geprüft werden, ob Frischbetonprüfverfahren, z. B. durch Maschinendaten (beispielsweise Pumpdruck- oder Strommessung) ersetzt werden können.

5.5 Prüfung von erhärtendem und erhärtetem Beton bzw. Bauteilen

5.5.1 Besonderheiten von additiv gefertigten Betonprodukten

Die vorhandenen 3D-Druck-Technologien unterscheiden sich in zahlreichen Aspekten voneinander. Die Verwendung desselben Materials mit verschiedenen Drucksystemen kann daher aufgrund der unterschiedlichen Prozessmerkmale jedes Systems zu unterschiedlichen Ergebnis-

sen führen. Die Merkmale, die für alle Technologien gelten, sind in der Regel schichtweise Fertigung und das Fehlen einer Schalung. Daraus ergeben sich spezifische, inhärente Aspekte von additiv gefertigten Betonprodukten, die bei der Qualitätskontrolle berücksichtigt werden müssen. Im Gegensatz zu konventionell in Formen gegossenem Beton können 3D-gedruckte Betonprodukte poröse und mechanisch schwach gebundene Schicht-zu-Schicht-Schnittstellen aufweisen, die die schwächsten Verbindungen in der gesamten Struktur darstellen und eine ausgeprägte Anisotropie implizieren, vgl. z. B. [59]. Materialablagerungsprozesse können auch zu einer flussinduzierten Orientierung der Betonbestandteile führen, insbesondere bei kurzen Fasern [60].

3D-gedruckter Beton ist oft nicht nur anisotrop, sondern auch weniger homogen als in Formen gegossener Beton, aufgrund des Fehlens einer Verdichtung und Durchmischung nach der Materialablage. Beispielsweise kann beim extrusionsbasierten Fertigungsprozess die Volumenflussrate des abgelagerten Betons je nach Betonzusammensetzung, rheologischen Eigenschaften, Alter und den Parametern des Extruders variieren. Solche Variationen können zur Bildung von Lufteinschlüssen, lokaler Zunahme der Anisotropie und Inhomogenität sowie sogar zu Rissen oder Ausbeulungen der Schichten führen. Diese lokalen Defekte können die mechanische Leistung [61] und die Dauerhaftigkeit [62] der gedruckten Strukturen erheblich beeinflussen. Daher müssen sie bei Tests sorgfältig untersucht und in der Bemessung berücksichtigt werden.

Konventionelle mechanische Tests, Versuche zum plastischen Schwinden, Luftgehaltstests und eine Vielzahl anderer Versuche beinhalten das Befüllen und Vibrieren von Beton in einen Behälter oder eine Form. Daher macht das Fehlen einer Schalung und Verdichtung viele konventionelle Testmethoden für 3D-gedruckten Beton unanwendbar, und in Fällen, in denen sie anwendbar sind, sind spezielle flankierende Maßnahmen erforderlich. Obwohl die Eigenschaften von 3D-gedrucktem Beton oft anhand von gegossenen Proben getestet werden, sind die so erhaltenen Eigenschaften oft nicht identisch mit denen von gedruckten Proben aufgrund von Unterschieden im Materialverhalten von vibrierten, gegossenen Proben und 3D-gedruckten Proben. Mit Ausnahme von Tests im frischen/erstarrten Zustand wie plastisches Schwinden können Tests im erhärteten Zustand an Proben durchgeführt werden, die aus gedruckten Elementen geschnitten wurden. Jedoch machen die relativ unebenen Oberflächen von gedruckten Proben das Schneiden und/oder Polieren notwendig, was zusätzliche Spannungen oder Schädigungen im 3D-gedruckten Beton induziert und möglicherweise zu fehlerhaften Charakterisierungen führen kann.

Oft werden Proben im Labor mit verkleinerten Maschinenaufbauten hergestellt, die darauf abzielen, die beabsichtigte Druckmaschinerie nachzuahmen. Folglich gibt es oft erhebliche Unterschiede im Betonpumpkreislauf,

Tab. 2 Übersicht über geeignete Frischbetonprüfungen bei der additiven Fertigung
 Overview of suitable fresh concrete tests for additive manufacturing

1	2	3	4		5	6	7
			Mögliche Anwendung des Prüfverfahrens	Anmerkung			
Prüfverfahren	Geprüfte Eigenschaft	Normen/ Richtlinien	Herstellung (Erstprüfung) und/oder Überwachung im Werk (WPK)	Baustelle (Annahme- prüfung)	Baustelle (Prozessüber- wachung)		
1	Ausbreitmaß	DIN EN 12350-5 [33]	X	X	X	---	
2	Setzmaß	DIN EN 12350-2 [34]	X	X	X	---	
3	Setzfließmaß	DIN EN 12350-8 [35]	X	X	X	Nur bei fließfähigem Beton (vor der Änderung der Rheologie durch Zusätze im Druckkopf)	
4	Mörtelausbreitmaß	DIN EN 1015-3 [36]	X	X	X	Größtkorn ≤ 4 mm	
5	Mörtelsetzfließmaß	In Anlehnung an SVB-RL 2003, Anhang P bzw. DIN EN 1015-3 [36] (aber ohne 15 Aufschläge)	X	X	X	Größtkorn ≤ 4 mm, nur bei fließfähigem Beton (vor der Änderung der Rheologie durch Zusätze im Druckkopf)	
6	V-Trichter	DIN EN 12350-9 [37]	X	X	X	Nur bei fließfähigem Beton vor der Ablage	
7	Slug-Test	Beschrieben in [38]	(X)	--	X	Auch Inline anwendbar (mit kurzer Prozessunterbrechung)	
8	Penetrationstest	z. B. in [39, 40]	X	(X)	X	--	
9	Sliper	z. B. in [41, 42]	(X)	(X)	(X)	--	
10	Einachsialer Druckversuch an Zylindern oder Prismen	z. B. in [43, 44]	X	--	(X)	Auflösungsgenauigkeit von üblichen Prüfmaschinen für Festbetonprüfung in der Regel nicht ausreichend	
11	Einachsialer Druckversuch an gedruckter Lage	z. B. in [45]	X	--	(X)	Auflösungsgenauigkeit von üblichen Prüfmaschinen für Festbetonprüfung in der Regel nicht ausreichend	
12	Dreiachsialversuch	Aus der Bodenmechanik und/oder Lit. aus Betonbereich [46]	X	--	--	--	

	1 Prüfverfahren	2 Geprüfte Eigenschaft	3 Normen/ Richtlinien	4 Mögliche Anwendung des Prüfverfahrens		5 Baustelle (Annahme- prüfung)	6 Baustelle (Prozessüber- wachung)	7 Anmerkung
				Herstellung (Erstprüfung) und/oder Überwachung im Werk (WPK)				
13	Extrusionsversuch, Schneckenextruder	Extrudierbarkeit	z. B. in [47]	X	X	X	X	Wenn Druckvorgang über Schneckenextruder, Annahmeprüfung im separaten Extruder
14	Extrusionsversuch, Kolbenextruder	Dynamische Fließgrenze, Viskosität	z. B. in [48, 49]	(X)	--	--	--	--
15	Extrusionsversuch, Kolbenextruder	Extrudierbarkeit	z. B. in [50]	X	(X)	X	X	Wenn Druckvorgang über Kolbenextruder
16	Vane-Flügeltest (händische Messung)	Statische Fließgrenze und deren Entwicklung mit der Zeit	DIN EN ISO 22476-9 [51]	X	X	X	X	--
17	Rotationsrheometer	Statische und dynamische Fließgrenze, Viskosität, und deren Entwicklung mit der Zeit	z. B. in [52, 53]	(X)	--	--	--	Nicht bei steifen Betonkonsistenzen
18	Darrversuch	Wassergehalt	DIN 1048-1 [54]	X	X	X	X	--
19	Feuchtesonde	Wassergehalt	z. B. [55]	X	(X)	X	X	--
20	Erfassung von Maschinendaten	Leistungsaufnahme, Umdrehungsgeschwindigkeit, Druck, Drehmoment, zugegebene Mengen	z. B. [55]	--	--	--	X	Nur für die Inline-Messung
21	Temperatur	Umgebungstemperatur, Frischbetontemperatur	z. B. [55]	X	X	X	X	--
22	Luftfeuchte	Relative Feuchte	z. B. [55]	X	--	--	X	--
23	Ultraschall- Impulsgeschwindigkeit	Erstarren, Erhärten	In Anlehnung an DIN EN 12504-4 [56]	X	--	--	(X)	--
24	Erstarrensbeginn und - ende	Erstarren von Zementleim oder Mörtel	DIN EN 196-1 [57] (Zementleim), DIN EN 480-2 [58] (Mörtel)	X	--	--	--	--

(X) Eignung für die Anwendung eingeschränkt.

*) nur zu Vergleichszwecken

der Schichtgeometrie, der Anzahl der Schichten und/oder der Strukturhöhe. Es wurde festgestellt, dass Pump- und Extrusionsprozesse die Frischzustandseigenschaften von Beton verändern können, vgl. z. B. [63]. Darüber hinaus ist der Größeneffekt auf die mechanischen Kennwerte von Beton ebenfalls gut bekannt. Weiterhin könnte der Druck, der auf untere Schichten in einer großen Struktur wirkt, und folglich der Grad der Verdichtung, anders sein als z. B. bei einer zweischichtigen Probe.

5.5.2 Methodik der Probenherstellung

Es gibt mehrere Möglichkeiten, Testproben im Kontext von 3D-gedrucktem Beton vorzubereiten. Diese können in drei verschiedene Ansätze/Ebenen der Probenpräparation unterteilt werden: (i) Betonieren des druckbaren Materials direkt in Formen mit regulärer Form wie bei herkömmlichem Beton; (ii) schichtweises Ablegen des Materials mithilfe von Laborgeräten, die sich von den Geräten unterscheiden, die beim eigentlichen 3D-Druck von Bauteilen und Strukturen verwendet werden; und (iii) Drucken der Proben mit derselben Ausrüstung wie bei der tatsächlichen Herstellung im größeren Maßstab [30]. Beim Übergang von Ebene (i) zu Ebene (iii) müssen zunehmend viele Aspekte, die spezifisch für 3D-gedruckten Beton sind, berücksichtigt werden, während sich auch der Grad der technischen Komplexität erhöht. Zusätzlich zu den unterschiedlichen Ansätzen der Probenformung muss der Einfluss der verschiedenen Misch- und Pumpverfahren berücksichtigt werden.

Während betonierte Proben (i) Informationen über die Eigenschaften von druckbaren Mischungen liefern, die oft durch hohen Bindemittelgehalt, kleine maximale Zuschlagstoffgröße, Anwesenheit von Zusatzmitteln usw. beeinflusst werden können, können die Effekte, die durch das Fehlen einer Schalung und die geschichtete Struktur des abgelagerten Materials verursacht werden, nicht berücksichtigt werden. Wichtig ist, dass betonierte Proben auch einen anderen Verdichtungsgrad aufweisen als gedruckte Proben. Da additiv gefertigter Beton aufgrund der fehlenden Schalung und dem mit Vibration verbundenen Strukturabbau nicht wie in der gängigen Praxis verdichtet werden kann, weist er oft einen geringeren Verdichtungsgrad im Vergleich zu in Schalung betonierte Proben/Komponenten auf.

Die nächste Stufe (ii) der Vorbereitung/Herstellung der Proben befasst sich mit geschichteten Strukturen und dem Fehlen einer Schalung. Die Verwendung von Laborausrüstung anstelle von Geräten, die für tatsächliches, d. h. großmaßstäbliches, Drucken verwendet werden, impliziert jedoch einige Unterschiede in der Scherhistorie des Materials, der Verdichtung im Druckkopf, der Ablegerate des Materials usw. Dies gilt insbesondere, wenn eine manuell gefütterte Mörtelpistole oder ein Ram-Extruder anstelle eines vollmaßstäblichen Schneckenextruders verwendet wird.

Die Vorbereitung der Proben gemäß Stufe (iii) ermöglicht die Berücksichtigung der vollautomatischen Herstellung der Proben. Darüber hinaus berücksichtigt diese Stufe auch den Pumpvorgang, der erforderlich ist, um das Material zur Düse zu befördern.

5.5.3 Zu prüfende Eigenschaften und Prüfmethode

Wie bereits oben ausgeführt, handelt es sich bei additiven Fertigungsverfahren um eine geschichtete Bauweise, die eine mehr oder weniger ausgeprägte Anisotropie aufweisen kann. Daher muss die Prüfung der Materialeigenschaften richtungsabhängig erfolgen [64, 65], wie beispielhaft anhand von Bild 5 dargestellt. Bisher kommen zur Beurteilung der mechanischen Materialeigenschaften meist zerstörende Prüfmethode zur Bestimmung der plastischen Verformung während des Baus, des Schwindverhaltens, der Druck- und Biegezugfestigkeit, des E-Moduls, des Haftverbands zwischen den Schichten sowie zwischen Beton und Bewehrung und des Widerstands gegen Anprall zum Einsatz. Außerdem wurden auch einachsige Zugversuche durchgeführt, allerdings meist an additiv hergestellten Faserbetonelementen [60, 66, 67]. Zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit werden bisher u. a. Methoden zur Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme über Gewichtszunahme, bei Grundlagenuntersuchungen die Neutronenradiografie oder das H^1 -NMR genutzt [68]. Darüber hinaus werden übliche Verfahren zur Bestimmung des Widerstands gegenüber Frost-Tau(-salz), Carbonatisierung, Chloridpenetration und Brand angewandt [66]. Tab. 3 gibt eine Übersicht über geeignete, bereits geregelte Festbetonprüfungen an Kleinproben bzw. Bauteilen, die im Rahmen von Genehmigungsverfahren verwendet werden können. Bei der Anwendung von Tab. 3 sind folgende Hinweise zu beachten:

- Nicht alle Prüfungen müssen für jeden Anwendungsfall der additiven Fertigung durchgeführt werden; die Auswahl der Festbetonprüfverfahren ist stets projektspezifisch mit den Beteiligten und anhand der für die jeweilige Bemessung des Bauteils erforderlichen Werkstoffeigenschaften vorzunehmen.
- Möglicherweise lassen sich nicht alle Auswertemethoden, die in der Norm beschrieben werden, sinnvoll auf 3D-gedruckte Proben anwenden. Beispielsweise ist zu überdenken, ob der Mittelwert aus einer Carbonatisierungsprüfung aussagekräftig ist, oder ob andere statistische Werte zu verwenden sind.
- Der Umfang der Prüfungen ist in der Regel größer als nach den gängigen Festbetonprüfnormen für (konventionell hergestellten) Beton; der Umfang muss projektspezifisch festgelegt werden.

Tab. 3 Übersicht über geeignete Festbetonprüfungen bei der additiven Fertigung
Overview of suitable tests on hardened additive manufactured concrete

Z	1 Prüfverfahren	2 Geprüfte Eigenschaft	3 Normen/ Richtlinien	4 Mögliche Anwendung des Prüfvorgangs		5 Anwendung des Prüfverfahrens		7 Anmerkung
				Herstellung (Erstprüfung) und/oder Überwachung im Werk (WPK) ¹⁾	Baustelle (Qualitäts- überwachung) ²⁾	Langzeit- verhalten		
Kleinproben (gesondert hergestellt oder aus Bauteilen gewonnen)								
1	Einaxiale Druckprüfung ³⁾	Druckfestigkeit	DIN EN 12390-3 [69]	X	X	X	--	
2	Spaltzug	Spaltzugfestigkeit	DIN EN 12390-6 [70]	X	X	X		Zur Prüfung des Schichtenverbundes in Abhängigkeit von der Orientierung
3	Biegezug ³⁾	Biegezugfestigkeit	DIN EN 12390-5 [71]	X	X	X		Zur Prüfung des Schichtenverbundes in Abhängigkeit von der Orientierung
4	Spannungs-Dehnungs-Verhalten unter Druck	E-Modul unter Druckbelastung	DIN EN 12390-13 [72]	X	(X)	X	--	
5	Druckfestigkeit von jungem Spritzbeton	Frühfestigkeit	DIN EN 14488-2 [73]	(X)	X	--	--	
6	Schwinden	Schwindmaß	DIN EN 12390-16 [74]	X	(X)	(X)	--	
7	Kriechen	Kriechmaß	DIN EN 12390-17 [75]	X	--	(X)	--	
8	Chlorideindringen	Chlorideindringwiderstand	DIN EN 12390-11 [76] DIN EN 12390-18 [77]	X	(X)	X		Ggf. ungleichmäßige Eindringtiefe und in Abhängigkeit von der Orientierung zu berücksichtigen
9	Karbonatisierung	Karbonatisierungswiderstand	DIN EN 12390-10 [78] DIN EN 12390-12 [79]	X	--	X		Ggf. ungleichmäßige Eindringtiefe und in Abhängigkeit von der Orientierung zu berücksichtigen
10	Frost- und Frost-Tausalz	Widerstand gegen Frost- und Frost-Tausalz-Einwirkung	DIN/TS 12390-9 [80]	X	--	X		In Abhängigkeit von der Orientierung

Z	1 Prüfverfahren	2 Geprüfte Eigenschaft	3 Normen/ Richtlinien	4 Mögliche Anwendung des Prüfverfahrens		5 Baustelle (Qualitäts- überwachung) ²⁾	6 Langezeit- verhalten	7 Anmerkung
				Herstellung (Erstprüfung) und/oder Überwachung im Werk (WPK) ¹⁾				
11	Verbundversuche Druck und Zug (z. B. an Ankern, Befestigungsmitteln oder Bewehrungsstäben)	Verbund, Ausknicken, Durchstanzen	RILEM-CEB-FIP RC6-78 oder DIN EN 10080 [81], Anhang D	X	X	X	--	
12	Schubversuche	Scherfestigkeit mit oder ohne Normlast		X	X	(X) ⁴⁾		Zur Prüfung des Schichtenverbundes in Abhängigkeit von der Orientierung
13	Einaxiale Zugversuche	Zugfestigkeit, Schichtenverbundfestigkeit	CPC 7 Direct tension of concrete specimens, 1975 DIN EN 14488-4 [82]	X	X	(X) ⁴⁾		Zur Prüfung des Schichtenverbundes in Abhängigkeit von der Orientierung
Bauteilprüfungen (abhängig vom Bauteiltyp)								
14	Einaxiale Druckprüfung	Druckfestigkeit	In Anlehnung an DIN EN 1052-1 [83]	X	--	(X) ⁴⁾		Mit und ohne Exzentrizität
15	Biegezug	Biegezugfestigkeit	In Anlehnung an DIN EN 1052-2 [84] oder DIN EN 4103-1 [85]	X	--	(X) ⁴⁾ (Schichtenverbund) (X) ⁴⁾		Auswahl der Norm entsprechend der Bauteilfunktion
16	Anprallprüfung	Durchstanzen, Abplatzungen, Kippstabilität	In Anlehnung an DIN EN 4103-1 [85]	X	--	--		--
17	Brandversuche	Brandwiderstand	DIN EN 1365-1 [86] in Verbindung mit DIN EN 1363-1 [87] und DIN EN 1363-2 [88]	X	--	(X)		--
18	Dynamische Versuche (z. B. für Erdbengebiete)	Druckversagen/ Schubversagen unter dynamischer Beanspruchung	In Anlehnung an DIN EN 1052-1 [83]	X	--	(X)		--

¹⁾ Kann an gedrucktem oder in Schalung gefüllten Material erfolgen

²⁾ Muss an gedrucktem Material erfolgen (ggf. auch zusätzlich Probekörper in Schalung mit Beton nach dem Düsenaustritt)

³⁾ Alternativ auch Mörtelprüfung nach DIN EN 196-1 [57] möglich bei Größtkorn ≤ 4 mm

(X) Eignung für die Anwendung eingeschränkt.

⁴⁾ Abhängig von der Bauteilgröße können diese Versuche auch an extra hergestellten Testwänden nach einer gewissen Zeit wiederholt werden.

6 Weitere Aspekte

6.1 Bauausführung

Allgemein ist für die Ausführung von Tragwerken aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton die DIN 1045-3 [89] zu beachten. Zusätzlich müssen bei der additiven Fertigung mit Beton die Baustellenbedingungen berücksichtigt werden. So sind z. B. Maßnahmen zu ergreifen, die das übermäßige Austrocknen während des Druckvorgangs begrenzen, um Rissbildung infolge plastischen Schwindens zu vermeiden (Schutz vor Witterungseinflüssen aus Sonneneinstrahlung, Wind, Regen etc.).

6.2 Brandschutz

Grundsätzlich ist der Brandschutz bei Bauwerken und Bauteilen zu beachten. Bei vielen Bauwerken gelten Brandschutzanforderungen. Bei manchen Bauwerken, wie beispielsweise einer Fußgängerbrücke im Freien, gelten keine Brandschutzanforderungen. Maßnahmen im Zusammenhang mit dem baulichen Brandschutz müssen unter anderem das Brandverhalten von Baustoffen und den Feuerwiderstand von Bauteilen berücksichtigen. Umfassende Brandschutznachweise für Bauteile aus der additiven Fertigung fehlen bisher. Brandschutzverkleidungen können den Feuerwiderstand von Bauteilen aus der additiven Fertigung erhöhen. Dabei sollen betreffende Bauteile durch Ummanteln, Beplanken und Dämmen vor Rauch, Feuer und Hitze geschützt, ihre Tragfähigkeit erhalten und die Übertragung eines Brandes in einen weiteren Brandabschnitt verhindert werden.

6.3 Nachhaltigkeit und Umweltverträglichkeit

Die Recyclingfähigkeit ist ein wichtiger Bereich der Nachhaltigkeit. Abbruch und weitestgehende sortenreine Trennung der gedruckten Betonbauteile sind möglich. Betonsplitt oder Bauwerkssplitt, der aus den Bauteilen gewonnen wird, kann zu rezykliertem Gesteinskörnung nach DIN EN 12620 [90] aufbereitet und im Betonbau wiederverwendet werden. Da die Reduzierung von Treibhausgasemissionen erklärtes Ziel der gesamten Betonbranche ist, sollten die Hersteller des Betons für die additive Fertigung Umweltproduktdeklarationen (z. B. für eine CO₂-Bilanz) zur Verfügung stellen. Wenn Betone für die additive Fertigung aus geregelten Ausgangsstoffen hergestellt werden, gelten die Regelungen der DAfStb-Stellungnahme zur Umweltverträglichkeit von Beton [91].

Literatur

[1] de Schutter, G. et al. (2018) *Vision of 3D printing with concrete – Technical, economic and environmental potentials*. Cement and Concrete Research, S. 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.06.001>

7 Zusammenfassung

Die Herstellung von Bauteilen und Bauwerken unter Einsatz des Verfahrens der additiven Fertigung mit Beton stellt eine der innovativsten Neuentwicklungen im Betonbau der letzten Jahre dar. Dieser Leitfaden gibt Architekten, Planern, Antragstellern für Genehmigungsverfahren, Genehmigungsstellen, Herstellern, Bauunternehmen und anderen Baubeteiligten Hilfestellung bei der Umsetzung von Projekten mit dieser neuen Technologie. Der Leitfaden enthält zusammenfassend:

- a) Ein Klassifizierungssystem für Verfahren der additiven Fertigung mit Beton mit Angaben, welche Technologien derzeit in der Praxis angewendet werden.
- b) Eine kompakte Darstellung der Genehmigungsverfahren im bauordnungsrechtlichen Rahmen und deren derzeitiger Stand der Anwendung für die additive Fertigung.
- c) Hinweise für eine optimale Strukturierung der Herangehensweise bei Genehmigungsverfahren.
- d) Hinweise für die Anwendung von Regelwerken für die Bemessung und die Konstruktion von additiv hergestellten Bauteilen.
- e) Einordnung der Betonzusammensetzungen für die additive Fertigung in den bauordnungsrechtlichen Rahmen.
- f) Zusammenstellung von geeigneten Prüfverfahren für Frisch- und Festbeton, die projektbezogen ausgewählt werden können.
- g) Wesentliche Hinweise zur Bauausführung, zum Brandschutz, zur Nachhaltigkeit und Umweltverträglichkeit.

Die Inhalte des Leitfadens können auch zur Vorbereitung von nationalen, europäischen oder internationalen Technischen Regeln für die additive Fertigung von Betonbauteilen oder Betonbauwerken genutzt werden.

Dank

Besonderer Dank für die Unterstützung bei der Durchsicht des Beitrags gilt den weiteren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der DAfStb-Arbeitsgruppe „Digitaler Betonbau durch additive Verfahren“: Freek Bos, Beda Eber, Martin Empelmann, Christoph Gehlen, Christian Glock, Eugen Kleen, Stefan Kubens, Dirk Lowke, Steffen Marx, Fabian Meyer-Brötz, Christoph Müller, Tobias Neef, Andreas Tuan Phan, Dietmar Stephan, Ksenija Vasilic.

[2] Mechtcherine, V. et al. (2019) *Large-scale digital concrete construction – CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D-printing*. Automation in Construction 107, April, S. 102933. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102933>

- [3] Salet, T. A. M. et al. (2018) *Design of a 3D printed concrete bridge by testing*. Virtual and Physical Prototyping 13, H. 3, S. 222–236. <https://doi.org/10.1080/17452759.2018.1476064>
- [4] Bos, F. P. et al. (2022) *The realities of additively manufactured concrete structures in practice*. Cement and Concrete Research 156, December 2021, S. 106746. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106746>
- [5] Mechtcherine, V. et al. (2021) *Digitaler Betonbau durch additive Verfahren – Sachstand und Forschungsbedarf*. Beton- und Stahlbetonbau 116, H. 11, S. 881–900. <https://doi.org/10.1002/best.202100067>
- [6] Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E. V. (2023) *Digitale Fertigung im Betonbau / Digital fabrication with concrete*.
- [7] Buswell, R. et al. (2020) *A process classification framework for defining and describing Digital Fabrication with Concrete*. Cement and Concrete Research 134, March. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106068>
- [8] DIN EN ISO 17296-2:2016-12 (2016) *Additive Fertigung – Grundlagen – Teil 2: Überblick über Prozesskategorien und Ausgangswerkstoffe*. Berlin: Beuth.
- [9] *Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates*. Veröffentlicht im Amtsblatt der Europäischen Union 2011.
- [10] Bauministerkonferenz [Hrsg.] (2016) *Musterbauordnung – MBO*. Fassung November 2002, zuletzt geändert durch Beschluss der Bauministerkonferenz vom 13.05.2016. Bauministerkonferenz 2016.
- [11] Deutsches Institut für Bautechnik (2017) *Musterverwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB)*. Ausgabe August 2017 mit Druckfehlerkorrektur vom 11. Dezember 2017. Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik.
- [12] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), Berlin: Homepage [online]. www.dibt.de [Zugriff am: 15. Jan. 2024].
- [13] Deutsches Institut für Bautechnik [Hrsg.] *Zustimmung im Einzelfall (ZiE) und vorhabenbez. Bauartgenehmigung (vBG) – Berlin* [online]. <https://www.dibt.de/de/wir-bieten/zulassungen-etwas-und-mehr/zustimmung-im-einzelfall-zie-und-vorhabenbez-bauartgenehmigung-vbg-berlin> [Zugriff am: 15. Jan. 2024].
- [14] Weger, D. et al. (2021) *Approval for the Construction of the First 3D Printed Detached House in Germany – Significance of Large Scale Element Testing*. S. 144–169.
- [15] Weger, D. et al. (2021) *Bauen neu gedacht – 3D-Betondruck in der Baupraxis 7+8*.
- [16] DIN EN 1990:2021-10 (2021) *Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung*. Berlin: Beuth.
- [17] DIN EN 1992-1-1:2011-01 (2011) *Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. Berlin: Beuth.
- [18] DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04 (2013) *Eurocode 2: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau*. Berlin: Beuth.
- [19] DIN EN 1996-1-1:2013-02 (1996) *Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk*. Berlin: Beuth.
- [20] DIN EN 1996-1-1/NA:2019-12 (2019) *Eurocode 6: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk*. Berlin: Beuth.
- [21] DVS Media [Hrsg.] *Brenn-, Plasma-, Laserstrahl-, Wasserstrahlschneiden* [online]. <https://www.dvs-home.de/pressemedien/download/40> [Zugriff am: 15. Jan. 2024].
- [22] (2021) *Neuartige Fügeprinzipien für additiv gefertigte Bauteile*.
- [23] Souza, M. T. et al. (2020) *3D printed concrete for large-scale buildings: An overview of rheology, printing parameters, chemical admixtures, reinforcements, and economic and environmental prospects*. Journal of Building Engineering 32, p. 101833. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101833>
- [24] Meurer, M.; Classen, M. (2021) *Mechanical properties of hardened 3D printed concretes and mortars-development of a consistent experimental characterization strategy*. Materials 14, H. 4, S. 1–23. <https://doi.org/10.3390/ma14040752>
- [25] TU Braunschweig (2021) *Praxislösungen in der additiven Fertigung – Neuartige Fügeprinzipien Betonwerk Fertigteil-Technik*. 30. Jan. 2021.
- [26] DIN 488-1:2009-08 (2009) *Betonstahl – Teil 1: Stahlsorten, Eigenschaften, Kennzeichnung*. Berlin: Beuth
- [27] Will, N. (2022) *DAfStb-Richtlinie „Betonbauteile mit Nichtmetallischer Bewehrung“*. Beiträge zum 61. Forschungskolloquium mit 9. Jahrestagung des DAfStb.
- [28] Asprone, D. et al. (2018) *3D printing of reinforced concrete elements: Technology and design approach*. Construction and Building Materials 165, S. 218–231. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.018>
- [29] Mechtcherine, V. et al. (2021) *Integrating reinforcement in digital fabrication with concrete: A review and classification framework*. Cement and Concrete Composites 119, February, S. 103964. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.103964>
- [30] Mechtcherine, V. et al. (2022) *A roadmap for quality control of hardening and hardened printed concrete*. Cement and Concrete Research 157, January, S. 106800. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106800>
- [31] DIN 1045-2:2023-08 (2023) *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton*. Berlin: Beuth.
- [32] Deutsches Institut für Bautechnik [Hrsg.] *Zulassungs- und Genehmigungsverzeichnisse* [online]. <https://www.dibt.de/de/service/zulassungsdownload/zulassungs-und-genehmigungsverzeichnisse> [Zugriff am: 15. Jan. 2024].
- [33] DIN EN 12350-5:2019-09 (2019) *Prüfung von Frischbeton – Teil 5: Ausbreitmaß*. Berlin: Beuth.
- [34] DIN EN 12350-2:2019-09 (2019) *Prüfung von Frischbeton – Teil 2: Setzmaß*. Berlin: Beuth.
- [35] DIN EN 12350-8:2019-09 (2019) *Prüfung von Frischbeton – Teil 8: Selbstverdichtender Beton – Setzfließversuch*. Berlin: Beuth.
- [36] DIN EN 1015-3:2007-05 (2007) *Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk – Teil 3: Bestimmung der Konsistenz von Frischmörtel (mit Ausbreittisch)*. Berlin: Beuth.
- [37] DIN EN 12350-9:2010-12 (2010) *Prüfung von Frischbeton – Teil 9: Selbstverdichtender Beton – Auslauftrichterversuch*. Berlin: Beuth.
- [38] Ducoulombier, N. et al. (2021) *The “Slugs-test” for extrusion-based additive manufacturing: Protocol, analysis and practical limits*. Cement and Concrete Composites 121, S. 104074. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104074>
- [39] Reiter, L. et al. (2022) *Slow penetration for characterizing concrete for digital fabrication*. Cement and Concrete Research 157, S. 106802. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106802>
- [40] Pott, U.; Stephan, D. (2021) *Penetration test as a fast method to determine yield stress and structural build-up for 3D printing of cementitious materials*. Cement and Concrete Composites 121, p. 104066. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104066>
- [41] Secrieru, E. et al. (2020) *Assessment and prediction of concrete flow and pumping pressure in pipeline*. Cement and Concrete Composites 107, S. 103495. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103495>

- [42] Fataei, S.; Secrieru, E.; Mechtcherine, V. (2020) *Experimental Insights into Concrete Flow-Regimes Subject to Shear-Induced Particle Migration (SIPM) during Pumping*. Materials (Basel, Switzerland) 13, Nr. 5. <https://doi.org/10.3390/ma13051233>
- [43] Panda, B.; Lim, J. H.; Tan, M. J. (2019) *Mechanical properties and deformation behaviour of early age concrete in the context of digital construction*. Composites Part B 165, December 2018, S. 563–571. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.02.040>
- [44] Wolfs, R. J.; Bos, F. P.; Salet, T. A. (2018) *Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing*. Cement and Concrete Research 106, January, S. 103–116. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.001>
- [45] Ivanova, I. et al. (2022) *Comparison between methods for indirect assessment of buildability in fresh 3D printed mortar and concrete*. Cement and Concrete Research 156, September, S. 1–28. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106764>
- [46] Wolfs, R. J.; Bos, F. P.; Salet, T. A. (2019) *Triaxial compression testing on early age concrete for numerical analysis of 3D concrete printing*. Cement and Concrete Composites 104, May, S. 103344. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103344>
- [47] Le, T. T. et al. (2012) *Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete*. Materials and Structures/Materiaux et Constructions 45, H. 8, S. 1221–1232. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9828-z>
- [48] Chen, H. et al. (2023) *A Review of the Extruder System Design for Large-Scale Extrusion-Based 3D Concrete Printing*. Materials 16, S. 2661. <https://doi.org/10.3390/ma16072661>
- [49] Chen, Y. et al. (2019) *Limestone and Calcined Clay-Based Sustainable Cementitious Materials for 3D Concrete Printing: A Fundamental Study of Extrudability and Early-Age Strength Development*. Applied Sciences 9, S. 1809. <https://doi.org/10.3390/app9091809>
- [50] Chaves Figueiredo, S. et al. (2019) *An approach to develop printable strain hardening cementitious composites*. Materials and Design 169. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107651>
- [51] DIN EN ISO 22476-9:2021-01 (2021) *Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Felduntersuchungen – Teil 9: Flügelscherversuche (FVT und FVT-F)*. Berlin: Beuth.
- [52] Roussel, N. (2018) *Rheological requirements for printable concretes*. Cement and Concrete Research 112, March, S. 76–85. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.04.005>
- [53] Haist, M. et al. (2020) *Interlaboratory study on rheological properties of cement pastes and reference substances: comparability of measurements performed with different rheometers and measurement geometries*. Materials and Structures 53, H. 4. <https://doi.org/10.1617/s11527-020-01477-w>
- [54] DIN 1048-1:1991-06 (1991) *Prüfverfahren für Beton; Frischbeton*. Berlin: Beuth.
- [55] PERI 3D Construction GmbH (2023) *Neues Assistenzsystem macht den 3D-Betondruck noch effizienter und nutzerfreundlicher, 15.12.2023* [online]. Wien: APA-OTS. https://www.ots.at/presseaussendung/OTS_20231215_OTS0131/neues-assistenzsystem-macht-den-3d-betondruck-noch-effizienter-und-nutzerfreundlicher [Zugriff am: 7. Feb. 2024].
- [56] DIN EN 12504-4:2021-10 (2021) *Prüfung von Beton in Bauwerken – Teil 4: Bestimmung der Ultraschall-Impulsgeschwindigkeit*. Berlin: Beuth.
- [57] DIN EN 196-1:2016-11 (2016) *Prüfverfahren für Zement – Teil 1: Bestimmung der Festigkeit*. Berlin: Beuth.
- [58] DIN EN 480-2:2006-11 (2006) *Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel – Prüfverfahren – Teil 2: Bestimmung der Erstarrungszeit*. Berlin: Beuth.
- [59] Nerella, V. N.; Hempel, S.; Mechtcherine, V. (2017) *Micro- and Macroscopic Investigations on the Interface Between Layers of 3D-Printed Cementitious Elements*. Proceedings of the ICACMS 2017 International conference on Advances in construction materials and systems, H. 9, S. 3–8.
- [60] Ogura, H.; Nerella, V. N.; Mechtcherine, V. (2018) *Developing and testing of Strain-Hardening Cement-Based Composites (SHCC) in the context of 3D-printing*. Materials 11, H. 8, S. 1–18. <https://doi.org/10.3390/ma11081375>
- [61] Dressler, I.; Freund, N.; Lowke, D. (2020) *The Effect of Accelerator Dosage on Fresh Concrete Properties and on Interlayer Strength in Shotcrete 3D Printing*. Materials (Basel, Switzerland) 13, Nr. 2. <https://doi.org/10.3390/ma13020374>
- [62] Bran-Anleu, P. et al. (2023) *Using micro-XRF to characterize chloride ingress through cold joints in 3D printed concrete*. Materials and Structures 56, Nr. 3, p. 51. <https://doi.org/10.1617/s11527-023-02132-w>
- [63] Secrieru, E. et al. (2018) *Changes in concrete properties during pumping and formation of lubricating material under pressure*. Cement and Concrete Research 108, S. 129–139. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.018>
- [64] Bos, F. P. et al. (2016) *Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing*. Virtual and Physical Prototyping 11, H. 3, S. 209–225. <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1209867>
- [65] Le, T. T. et al. (2012) *Hardened properties of high-performance printing concrete*. Cement and Concrete Research 42, H. 3, S. 558–566. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.12.003>
- [66] van der Putten, J. et al. (2022) *Properties and Testing of Printed Cement-Based Materials in Hardened State*. Digital fabrication with cement-based materials : state-of-the-art report of the RILEM TC 276-DFC 36, pp. 137–185. https://doi.org/10.1007/978-3-030-90535-4_5
- [67] Li, V. C. et al. (2020) *On the emergence of 3D printable Engineered, Strain Hardening Cementitious Composites (ECC/SHCC)*. Cement and Concrete Research 132, January, S. 106038. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106038>
- [68] van der Putten, J. et al. (2019) *Microstructural Characterization of 3D Printed Cementitious Materials*. Materials 12, Nr. 18, p. 2993. <https://doi.org/10.3390/ma12182993>
- [69] DIN EN 12390-3:2019-10 (2019) *Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern*. Berlin: Beuth.
- [70] DIN EN 12390-6:2010-09 (2010) *Prüfung von Festbeton – Teil 6: Spaltzugfestigkeit von Probekörpern*. Berlin: Beuth.
- [71] DIN EN 12390-5:2019-10 (2019) *Prüfung von Festbeton – Teil 5: Biegezugfestigkeit von Probekörpern*. Berlin: Beuth.
- [72] DIN EN 12390-13:2021-09 (2021) *Prüfung von Festbeton – Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung (Sekantenmodul)*. Berlin: Beuth.
- [73] DIN EN 14488-2:2006-09 (2006) *Prüfung von Spritzbeton – Teil 2: Druckfestigkeit von jungem Spritzbeton*. Berlin: Beuth.
- [74] DIN EN 12390-16:2019-12 (2019) *Prüfung von Festbeton – Teil 16: Bestimmung des Schwindens von Beton*. Berlin: Beuth.
- [75] DIN EN 12390-17:2019-12 (2019) *Prüfung von Festbeton – Teil 17: Bestimmung des Kriechens von Beton unter Druckspannung*. Berlin: Beuth.
- [76] DIN EN 12390-11:2015-11 (2015) *Prüfung von Festbeton – Teil 11: Bestimmung des Chloridwiderstands von Beton – Einseitig gerichtete Diffusion*. Berlin: Beuth.
- [77] DIN EN 12390-18:2021-09 (2021) *Prüfung von Festbeton – Teil 18: Bestimmung des Chloridmigrationskoeffizienten*. Berlin: Beuth.
- [78] DIN EN 12390-10:2019-08 (2019) *Prüfung von Festbeton – Teil 10: Bestimmung des Karbonatisierungswiderstands von Beton bei atmosphärischer Konzentration von Kohlenstoffdioxid*. Berlin: Beuth.
- [79] DIN EN 12390-12:2020-04 (2020) *Prüfung von Festbeton – Teil 12: Bestimmung des Karbonatisierungswiderstands von Beton – Beschleunigtes Karbonatisierungsverfahren*. Berlin: Beuth.

- [80] DIN CEN/TS 12390-9:2017-05 (2017) *Prüfung von Festbeton – Teil 9: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand – Abwitterung*. Berlin: Beuth.
- [81] DIN EN 10080:2005-08 (2005) *Stahl für die Bewehrung von Beton – Schweißgeeigneter Betonstahl – Allgemeines*. Berlin: Beuth.
- [82] DIN EN 14488-4:2008-08 (2008) *Prüfung von Spritzbeton – Teil 4: Haftfestigkeit an Bohrkernen bei zentrischem Zug*. Berlin: Beuth.
- [83] DIN EN 1052-1:1998-12 (1998) *Prüfverfahren für Mauerwerk – Teil 1: Bestimmung der Druckfestigkeit*. Berlin: Beuth.
- [84] DIN EN 1052-2:2018-12 (2018) *Prüfverfahren für Mauerwerk – Teil 2: Bestimmung der Biegezugfestigkeit*. Berlin: Beuth.
- [85] DIN 4103-1:2015-06 (2015) *Nichttragende innere Trennwände – Teil 1: Anforderungen und Nachweise*. Berlin: Beuth.
- [86] DIN EN 1365-1:2013-08 (2013) *Feuerwiderstandsprüfungen für tragende Bauteile – Teil 1: Wände*. Berlin: Beuth.
- [87] DIN EN 1363-1:2012-10 (2012) *Feuerwiderstandsprüfungen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen*. Berlin: Beuth.
- [88] DIN EN 1363-2:1999-10 (1999) *Feuerwiderstandsprüfungen – Teil 2: Alternative und ergänzende Verfahren*. Berlin: Beuth.
- [89] DIN 1045-3:2012-03 (2012) *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 3: Bauausführung*. Berlin: Beuth.
- [90] DIN EN 12620:2008-07 (2008) *Gesteinskörnungen für Beton*. Berlin: Beuth.
- [91] DAfStb (2010) *Erläuterung des DAfStb zum aktuellen Regelungsstand der Umweltverträglichkeit von Beton*. Berlin: Deutscher Ausschuss für Stahlbetonbau.

Autor:innen



Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine
(Korrespondenzautor:in)
vikt.mechtcherine@tu-dresden.de
Technische Universität Dresden
Institut für Baustoffe
Georg-Schumann-Str. 7
01187 Dresden



Dr.-Ing. Daniel Weger
weger@ib-schiessl.de
Ingenieurbüro Schiessl · Gehlen · Sodeikat
Straße 370
80687 München



Dipl.-Ing. Alexander Kuhn
alexander.kuhn@zueblin.de
Ed Züblin AG
Albstadtweg 3
70567 Stuttgart



Egor Ivaniuk, M.Sc.
egor.ivaniuk@tu-dresden.de
Technische Universität Dresden
Institut für Baustoffe
Georg-Schumann-Str. 7
01187 Dresden



Prof. Dr.-Ing. Inka Mai
mai@tu-berlin.de
Technische Universität Berlin
Gustav-Meyer-Allee 25
13355 Berlin



Prof. Dr.-Ing. Udo Wiens
udo.wiens@dafstb.de
Deutscher Ausschuss für Stahlbeton
Budapester Straße 31
10787 Berlin



Dr.-Ing. Venkatesh Naidu Nerella
venkatesh.nerella@putzmeister.com
Putzmeister Engineering
Max-Eyth-Straße 10
72631 Aichtal

Zitieren Sie diesen Beitrag

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, H. 4, S. 290–310.
<https://doi.org/10.1002/best.202400005>