

Wiley Industry Days

WIN DAYS

7.-9. Juni 2021

www.WileyIndustryDays.com

Bauen 2021 - Werden Sie mit uns Teil der WINDays

Virtuelle Show mit Konferenz, Ausstellung und Networking für Architektur und Bauingenieurwesen, Automatisierung, Machine Vision, Photonics, Healthcare und Sicherheit.

- **Virtuelle Ernst & Sohn Ausstellungshalle** mit Auditorium für Architektur und Bauingenieurwesen
- **Fokus auf Ihr Networking** - Ihre Kommunikation - Ihren Vertrieb
- **3 Leistungspakete bieten Ihnen optimale Repräsentationsmöglichkeiten**, inkl. direkter Kommunikation mit den Messteilnehmern per Video- und Textchat u. v. m.



STANDBUCHUNGEN

Wenden Sie sich jetzt an unsere Experten!

Fred Doischer - Fred.Doischer@Wiley.com
Tel. +49 (0)172-3999-853

Sigrid Elgner - Sigrid.Elgner@Wiley.com
Tel. +49 (0)30-47031-254



**JETZT KOSTENFREI ALS
BESUCHER REGISTRIEREN!**
WWW.WILEYINDUSTRYDAYS.COM

Additive Fertigung im Bauwesen: erste 3-D-gedruckte und bewehrte Betonbauteile im Shotcrete-3-D-Printing-Verfahren (SC3DP)

Mit dem 3-D-Drucken (Additive Fertigung) steht eine digital gesteuerte Fertigungstechnologie bereit, die das Potenzial hat, spezifisch für das Bauwesen entwickelt, zu einer Schlüsseltechnologie für die Digitalisierung der Bauwirtschaft zu werden. Bei der Additiven Fertigung erfolgt der Bauteilaufbau allein durch einen digital gesteuerten, schichtenweisen Werkstoffauftrag, ohne Formenbau oder Umformprozesse. Dies stellt einen Paradigmenwechsel zu den noch überwiegend handwerklichen, formgebenden Bauprozessen dar. Um das Potenzial dieser Technologie voll auszuschöpfen, müssen Strukturdesign, Materialverhalten und Fertigungsprozess integrativ aufeinander abgestimmt werden. Dies ermöglicht Bauwerke von hoher Gestaltungsfreiheit und einen ressourceneffizienten Einsatz von Werkstoffen. Am Institut für Tragwerksentwurf (ITE) und am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der TU Braunschweig wird seit mehreren Jahren an Verfahren für den 3-D-Druck von großformatigen Betonbauteilen geforscht. In einem interdisziplinären Verbundvorhaben wurde das sog. Shotcrete-3-D-Printing-Verfahren (SC3DP) entwickelt. Bei der SC3DP-Technologie handelt es sich um ein automatisiertes robotisches, additives Fertigungsverfahren, das Betonbauteile unter kontrollierter Zugabe von Druckluft Schicht für Schicht aufbaut. In dem vorliegenden Bericht werden erste 3-D-gedruckte und bewehrte Betonbauteile vorgestellt, die das Potenzial der SC3DP-Technologie aufzeigen.

Keywords Fertigung, additive; 3-D-Drucken; Baufabrikation, digitale

1 Grundlegende Prinzipien der additiven Fertigung

Beim 3-D-Drucken (Additive Fertigung) handelt es sich um eine digital gesteuerte Fertigungstechnologie, die völlig neue Möglichkeiten für die Formenfreiheit und den effizienten Einsatz von Ressourcen im Bauwesen schafft. Der ursprüngliche Einsatzbereich der additiven Fertigung liegt in der Herstellung prototypischer Werkstücke in industriellen Entwicklungsprozessen, um Funktionen und Design schneller überprüfen zu können, und ist unter dem Begriff Rapid Prototyping bekannt. Da mehr oder weniger jedes Gebäude durch die unterschiedlichen örtlichen Gegebenheiten einem prototypischen Fertigungsansatz unterliegt, passen die grundlegenden Prinzipien der additiven Fertigung ideal zur Individualisierung im Bauwesen.

Das grundlegende Prinzip der Additiven Fertigung basiert auf dem digital gesteuerten schichtweisen Bauteilaufbau,

Additive manufacturing in construction: first 3-D-printed reinforced concrete components using Shotcrete 3-D Printing (SC3DP) technology

3-D printing (additive manufacturing) is a digitally controlled manufacturing technology, that has the potential to be specifically developed for the construction industry and to become a key technology for the digitalization in building industry. In additive manufacturing (AM), the component construction is done solely by a digitally controlled layer-by-layer material application, without mold construction or forming processes. This represents a paradigm shift to the still predominantly manual shaping construction processes. In order to fully exploit the potential of AM structural design, material behavior and manufacturing processes must be integratively aligned. This enables buildings with a high degree of design freedom and resource-efficient use of materials. At the Institute of Structural Design (ITE) and at the Institute of Building Materials, Concrete Construction and Fire Safety (iBMB) at the Technische Universität Braunschweig, research has been carried out for several years into processes for the 3-D printing of large-format concrete components. The so-called Shotcrete 3-D Printing (SC3DP) technology was developed in an interdisciplinary research project. The SC3DP technology is an automated robotic, additive manufacturing process that builds up concrete components layer by layer with the controlled addition of compressed air. This report presents the first 3-D-printed and reinforced concrete components that demonstrate the potential of SC3DP.

Keywords additive manufacturing; 3-D printing; digital building fabrication

ohne vorangehendem Formenbau oder weiteren nachlaufenden Umformprozessen. Dies stellt einen Paradigmenwechsel zu den noch überwiegend handwerklichen Bauprozessen dar, die geprägt sind von traditionellen, größtenteils manuellen Bautechniken, wie dem Schalungsbau beim Betonbau oder individualisierten Anpassungen von Halbzeugen beim Stahl- und Holzbau. Der wesentliche Unterschied des 3-D-Druckens zu den konventionellen Bautechniken besteht in der Möglichkeit, Material beim additiven Bauteilaufbau nur dort aufzutragen, wo es eine Funktion erfüllt. Um das Potenzial dieser Technologie voll auszuschöpfen, müssen Strukturdesign, Materialverhalten und Fertigungsprozess integrativ aufeinander abgestimmt werden. Durch die Additive Fertigung werden Bauwerke von hoher Gestaltungsfreiheit und ein ressourceneffizienter Materialeinsatz ermöglicht. Dies betrifft sowohl die äußere Formgebung wie auch den inneren Strukturaufbau der Bauteile. Bild 1 zeigt ein Konzept für

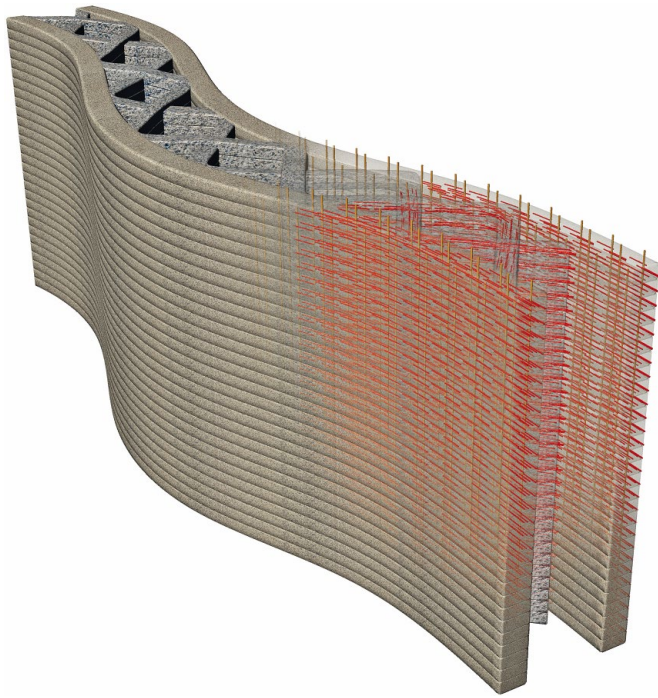


Bild 1 Konzept für eine 3-D-gedruckte gekrümmte Wand mit aufgelöster Struktur im Bauteilinneren
 Concept for a 3-D printed curved wall with dissolved inner structure

eine 3-D-gedruckte, gekrümmte Wand, bestehend aus den äußeren raumabschließenden Schichten und einer verbindenden aufgelösten Struktur im Bauteilinneren. Je nach primärer Funktion (z. B. Tragen, Dämmen) kann die Materialität der einzelnen Schichten variieren sowie zusätzliche technische Installationen integriert werden.

Bild 2 zeigt in einer schematischen Darstellung die derzeit vorherrschenden Betondrucktechniken und die prozessbezogene Zusammenführung von Gesteinskörnung (GK), Zement (Z) und Wasser (W) zu einer Betonmatrix. Bei den selektiv bindenden Partikelbett-3-D-Druckverfahren [1, 2] wird die Betonmatrix nicht vorab gemischt, sondern zunächst eine Schicht aus trockenen Partikeln aufgebracht. Anschließend wird eine flüssige Phase selektiv in die Partikelpackung mittels eines Druckkopfs oder einer Düse eingebracht, um die Partikel zu binden. Nach Abschluss des Druckprozesses werden die nicht gebundenen Partikel entfernt. Abhängig von den für den Druck-

prozess verwendeten Materialien können zwei selektiv bindende Partikelbett-3-D-Druckverfahren unterschieden werden: (1) die selektive Leimintrusion, bei der das Partikelbett aus Gesteinskörnung (≤ 5 mm) ohne Bindemittel besteht und Bindemittelleim selektiv auf das Partikelbett aufgetragen wird (Bild 2b) und (2) die selektive Zementaktivierung, bei der das Partikelbett aus sehr feiner Gesteinskörnung (Sand < 1 mm) und Zement besteht und der Zement lokal durch Wasser aktiviert wird (Bild 2c). Die selektiv bindenden Partikelbett-3-D-Druckverfahren werden derzeit u.a. an der TU München und der TU Braunschweig grundlegend erforscht [1–4] und von D-Shape [5] kommerziell eingesetzt.

Die derzeit am weitesten verbreitete Methode des 3-D-Druckens ist der schichtweise additive Aufbau durch Ablegen von plastisch verformbaren Materialsträngen durch Extrusion oder Spritzen (Bild 2a). Beim Extrusions-3-D-Drucken wird der zuvor hergestellte Beton schichtweise abgelegt. Der Verbund zwischen den Schichten erfolgt bei der Betonextrusion schwerkraftinduziert und vorwiegend über chemische Bindung. Stellvertretend für das Extrusions-3-D-Drucken ist die 2004 von KHOSHNEVIS patentierte Contour-Crafting-Technologie [6] zu nennen. Weiterentwicklungen dieses Verfahrens werden derzeit bspw. an der TU Dresden [7, 8], der TU Eindhoven [9] und der Loughborough University [10] untersucht. Im Unterschied zu einem betonierten Bauteil, bei dem der Frischbeton nachträglich mechanisch verdichtet wird, um die designierten Festbetoneigenschaften zu erreichen, ist dieser Arbeitsschritt bei der additiven Fertigung nicht vorgesehen. Entsprechend sensibel ist der Bereich zwischen den Schichten im Hinblick auf homogene Materialeigenschaften. Die Gefahr von Schwachstellen in der Verbundzone zwischen den Schichten ist als „cold joints“ in diesem Zusammenhang bekannt und Gegenstand div. aktueller Forschung [8, 10–15].

2 Digital Building Fabrication Laboratory (DBFL)

Für die Erforschung digitaler Technologien in der Baufabrikation wurde 2016 an der TU Braunschweig das Digital Building Fabrication Laboratory (DBFL) – ein von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), dem Land

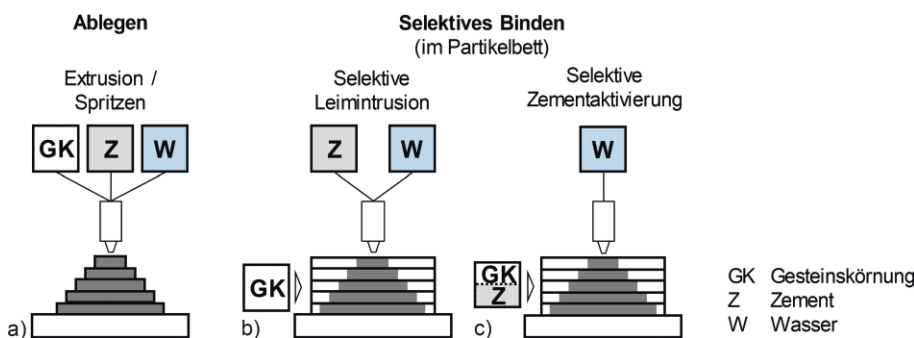


Bild 2 Schematische Darstellungen der 3-D-Drucktechniken im Betonbau: a) Extrusion/Spritzen, b) selektive Leimintrusion, c) selektive Zementaktivierung
 Schematic illustrations of 3-D printing techniques in concrete construction: a) extrusion/spraying, b) selective paste intrusion, c) selective cement activation

Niedersachsen sowie der TU Braunschweig grundfinanziertes Forschungsgroßgerät – in Betrieb genommen. Das DBFL steht im Zentrum der aktuellen Forschungen auf dem Gebiet der Additiven Fertigung am Institut für Tragwerksentwurf (ITE) und am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB). Bei der Konzeption und Planung des DBFL wurden zwei Fertigungstechnologien kombiniert: eine CNC-gesteuerte 5-Achs-Portalfräse und ein sechssachsiger Schwerlastroboter, der an ein zweites Portal gekoppelt ist (Bild 3).

Beide Fertigungseinheiten können sowohl getrennt gesteuert werden als auch synchron zusammenarbeiten. Der Schwerlastroboter kann sich im gesamten Arbeitsbereich frei bewegen und je nach Material (Beton, Stahl, Lehm) mit unterschiedlichen Endeffektoren für die Additive Fertigung ausgestattet werden. Die CNC-Portalfräse bildet die subtraktiv arbeitende Einheit des DBFL, die für die Nachbearbeitung (Glätten, Fräsen, Schneiden) auch von harten und abrasiven Materialien, wie ultrahochfesten Betonen, entwickelt wurde. Durch die Kombination der Flexibilität des Roboters mit der Steifigkeit der Fräs- und Sägeeinheit kann eine große Bandbreite an Anwen-



Bild 3 Digital Building Fabrication Laboratory (DBFL) am ITE der TU Braunschweig
Digital Building Fabrication Laboratory (DBFL) at the ITE of the TU Braunschweig

dungen abgedeckt werden. Zusätzlich können im Synchronbetrieb komplexe, kooperative Prozessketten, bestehend aus additiven und subtraktiven Bearbeitungsschritten, aufgebaut werden. Der Arbeitsbereich des DBFL beträgt bis zu 10,50 m in der Länge, 5,25 m in der Breite und 2,50 m in der Höhe. Damit ist das DBFL in der Lage realmaßstäbliche Bauteile zu fertigen und ermöglicht somit sowohl Grundlagenforschung als auch anwendungsorientierte Kooperationsprojekte mit der Industrie.

3 Shotcrete 3-D Printing (SC3DP)

Am ITE und iBMB der TU Braunschweig wird seit mehreren Jahren an Verfahren für den 3-D-Druck von großformatigen Betonbauteilen geforscht. In einem interdisziplinären Verbundvorhaben, gefördert vom Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur, wurde von 2016 bis 2018 mit Forschern aus den Bereichen der Materialtechnologie, des Maschinenbaus und der Informatik das Shotcrete-3-D-Printing-Verfahren (SC3DP) entwickelt [14–16]. Bei der SC3DP-Technologie handelt es sich um ein robotisch gesteuertes, additives Fertigungsverfahren, das – im Unterschied zu den Extrusionsverfahren – Betonbauteile durch die kontrollierte Zugabe von Druckluft Schicht für Schicht aufbaut (Bild 4a). Durch die Zugabe von Druckluft wird die Betonmatrix zerstäubt und beschleunigt. Zum definierten Spritzauftrag ist neben der Druckluft eine Vielzahl weiterer Parameter zu kontrollieren, u. a. der Düsenabstand, der Sprühwinkel sowie die Abstimmung von Druck- und Fördergeschwindigkeit.

Da beim 3-D-Drucken keine Schalung verwendet wird, ist der Fertigungsprozess auf die Tragfähigkeit der bereits aufgetragenen Frischbetonschichten angewiesen. Am iBMB der TU Braunschweig werden hierfür spezielle Betone entwickelt, die anforderungsspezifisch auf unterschiedliche Werkstoffeigenschaften eingestellt werden können [14]. Die Steuerung der Rheologie und des Erstar-

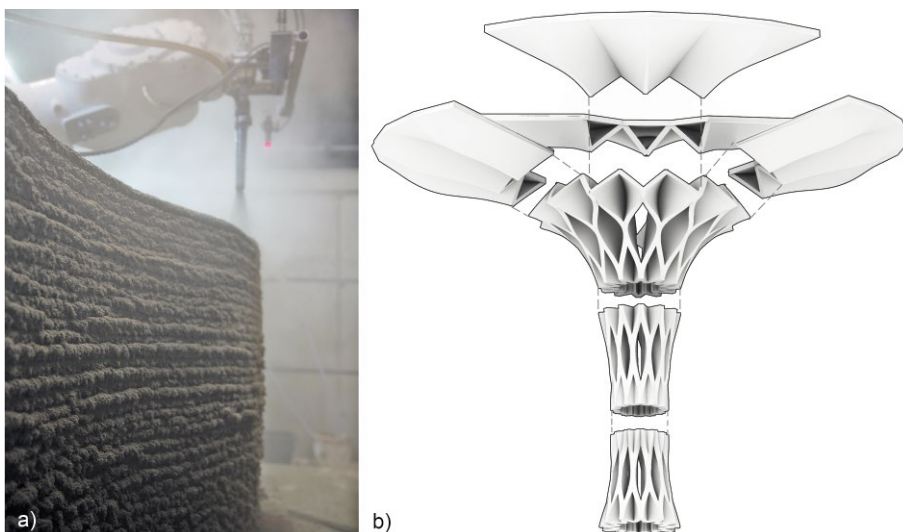


Bild 4 a) Automatisierter robotischer Materialaufbau im SC3DP-Verfahren, b) Konzept für eine segmentierte Kelchstütze (Breite 9 m, Höhe 6 m)
a) Automated robotic material application in the SC3DP process, b) concept for a segmented calyx-like column (width 9 m, height 6 m)

rungsverhaltens und damit der Tragfähigkeit der Schichten erfolgt beim SC3DP-Verfahren u. a. über die Zugabe von Betonzusatzmitteln in den Betonstrahl. Ein Vorteil der SC3DP-Technologie ist das beschleunigte Aufspritzen des Materials. Die hohe kinetische Energie beim Aufprall bewirkt eine Verdichtung des Betons sowie einen guten mechanischen Verbund zwischen zwei aufeinanderfolgenden Schichten. Hierdurch können mit dem SC3DP-Verfahren höhere Rohdichten bzw. geringere Porositäten erzielt werden [14]. Daraus resultieren gute Festigkeits- und Dauerhaftigkeitseigenschaften der additiv gefertigten Bauteile. Aufgrund der hohen Auftragsrate und der hohen Prozessgeschwindigkeit eignet sich das SC3DP-Verfahren sehr gut für die Fertigung großformatiger Bauteile. Ein weiterer Vorteil der robotergestützten SC3DP-Technologie liegt in den räumlichen Freiheitsgraden der robotergestützten Fertigung begründet. Mit insgesamt neun ansteuerbaren Achsen für die Roboterinheit im DBFL (sechs Roboterachsen und drei Achsen der Portaleinheit) liegen enorme geometrische Freiheiten vor und ermöglichen neue Formen, Segmentierung und Fügeprinzipien für die automatisierte Herstellung von Betonbauteilen (Bild 4b).

4 3-D-gedruckte Beton- und Stahlbetonstützen

In den ersten Versuchen wurden ringförmige Geometrien getestet, da diese steifer und somit resistenter gegen Stabilitätsversagen der noch nicht erhärteten Bauteile sind. In den Versuchen wurde die max. Höhe der gespritzten Betonbauteile vorerst auf etwa 80 cm begrenzt (Bild 5a).

Beim Druck dieser unbewehrten Betonstützensegmente wurde die Spritzdüse spiralförmig sukzessive nach oben geführt und der Düsenwinkel immer orthogonal zu der jeweils unteren Schicht eingestellt. Nach dem Erhärten des Spritzbetons wurden die Stirnflächen präzise subtraktiv mit der Fräs- und Sägeeinheit des DBFL nachbearbeitet (Bild 5b). Anschließend wurden die einzelnen Stützensegmente trocken gefügt und über Spannkabel, die im Inneren der Betonhohlstützen geführt werden, zu einer

Stütze mit einer Gesamthöhe von 2,50 m verbunden (Bild 5c). Die bei Stützen geforderte hohe Bauteilgenauigkeit kann im SC3DP-Verfahren aufgrund des schichtweisen Aufbaus und des recht hohen Spritzdrucks nur bedingt erreicht werden. Daher sind Nachbearbeitungsprozesse erforderlich, um Kerben und eine gestörte Kraftübertragung zu vermeiden. Diese Prozeduren können z. B. ein Glätten oder Überfräsen der Oberflächen sein, die Gegenstand aktueller Forschungen sind.

Ausgehend von den Erfahrungen des ITE beim Druck der unbewehrten Betonstützen wurde der 3-D-Betondruck von bewehrten Stahlbetonstützen gemeinsam mit dem iBMB untersucht [17]. Hierzu wurden zwei 3-D-gedruckte Stahlbetonstützen mit einem kreisrunden Vollquerschnitt von 25 cm Durchmesser und eine Länge von 1,25 m hergestellt. Die Bewehrungskörbe wurden manuell vorgefertigt. Aufgrund der Vorfertigung der Bewehrung konnte die Spritzdüse nicht wie bei den unbewehrten Betonstützen rechtwinklig zur Horizontalen geführt werden. Des Weiteren musste der Betondruckprozess so gestaltet werden, dass mögliche Spritzschatten minimiert werden und die Bewehrung allseitig umschlossen ist. Auf Basis von umfangreichen Voruntersuchungen und Prozesssimulationen bzgl. möglicher Spritzdüsenführungen wurde der Bewehrungskorb schließlich mittels zweier Schalbretter auf einem Drehteller mit elektrischem Antrieb fixiert und die um 60° gegen die Horizontale geneigte Spritzdüse von unten nach oben entlang des rotierenden Bewehrungskorbs geführt. Aus der in Bild 6 dargestellten Fotostrecke wird deutlich, dass die Herstellung 3-D-gedruckter Stahlbetonstützen mit dieser Methode gut realisiert werden konnte.

Derzeit finden weiterführende Forschungen statt, um prozessbedingte Strukturfehler wie die noch zu geringe Maßhaltigkeit, die hohe Oberflächenrauigkeit, vereinzelte Spritzschatten und die Inhomogenität des Spritzbetons zu minimieren. Zudem sind systematische Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit der 3-D-gedruckten Stützen geplant, um den Vergleich zu konventionell hergestellten Stahlbetonstützen herzustellen.



Bild 5 a) Spritzen von Betonhohlstützen im SC3DP-Verfahren, b) CNC-Schneiden der Fugengeometrie, c) vorgespannte, aus vier Segmenten trocken gefügte Betonstütze
 a) Printing of hollow concrete columns using the SC3DP technology, b) CNC cutting of the joint geometry, c) pre-stressed concrete column, dry joined from four segments

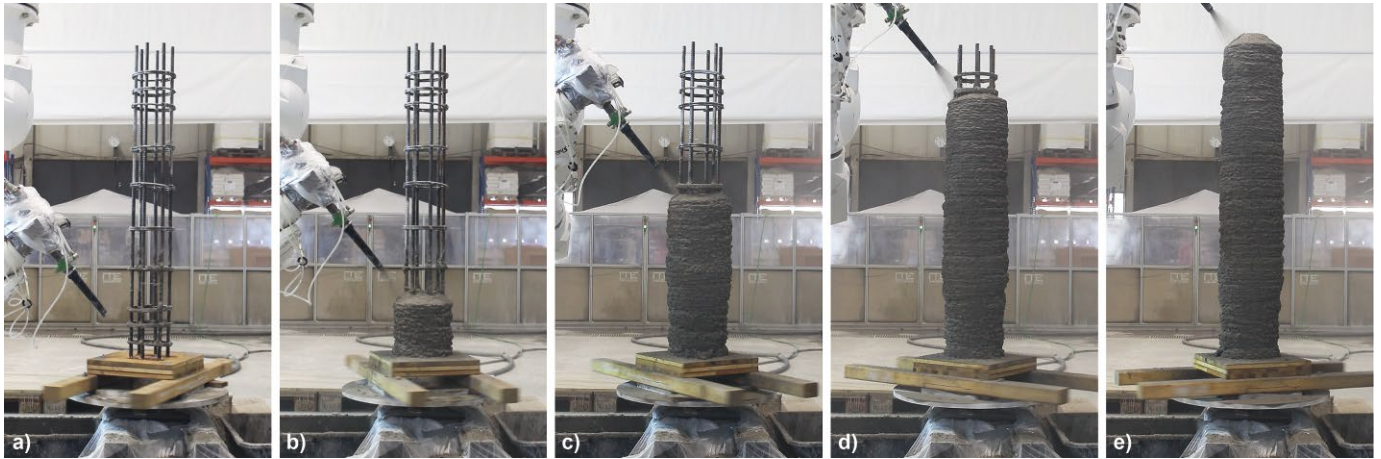


Bild 6 Kontinuierlicher 3-D-Betondruckprozess einer Stahlbetonstütze a) bis e)
Continuous 3-D printing process of a reinforced concrete column a) to e)

5 Freigeformte und bewehrte Wandbauteile

Um die strukturellen und gestalterischen Potenziale der SC3DP-Technologie zu demonstrieren, wurde eine Konzept zur Herstellung einer doppelt gekrümmten, bewehrten Betonwand entwickelt und ein Demonstrationsobjekt hergestellt. Das Fertigungs-konzept besteht aus folgenden Schritten: Zunächst wurde in der CAD-Software Rhino 3D eine globale Oberflächen-geometrie entworfen und mit dem Plug-in Karamba für Grasshopper statisch untersucht.

Für diese Untersuchung wurde ein vereinfachtes Materialmodell verwendet, das auf empirischen Daten basiert, um sicherzustellen, dass die Wand während des Aufbauprozesses nicht zusammenbricht. In einem zweiten Schritt wird die Wand parametrisch für die Bewehrungsintegration adaptiert. Hierzu wurde zunächst eine wellenförmige Oberflächenform generiert. In den Tälern der Wellen wurde die vertikale Wandbewehrung integriert, die wiederum durch horizontale, in den Druckbahnen angeordnete Bewehrungsstäbe gehalten wird. Nach dem Einbau der

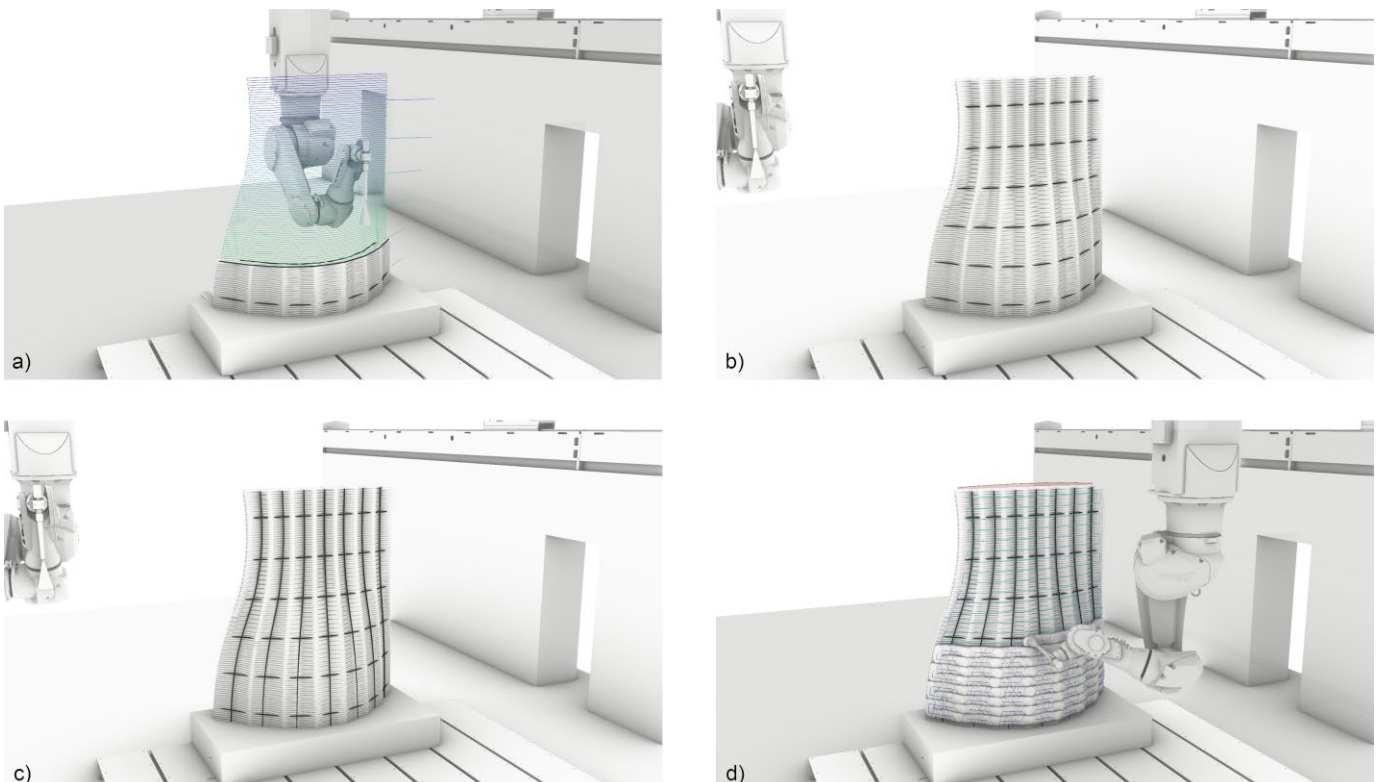


Bild 7 Fertigungsstrategie: a) Drucken der wellenförmigen Bauteilstruktur in horizontalen Schichten und Einlegen der horizontalen Bewehrung in definierten Abschnitten, b) gedrucktes Bauteil mit Taschen zum Einfädeln der vertikalen Bewehrung, c) vertikal eingefädelte Bewehrungsstäbe, d) Aufbringen einer weiteren vertikalen Spritzbetonschicht
Manufacturing strategy: a) printing of the wave-shaped component structure in horizontal layers and insertion of the horizontal reinforcement in defined sections, b) printed component with pockets for inserting the vertical reinforcement, c) vertically inserted reinforcement bars, d) applying a further vertical shotcrete layer

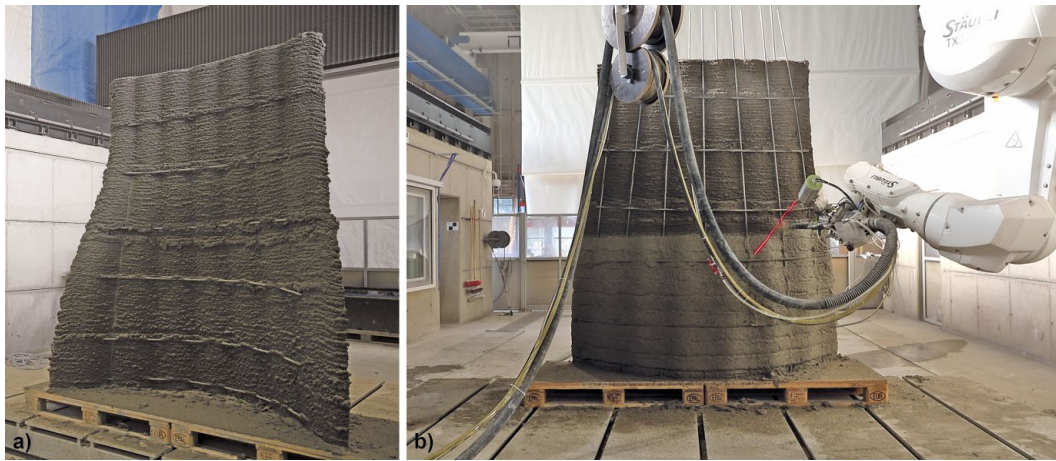


Bild 8 a) Gekrümmte Betonwand vor Einfädeln der Längsbewehrung, b) Second Layer 3-D Printing nach Einfädeln der Längsbewehrung
 a) Curved concrete wall before insertion of the longitudinal reinforcement, b) Second Layer 3-D Printing after insertion of the longitudinal reinforcement

vertikalen Bewehrung wurde eine zusätzliche Betonschicht vertikal (Second Layer 3-D Printing) auf die Wandoberfläche aufgespritzt, die die Bewehrung 3 cm überdeckt. Bild 7 zeigt die einzelnen Prozessschritte im Detail und Bild 8 das Wandbauteil im additiven Fertigungsprozess.

6 Hybride betonierte und 3-D-gedruckte Deckenbauteile

Für Deckenkonstruktionen liegen im Bereich der ablegenden 3-D-Betondruckverfahren noch keine Ansätze vor. Da Betondecken ebene 2-D-Flächenbauteile darstellen, wird das Schalen und Betonieren auch zukünftig eine wirtschaftliche Lösung sein. Die Tendenz der letzten Jahrzehnte bei Stahlbetondecken ging von den materiaeffizienten Rippen- und Unterzugsdecken hin zu den massenintensiven punktgestützten Flachdecken. Der geringe Schalungsaufwand von Flachdecken überwiegt dabei die Mehrkosten auf der Materialseite. Um die materialsparenden Rippen- und Unterzugsdecken im Betonbau künftig wieder wirtschaftlich interessant zu gestalten, wird am ITE der völlig neue hybride Fertigungsansatz verfolgt, die Vorteile des Betonierens mit denen des 3-D-Druckens zu kombinieren. Die Idee des sog. Add-on 3-D Printing ist es, betonierte Decken so dünn wie möglich auszubilden und diese durch aufgedruckte Rippen entsprechend den statischen Anforderungen zu verstärken. Indem die Rippen frisch in frisch auf die noch nicht abgebundene betonierte Deckenplatte gedruckt werden, können die Vorteile der SC3DP-Technologie – wie der sehr gute Schichtenverbund – voll ausgeschöpft werden.

Bild 9 zeigt ein Plattenbalkenelement mit drei aufgedruckten, parallel verlaufenden Rippen. Die automatisierte additive Fertigung ermöglicht, durch einen veränderlichen Querschnittsverlauf der Rippen, eine der Momentenlinie affine Formgebung.

Als weiterer Vorteil kann die erforderliche Längsbewehrung ohne zusätzliche konstruktive Hilfsbewehrung



Bild 9 Hybrid gefertigtes bewehrtes Plattenbalkenelement aus einer 6 cm dicken betonierten Platte mit Flächenbewehrung und aufgedruckten Rippen mit veränderlichem Querschnitt
 Hybrid reinforced slab beam element made of a 6 cm thick concrete slab with surface reinforcement and printed ribs with variable cross section

eingebaut werden (Bild 10). Hierbei wird der robotische Druckprozess bei Erreichen der Bewehrungslage angehalten und die Längsbewehrung manuell auf die frische Betonmatrix abgelegt (Bild 10b). Die Positionierung und Lagesicherung erfolgt durch die beim Betonieren der Deckenplatte eingebrachte Schubbewehrung. Nach Aufbringen der Längsbewehrung wird der Druckprozess fortgeführt und die Bewehrung mit Beton überdeckt.

Durch die Kombination der etablierten Betoniertechnik mit der innovativen SC3DP-Technologie können nicht nur hochleistungsfähige und materiaeffiziente Deckenbauteile erzeugt werden, sondern der Fertigungsprozess kann auch, durch den Entfall aufwändiger Schalungen, äußerst wirtschaftlich gestaltet werden. Zudem lassen sich architektonisch ausdrucksstarke Konstruktionen herstellen, wie bspw. ein 16 m² großes Deckenelement für eine punktgelagerte Decke (Bild 11).



Bild 10 a) Aufdrucken der Rippen, b) Einlegen der Bewehrung, c) Plattenbalkenelement nach dem Überdrucken der Bewehrung
a) Printing of the ribs, b) insertion of the reinforcement, c) beam element after printing on the reinforcement

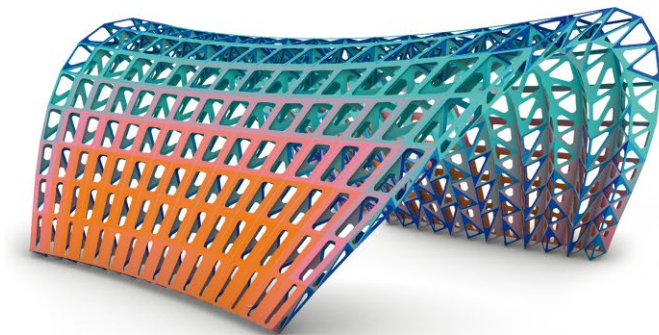


Bild 11 Im Add-on 3-D Printing hergestelltes, 16 m² großes Deckenelement für eine punktgestützte Decke
16 m² ceiling element for a point supported ceiling using Add-on 3-D Printing

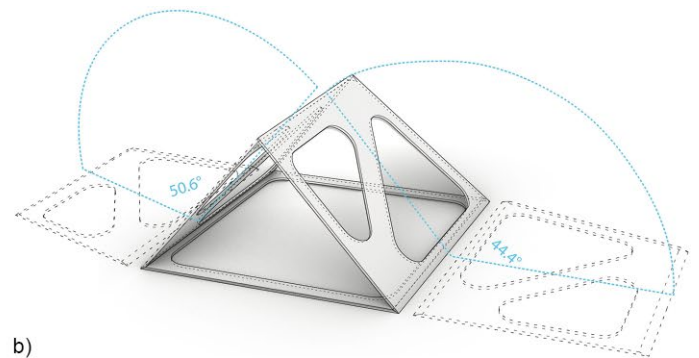
7 Additiv gefertigte Raumtragwerke

Die derzeit am weitesten verbreitete Methode des 3-D-Druckens von Beton ist der schichtweise vertikale Aufbau von flächigen Bauteilen. Ein gänzlich neuer Ansatz stellt die am ITE entwickelte Idee des Planar 3-D Printing dar. Ziel ist es, liegend gedruckte, stabförmige carbonbewehrte Betonbauteile mit nur wenigen Schichten zu drucken und diese nach dem Aushärten des Betons zu dreidimensionalen Tragwerken zusammenzufügen. Hierzu werden räumliche Stabwerksstrukturen (Bild 12a) parametrisch gesteuert in Module mit planaren Segmenten zerlegt (Bild 12b) und daraus Druckpfade zum planaren Drucken der abgewickelten Bauteile generiert.

Da sämtliche Bauteile eben sind, können diese mit nur wenigen Schichten liegend gedruckt (Bild 13a) und an-



a)



b)

Bild 12 a) Parametrisches Entwurfsmodell, b) abgewickeltes Modul
a) Parametric design model, b) unfolded module



a)



b)



c)

Bild 13 a) Planares Drucken der abgewickelten Bauteile, b) subtraktive Nachbearbeitung der Kanten zum Fügen durch Trockenstoßverbindungen, c) räumliches Modul aus drei planar gedruckten Segmenten
a) Planar printing of the unwound components, b) subtractive finishing of the edges for joining by dry joints, c) spatial module of three planar printed segments

schließlich zu räumlichen Modulen zusammengefügt werden. Als Bewehrung werden Streifen aus Carbonmatten zugeschnitten. Diese werden während des Druckprozesses präzise platziert und durch das Aufdrucken weiterer Schichten in das Bauteil eingebaut. Noch bevor der Beton ausgehärtet ist, werden die Kanten, an denen die Elemente und Module später gefügt werden, präzise subtraktiv nachbearbeitet (Bild 13b). Dabei werden die Kanten zuerst mit einer rotierenden Scheibe auf Gehrung geschnitten und anschließend geglättet. Nach dem Abbinden werden die Elemente zu räumlichen Modulen zusammengesetzt (Bild 13c). Derzeit werden am ITE präzise Trockenstoßfugungen entwickelt. Durch die Verwendung von Trockenstößen ist die gesamte Betonstruktur zudem leicht rückbaubar.

8 Nachbearbeitungsprozesse zur Oberflächengestaltung

Eine wichtige Voraussetzung zur Akzeptanz von 3-D-gedruckten Bauteilen ist die Qualität der gedruckten Oberflächen. Hier wurde an der TU Braunschweig das neue Konzept des sog. Second Layer 3-D Printing entwickelt. Hierbei wird der Vorteil der geometrischen Freiheit der Robotereinheit genutzt und eine weitere dünne Schicht auf das gedruckte Bauteil gespritzt. Anschließend wird die aufgespritzte Schicht in einem automatisierten Prozess nachbearbeitet. Hierzu wurde ein Endeffektor entwickelt, der aus einer rotierenden Kunststoffscheibe besteht, die in die 5-Achs-Portaleinheit integriert wurde (Bild 14).

Neben dem präzisen Glätten der Oberfläche sind auch strukturgebende Gestaltungen der Oberflächen möglich (Bilder 15c–15e). Aktuell wird zudem die Integration von

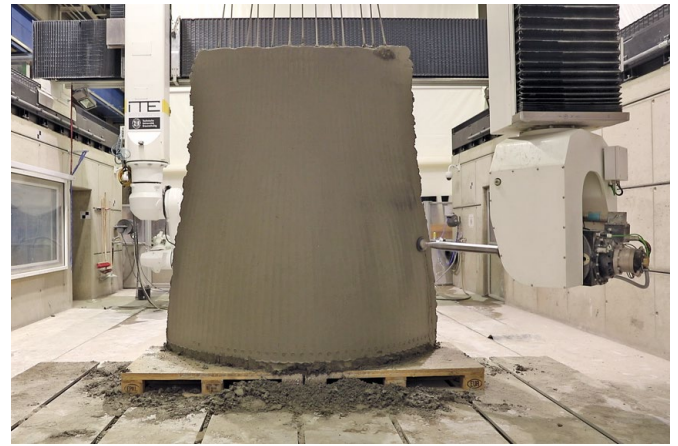


Bild 14 Herstellung der Oberfläche durch einen weiteren Spritzauftrag im Second Layer 3-D Printing und anschließender automatisierter Glättungsprozess
Surface finishing using Second Layer 3-D Printing and subsequent automated smoothing process

flächigen Carbonmatten als Bewehrungselement in das Second Layer 3-D Printing untersucht (Bilder 6a, 6b).

9 Fazit

Die bisherigen Forschungen an der TU Braunschweig zur additiven Fertigung im Bauwesen haben gezeigt, dass sich großformatige bewehrte Betonbauteile im SC3DP-Verfahren herstellen lassen. Neben den Vorteilen des ressourceneffizienten Materialeinsatzes und der hohen Gestaltungsfreiheit ist auch die Wirtschaftlichkeit des Materialauftrags gegeben. Die Erfahrungen im DBFL zeigen, dass ein Materialauftrag von $1 \text{ m}^3/\text{h}$ möglich ist und sich bspw. bei den hybriden Deckenelementen bis zu 60% des Betons einsparen lassen.

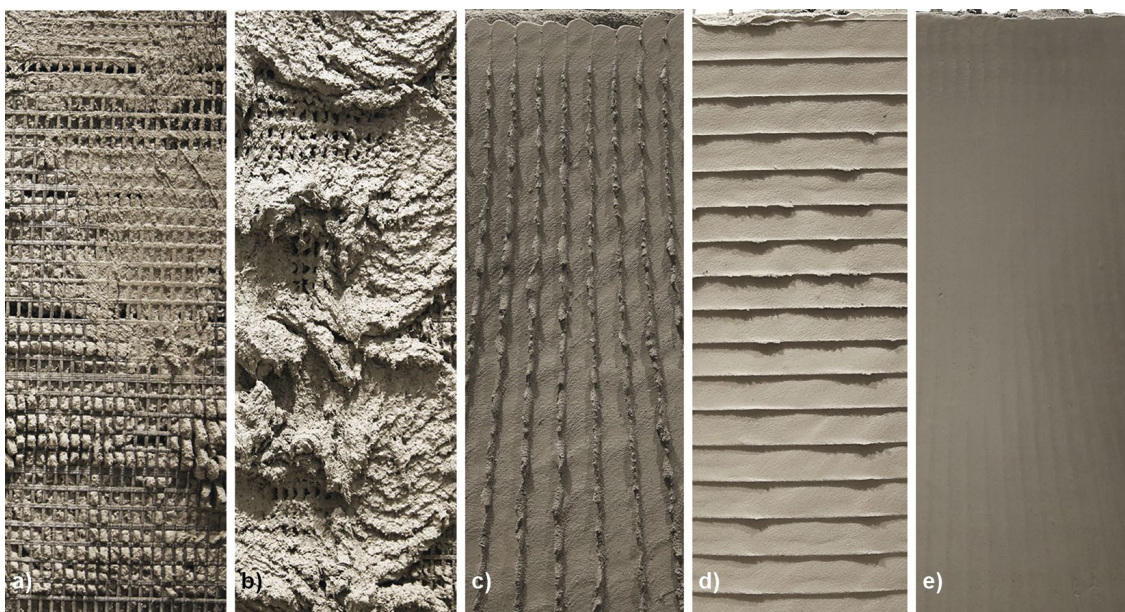


Bild 15 a) Eindrücken der Carbonbewehrung, b) aufgespritzte Deckschicht (Second Layer 3-D Printing), c) Oberfläche nach dem Glätten mit einem Flügglätter, d) nach horizontalem Glätten mit einer großen Glattscheibe, e) nach dem vertikalen Glätten mit einer kleinen Glattscheibe
a) Pressing in the carbon reinforcement, b) sprayed coating layer (Second Layer 3-D Printing), c) surface after smoothing with a trowel, d) after horizontal smoothing with a large trowel, e) after vertical smoothing with a small trowel

Die Additive Fertigung hat das Potenzial, eine auf die individuellen Bedürfnisse des Bauwesens zugeschnittene digitale Schlüsseltechnologie zu werden. Durch die konsequente Zusammenführung additiver Fertigungstechnologien mit BIM-basierten Planungsprozessen sowie die Einbeziehung leistungsfähiger Softwaretools können zukünftig ressourceneffiziente, topologie- und formoptimierte Bauteile gedruckt werden, die gleichzeitig extrem leicht und stabil sind. Hierzu ist es insbesondere notwendig, die Integration der Bewehrung neu zu denken (Bild 16) und innovative Werkstoffverbunde und Prozesskombinationen für die Additive Fertigung zu entwickeln.

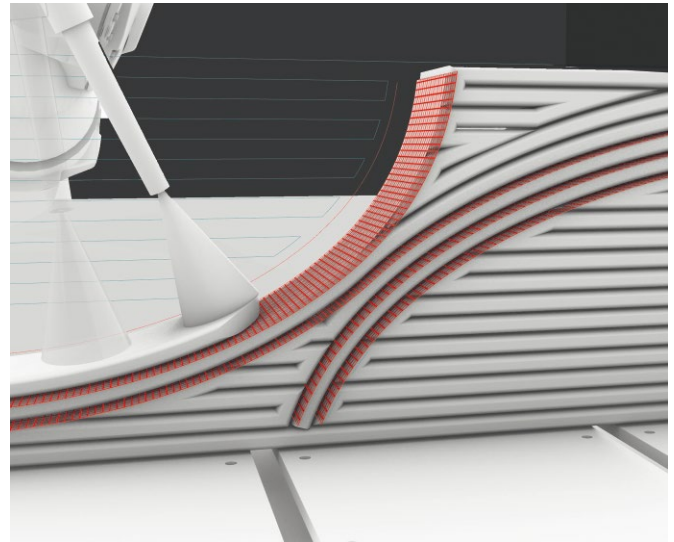


Bild 16 Konzept für die Integration von Textilbewehrung entlang der Spannungstrajektorien
Concept for the integration of textile reinforcement along the stress trajectories

Literatur

- [1] LOWKE, D.; DINI, E.; PERROT, A.; WEGER, D.; GEHLEN, C.; DILLENBURGER, B. (2018) *Particle-bed 3D printing in concrete construction – possibilities and challenges* in: Cement and Concrete Research 112, no. 10, pp. 50–65.
- [2] LOWKE, D.; WEGER, D.; HENKE, K.; TALKE, D.; WINTER, S.; GEHLEN, C. (2015) *3D-Drucken von Betonbauteilen durch selektives Binden mit calciumsilikatbasierten Zementen – Erste Ergebnisse zu beton-technologischen und verfahrenstechnischen Einflüssen* in: LUDWIG, H.-W.; FISCHER, H.-B. [Hrsg.] Tagungsbericht 19. Internationale Baustofftagung. Ibausil. Weimar, 16.–18. Sept. 2015.
- [3] PIERRE, A.; WEGER, D.; PERROT, A.; LOWKE, D. (2018) *Penetration of cement pastes into sand packings during 3D printing: analytical and experimental study* in: Materials and Structures 51, no. 1, art. 22.
- [4] WEGER, D.; LOWKE, D.; GEHLEN, C. (2016) *3D Printing of Concrete Structures with Calcium Silicate based Cements using the Selective Binding Method – Effects of Concrete Technology on Penetration Depth of Cement Paste* in: Proc. of the 4th Int. Symposium on UHPC and High Performance Construction Materials. Kassel, 9–11 March 2016. Kassel: Kassel University Press.
- [5] CESARETTI, G.; DINI, E.; DE KESTELIER, X.; COLLA, V.; PAMBAGUIAN, L. (2014) *Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology* in: Acta Astronautica 93, pp. 430–450.
- [6] KHOSHNEVIS, B.; BEKEY, G. (2002) *Automated Construction Using Contour Crafting – Applications on Earth and Beyond* in: IAARC [ed.] Proceedings of the 19th ISARC. Washington, 2002. pp. 489–495.
- [7] SCHACH, R.; KRAUSE, M.; NÄTHER, M.; NERELLA, V. N. (2017) *CONPrint3D: Beton-3D-Druck als Ersatz für den Mauerwerksbau / CONPrint3D: 3D-Concrete-Printing as an Alternative for Masonry* in: Bauingenieur 92, H. 9, S. 355–363.
- [8] NERELLA, V. N.; HEMPEL, S.; MECHTCHERINE, V. (2017) *Micro- and macroscopic investigations on the interface between layers of 3D-printed cementitious elements* in: International Conference on Advances in Construction Materials and Systems. 71st RILEM Annual Week & ICACMS. Chennai, India, 3–8 Sept. 2017.
- [9] BOS, F.; AHMED, Z.; JUTINOV, E.; SALET, T. (2017) *Experimental Exploration of Metal Cable as Reinforcement in 3D Printed Concrete* in: Materials 10, no. 11, p. 1314.
- [10] LE, T. T.; AUSTIN, S. A.; LIM, S.; BUSWELL, R. A.; LAW, R.; GIBB, A. G. F.; THORPE, T. (2012) *Hardened properties of high-performance printing concrete* in: Cement and Concrete Research 42, no. 3, pp. 558–566.
- [11] NERELLA, V. N.; MARKIN, V.; HEMPEL, S.; MECHTCHERINE, V. (2018) *Characterising Bond between Concrete Layers resulting of Extrusion-Based Digital Construction*. 1st International Conference on Concrete and Digital Fabrication Digital Concrete 2018. Zurich, Switzerland, 10–12 Sept. 2018.
- [12] ZAREIYAN, B.; KHOSHNEVIS, B. (2017) *Interlayer adhesion and strength of structures in Contour Crafting – Effects of aggregate size, extrusion rate, and layer thickness* in: Automation in Construction 81, pp. 112–121.
- [13] KEITA, E.; BESSAIES-BEY, H.; ZUO, W.; BELIN, P.; ROUSSEL, N. (2019) *Weak bond strength between successive layers in extrusion-based additive manufacturing: measurement and physical origin* in: Cement and Concrete Research 123, art. 105787.
- [14] NOLTE, N.; VARADY, P.; KRAUSS, H.; LOWKE, D. (2018) *Schichtenverbund bei der additiven Fertigung – Einflussgrößen und Verfahrensvergleich* in: LUDWIG, H.-W.; FISCHER, H.-B. [Hrsg.] Tagungsbericht 20. Internationale Baustofftagung Weimar. Ibausil. Weimar, 12.–14. Sept. 2018. S. 1-1281–1288.
- [15] NOLTE, N.; KRAUSS, H.-W.; VARADY, P.; LOWKE, D. (2018) *Cold joints in additive manufacturing – Effect of extrusion and spraying on layer bonding* in: 1st International Conference on Concrete and Digital Fabrication. Digital Concrete 2018, Zurich, Switzerland, 10–12 Sept. 2018. pp. 13–14.
- [16] KLOFT, H.; HACK, N.; LINDEMANN, H. (2019) *Shotcrete 3D Printing (SC3DP) – 3D-Drucken von großformatigen Betonbauteilen* in: Deutsche Bauzeitung DBZ, S. 54–57.
- [17] KLOFT, H.; EMPELMANN, M.; OETTEL, V.; LEDDEROSE, L. (2019) *3D Concrete Printing – Production of first 3D Printed Concrete Columns and Reinforced Concrete Columns* in: BFT International, H. 6, S. 28–37.

Autoren

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Harald Kloft
Professor für Tragwerksentwurf
Technische Universität Braunschweig
Institut für Tragwerksentwurf
Pockelsstraße 4
38106 Braunschweig
h.kloft@tu-braunschweig.de

Jun.-Prof. Dr. Norman Hack
Junior Professor für Digitale Baufabrikation
Technische Universität Braunschweig
Institut für Tragwerksentwurf
Pockelsstraße 4
38106 Braunschweig
n.hack@tu-braunschweig.de

Dr.-Ing. Jeldrik Mainka
Technische Universität Braunschweig
Institut für Tragwerksentwurf
Pockelsstraße 4
38106 Braunschweig
jeldrik.mainka@tu-braunschweig.de

M.Sc. Leon Brohmann
Technische Universität Braunschweig
Institut für Tragwerksentwurf
Pockelsstraße 4
38106 Braunschweig
leon.brohmann@tu-braunschweig.de

M.Sc. Eric Herrmann
Technische Universität Braunschweig
Institut für Tragwerksentwurf
Pockelsstraße 4
38106 Braunschweig
e.herrmann@tu-braunschweig.de

Dipl.-Ing. Lukas Ledderose (M.a.A.)
Technische Universität Braunschweig
Institut für Tragwerksentwurf
Pockelsstraße 4
38106 Braunschweig
l.ledderose@tu-braunschweig.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dirk Lowke
Professor für Baustoffe
Technische Universität Braunschweig
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
Beethovenstraße 52
38106 Braunschweig
d.lowke@ibmb.tu-bs.de