
ENTWICKLUNG VON SPRITZBETONREZEPTUREN MIT STUEBERBAREN EIGENSCHAFTEN FÜR DIE ROBOTERGESTÜTZTE ADDITIVE FERTIGUNG VON BETONBAUTEILEN

DEVELOPMENT OF SHOTCRETE MIXTURES WITH CONTROLLABLE PROPERTIES FOR THE ADDITIVE MANUFACTURING OF CONCRETE STRUCTURES

Niklas **Nolte**, iBMB, TU Braunschweig, Braunschweig, Deutschland
Maren **Heidmann-Ruhz**, INW, TU Clausthal, Clausthal, Deutschland
Hans-Werner **Krauss**, iBMB, TU Braunschweig, Braunschweig, Deutschland
Patrick **Varady**, iBMB, TU Braunschweig, Braunschweig, Deutschland
Harald **Budelmann**, iBMB, TU Braunschweig, Braunschweig, Deutschland
Albrecht **Wolter**; INW, TU Clausthal, Clausthal, Deutschland

In einem interdisziplinären Forschungsprojekt unter Beteiligung der TU Braunschweig, der TU Clausthal und der LU Hannover wird derzeit ein Verfahren zur additiven Fertigung komplexer Betonbauteile mit Hilfe der robotergestützten Spritztechnik entwickelt. Der Beitrag gibt einen kurzen Überblick über den Stand der Forschung im Bereich der additiven Fertigung und stellt das besondere Potential der robotergestützten Spritztechnik auch anhand von ersten Versuchsergebnissen heraus. Weiter werden die Anforderungen an zementbasierte Stoffsysteme für die additive Fertigung dargelegt, welche aus den einzelnen Prozessschritten und den angestrebten Bauteileigenschaften resultieren. Darauf aufbauend werden ein Konzept zur Realisierung der benötigten Materialeigenschaften sowie erste Ergebnisse der Materialentwicklung in dem laufenden Projekt vorgestellt.

At TU Braunschweig, TU Clausthal and LU Hannover the development of an alternative additive manufacturing method based on robot-aided fabrication is in process. In combination with shotcrete techniques new possibilities for the fabrication of free formed concrete elements with large dimensions (walls, etc.) are given. In this paper, a short state of the art regarding additive manufacturing processes is presented. The potential of a robot-aided shotcrete process is shown based on first test results. Furthermore, the requirements of cementitious materials arising from the manufacturing process and the aimed properties of the building components are discussed. A concept for the realization of the material requirements is introduced and first laboratory results are presented.

1. Stand der Forschung bei der additiven Fertigung im Bauwesen

In vielen Produktionsbereichen gehört die automatisierte, digitale Fertigung bereits zum Stand der Technik. Bei der Fertigung von Betonbauteilen werden hingegen größtenteils Technologien eingesetzt, die seit mehreren Jahrzehnten etabliert sind. Mit diesen „herkömmlichen“ Fertigungsmethoden kann das Potenzial des digitalen Entwerfens, welches in der Errichtung konstruktiv und wirtschaftlich optimierter, häufig geometrisch komplexer Bauteile zu sehen ist, zurzeit nicht voll ausgeschöpft werden. Die additive Fertigung (häufig vereinfachend als „3D-Betondrucken“ bezeichnet) ermöglicht dagegen die Realisierung individuell gestalteter, komplexer Betonbauteile und stellt zudem eine logische und konsequente Erweiterung des digitalen Bauprozesses dar.

In aktuellen Forschungs- und Entwicklungsvorhaben kommen hauptsächlich additive Fertigungstechniken auf der Basis von Extrusionsverfahren [5], [1] oder von Pulverbetttechniken [8], [12] zum Einsatz. Am Digital Building Fabrication Laboratory (DBFL) der TU Braunschweig werden aktuell verschiedene robotergestützte Fertigungstechniken erprobt [10], [11]. In dem hier präsentierten Beitrag werden das Konzept sowie erste Ergebnisse eines Projektes vorgestellt, in dem die robotergestützte Spritzbetontechnik zur Fertigung räumlicher, geometrisch komplexer Betonbauteile eingesetzt wird. Eine detailliertere Beschreibung des DBFL sowie des gesamten Forschungsprojekts ist im Beitrag von Herrmann et al. [3] in diesem Sammelband gegeben.

Additive Fertigungstechniken bieten allgemein den Vorteil, dass Bauteile nahezu beliebiger Geometrie mit Hilfe digitaler Prozesse produziert werden können. Daraus ergeben sich Vorteile hinsichtlich der geometrischen Freiheitsgrade sowie der effizienten Materialausnutzung, so dass die Bauweise im Vergleich zu herkömmlichen Fertigungsmethoden neben neuen Entwurfsmöglichkeiten auch ein hohes Nachhaltigkeitspotenzial bietet. Bei schalungsloser Fertigung von Betonbauteilen können zudem die Produktionskosten (Personal und Sachmittel) deutlich reduziert werden [13]. Weiter kann die additive Fertigung dabei helfen, die Herstellung von Betonbauteilen bei begrenztem Arbeitsraum oder gesundheitsgefährdenden Umgebungsbedingungen zu erleichtern. Die unterschiedlichen additiven Fertigungsmethoden bieten dabei individuelle Vor- und Nachteile.

Bei den Pulverbetttechniken wie bspw. dem selektiven Binden, wird zwischen zwei Varianten unterschieden. Variante 1 arbeitet mit einem Gesteinskörnungsgemisch, das durch lokales Auftragen von Zementleim nach dessen Erhärtung zu einem Komposit verbunden wird. Bei der zweiten Variante wird durch das punktuelle Auftragen von Wasser auf ein Gemisch aus Gesteinskörnung und Zement eine Verfestigung erreicht. Bei beiden Varianten können komplexe und filigrane räumliche Strukturen realisiert werden (siehe Bild 1 links). Allerdings ist die Prozessgeschwindigkeit aufgrund der limitierten Tiefe des Wasser- bzw. Bindemittel-eintrags verhältnismäßig gering, sodass zahlreiche Auftragsdurchgänge notwendig sind, um größere Bauteile zu fertigen. Die Prozessgeschwindigkeit hängt dabei stark mit der zu erzielenden Präzision zusammen. Der exakte Eintrag des Wassers bzw. Bindemittels ist zudem Voraussetzung für gute Verbundeigenschaften und homogene Bauteileigenschaften [8].

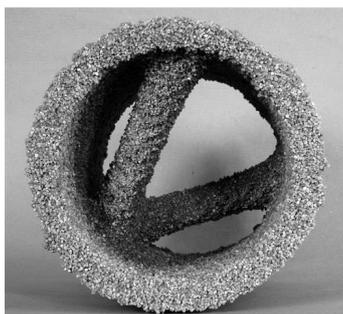


Bild 1: Charakteristische Oberflächen additiv gefertigter Strukturen – links: mittels Pulverbetttechnik (Bild: TU München); rechts: mittels Extrusion (Bild: XtreeE – Osman M. Gyasi)

Bei den Extrusionstechniken wird das fertig gemischte Material über ein Pumpsystem zum Düsenkopf (Extrusionskopf) gefördert. Dort wird das Material strangförmig abgelegt. Je nach Düsenkopf entstehen dabei unterschiedliche Stranggeometrien (Form, Höhe, Breite). Der Bauteilaufbau erfolgt durch das schichtweise Ablegen der Materialstränge. Die Extrusionstechnik ist die am häufigsten bei der additiven Fertigung eingesetzte Technik. Erste großformatige Prototypen wurden bereits realisiert [9], [15]. Wie auch bei den Pulverbetttechniken, ergibt sich ein für den individuellen Fertigungsprozess charakte-

ristisches Oberflächenbild. Eine beispielhafte Oberflächenstruktur eines im Extrusionsverfahren gefertigten Betonbauteils ist in Bild 1 (rechts) zu sehen. Der Verbund zwischen den einzelnen Materialsträngen wird lediglich über das Anpressen des neu abgelegten Materialstrangs auf den vorherigen erreicht. Le et al. [7] zeigen, dass die Verbundzone extrudierter Betonbauteile generell eine Schwachstelle hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften darstellen kann.

Die am Braunschweiger DBFL eingesetzte Technik des additiven Betonauftrags basiert auf dem Nassspritzverfahren. Wie beim Extrudieren wird das vorgemischte Nassspritzgut zur Spritzdüse gepumpt, dort unter Druckluftzufuhr beschleunigt und auf dem Untergrund appliziert. Aufgrund der hohen Auftragsrate und der hohen Prozessgeschwindigkeit eignet sich das Verfahren sehr gut für die Fertigung großformatiger, räumlicher Bauteile, siehe Beispiel in Bild 2. Filigrane Bauteile sind dagegen aufgrund der natürlichen Breite der Spritzbahn bei vertikalem Auftrag nur mit Einschränkungen realisierbar. Für die Fertigung dünnwandiger, mehrfach gekrümmter Bauteile werden aktuell unterschiedliche Techniken ausprobiert (nicht Gegenstand dieses Beitrags).

In Abhängigkeit von der Betonzusammensetzung (u.a. Größtkorn) und den Prozessrandbedingungen können je nach Zielsetzung unterschiedliche Oberflächenqualitäten realisiert werden. Ein besonderer Vorteil des Spritzverfahrens gegenüber anderen additiven Fertigungstechniken ist der gute Verbund zwischen zwei aufeinanderfolgenden Schichten, da i.d.R. „frisch in frisch“ appliziert wird [2]. Ein weiterer Vorteil ist die durch Druckluft erzielte Beschleunigung des Materials. Die hohe kinetische Energie beim Aufprall bewirkt eine Verdichtung des Betons, so dass i.d.R. im Vergleich zum Extrusionsverfahren eine höhere Rohdichte bzw. eine geringere Porosität erzielt werden. Daraus resultieren vergleichsweise gute Festigkeits- und Dauerhaftigkeitseigenschaften des Betons. Ein Teil der für die Verdichtung erforderlichen Gesteinskörnung bleibt allerdings als Rückprall zurück, was beim Herstellungsprozess zu berücksichtigen ist. Ein weiterer Nachteil ist zudem die Staub- und Aerosolentwicklung.



Bild 2: Vom DBFL mittels Spritzverfahren hergestellte Struktur mit Überhang (Bild: ITE)

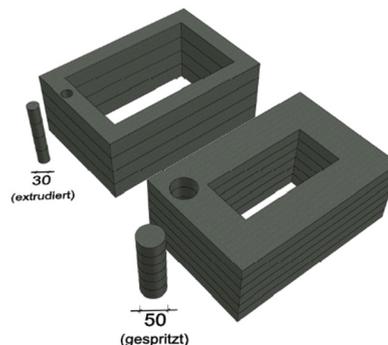


Bild 3: Schematischer Aufbau der am DBFL hergestellten Probekörper

2. Vergleich der Verbundeigenschaften von im Spritzverfahren und im Extrusionsverfahren erzeugten Betonschichten

2.1 Material und Methoden

Für die Fertigung der Probekörper wurde ein kunststoffvergüteter, mikrofaserverstärkter Instandsetzungsmörtel (SPCC, „Emcefix Spachtel G Extra“, MC Bauchemie) verwendet. Der Mörtel wurde in einem Zwangsmischer nach Herstellerangaben vorgemischt. Anschließend wurde der Mörtel mit einer Schneckenpumpe (Variojet FU, Mader) über 20 m bei einem Schlauchdurchmesser von 35 mm bis zur Düse (Reprofilier-Spritzgerät mit Düsenrohr NW

15 mm, Mader) vorgepumpt. Es wurden Probekörper mit ähnlichen Abmessungen sowohl im Extrusions- als auch im Spritzverfahren durch schichtweisen, vertikalen Aufbau gefertigt (siehe Bild 3). Beim Spritzbetonauftrag wurden die Düsenabstände zwischen 15 und 25 cm variiert. Größere Düsenabstände sind beim vertikalen Auftrag nicht zielführend, da die Breite des Spritzstrahls mit dem Düsenabstand zunimmt. Der Luftdruck betrug konstant 2 bar. Bei der Probekörperherstellung mittels Extrusion wurde der Volumenstrom variiert, während der Düsenabstand und die Bahngeschwindigkeit konstant gehalten wurden. Bei beiden Auftragsverfahren wurde eine vergleichbare Bahngeschwindigkeit gewählt, so dass Unterschiede in der Porosität, den Verbundeigenschaften und den weiteren mechanischen Eigenschaften allein auf die unterschiedliche Verdichtung des Materials zurückgeführt werden können. Aufgrund des Düsenabstandes und der höheren kinetischen Energie des Materials beim Spritzverfahren ergibt sich im Vergleich zum Extrusionsverfahren eine größere Bahnbreite und eine geringere Schichthöhe.

An allen Grundprobekörpern wurden Haftzugfestigkeiten ermittelt. Des Weiteren wurden Bohrkerne ($d = 30 \text{ mm}$) entnommen und in einem Mikrocomputertomographen (phoenix v|tome|x s, GE Sensing & Inspection Technologies GmbH, Wunstorf, DE) mit $150 \text{ kV}/230 \text{ }\mu\text{A}$ gescannt. Die Auflösung (Voxelgröße) betrug $35 \text{ }\mu\text{m}$. Die Bildverarbeitung wurde mit Matlab 2017a (The Mathworks, Inc., Natick, US-MA) vorgenommen. Durch ein eigens entwickeltes, manuelles Schwellwertverfahren wurden Luftporen und Feststoff segmentiert und der Gesamt-Luftporenanteil berechnet. Zusätzlich wurde der Luftporenanteil jeder segmentierten Schicht bestimmt, sodass dieser über die Höhe der Probe abgebildet werden kann.

2.2 Versuchsergebnisse

Bild 4 zeigt die Haftzugfestigkeiten sowie die Rohdichten von Probekörpern, die im Extrusions- sowie im Spritzverfahren unter Variation des Düsenabstandes bzw. des Volumenstroms gefertigt wurden.

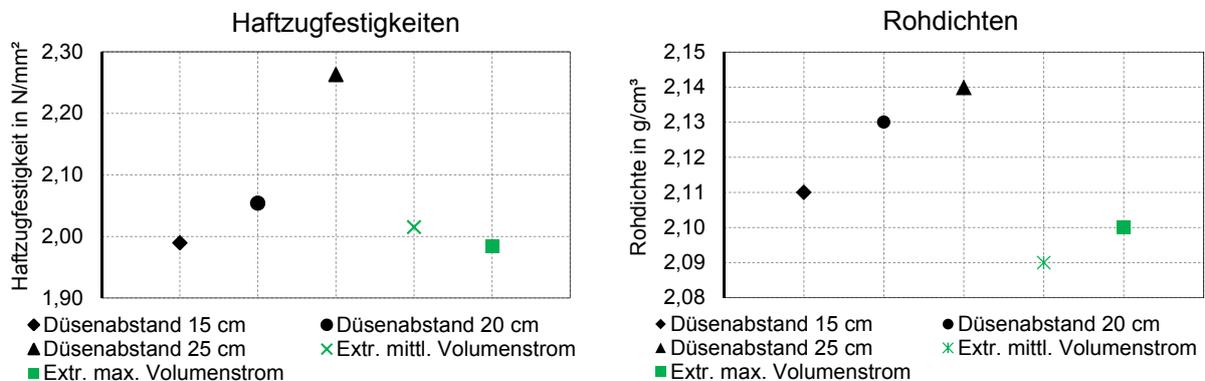


Bild 4: Vergleich der Haftzugfestigkeiten (nach 28d) und der Rohdichten verschiedener Probekörper, die im Spritzverfahren mit unterschiedlichen Spritzdüsenabständen sowie im Extrusionsverfahren mit unterschiedlichen Materialvolumenströmen hergestellt wurden

In Abhängigkeit vom Spritzdüsenabstand variierte die Haftzugfestigkeit zwischen $1,99 \text{ N/mm}^2$ und $2,27 \text{ N/mm}^2$, wobei die Festigkeit mit dem Spritzdüsenabstand ansteigt. Die Haftzugfestigkeiten der extrudierten Probekörper liegen bei $1,98 \text{ N/mm}^2$ und $2,02 \text{ N/mm}^2$. Es wird deutlich, dass bei den hier eingestellten Prozessparametern (Luftdruck, Bahngeschwindigkeit, etc.) der ideale Spritzdüsenabstand bei 25 cm oder höher liegt, da hierbei die beste Verdichtung erzielt wird. Die Haftzugfestigkeiten der extrudierten Probekörper liegen auf dem Niveau der mit einem Düsenabstand von 15 cm bzw. 20 cm gespritzten Proben.

Die Bruchflächen bei den im Spritzverfahren hergestellten Probekörpern befinden sich alle- samt in der Nähe der Lasteinleitung, jedoch eindeutig in der Probe und nicht in der Klebe- schicht selbst. Dagegen zeigen 50 % der extrudierten Proben ein Versagen in der Mitte der Probe, d.h. außerhalb des Lasteinleitungsbereichs, was als Hinweis auf Inhomogenitäten in- nerhalb der Probe gedeutet werden kann. Die Bruchstellen können jedoch nicht generell exakt den Verbundzonen zugewiesen werden. Die Klärung des Einflusses der Verbund- zonen auf die mechanischen Eigenschaften und das Bruchverhalten erfordert weitere Untersuchungen.

Die höheren Rohdichten bzw. geringeren Porositäten der gespritzten Proben werden durch Computertomographie-Aufnahmen (CT-Scans) belegt. Bild 5 zeigt das Ergebnis zweier CT- Scans an je einem Bohrkern aus einem extrudierten und einem gespritzten Grund- probekörper. In dem Diagramm dargestellt ist der schichtweise bestimmte Luftporenanteil über die Höhe des Bohrkerns.

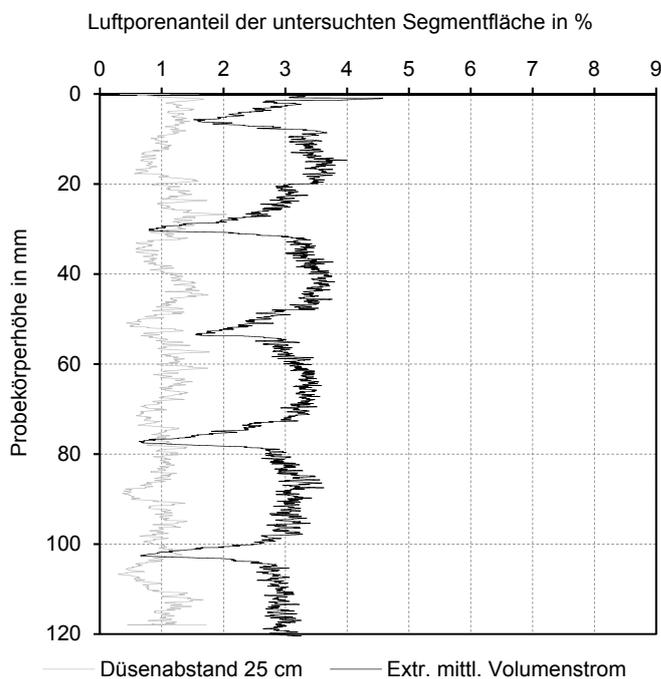


Bild 5: Aus CT-Scans ermittelter Luftporenanteil über die Probekörperhöhe

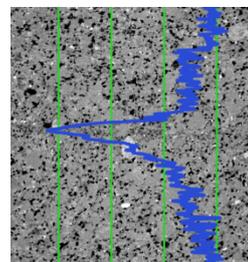


Bild 6: CT-Scan eines extrudierten Probekörpers mit überlagerter Luftporenverteilung (Ausschnitt)

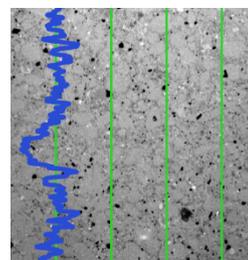


Bild 7: CT-Scan eines gespritzten Probekörpers mit überlagerter Luftporenverteilung (Ausschnitt)

Es fällt auf, dass der gespritzte Probekörper eine deutlich homogenere Luftporenverteilung aufweist. Bei dem extrudierten Probekörper ist ein regelmäßiger Wechsel zwischen Bereichen sehr geringer und erhöhter Porosität zu erkennen. Aus Bild 6 geht hervor, dass Bereiche mit stark reduzierter Porosität mit einer Materialverdichtung sowie einer Inhomogenität im Gefüge einhergehen. Die lokale Verdichtung könnte aus dem Anpressdruck des Düsenkopfes an der bereits abgelegten Schicht resultieren. Eine weitere Ursache für den geringeren Luftporenanteil könnte eine Bindemittelanreicherung an dieser Grenzschicht sein. Zur genaueren Klärung der Ursachen sind weitere Untersuchungen geplant. Bemerkenswert ist das deutlich homogenere Gefüge der gespritzten Probekörper, obwohl der Materialauftrag in diesem Fall auch beim Spritzverfahren schichtweise erfolgte. Bei dem vorgesehenen kontinuierlichen Materialauftrag im robotergestützten Spritzverfahren ist entsprechend eine noch höhere Gefügehomenität zu erwarten.

3. Steuerung der Materialeigenschaften – Konzept

Die Umsetzung individueller Bauaufgaben durch additive Fertigungsprozesse erfordert gut steuerbare und reproduzierbare Materialeigenschaften. Ein Ziel des hier präsentierten Forschungsvorhabens ist die robotergestützte in situ Steuerung des Fertigungsprozesses. Wichtige Randbedingungen bilden dabei die Materialanforderungen, welche aus den zu erzielenden Bauteileigenschaften resultieren, sowie die realisierbaren Materialeigenschaften. Neben den verfahrenstechnischen Regelungsgrößen soll auch die Materialzusammensetzung bspw. durch eine veränderte Dosierung von Zusatzmitteln für die Steuerung des Prozesses genutzt werden. Der Zusammenhang zwischen den geforderten Bauteil- und Materialeigenschaften, den verfahrenstechnischen Einflussfaktoren sowie den prozess-technischen und materialtechnologischen Steuerungsmöglichkeiten ist in Bild 8 schematisch dargestellt. Um die mechanischen, optischen und geometrischen Bauteileigenschaften erfüllen zu können, gilt es das rheologische sowie das Erstarrungs- und Erhärtungsverhalten des Materials möglichst präzise einzustellen bzw. zu steuern. Im Folgenden werden die wichtigsten materialtechnologischen Herausforderungen erläutert und erste Lösungsansätze präsentiert.

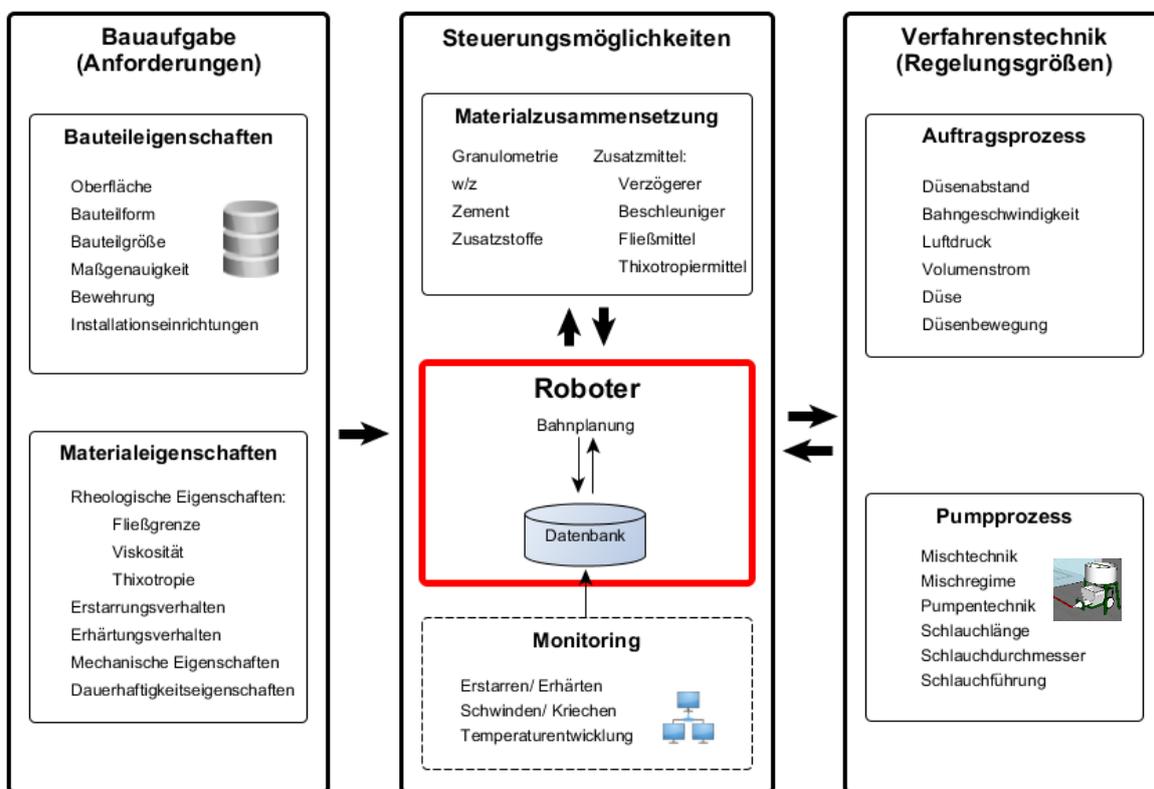


Bild 8: Übersicht zum robotergestützten additiven Fertigungsprozess

In den einzelnen Prozessschritten werden teilweise sehr unterschiedliche Anforderungen an die rheologischen Eigenschaften des verwendeten Betons gestellt. Um eine gute Pumpfähigkeit zu erzielen, sollte der Beton bspw. keine zu hohe Fließgrenze aufweisen. Dagegen erfordert eine hohe Fertigungsgeschwindigkeit im Spritzverfahren eine möglichst hohe Fließgrenze des Betons. Die damit erzielte Grünstandfestigkeit sorgt für eine ausreichende Formstabilität des Materials unmittelbar nach dem Auftrag, so dass ein schnellerer Schichtenaufbau möglich ist. Gegenläufige Anforderungen ergeben sich auch hinsichtlich der Viskosität des Betons. Während eine niedrige Viskosität für den Pumpprozess von Vorteil ist, ist eine hohe Viskosität zielführend, um Sedimentations- oder Segregationsprozesse zu begrenzen. Die gleichzeitige Einstellung einer hohen Fließgrenze und einer niedrigen

Viskosität stellt eine wesentliche materialtechnische Herausforderung dar. Um die genannten Kriterien zu erfüllen, sollte das Material ausgeprägt thixotrope Eigenschaften aufweisen, d.h. bei hohen Scherraten einen schnellen Strukturabbau und im Ruhezustand eine möglichst schnelle Strukturholung zeigen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das Material in den verschiedenen Prozessschritten unterschiedlich starken Scherbeanspruchungen ausgesetzt ist, welche einen Einfluss sowohl auf die Struktur als auch auf die Rheologie haben.

Auch hinsichtlich des Erstarrungs- und Erhärtungsverhaltens ergeben sich aus den Prozesscharakteristika der additiven Fertigung spezifische Anforderungen. Mit zunehmender Schichtdicke und Bauteilhöhe nehmen die im unteren Bauteilbereich abzutragenden Lasten zu. Entsprechend ist ein an den Prozess angepasstes Erstarrungsverhalten des Betons erforderlich, welches bevorzugt über die Dosierung von Erstarrungsbeschleuniger (BE) an der Düse gesteuert werden kann. Zudem kann bei größeren Bauteilen auch eine hohe Frühfestigkeitsentwicklung erforderlich sein. Trotz des schnellen Erstarrens muss jedoch ein guter Verbund zu der zuvor applizierten Schicht gewährleistet sein, sofern schichtweise appliziert wird. Dies bedingt eine ausreichend lange „Offenzeit“ des Betons nach Zugabe des BE. Zudem ist eine ausreichend lange Verarbeitungszeit erforderlich, um eventuelle Prozessunterbrechungen tolerieren zu können.

Aus den beschriebenen Materialanforderungen und Zusammenhängen (Festigkeitsentwicklung und Offenzeit) ergibt sich für jede individuelle Bauaufgabe ein optimales Zeitfenster für den Auftrag der nächsten Schicht. Der Zusammenhang ist in Bild 9 exemplarisch dargestellt. Das optimale Zeitfenster für das Aufbringen der nächsten Schicht ergibt sich aus der einzuhaltenen minimalen und der maximal zulässigen Festigkeit für die Gewährleistung eines guten Verbunds. Das Zeitfenster ist durch Veränderung der BE-Dosierung oder anderer Rezepturparameter in einem gewissen Rahmen steuerbar. Zu beachten ist, dass das optimale Zeitfenster auch durch die Geschwindigkeit des Auftragsprozesses sowie die Bahngeometrie (Schichtdicke, -breite) beeinflusst wird.

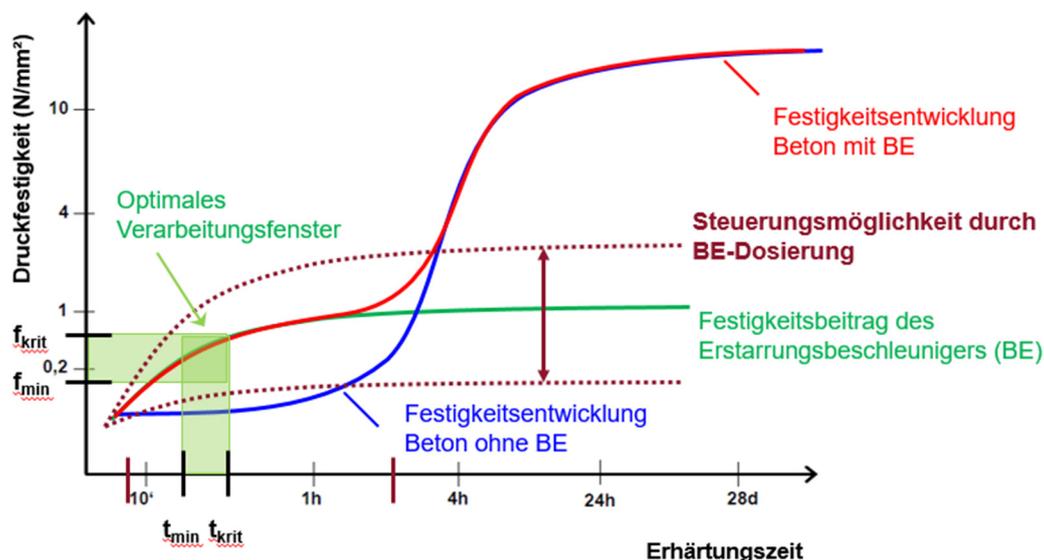


Bild 9: Beispiel für ein optimales Zeitfenster für den Spritzauftrag von Beton bei der Zugabe von Erstarrungsbeschleuniger (in Anlehnung an [4])

Die genannten Zusammenhänge gelten für den Materialauftrag sowohl im Spritzverfahren als auch im Extrusionsverfahren. Vorschläge für die experimentelle Bestimmung des Verarbeitungszeitfensters bei extrusionsbasierten Verfahren werden bspw. in [13] und [6] unterbreitet. Perrot et al. [13] leiten aus eigenen Versuchen ein erstes Modell zur Vorhersage der abzutragenden Auflasten ab, die durch den sukzessiven Schichtenaufbau entstehen.

Untersuchungen zur Verbundfestigkeit extrudierter Probekörper deuten an, dass Inhomogenitäten oder Fehlstellen zwischen zwei Schichten zu Verbundproblemen (sog. „cold joints“) führen können, deren Behebung als eine zentrale Herausforderung für die Forschung gilt [7]. Die in Abschnitt 2 vorgestellten Ergebnisse verdeutlichen dagegen das besondere Potenzial der Spritztechnik zur Erzielung eines guten Schichtenverbunds.

4. Entwicklung von Betonen mit steuerbaren Eigenschaften – erste Ergebnisse

Es wurde gezeigt, dass die Steuerung der materialtechnologischen Eigenschaften der verwendeten Betone von maßgeblicher Bedeutung für die additive Fertigung sind. Im Folgenden werden Lösungswege für die Steuerung der rheologischen Eigenschaften und des Erstarrungsverhaltens aufgezeigt und mit ersten Versuchsergebnissen unterlegt.

4.1 Rheologische Steuerung

Der unterschiedliche Scherenergieeintrag sowie die unterschiedlichen Anforderungen an die Fließgrenze und die Viskosität des Materials in den verschiedenen Prozessschritten beim robotergestützten Spritzverfahren erfordern eine an den individuellen Prozess angepasste Steuerung der rheologischen Eigenschaften des Betons. Im Folgenden wird schwerpunktmäßig auf die Steuerung der Thixotropie am Beispiel von Spritzmörtelrezepturen eingegangen. Die Einstellung der thixotropen Eigenschaften von Beton oder Mörtel kann über verschiedene Steuergrößen bei der Materialzusammensetzung erfolgen, siehe Bild 8. Zurzeit werden die Auswirkungen des Bindemittel-/Gesteinskörnungs-Volumenverhältnisses, des w/z-Werts sowie verschiedener Zusatzmittel auf die rheologischen Eigenschaften untersucht. Nachfolgend werden erste Versuchsergebnisse zum Einfluss von stabilisierenden und scherverdünnenden Zusatzmitteln präsentiert.

4.1.1 Material und Methoden

Ein Auszug der untersuchten Mörtelrezepturen ist in Tabelle 1 aufgeführt. Die Ausgangsstoffe wurden in einem Hobart-Planetenmischer nach dem in Tabelle 2 dargestellten Mischregime homogenisiert. Neben PCE-Fließmittel wurde bei Rezeptur 2 ein stabilisierendes Zusatzmittel verwendet (Starvis 3040 F, BASF), das darüber hinaus eine scherverdünnende Wirkung bei hohem Scherenergieeintrag zeigt.

Tabelle 1: Zusammensetzung der untersuchten Mörtelrezepturen

Komponenten	Rezeptur 1 (REF)	Rezeptur 2 (ST)	Einheit
CEM I 52,5 N	600	600	kg/m ³
Kalksteinmehl	97	97	kg/m ³
Gesteinskörnung d = 0 – 4 mm	1258	1258	kg/m ³
Leitungswasser	270	270	kg/m ³
PCE – Fließmittel	0,3	0,3	% / Zement
Starvis 3040 F (ST)	-	1,5	kg/m ³

Tabelle 2: Mischregime

Zeitpunkt	Reihenfolge	Intensität Mischer
vorher	Wasser + FM	Stufe 1
00:00 - 00:30	Bindemittel (+ ST)	Stufe 1
00:30 - 01:00	Sand	Stufe 1
01:00 - 02:00	Mischen	Stufe 1
02:00 - 02:30	Mischen	Stufe 2
02:30 - 04:00	Ruhen	-
04:00 - 05:00	Mischen	Stufe 2
05:00 - 05:15	ggf. BE (Abs. 2.2)	Stufe 2

Die rheologischen Eigenschaften der Mörtel wurden mit dem Betonrheometer „Viskomat XL“ (Schleibinger [14]) charakterisiert. Es handelt sich um ein Rotationsviskosimeter nach dem Couette-Prinzip. Die Rheometermessungen erfolgten mit einer Fishbone-Messzelle. Es wurde ein Rampen-Scherprofil verwendet, wobei die Umdrehungsgeschwindigkeit zunächst über 2 Minuten von 0 Upm auf 60 Upm linear gesteigert und anschließend sofort wieder über 2 Minuten von 60 Upm auf 0 Upm linear reduziert wurde. Die Messungen wurden ca. 5 Minuten nach Beendigung des Mischvorgangs gestartet.

Begleitend zu den genannten Untersuchungen wurden die Frischmörtel- und Festigkeitseigenschaften bestimmt. Für den Referenzmörtel (REF) wurde ein Ausbreitmaß von 24,1 cm sowie ein Setzfließmaß von 13,0 cm gemessen. Die 28 Tage Druckfestigkeit betrug 64,04 N/mm² bei einer Rohdichte von 2,15 g/cm³. Das Ausbreitmaß sowie das Setzfließmaß des modifizierten Mörtels (ST) betragen 17,2 cm bzw. 10,2 cm. Nach 28 Tagen wurde eine Druckfestigkeit von 67,3 N/mm² bei einer Rohdichte von 2,19 g/cm³ bestimmt. Die Luftporengehalte betragen 4,3 % (REF) und 3,0 % (ST).

4.1.2 Ergebnisse Rheologie

Anders als bei Leimviskosimetern können die Ergebnisse aus dem Betonrheometer aufgrund der verwendeten Messgeometrie und des großen Probenvolumens nicht ohne Weiteres in rheologische Kennwerte umgerechnet werden. Die Ergebnisdarstellung erfolgt daher i.d.R. in Form von Drehmomentkurven über der Umdrehungsgeschwindigkeit. Die Aussagekraft der Kurven ist jedoch mit der von Fließkurven (Schubspannung über Scherrate) vergleichbar, sofern Artefakte wie z.B. eine Gleichschichtbildung vermieden werden. Daher wird im Folgenden vereinfachend die Bezeichnung „Fließkurve“ verwendet.

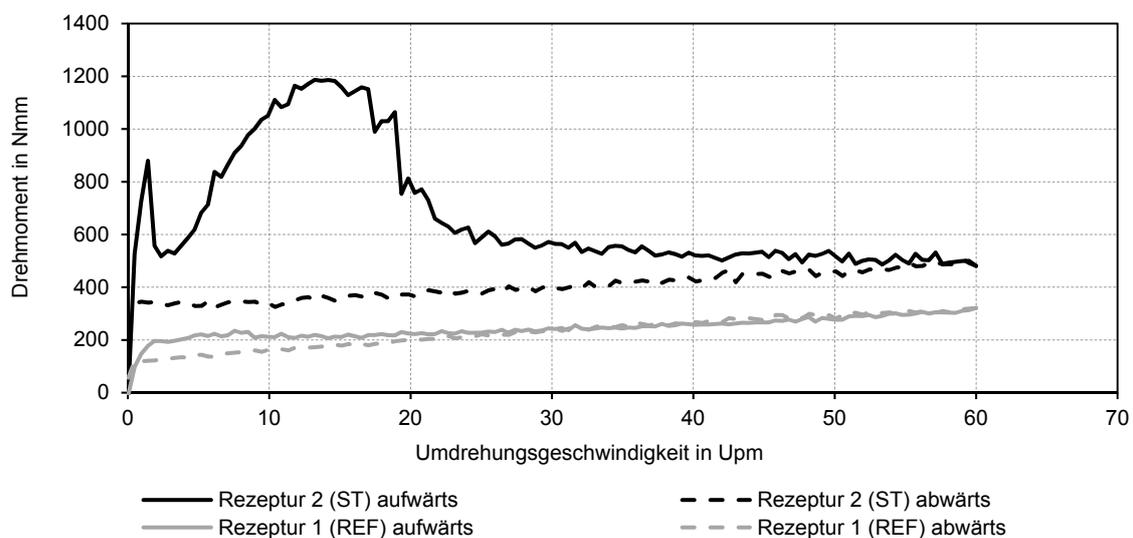


Bild 10: Vergleich der Fließkurven der verwendeten Mörtelrezepturen – Drehmoment in Abhängigkeit von der Umdrehungsgeschwindigkeit (Messprofil siehe 4.1.1)

In Bild 10 sind die resultierenden Fließkurven der beiden Mörtelrezepturen gegenübergestellt. Beim Vergleich der Aufwärtskurven ist erwartungsgemäß ein deutlicher Anstieg der Fließgrenze bei Zugabe von ST festzustellen. Der Stabilisierer bewirkt einen schnelleren Strukturaufbau während der Ruhephase nach dem Mischprozess, welche erst bei höherer Scherbelastung (hohen Umdrehungsgeschwindigkeiten) abgebaut wird. Bei Umdrehungsgeschwindigkeiten > 20 Upm ist eine kontinuierliche Abnahme des Drehmoments festzustellen, was auf die scherverdünnende Wirkung des ST hinweist. Jedoch liegt der Scherwiderstand zu jedem Zeitpunkt auf einem höheren Niveau als bei der Referenz-

rezeptur. Bei der Referenzrezeptur ist hingegen erwartungsgemäß ein Anstieg des Drehmoments proportional zur Umdrehungsgeschwindigkeit zu verzeichnen. Die Steigungen der Abwärtskurven verlaufen bei beiden Mörtelrezepturen ähnlich flach – ein Hinweis auf eine vergleichbare (niedrige) Viskosität der Mörtel bei hoher Scherenergie trotz des Zusatzes von ST.

Bei Betrachtung der Hystereseflächen zwischen den Aufwärts- und den Abwärtsästen wird die ausgeprägte Thixotropierwirkung des verwendeten ST deutlich. Die Ergebnisse zeigen, dass durch den Einsatz von ST in Kombination mit anderen Zusatzmitteln die geforderten rheologischen Eigenschaften (hohe Fließgrenze bei gleichzeitig niedriger Viskosität) realisierbar sind. Zudem verdeutlichen die Ergebnisse das Potenzial der Betonrheometrie als leistungsfähiges Werkzeug für die Charakterisierung des rheologischen Verhaltens von Spritzmörteln und Spritzbetonen.

4.2 Steuerung des Erstarrungsverhaltens

Die Festigkeitsentwicklung sowie das Erstarrungsverhalten des Mörtels bzw. Betons geben das optimale Zeitfenster für den Materialauftrag vor, siehe Prinzip in Bild 9. Zur Definition eines solchen Zeitfensters wurden die Auswirkungen der Menge und des Zeitpunkts des Zusatzes von Erstarrungsbeschleunigern (BE) auf das Erstarrungsverhalten des Mörtels untersucht.

Den Untersuchungen zur Beschleunigerdosierung liegt die Referenzrezeptur aus Tabelle 1 zugrunde. In der ersten Phase wurde jedoch auf das Kalksteinmehl verzichtet. Als BE wurde das Produkt Montan 02 (MCM-02, MC Bauchemie) verwendet. Das Additiv wurde in den letzten 15 Sekunden während des Mischprozesses nach EN 196-1 hinzugegeben, siehe auch Tabelle 2. Bild 11 verdeutlicht, dass das Untermischen des BE sehr homogen erfolgte (BE-Verteilung durch Zusatz von Farbpigmenten visualisiert). Die Messung des Erstarrungsbeginns erfolgte in Anlehnung an EN 934-5. Dabei erfolgte das Einbringen des Mörtels in die Form bei hohen Dosierungsmengen zu zweit. Die Einbauzeit betrug weniger als eine Minute.



Bild 11: Kennzeichnung der BE-Verteilung durch Zugabe von Farbpigmenten

Der Einfluss der BE-Dosierungsmenge auf den Erstarrungsbeginn ist in Bild 12 dargestellt. Der Erstarrungsbeginn der Referenzmischung liegt bei 206 Minuten. Wie zu erwarten, ist eine deutliche Reduzierung des Erstarrungsbeginns bei einer Steigerung der Dosierungsmenge bis 4 M.-% bezogen auf den Zementanteil zu verzeichnen.

Für den Prozess der additiven Fertigung ist daneben auch der Zeitpunkt der BE-Zugabe von Bedeutung, da der Beton u.U. nicht sofort nach dem Mischen verarbeitet werden kann. Um den Einfluss möglicher Betriebsunterbrechungen zu untersuchen, wurde der BE zusätzlich nach einer Standzeit von 30, 60 oder 90 Minuten über jeweils 15 Sekunden untergemischt.

Bei geringen BE-Dosierungsmengen ist eine Verkürzung des Erstarrungsbeginns erkennbar, siehe Bild 13. Bei höheren BE-Dosierungsmengen hat der Zugabezeitpunkt einen deutlich geringeren Einfluss auf den Erstarrungsbeginn. Die Ergebnisse zeigen jedoch, dass die BE-Dosierungsmenge bei der robotergestützten Steuerung des Erstarrungsverhaltens immer im Zusammenhang mit dem Zeitpunkt der BE-Zugabe festzulegen ist.

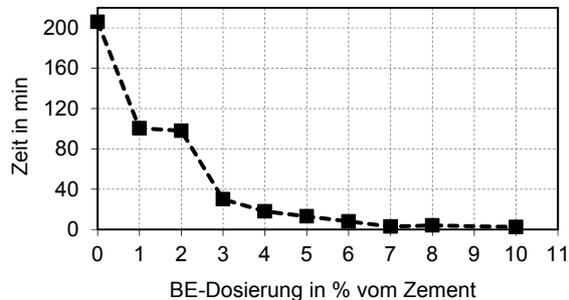


Bild 12: Einfluss der BE-Dosierung auf den Erstarrungsbeginn

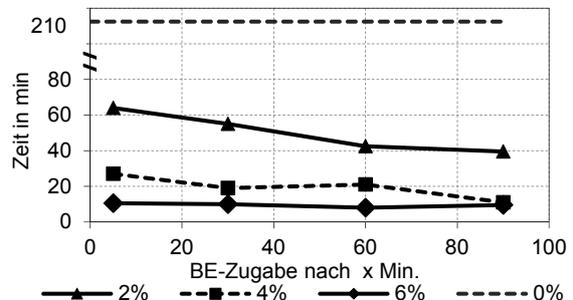


Bild 13: Einfluss des Zeitpunkts der BE-Zugabe auf den Erstarrungsbeginn

5. Zusammenfassung und Ausblick

In einem interdisziplinären Forschungsprojekt unter Beteiligung der TU Braunschweig, der TU Clausthal und der LU Hannover wird derzeit ein robotergestütztes additives Fertigungsverfahren zur schalungslosen Herstellung komplexer Betonbauteile im Spritzverfahren entwickelt. Das Spritzverfahren bietet im Vergleich zum weit verbreiteten Extrusionsverfahren den Vorteil eines homogeneren Materialgefüges – auch bei schichtweisem Auftrag. Dies konnte in ersten Untersuchungen am Braunschweiger DBFL mit einem am Markt erhältlichen Instandsetzungsmörtel (SPCC) deutlich gezeigt werden. Erfolgt der Materialauftrag beim Spritzverfahren kontinuierlich, kann die Verbundproblematik zwischen den einzelnen Schichten nahezu ausgeschlossen werden. Die Spritztechnik ermöglicht darüber hinaus grundsätzlich auch einen freien, räumlichen Bauteilaufbau, da das Verfahren nicht auf den vertikalen Materialauftrag beschränkt ist. Aktuell sind mehrere Lösungsansätze zur Realisierung des Freiformbaus in der Entwicklung (mobile Gegenschalung, kooperatives Arbeiten von Robotern, etc.).

In dem Beitrag wurde herausgestellt, dass additive Fertigungsverfahren besonders hohe und teils gegensätzliche Anforderungen an die Materialeigenschaften stellen. Unterschiedliche, teilweise widersprüchliche Anforderungen an die rheologischen Eigenschaften ergeben sich aus den Teilprozessen bei der additiven Fertigung, während Anforderungen an das Erstarrungs- und Erhärtungsverhalten aus der Geschwindigkeit des additiven Bauteilaufbaus und weiteren geometrischen Faktoren resultieren. Es wurden Ergebnisse von Laboruntersuchungen präsentiert, die einen Ansatz zur Lösung der materialtechnologischen Herausforderungen erkennen lassen. Im nächsten Schritt ist u.a. eine Übertragung der Laborergebnisse in den technischen Maßstab am DBFL vorgesehen.

6. Literatur

- [1] Buswell, R. A.; Soar, R. C.; Gibb, A. G. F.; Thorpe, A.: Freeform Construction: Mega-scale rapid manufacturing for construction. Automation in Construction 16 (2007), 224-231.
- [2] Hanskat, C. S.: Shotcrete Placed in Multiple Layers does NOT Create Cold Joint. Concrete International 36 (2014) 12, 46-47.

- [3] Herrmann, E.; Lindemann, H.; Kloft, H.:
Entwicklung einer robotergestützten Spritzbetontechnologie zur schalungslosen generativen Fertigung komplexer Betonbauteile am DBFL (Digital Building Fabrication Laboratory). In: Kusterle, W. (Hrsg.): Spritzbeton-Tagung 2018. Tagungsband der 12. Fachtagung in Alpbach, 11.-12.1.2018, Eigenverlag, 2018.
- [4] Höfler, J.; Schlumpf, J.; Jahn, M.:
Sika Spritzbeton Handbuch. 4. Ausgabe 2012.
- [5] Khoshnevis, B.:
Automated construction by contour crafting – related robotics and information technologies. *Automation in Construction* 13 (2004), 5-19.
- [6] Le, T. T.; Austin, S. A.; Lim, S.; Buswell, R. A.; Gibb, A. G. F.; Thorpe, T.:
Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and Structures* 45 (2012), 1221-1232.
- [7] Le, T. T.; Austin, S. A.; Lim, S.; Buswell, R. A.; Law, R.; Gibb, A. G. F.; Thorpe, T.:
Hardened properties of high-performance printing concrete. *Cement and Concrete Research* 42 (2012), 558-566.
- [8] Lowke, D.; Weger, D.; Henke, K.; Talke, D.; Winter, S.; Gehlen, C.:
Drucken von Betonbauteilen durch selektives Binden mit calciumsilikatbasierten Zementen – Erste Ergebnisse zu betontechnologischen und verfahrenstechnischen Einflüssen. In: IBAUSIL Tagungsbericht, Weimar, 2015.
- [9] Davison, N.:
3D-printed cities: Is this the future?. *The Guardian* 26.02.2015.
- [10] Neudecker S.; Bruns C.; Gerbers, R.; Heyn, J.; Dietrich, F.; Dröder, K.; Raatz, A.; Kloft, H.:
A new robotic spray technology for generative manufacturing of complex concrete structures without formwork. *Procedia CIRP* 43 (2016), 333-338.
- [11] Nolte, N.; Krauss, H.-W.; Budelmann, H.:
Preliminary results on the rheological behavior of mortars for the robotic-aided fabrication of 3D concrete components by shotcreting, scientific short reports of the iBMB. Online Dokument. <http://www.ibmb.tu-braunschweig.de/docpool/>, 2017, eingesehen am 11.08.2017.
- [12] Pegna, J.:
Exploratory investigation of solid freeform construction. *Automation in Construction* 5 (1997), 427-437.
- [13] Perrot, A.; Rangeard, D.; Pierre, A.:
Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. *Materials and Structures* 49 (2016), 1213-1220.
- [14] Datenblatt Viskomat XL. Schleibinger Geräte Teubert u. Greim GmbH. Online Dokument. http://www.schleibinger.com/cmsimple/?Rheologie:Viskomat_XL_-_Rheometer_fuer_Frischbeton, eingesehen am 07.09.2017.
- [15] Rudenko 3D Printer:
Online Dokument. <http://totalkustom.com>, eingesehen am 11.08.2017.

Zu den Autoren

M. Sc. Niklas Nolte

Studium des Wirtschaftsingenieurwesens (Bauingenieur) an der TU Braunschweig. Seit 2016 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig.

n.nolte@ibmb.tu-bs.de

Dr. Maren Heidmann-Ruhz

Studium der Mineralogie an der Universität Hamburg. Promotion am Institut Baustoff, Bauphysik und Bauchemie der TU Hamburg-Harburg. Seit 2012 am Institut für Nichtmetallische Werkstoffe der TU Clausthal tätig.

maren.heidmann@tu-clausthal.de

Dr. Hans-Werner Krauss

Studium des Bauingenieurwesens an der TU Braunschweig. Promotion zum Dr.-Ing. im Jahr 2013. Seit 2012 Oberingenieur am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig.
h.krauss@ibmb.tu-bs.de

Dr. Patrick Varady

Studium des Maschinenbaus an der LU Hannover, Promotion an der PMU Salzburg und seit 2016 technisch-wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig.
p.varady@ibmb.tu-bs.de

Prof. Dr.-Ing. Harald Budelmann

Seit 1998 Professor für Baustoffe und Stahlbetonbau an der TU Braunschweig, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz. Forschungsgebiete: Bautechnik, Betontechnologie, junger Beton, Mauerwerk, Schädigungsprozesse, Monitoring, Messtechnik, uvm.
h.budermann@ibmb.tu-bs.de

Prof. Dr.-Ing. Albrecht Wolter

Professor für Bindemittel und Baustoffe an der TU Clausthal. Seine Forschung umfasst die vollständige Prozesskette der Kalk- und Zementproduktion. Zudem ist er Obmann des DIN NA Bau AA „Zement“ sowie als Mitglied in verschiedenen industriellen und wissenschaftlichen Beiräten tätig.
a.wolter@tu-clausthal.de