

i.tech® 3D

Sonderdruck aus beton,
Ausgabe 7+8/2021

HEIDELBERGCEMENT

DAS ERSTE 3D-GEDRUCKTE HAUS IN DEUTSCHLAND

Bauen neu gedacht – 3D-Betondruck in der Baupraxis

Daniel Weger, Christoph Gehlen, München; Waldemar Korte, Beckum; Fabian Meyer-Brötz, Weißenhorn; Jennifer Scheydt, Leimen; Thorsten Stengel, München



Der Spezialmörtel wird schalungslos Schicht für Schicht übereinander aufgetragen.
Foto: HeidelbergCement AG/
Michael Rasche

ECHT. STARK. GRÜN.

Das erste 3D-gedruckte Haus in Deutschland

Bauen neu gedacht – 3D-Betondruck in der Baupraxis

Daniel Weger, Christoph Gehlen, München, Waldemar Korte, Beckum, Fabian Meyer-Brötz, Weißenhorn,
Jennifer Scheydt, Leimen, Thorsten Stengel, München*)

Der 3D-Druck mittels additiver Fertigungsverfahren hat sich in industriellen Bereichen, wie z.B. dem Maschinenbau oder der Medizintechnik, bereits seit Jahren bewährt. Auch im Betonbau können additive Fertigungsverfahren eine echte Alternative zu konventionellen Bauweisen sein. Additive Fertigungsverfahren können komplett auf die Verwendung einer Schalung verzichten und komplexe Formen, entkoppelt von der Stückzahl, herstellen. Pilotprojekte haben gezeigt, dass durch eine geeignete Konstruktion eine große Materialeinsparung an Beton von bis zu 70 % bei vergleichbarer Traglast bzw. 80 % Mindestbewehrung möglich ist. Das führt vor allem bei komplexen Bauteilen zu einer positiven Ökobilanz verglichen mit konventionell gefertigten Bauteilen. Mit dem Bau des ersten 3D-gedruckten Hauses in Deutschland in Beckum wurde diese neue Fertigungstechnologie im Bauwesen erfolgreich erprobt und damit der Grundstein für die erfolgreiche Einführung des 3D-Druckverfahrens in die Praxis gelegt.

1 Einleitung

Aktuell werden die Themen Ressourcenschonung und formoptimiertes Bauen vor allem im Hinblick auf die Ressourcenknappeit geeigneter Gesteinskörnung [1–3] bzw. Zusatzstoffe [4] zur Betonherstellung sowie des Energiebedarfs und CO₂-Ausstoßes der Zement- und Stahlherstellung immer wichtiger [5–7]. Bauteile, die unter dem Aspekt der Materialeinsparung konstruiert werden, weisen oft eine komplexere Formgebung auf, die nur noch mit großem Aufwand oder gar nicht mehr durch konventionelle Bauweisen, wie das Füllen einer Schalung, hergestellt werden können. Additive Fertigungsverfahren können dagegen komplett auf die Verwendung einer Schalung verzichten und komplexe Formen, entkoppelt von der Stückzahl, herstellen [8–10]. Des Weiteren haben bereits einige Pilotprojekte gezeigt, dass durch eine geeignete Konstruktion eine große Materialeinsparung an Beton von bis zu 70 % bei vergleichbarer Traglast [11–14] bzw. 80 % Mindestbewehrung [15] möglich ist. Mit dem Verzicht auf Schalung wird weiteres Material eingespart und nach Verwendung Abfall vermieden. Diese

Punkte führen vor allem bei komplexen Bauteilen zu einer positiven Ökobilanz verglichen mit konventionell gefertigten Bauteilen [9].

Des Weiteren stellt der Fachkräftemangel im Baugewerbe ein sich verstärkendes Problem dar [16]. Dabei könnte das Schaffen neuer Berufsbilder im Rahmen der Anwendung Additiver Fertigungsverfahren auf der Baustelle neue Perspektiven schaffen und das Baugewerbe für Nachwuchskräfte wieder attraktiver machen.

Nach nur wenigen Jahren weltweiter intensiver Forschung ergänzt der 3D-Druck die Herstellungstechnologie von Gebäuden. Neben den partikelbettbasierten Verfahren (Selective Cement Activation – SCA [17–20] und der Selective Paste Intrusion – SPI [21–

25]), mit Vorteilen in Oberflächenauflösung und Komplexität sowie den spritzenden Verfahren (Shotcrete 3D Printing) [26], stehen vor allem die ablegenden Verfahren (Extrusion) im weltweiten Fokus [6, 27–30]. Die ablegenden Verfahren ermöglichen es, große Betonbauteile in relativ kurzer Zeit herzustellen. Außerdem ist man in der Regel nicht durch einen Bauraum begrenzt.

Mit dem Bau des ersten 3D-gedruckten Hauses in Deutschland in Beckum wurde nun diese neue Fertigungstechnologie im Bauwesen erfolgreich erprobt und damit der Grundstein für die erfolgreiche Einführung des 3D-Druckverfahrens in die Praxis gelegt.

2 Betonextrusion – Technologie

Die 3D-gedruckten Wände in Beckum wurden mit Hilfe des ablegenden additiven Fertigungsverfahrens „Extrusion“ hergestellt. Bei diesem Verfahren wird frischer Zementmörtel oder Beton mit einer Pumpe durch einen Schlauch einem Manipulator zugeführt und durch eine Düse extrudiert. Die frischen Betonstränge werden Schicht für Schicht aufgetragen und übereinander gelegt. Ein großer Vorteil der Betonextrusion ist u.a., dass Bauteile ohne Schalung hergestellt werden können (Bild 1).



Bild 1: Druckprozess mit dem BOD2

Foto: Peri

*) Die Autorenbiografien sind am Ende des Beitrags zu finden.

Für das in diesem Beitrag beschriebene Projekt setzte Peri den BOD2 Betondrucker ein. Diese Drucktechnologie stammt vom dänischen Hersteller COBOD, an dem Peri bereits seit 2018 beteiligt ist. Jeder BOD2 besteht aus einem Portalsystem mit mehreren Modulen. Die Anzahl der Module wird so gewählt, dass sie zu dem jeweiligen Bauprojekt passt. Das Portalsystem ist sowohl für Ortbeton-Projekte als auch für die Herstellung von Elementen außerhalb der Baustelle optimal. Zudem wird durch das Portalsystem häufiges Versetzen und wiederkehrendes Kalibrieren des Druckers vermieden. Zur Beschickung des Druckers mit Material wurde ein Silo und eine Mörtelmischpumpe der Firma mtec genutzt.

3 Anforderungen an das Material – Entwicklung eines 3D-Druckmörtels

Die Entwicklung innovativer, moderner Materialien sollte immer gekoppelt sein an den Anspruch, den zugehörigen CO₂-Footprint zu minimieren. Vor dem Hintergrund der zunehmenden Ressourcenknappheit sollten zudem weitere Aspekte betrachtet werden, insbesondere die Kreislauffähigkeit eines Materials und die Materialeffizienz. Letzteres bedeutet, dass das Material dazu befähigen sollte, schlank zu bauen. Dies bei einer möglichst langen Nutzungsdauer der daraus hergestellten Bauteile.

Eine Herausforderung speziell bei der Entwicklung von Druckmörteln ist es, dass die einzelnen abgelegten Mörtel- bzw. Betonstränge nicht zu schnell erhitzen, um den Verbund der einzelnen Schichten zu gewährleisten.

Bei zu langsamer Druckgeschwindigkeit oder zu langen Druckpausen (z.B. durch einen Druckerausfall, verzögerte Materialzufuhr oder geplante Druckpausen über Nacht) können „kalte Fugen“, so genannte „Cold Joints“, entstehen. Der Cold Joint bezeichnet die Übergangszone zwischen zwei Strängen, die nicht unmittelbar nacheinander (frisch in frisch) produziert wurden. Die fortgeschrittene Hydratation und der geringere Feuchtigkeitsgehalt der Kontaktfläche des älteren Strangs im Vergleich zum Frischbeton des neuen Druckabschnitts kann zu einem schlechteren Schichtverbund führen [31–34]. Gleichzeitig müssen die Schichten eine ausreichende Grünstandfestigkeit aufweisen, um die nachfolgenden Schichten mit möglichst geringer Verformung zu tragen [35–38].

Auch bei der Entwicklung des speziellen Druckmörtels „i.tech 3D“ wurden diese Maßstäbe berücksichtigt.

So zeichnet sich der Premix „i.tech 3D“, entwickelt von HeidelbergCement, zunächst dadurch aus, dass er im vorgelagerten Misch- und Transportprozess problemlos verarbeitet werden kann. Das heißt, das Material ist sowohl gut verflüssigbar als auch gut pumpbar. Nach dem Austreten aus der Druckdüse ist der Mörtel hinreichend formstabil. Die Festigkeitsentwicklung ist so angepasst, dass sich die Schichten einerseits verbinden können und der Mörtel andererseits problemlos

in der Lage ist, die Lasten aus den weiteren aufgetragenen Druckbahnen ohne signifikante Verformung zu tragen. Im Beckum-Projekt erfolgte zum Beispiel bereits nach ca. 7 bis 12 Minuten jeweils der Auftrag der folgenden Druckschichten.

Das Ausbalancieren dieser Eigenschaften erfordert ein ausgeprägtes betontechnologisches Know-how und ein umfassendes, langjähriges Versuchsprogramm (Bild 2).

Zum einen sind Gesteinskörnung, Zement und Zusatzstoffe im Hinblick auf die zu erzielenden Eigenschaften des Trockenmörtels auszuwählen. Zum anderen ist die Korngrößenverteilung der Ausgangsmaterialien exakt aufeinander abzustimmen. Der Einsatz hochleistungsfähiger Zusatzmittel steuert die gewünschte Materialperformance zusätzlich aus. Das im Premix eingesetzte Bindemittel wurde mit Blick auf die Nachhaltigkeit so konzipiert, dass es einen um ca. 70 % geringeren CO₂-Footprint aufweist als Portlandzement.

Die Kreislauffähigkeit des Druckmaterials – also dessen Rezyklierbarkeit und die Möglichkeit des Wiedereinbringens in den Materialkreislauf nach Erreichen des Lebensendes – werden bei „i.tech 3D“ dadurch sichergestellt, dass es aus rein mineralischen Komponenten besteht.

Die hohen Festigkeiten des Materials ($R_{c,28} \approx 60$ MPa entsprechend DIN EN 196-1:2016 [39]) sowie die sehr guten Dauerhaftigkeitseigenschaften (Abwitterung < 250 g/m² nach 56 Frost-Tau-Wechseln im CIF-Test, keine innere Schädigung erkennbar [40, 41]) ermöglichen die Herstellung schlanker und gleichzeitig langlebiger Druckbauteile.

4 Entwurf des ersten 3D-gedruckten Gebäudes in Deutschland – Architektonische Vision

4.1 Erste Überlegungen

Die Idee, das erste gedruckte Wohngebäude Deutschlands in Beckum zu realisieren, stammt von einem Trockenbauunternehmer aus Beckum. Von der Idee angesteckt, war nun vor allem die Aufgabe zu



Bild 2: Untersuchung der Stabilität des Druckmörtels im Labor Foto: HeidelbergCement Group

meistern, die im kleineren Maßstab bereits entwickelte Technologie in die Praxis zu übertragen, sodass ein reelles Gebäude entsteht, das alle baurechtlichen Anforderungen des Landes Nordrhein-Westfalen erfüllt. Da es im europäischen Umland bereits kleine gedruckte Gebäudestrukturen (Pavillons) zum Zeitpunkt des Projektstarts in Beckum gab, musste die Herausforderung gesteigert werden. Das heißt, es musste ein Gebäude sein, das eine Größe und Komplexität aufweist, die einem hochwertigen Einfamilien-Wohnhaus mit zwei Geschossen gleichkommt. Das Gebäude sollte den tatsächlichen Immobilienmarkt widerspiegeln, den es mittelfristig bedienen können muss. Beginnend mit einer recht einfachen Gebäudestruktur in den ersten Entwurfsgedanken kristallisierte sich schnell heraus, dass es für die kurzfristige Etablierung der Betondrucktechnologie von essentieller Bedeutung sein würde, ein Gebäude zu entwerfen, das sämtliche konstruktiven, gestalterischen und prozesstechnischen Herausforderung der heutigen Baubranche annimmt und lösen kann bzw. optimiert (Bild 3).

4.2 Entwurfsprozess

Der anfängliche Entwurfsprozess bei gedruckten Gebäudestrukturen gleicht weitestgehend demjenigen herkömmlicher Bau-



Bild 3: Animation des ersten in Deutschland mittels 3D-Betondruck realisierten Gebäudes

Grafik: Mense-Korte

weisen. Der Planer und der Kunde definieren gemeinsam das Anforderungsprofil an die Gebäudenutzung, die Gebäudegröße und die Architektursprache. In Bezug auf die Gebäudearchitektur kann der Betondruck bereits zum ersten Mal seine Stärke ausspielen. Die Planenden sind bei der Verwirklichung der eigenen Ideen nicht mehr durch kosteneffiziente, rechtwinklige Grundriss-Geometrien limitiert, sondern können ihren Designvorstellungen freien Lauf lassen. Im 3D-Betondruck sind freie Grundrissformen im Vergleich zu stringenten Formen kosten- und bauzeitneutral realisierbar. So war es möglich, das Gebäude in Beckum im Grundriss völlig frei zu gestalten, um das Potenzial der Drucktechnologie aufzuzeigen. Lediglich bei den Innenwänden wurde ein hoher Grad an Rechtwinkligkeit angestrebt, um die Inneneinrichtung der Räume mit Standardmöbeln zu ermöglichen. Der Entwurfsprozess findet beim 3D-Druck früh am digitalen Gebäudemodell statt, sodass Auswirkungen von Planungsänderungen direkt sichtbar werden und allen Projektbeteiligten Planungssicherheit geben.

4.3 Besonderheiten beim Entwurf von 3D-gedruckten Häusern

Das dreidimensionale BIM-basierte Gebäudemodell ist ein essentieller Bestandteil der Projektabwicklung von Gebäuden im Betondruckverfahren. Am 3D-Modell zu planen, bedeutet zum einen eine große Planungstiefe zu einem frühen Zeitpunkt zu generieren, setzt zum anderen aber voraus, dass das Projektteam aus Gebäudeplanern, Statikern und TGA-Planern wesentlich früher zusammenarbeiten muss, als es bei herkömmlichen Bauprojekten der Fall ist. Bei der additiven Fertigung von Gebäuden können bereits Wandaussparungen und Schlitze für Medienleitungen im 3D-Gebäudemodell vorgesehen und vor Ort durch die Maschine präzise hergestellt werden. So konnten bei dem Projekt in Beckum sämtliche Elektro-Leerdosen und Elektroschlitze sowie Steigstränge für die Abwasserleitungen durch den Drucker ausgespart und direkt druckbegleitend händisch mit Leerdosen oder Abwasserleitungen bestückt werden (Bild 4).

Eine nachträgliche Rohinstallation durch die TGA-Gewerke erübrigte sich dadurch größtenteils. Die Funktionsfähigkeit einer lückenlosen digitalen Prozesskette hat sich als wichtiger Baustein in der Planung und örtlichen Realisierung von gedruckten Gebäuden herausgestellt.

4.4 Konstruktionskonzept

Das Wohngebäude in Beckum wurde als Massivbau mit mehrschaligen Wandaufbauten konzipiert. Durch das Zusammenspiel der unterschiedlichen Wandschalen mit Einzelbreiten von 60 mm war es möglich, Hohlräume zu generieren, die zum einen die Wärmedämmung als Schüttdämmung und zum anderen örtliche unbewehrte Betonverfüllungen für statisch hoch belastete Gebäudeteile aufnehmen konnten. Das Ausschalen von Ortbetonwänden war nicht notwendig, da die Schalung direkt als verlorene Betonschalung mitgedruckt werden konnte. Sämtliche vertikalen Wandbauteile wurden ohne Bewehrung ausgeführt. Die horizontalen Bauteile wie Decken und die Bodenplatte wurden herkömmlich bewehrt, teilweise als teilvorgefertigte Betonelemente vor Ort auf den gedruckten Wandscheiben verlegt und nachträglich mit Transportbeton aufbetoniert (Bild 5). Die Fassade besteht aus einem 60 mm breiten Strang aus Druckmörtel und ist mit Edelstahlankern mit der tragenden gedruckten Außenwandstruktur verbunden.

5 Konzept zur Erwirkung der ZiE/vBG

Bei der Erstellung eines 3D-gedruckten Gebäudes muss beachtet werden, dass sich das Design, die Drucktechnologie und das Material gegenseitig beeinflussen. Somit muss für jedes Gebäude ein individuelles Herstellungskonzept erstellt werden. Dieses Herstellungskonzept beinhaltet u.a. einen auf den Druckprozess abgestimmten architektonischen Entwurf, verfahrenstechnische Details, wie die Düsengeometrie und Layerzeit (Zeit bis die Düse wieder an ihrem Anfangspunkt angekommen ist), oder die Umgebungsbedingungen (Temperatur, Wind, direkte Beregnung etc.), die sich auf die Materialzusammensetzung oder die bauseitige Ausstattung auswirken können [42–45].

Vor allem bei der Beurteilung der Materialeigenschaften muss beachtet werden, dass es sich um eine geschichtete Bauweise handelt, die ein mehr oder weniger ausgeprägtes anisotropes und heterogenes Verhalten zeigen kann [42, 46]. Dies erfordert die Ermittlung der Materialeigenschaften (Festigkeit und Dauerhaftigkeit) in allen drei Raumrichtungen (O-I bis O-III) (Bild 6).

Zu beachten ist hier auch ein möglicherweise auftretender Skaleneffekt, der beispielsweise in [40] beim Vergleich der Biegezugfestigkeit von herausgesägten kleinformatigen Prismen und der Prüfung ganzer Wandelemente festgestellt wurde.

Bisher gibt es noch keine einheitlichen Prüfprinzipien oder Standards für 3D-gedruckte Bauteile. Jedoch können, sobald das Herstellungskonzept bekannt ist, Analogien zu vorhandenem, technisch verwandten Regelwerk genutzt oder angepasst werden, um ein (Nachweis-) Konzept für eine Genehmigung eines Projekts zu entwickeln.

Die Zulassung für dieses Projekt wurde für den 3D-Druckmörtel in Kombination mit den 3D-gedruckten Wandtypen und dem verwendeten 3D-Drucker erteilt. Die Zulassung erfolgte auf Basis bestehender Normen (DIN EC2 und EC6) für den Beton- und Mauerwerksbau.

Daher wurde zum einen das Verhalten des Materials im frischen (Ausbreitmaß, Erstarrungsbeginn und -ende) und im ausgehärteten Zustand (Druck- und Biegefestigkeit, E-Modul, Haftung zwischen den Schichten nach verschiedenen Umwelteinflüssen, Frost-Tau-Widerstand, Pull-Out sowie Push-Out-Widerstand von Mauerankern) geprüft. Alle Eigenschaften wurden an geschalteten Referenzprobekörpern sowie an 3D-gedruckten Probekörpern in zwei oder drei Raumrichtungen durchgeführt. Zum anderen wurden großformatige Wandelemente untersucht. Dabei wurden sowohl Anprallversuche, als auch eine Bestimmung der Biegezugfestigkeit an tragenden und nicht tragenden Wandelementen durchgeführt. Des Weiteren wurde die Beständigkeit der 3D-gedruckten verlorenen Schalung gegen den bei der Betonage auftretenden Frischbetondruck untersucht.

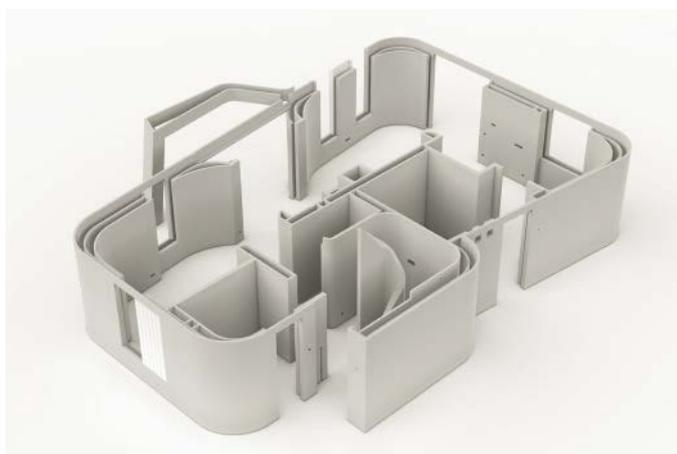


Bild 4: BIM-Modell des in Beckum gedruckten Hauses Grafik: Mense-Korte



Bild 5: Bauprozess mit eingehängter Decke

Foto: Mense-Korte

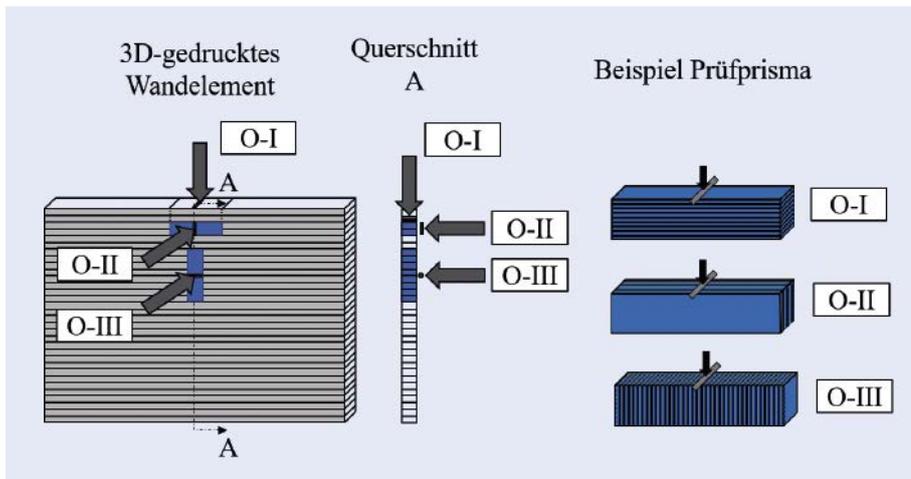


Bild 6: Richtungsabhängige Prüfung von Bauteileigenschaften, in Anlehnung an [40]
 Grafik: Ingenieurbüro Schiessl Gehlen Sodeikat

notwendig, ein Monitoring des angelieferten Materials, der Ausführung der konstruktiven Details während des Druckprozesses sowie eine Langzeitüberwachung durchzuführen (Bild 7).

Auf Basis des Konzepts und der Ergebnisse der Prüfungen wurde eine Zustimmung im Einzelfall bzw. vorhabenbezogene Bauartgenehmigung (ZiE/vBG) für das Vorhaben erteilt.

6 Ausführung der Druckerarbeiten

Nach dem erfolgreichen Erwirken der ZiE/vBG, wurde der Betondrucker von Peri auf die Baustelle nach Beckum transportiert. Das Portalsystem wurde in ca. 1,5 Tagen auf Betonblöcken mit einem Baustellenkran montiert (Bild 8).

Der fertig gelieferte Trockenmörtel wurde pneumatisch von BigBags in ein Silo gefördert. Vom Silo ausgehend wurde der Druckmörtel unter Einsatz der nachgeschalteten Mischtechnik verflüssigt und über einen Schlauch bis zur Druckdüse gefördert. Im ersten Schritt wurde die Randabschaltung der Bodenplatte mittels des 3D-Druckers hergestellt.

Um die notwendigen Layerzeiten einzuhalten, wurde das Gebäude in einzelnen Sektionen gedruckt. Hierbei ist der Druckprozess durch leichte Variation des Wassergehalts, der Druckgeschwindigkeit und der extrudierten Materialmenge an unterschiedliche Wetter- und Temperaturbedingungen anpassbar.

Somit konnte eine gleichmäßig geformten Fassadenoberfläche erreicht werden, die unverputzt bleibt. Die artikulierte und sichtbare Lagenstruktur unterstreicht den 3D-gedruckten Charakter des Gebäudes. Die Lagen können aber auch maschinell geglättet werden, um eine andere Optik der Oberfläche zu erreichen.

Die Wandaufbauten sowie die Integration von Öffnungen und Elektroinstallationen konnten wie geplant realisiert werden. In Bild 9 sind diese Details sowie der gedruckte Kamin veranschaulicht.

Lediglich sehr kurze Druckpfade konnten nicht mit der erwarteten Genauigkeit erstellt werden, sodass zukünftig Druckpfade von mindestens 30 cm Länge geplant werden.

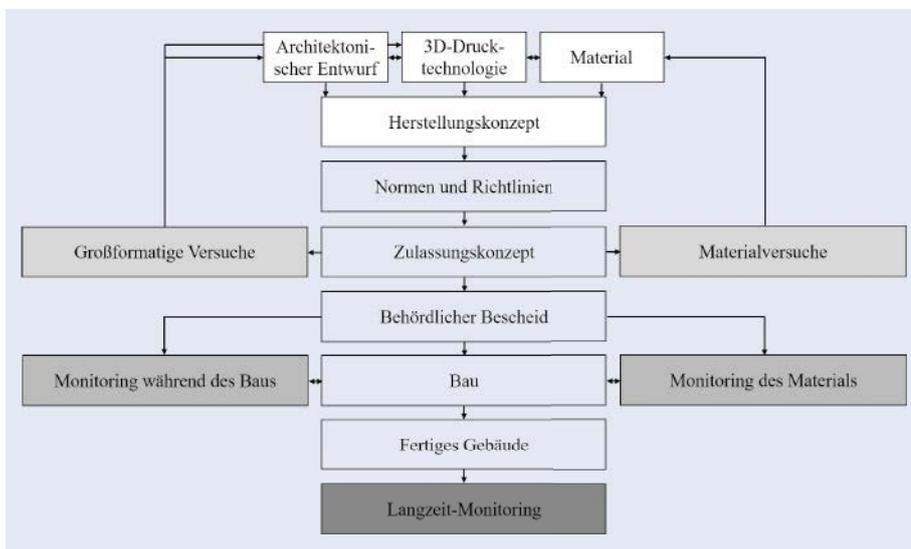


Bild 7: Zulassungskonzept für das erste 3D-gedruckte Wohnhaus in Deutschland, in Anlehnung an [40]
 Grafik: Ingenieurbüro Schiessl Gehlen Sodeikat

Aus den Ergebnissen der Materialversuche und der großmaßstäblichen Untersuchungen wurden charakteristische Werte sowie Bemessungswerte für die statischen

Nachweise und Dauerhaftigkeitsprognosen ermittelt.

Aufgrund der noch nicht geregelten Fertigungstechnologie wurde es darüber hinaus



Bild 8: Aufbau des COBOD BOD2 3D-Betondruckers

Foto: Peri



Bild 9: Erdgeschoss mit Kamin des 3D-gedruckten Hauses in Beckum

Foto: Peri



Bild 10: Außenansicht des ersten 3D-gedruckten Gebäudes in Beckum kurz vor Fertigstellung

Foto: Peri

Da Anpassungen am 3D-Modell leicht möglich sind und direkt in den Drucker geladen werden können, konnten die Erfahrungen aus dem Druckprozesses des Erdgeschosses im Obergeschoss des Gebäudes direkt einfließen. Dieses wurde in nur ca. acht Drucktagen fertiggestellt.

In diesem ersten 3D-gedruckten Gebäude Deutschlands konnte auch die Kombination von 3D-gedruckten Fertigteilen und in-situ Druck erfolgreich umgesetzt werden. Um längere Standzeiten des 3D-Druckers während der Arbeiten anderer Gewerke zu vermeiden, wurden die Attika-Elemente im Fertigteilerwerk der Firma Röser, einem Kunden von Peri und HeidelbergCement, mit einem BOD2 gedruckt und auf die Baustelle transportiert. Dort wurden die Elemente aufgesetzt und verbunden. Optisch ist der Übergang zwischen in-situ und vorgefertigtem Druck nicht zu erkennen, wie Bild 10 zeigt.

Schlussbetrachtung und Zusammenfassung

Der Bau des ersten 3D-gedruckten Wohnhauses in Deutschland in Beckum zeigt, dass die Additiven Fertigungsverfahren eine echte Alternative zu konventionellen Bauweisen darstellen. Neben den ökologischen und fertigungstechnischen Vorteilen kann eine neue Designsprache in den architektonischen Entwürfen angewendet sowie multifunktionale Bauteile realisiert werden.

Jedoch gibt es noch keine einheitlichen Prüfprinzipien oder Standards für 3D-gedruckte Bauteile. Dies ist aktueller Gegenstand der Aktivität einiger nationaler und internationaler Gremien (siehe u.a. RILEM TC 267-DFC, RILEM TC ADC, ISO/TC 261/JG 80, ACI Committee 564, fib Task Group 2.11, DAfStb AG Digitaler Betonbau). Aktuell werden Prüfverfahren

aus dem Beton- und Mauerwerksbau (z.B. EC2, EC6, ASTM, UL3041, ICC-AC509) adaptiert, abgewandelt und teilweise neu entwickelt.

Auch im Bereich der Forschung wird die Additive Fertigung im Bauwesen ständig weiterentwickelt, um neue Prozesse, aber auch Fragestellungen wie die automatisierte Integration von Bewehrung umsetzen zu können (siehe u.a. DFG TRR 277).

Literatur

- [1] Sand and sustainability: Finding new solutions for environmental governance of global sand resources: synthesis for policy makers. UNEP, Geneva 2019
- [2] Beiser, V.: The World's Disappearing Sand. New York Times Online (2016-06-23), www.nytimes.com/2016/06/23/opinion/the-worlds-disappearing-sand.html (abgerufen am 2019-11-28)
- [3] Höflinger, L.: The Sand Thieves: World's Beaches Become Victims of Construction Boom. Spiegel Online (2014-10-02), www.spiegel.de/international/world/global-sand-stocks-disappear-as-it-becomes-highly-sought-resource-a-994851.html (abgerufen am 2019-11-28)
- [4] Gemeinsames Positionspapier BAW und DBV: Beton ohne Steinkohlenflugasche Veränderung der Betonbauweise aufgrund abnehmender Verfügbarkeit von Steinkohlenflugasche und anderen Kraftwerksnebenprodukten als Zusatzstoffe für Beton. Karlsruhe und Berlin 2021
- [5] Global Status Report 2017. UNEP, Nairobi 2017
- [6] Salet, T. A. M.; Wolfs, R. J. M.: Potentials And Challenges In 3D Concrete Printing. Proceedings of the 2nd International Conference on Progress in Additive Manufacturing (Pro-AM 2016), Singapore 2016
- [7] Suhendro, Bambang: Toward Green Concrete for Better Sustainable Environment. Procedia Engineering 95 (2014), S. 305-320
- [8] Zäh, M. F.: Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien Anwender-Leitfaden zur Auswahl geeigneter Verfahren. Hanser Verlag, München 2006
- [9] Agustí-Juan, I.; Müller, F.; Hack, N.; Wangler, T.; Habert, G.: Potential benefits of digital fabrication for complex structures: Environmental assessment of a robotically fabricated concrete wall. Journal of Cleaner Production 154 (2017), pp. 330-340
- [10] Gebler, M.; Schoot Uiterkamp, A. J. M.; Visser, C.: A global sustainability perspective on 3D printing technology. Energy Policy 74 (2014) No. 74, pp. 158-167
- [11] Meibodi, M.; Bernhard, M.; JIPA, A.; Dillenburger, B.; Glynn, R.; Sheil, B.; Menges, A.; Skavara, M.; Lee, E.: The Smart Takes from the Strong: 3D printing stay-in-place formwork for concrete slab construction. Fabricate 2017, UCL Press 2017, pp. 210-218
- [12] López López, D.; Veenendaal, D.; Akbarzadeh, M.; Block, P.: Prototype of an ultra-thin, concrete vaulted floor system. Proceedings of the IASS-SLITE Symposium "Shells, Membranes and Spatial Structures: Footprints", Brasilia 2014
- [13] Asprone, D.; Auricchio, F.; Menna, C.; Mercuri, V.: 3D printing of reinforced concrete elements: Technology and design approach. Construction and Building Materials 165 (2018), pp. 218-231
- [14] Menna, C.: 3D Printed RC Structures: Concept and Technology. International RILEM Workshop: Digital Fabrication with Concrete, Zurich 2017
- [15] Mata-Falcon, J.; Bischof, P.; Kaufmann, W.; Wangler, T.; Flatt, R. J.: Exploiting the Potential of Digital Fabrication for Sustainable and Economic Concrete Structures. RILEM Bookseries 19, Springer Verlag, Berlin 2018
- [16] Weitz, H.: Fachkräftemangel Die Deutsche Bauindustrie. www.bauindustrie.de/zahlen-fakten/bauwirtschaft-im-zahlenbild/fachkraeftemangel_bwz/ (abgerufen am 2021-04-16 – Überprüfungsdatum 2021-04-16)
- [17] Lowke, D.; Dini, E.; Perrot, A.; Weger, D.; Gehlen, C.; Dillenburger, B.: Particle-bed 3D printing in concrete construction – possibilities and challenges. Cement and Concrete Research 112 (2018), pp. 50-65
- [18] Lowke, D.; Talke, D.; Dressler, I.; Weger, D.; Gehlen, C.; Ostertag, C.; Rael, R.: Particle-bed 3D-Printing by Selective Cement Activation – Applications, material and process technology. Special Issue for the 2nd RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication in July 2020, Cement and Concrete Research (2020)
- [19] Weger, D.; Kim, H.; Talke, D.; Henke, K.; Kränkel, T.; Gehlen, C.: Lightweight Concrete 3D-Printed by Selective Cement Activation – Investigation of Thermal Conductivity, Strength and Water Distribution. Proceedings of the 2nd RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication, Springer Verlag, Berlin 2020
- [20] Shakor, P.; Nejadi, S.; Paul, G.; Sanjayan, J.; Nazari, A.: Mechanical Properties of Cement-Based Materials and Effect of Elevated Temperature on 3-D Printed Mortar Specimens in Inkjet 3-D Printing. ACI Materials Journal 116 (2019) No. 2
- [21] Prasittisopin, L.; Pongpaisanseree, K.; Snguanyat, C.; Dini, E.: A 3D Printing Cement Mortar for Powder-bed (D-Shape) Machine. Proceedings of RILEM 1st International Conference on Concrete and Digital Fabrication, Zurich 2018
- [22] Weger, D.; Baier, D.; Straßer, A.; Prötting, S.; Kränkel, T.; Bachmann, A.; Gehlen, C.; Zäh, M.: Reinforced Particle-bed Printing by Combination of the Selective Paste Intrusion Method with Wire and Arc Additive Manufacturing – A First Feasibility Study. Proceedings of the 2nd RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication, Springer Verlag, Berlin 2020
- [23] Pierre, A.; Weger, D.; Perrot, A.; Lowke, D.: Penetration of cement pastes into sand packings during 3D printing: Analytical and experimental study. Materials and Structures 51 (2018) No. 1, pp. 22
- [24] Weger, D.; Pierre, A.; Perrot, A.; Kränkel, T.; Lowke, D.; Gehlen, C.: Penetration of Cement Pastes into Particle-Beds: A Comparison of Penetration Models. Materials 14 (2021) No. 2, pp. 389
- [25] Weger, D.; Gehlen, C.: Particle-Bed Binding by Selective Paste Intrusion Strength and Durability of Printed Fine-Grain Concrete Members. Materials 14 (2021) No. 3, pp. 586
- [26] Kloft, H.; Lowke, D.; Hack, N.: Shotcrete 3D Printing – An innovative and efficient technology for 3D printing of large-scale concrete components. Drymix Mortar Yearbook 3D Special 2019, pp. 38-43
- [27] Wangler, T.; Lloret, E.; Reiter, L.; Hack, N.; Gramazio, F.; Kohler, M.; Bernhard, M.; Dillenburger, B.; Buchli, J.; Roussel, N.; Flatt, R.: Digital Concrete: Opportunities and Challenges. RILEM Technical Letters 1 (2016), pp. 67
- [28] Matthäus, C.; Back, D.; Weger, D.; Kränkel, T.; Scheydt, J.; Gehlen, C.: Effect of Cement Type and Limestone Powder Content on Extrudability of Lightweight Concrete. Proceedings of the 2nd

- RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication, Springer Verlag, Berlin 2020
- [29] Buswell, R. A.; Da Silva, W. Leal; Bos, F. P.; Schipper, H. R.; Lowke, D.; Hack, N.; Kloft, H.; Mechtcherine, V.; Wangler, T.; Roussel, N.: A process classification framework for defining and describing Digital Fabrication with Concrete. *Cement and Concrete Research* 134 (2020), p. 106068
- [30] Mechtcherine, V.; Buswell, R.; Kloft, H.; Bos, F. P.; Hack, N.; Wolfs, R.; Sanjayan, J.; Nematollahi, B.; Ivaniuk, E.; Neef, T.: Integrating reinforcement in digital fabrication with concrete: A review and classification framework. *Cement and Concrete Composites* 119 (2021), p. 103964
- [31] Buswell, R. A.; Leal De Silva, W. R.; Jones, S. Z.; Dirrenberger, J.: 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. *Cement and Concrete Research* 112 (2018), pp. 37-49
- [32] Matthäus, C.; Kofler, N.; Kränkel, T.; Weger, D.; Gehlen, C.: Interlayer Reinforcement Combined with Fiber Reinforcement for Extruded Lightweight Mortar Elements. *Materials* 13 (2020) No. 21
- [33] Wolfs, R.J.M.; Bos, F. P.; Salet, T.A.M.: Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion. *Cement and Concrete Research* 119 (2019), pp. 132-140
- [34] Kruger, J.; Van Zijl, G.: A compendious review on lack-of-fusion in digital concrete fabrication. *Additive Manufacturing* 37 (2021), p. 101654
- [35] Perrot, A.; Rangeard, D.; Pierre, A.: Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. *Materials and Structures* 49 (2016) No. 4, pp. 1213-1220
- [36] Reiter, L.; Wangler, T.; Roussel, N.; Flatt, R. J.: The role of early age structural build-up in digital fabrication with concrete. *Cement and Concrete Research* 112 (2018), pp. 86-95
- [37] Wolfs, R. J. M.; Suiker, A. S. J.: Structural failure during extrusion-based 3D printing processes. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 104 (2019) 1-4, pp. 565-584
- [38] Weger, D.; Cho, S.; Zeranka, S.; Viljoen, C.; Van Zijl, G.: 3D concrete printer parameter optimisation for high rate digital construction avoiding plastic collapse. *Composites Part B: Engineering* 183 (2020), pp. 107660
- [39] HeidelbergCement Group: Technical Data Sheet i.tech 3D (Premix for 3D Technology). May 2019
- [40] Weger, D.; Stengel, T.; Gehlen, C.; Maciejewski, Y.; Meyer-Brötz, F.: Approval for the Construction of the First 3D Printed Detached House in Germany – Significance of Large Scale Element Testing [accepted after review]. *Proceedings of ASTM Symposium on Standards Development for Cement and Concrete for Use in Additive Construction, 2020*
- [41] Gehlen, C.; Stengel, T.; Weger, D.: Gutachten 19-215/2.1.1: ZiE 3D-Druck Haus Beckum [unveröffentlicht]. Ingenieurbüro Schießel Gehlen Sodeikat GmbH, München 03.09.2020
- [42] Bos, F.; Wolfs, R.; Ahmed, Z.; Salet, T.: Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. *Virtual and Physical Prototyping* 11 (2016) No. 3, pp. 209-225
- [43] Buswell, R. A.; Leal De Silva, W. R.; Jones, S. Z.; Dirrenberger, J.: 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. *Cement and Concrete Research* 112 (2018), pp. 37-49
- [44] Mechtcherine, V.; Fataei, S.; Bos, F.; Buswell, R.; Leal Da Silva, W.R.; Keita, E.; Krauss, H.; Lowke, D.; Perrot, A.; Nerella, V.N.; Roussel, N.; Sonebi, M.; Wangler, T.; Weger, D.; Wolfs, R.: Chapter 3: Digital fabrication with cement-based materials: underlying physics [submitted]. RILEM Technical Committee Digital Fabrication with Cement-based Materials (TC-DFC) (Hrsg.), STAR State of the Art Review, 2021
- [45] Van Der Putten, J.; Nerella, V.N.; Mechtcherine, V.; Sonebi, M.; D'Hondt, M.; Weger, D.; Wang, Z.; Menna, C.; Roussel, N.; Lowke, D.; Van Titelboom, K.; De Schutter, G.: Chapter 5: Properties and testing of printed cement based materials in hardened state [submitted]. RILEM Technical Committee Digital Fabrication with Cement-based Materials (TC-DFC) (Hrsg.), STAR State of the Art Review, 2021
- [46] 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) No. 3, pp. 558-566

Die Autoren:

Dr.-Ing. Daniel Weger studierte Bauingenieurwesen an der Technischen Universität München und spezialisierte sich im Masterstudium im Bereich Baustoffe, Bauchemie und Instandsetzung, welches er 2014 abschloss. 2014 bis 2020 war er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm), Lehrstuhl Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen, Arbeitsgruppe Betontechnologie) beschäftigt und leitete ab 2018 die Projektgruppe „Additive Fertigung“. 2020 erfolgte die Promotion zum Dr.-Ing. an der TU München zum Thema „Additive Fertigung von Betonstrukturen mit der Selective Paste Intrusion – SPI“. Seit 2020 ist er Mitarbeiter des Ingenieurbüros Schießel Gehlen Sodeikat GmbH in München und dort aktuell Senior Ingenieur sowie stellvertretender Teamleiter.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Christoph Gehlen studierte Bauingenieur- und Vermessungswesen und promovierte im Jahr 2000 an der RWTH Aachen. Seit 2008 hält er den Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen an der Technischen Universität München und leitet dort das Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm). Seit 2016 ist er Dekan der Ingenieurakultät Bau Geo Umwelt und Mitglied des erweiterten Hochschulpräsidiums (EHP). Seit 2020 ist er Sprecher des „Board of Deans“ der „TUM-School of Engineering and Design in Transformation“ sowie Vorstandsmitglied des DAfStb. Außerdem ist er Gesellschafter des Ingenieurbüros Schießel Gehlen Sodeikat GmbH in München.

Waldemar Korte, M.A. (arch) schloss 2002 die Berufsausbildung zum Maurer ab und studier-

te im Anschluss Architektur an der MSA Münster School of Architecture. Nach Beendigung des Studiums im Jahr 2009 war er als angestellter Architekt im Ingenieurbüro Mense-Werner-Beyer in Beckum tätig und wickelte Projekte aus dem Industrie- und Gewerbebereich ab. Seit 2015 ist er Mitgesellschafter des Büros Mense-Werner-Beyer, das sich im September 2020 in Mense-Korte umfirmierte.

Dr. Fabian Meyer-Broetz ist seit 2019 Leiter der Abteilung 3D Construction Printing bei der Peri GmbH. Seine Arbeit ist auf die Etablierung der 3D-Betondrucktechnologie in einem breiteren Spektrum der industriellen Praxis fokussiert. Dr. Meyer-Brötz ist ein ehemaliges Mitglied der Abteilung Disruptive Products & Technologie bei Peri, in der er verschiedenste Projekte geleitet hat – von neuen Baumethoden für Slum-Regionen bis zu automatisierten Verfahren zur Bauwerksüberwachung. Vor seiner Zeit bei Peri, verfolgte Dr. Meyer-Brötz sein langjähriges Interesse an Innovations- und Veränderungsprozessen in seinen Tätigkeiten bei Siemens und Daimler im Bereich der Technologievorausschau. Er hat einen Masterabschluss in Wirtschaftsphysik und einen Dokortitel im Bereich der Wirtschaftswissenschaften von der Universität Ulm.

Dr.-Ing. Jennifer C. Scheydt studierte Bauingenieurwesen an der Universität Karlsruhe (TH). Von 2004 bis 2012 beschäftigte sie sich als wissenschaftliche Mitarbeiterin an der MPA Karlsruhe sowie am Institut für Massivbau und Baustofftechnologie des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) vor allem mit Spezialbetonen und der Betonkorrosion. Promoviert wurde sie

2013 am KIT zur Dauerhaftigkeit von ultrahochfestem Beton. Im Anschluss an die Promotion wechselte sie zur HeidelbergCement AG, wo sie zunächst als Projektingenieurin tätig war und im Jahr 2016 die Teamleitung des Bereichs Innovation & Produktentwicklung übernahm. Seit April 2018 leitet sie die Abteilung Engineering & Innovation und hat zudem die fachliche Leitung des Produktmanagements Zement inne. In diesen Funktionen treibt sie marktzentrierte sowie nachhaltige Produktinnovationen und Branchenlösungen voran.

Prof. Dr.-Ing. Thorsten Stengel schloss im Dezember 2002 sein Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Universität München erfolgreich ab. Anschließend war er bis September 2010 als wissenschaftlicher Mitarbeiter/wissenschaftlicher Assistent am Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm) der Technischen Universität München tätig, dabei von 2007 bis 2009 als Leiter der Arbeitsgruppe „Betontechnologie“. Im März 2010 trat er als wissenschaftlicher Mitarbeiter in das Ingenieurbüro Schießel Gehlen Sodeikat GmbH ein, wo er 2011 die Teamleitung im Bereich „Betontechnologie, Materialmodellierung, Sichtbeton“ übernahm. Im Dezember 2013 erfolgte die Promotion zum Dr.-Ing. an der TU München, Bereich Baustoffkunde und Werkstoffprüfung, zum Thema: „Verbundverhalten und mechanische Leistungsfähigkeit von Stahlfasern in ultrahochfestem Beton“. Seit 2017 ist er Gesellschafter des Ingenieurbüros Schießel Gehlen Sodeikat GmbH in München. 2020 erfolgte sein Ruf als Professor für Baustoffe und Bauchemie an der Hochschule für angewandte Wissenschaften München.

WWW.HEIDELBERGCEMENT.DE

HEIDELBERGCEMENT

HeidelbergCement AG

Engineering & Innovation
Oberklamweg 6
69181 Leimen

www.heidelbergcement.de



Die vorliegende Informationsschrift einschließlich aller darin enthaltenen Abbildungen ist urheberrechtlich geschützt und Eigentum der HeidelbergCement AG. Verwertungen sind ohne Zustimmung der HeidelbergCement AG nicht zulässig. Dies gilt insbesondere auch für Vervielfältigungen, Übersetzungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.