

# Extrusion komplex geformter Geometrien aus überfräsbarem Beton zur Herstellung von Gießharzformen für Betonfertigteile

■ Marvin Abstoß, Enrico Rudolph, Henrik Funke, Sandra Gelbrich, TU Chemnitz, Deutschland

Die Nachfrage nach hochqualitativen sowie komplex geformten Betonfertigelementen steigt in den letzten Jahren kontinuierlich an. Eine führende Fertigungstechnologie für die Erzeugung der notwendigen Formen zur Fertigteilherstellung ist das Fräsen aus Polyurethan. Bei der Fertigung unikatler Bauteile erzeugen die geometrisch komplexen Elemente einen hohen Kostenfaktor sowie enormen Materialabfall. Aus ökologischen und ökonomischen Bestrebungen forschen die Partner Wasa Compound GmbH & Co. KG, die Professur für Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung der Technischen Universität Chemnitz sowie das Steinbeis - Innovationszentrum FiberCrete an der Entwicklung eines kostengünstigen und recycelbaren Formgebungssystems, womit künftig Betonfertigteile ressourcenschonend und damit umweltfreundlich hergestellt werden können.

Im Kooperationsprojekt wurde ein Material entwickelt, das endkonturnah mittels Extrusion gefertigt und anschließend mittels Fräsen bearbeitet wird. Durch diese Schritte entsteht ein Gießmodell, das wiederum mit einem geeigneten Gießharz abgeformt wird. Die entstehende Form wird zur Fertigung von Betonfertigteilen verwendet, wobei das extrudierte

Modell recycelt und dem Stoffkreis wieder zugeführt werden kann.

Von besonderer Bedeutung sind Ressourceneffizienz und die Nachhaltigkeit. Daher steht bei der Fertigung der komplexen Betonfertigteile primär der Prototypenbau sowie kleine und mittlere Serien im Vordergrund - Sektoren, in denen aufgrund der Individualität der Bauteile und der damit notwendigen hohen Anzahl an verschiedenen komplexen Formen ein hohes Potential zur Einsparung von Ressourcen besteht. Hier ist die Entwicklung und Umsetzung des neuen Formgebungssystems ein Baustein für den Erfolg zur effizienten Fertigung von Betonbauteilen.

## Materialentwicklung

Zur Erreichung eines möglichst kostengünstigen Materials, das sowohl extrudiert als auch gefräst werden kann, wurde ein Zementleim entwickelt, welcher aus dem Zement CEM I 52,5 R, einem Gesteinsmehl im Kornbereich von 0-160 µm sowie Wasser besteht. Dieser Stoffaufbau wurde mit Hilfe verschiedener Versuche - vom händischen Extrudieren mit Spritztülle bis zum teilautomatisierten Extrusionsprozess - , wie in Abb. 1 dargestellt, optimiert.



(a) Händische Extrusion



(b) Versuchsaufbau teilautomatisierter Extrusion



(c) teilautomatisierte Extrusion

Abb. 1: Beispielhafte Extrusion mit Hilfe einer Spritztülle (a) sowie einer teilautomatisierten Versuchsanlage mit Schneckenextruder [(b) und (c)]



■ Marvin Abstoß hat zwischen 2011 und 2016 an der Technischen Universität Chemnitz Medical Engineering studiert und ist seit 2016 als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TU Chemnitz angestellt. Er arbeitet an der Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung im Forschungsbereich Leichtbau im Bauwesen und befasst sich mit der automatisierten Fertigung von Betonbauteilen sowie neuartiger Schalungssysteme für die Betonfertigteilefertigung. [marvin.abstoss@mb.tu-chemnitz.de](mailto:marvin.abstoss@mb.tu-chemnitz.de)



■ Enrico Rudolph hat zwischen 2007 und 2012 an der Hochschule Mittweida Maschinenbau studiert und ist seit 2012 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TU Chemnitz. Er arbeitet an der Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung im Forschungsbereich Leichtbau im Bauwesen und befasst sich mit der automatisierten Fertigung von Betonbauteilen. [enrico.rudolph@mb.tu-chemnitz.de](mailto:enrico.rudolph@mb.tu-chemnitz.de)



■ Henrik Funke hat zwischen 2004 und 2009 an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg Keramik, Glas- und Baustofftechnik studiert und ist seit 2010 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der TU Chemnitz. Er arbeitet an der Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung im Forschungsbereich Leichtbau im Bauwesen. Er befasst sich mit faserverstärkten mineralischen Baustoffen. [henrik.funke@mb.tu-chemnitz.de](mailto:henrik.funke@mb.tu-chemnitz.de)



■ Prof. Dr. Sandra Gelbrich leitet seit 2009 den Forschungsbereich „Leichtbau im Bauwesen“ an der TU Chemnitz. Sie schloss 2009 ihre Promotion ab und habilitierte 2016 zum Thema „Funktionsintegrative Leichtbaustrukturen für Tragwerke im Bauwesen“. [sandra.gelbrich@mb.tu-chemnitz.de](mailto:sandra.gelbrich@mb.tu-chemnitz.de)

Durch fortlaufende Versuche unter Beachtung der Parameter:

- Extrudierbarkeit,
- Kraftaufwand bei Materialaustrag,
- Entmischungerscheinungen,
- Druckbild vor und nach dem Aushärten,
- Anhaftung der einzelnen Druckschichten,
- Standfestigkeit sowie
- Schwindmaß/ -risse

ergab sich die Notwendigkeit, den Zementleim zu einem 5-Stoffsystem nach Tab. 1 zu ergänzen.

Tab. 1: Komponenten des entwickelten Betons

Komponente	Norm
CEM I 52,5 R	DIN EN 197-1
Gesteinsmehl	DIN EN 12620
Stabilisator	DIN EN 9342: T4
Verzögerer	EN 934-2
Fließmittel	DIN EN 934-2:T3.1/3.2
Trinkwasser	DIN EN 1008

Das Fließmittel ermöglicht die Verringerung des Wasseranteils und somit in Verbindung mit dem Stabilisator eine beständige Mischung, die weniger zu Sedimentationserscheinungen neigt. Die Verwendung eines Verzögerers ermöglicht die längere Verarbeitbarkeit, die bei der additiven Fertigung von besonderer Bedeutung ist.

Die Dispergierung der eingesetzten Komponenten erfolgte mit einem zweistufigen Mischregime aus Tab. 2.

Tab. 2: Mischregime des entwickelten Betons

	Komponente	Mischzeit in s
1.	Zement + Gesteinsmehl + Stabilisator	120
2.	Wasser + Fließmittel + Verzögerer	300

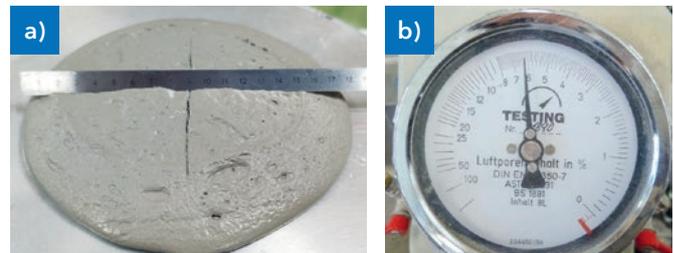


Abb. 2: Bestimmung der Frischbetoneigenschaften: Ausbreitmaß (a) und Luftgehalt (b)

### Untersuchung des entwickelten Materials

Das entwickelte Material wurde anschließend anhand seiner mechanischen Eigenschaften sowie der Frischbetoneigenschaften charakterisiert. Abb. 2 zeigt die Bestimmung der Fließfähigkeit mit dem Hägermann-Rütteltisch nach DIN EN 1015-3. Als Zielgröße für die Verarbeitbarkeit zum Extrudieren des Materials wurde ein Ausbreitmaß zwischen 15 und 19 cm festgelegt. Der Luftporengehalt und die Rohdichte des Frischbetons wurden nach DIN EN 12350-6 bzw. DIN EN 12350-7 mithilfe eines Luftgehaltsprüfers ermittelt.

Zur Bestimmung von Druck- und Biegezugfestigkeit wurden alle Probekörper nach DIN EN 12390-2:2017 gelagert und nach DIN EN 12390-2:2017 geprüft. Die Druckfestigkeit wurde an drei Würfeln („besonders hergestellte Probekörper“) mit einer Kantenlänge von 150 mm nach DIN EN 12390-3 auf der ToniNORM (3000-kN-Lastrahmen) der Fa. Toni Technik geprüft. Die Ermittlung der 3-Punkt-Biegezugfestigkeit erfolgte an 10 Proben mit den Abmessungen von 250 x 50 x 25 mm<sup>3</sup> (L x B x H in Anlehnung an DIN EN 12390-5). Die Prüfkörper wurden aus gegossenen Platten mit den Abmessungen von 500 x 500 x 25 mm<sup>3</sup> (L x B x H) geschnitten, wobei die Herstellung unter serientypischen Produktionsbedingungen inklusive einseitigem Abschleifen erfolgte. Die Stützweite und die Belastungsgeschwindigkeit lagen bei 200 mm bzw. 50 N/s (Vorkraft: 80 N). Die Ergebnisse zu den untersuchten Eigenschaften sind in Tab. 3 zusammengefasst.

Das Ausbreitmaß lag bei 18 cm, womit die anvisierte Zielgröße erreicht wurde. Die Druck- und 3-Punkt-Biegezugfestigkeiten nach 28 Tagen betragen 37,87 MPa sowie 8,16 MPa. Der entwickelte Beton lässt sich damit der Festigkeitsklasse der Normbetone zuordnen. Da in der Anwendung keine statischen Ansprüche an das Material gestellt werden, dieser lediglich spanend bearbeitbar sein muss, genügen die erreichten Festigkeiten den Ansprüchen.

Tab. 3: Ergebnisse zum Fließverhalten sowie Frisch- und Festbetoneigenschaften

Eigenschaft	
Ausbreitmaß	18 cm
Frischbetontemperatur	28,4 °C
Luftgehalt	4,6 Vol.-%
Frischbetonrohddichte	2,03 g/cm <sup>3</sup>
Festbetonrohddichte	2,01 g/cm <sup>3</sup>
Druckfestigkeit	37,87 MPa
3-Punkt-Biegezugfestigkeit	8,16 MPa

**Endkonturnahe Extrusion des Betons**

Mit den Erkenntnissen der teilautomatisierten Extrusion hinsichtlich Materialeigenschaften und Verfahrensparameter wurde diese Korrelation in der robotergestützten additiven Fertigung weiter untersucht. Die Ablage der extrudierten Leichtbetonlagen erfolgt hierbei über einen 6-Achs-Industrieroboter der Firma KUKA, wodurch die Fertigung endkonturnaher komplex geformten Strukturen ermöglicht wird. Abb. 3 zeigt ein CAD-Modell der roboterbasierten Anlage zur additiven Fertigung von Beton.

Zur Ansteuerung des Roboters werden Druckprogramme mithilfe des Programms Grasshopper, einem Aufsatz für die CAD-Software Rhinoceros erstellt. Grasshopper ist eine visuelle Programmiersprache, mit der parametrische Geometrien in Rhinoceros erzeugt bzw. bestehende CAD-Daten gezielt beeinflusst werden können. Hierfür werden die entsprechenden Komponenten, z. B. zur Erzeugung von geometrischen Formen (Punkte, Linien, Kurven, Flächen) und Definition von Parametern, in die Arbeitsumgebung gezogen und miteinander verknüpft. Im Ergebnis resultieren gesteuerte Algorithmen, welche die Geometrien beschreiben bzw. definieren.

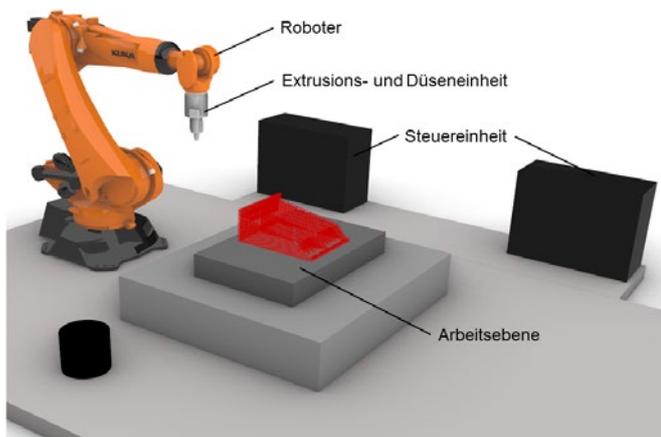


Abb. 3: CAD-Modell der roboterbasierten Anlage zur additiven Fertigung von Beton

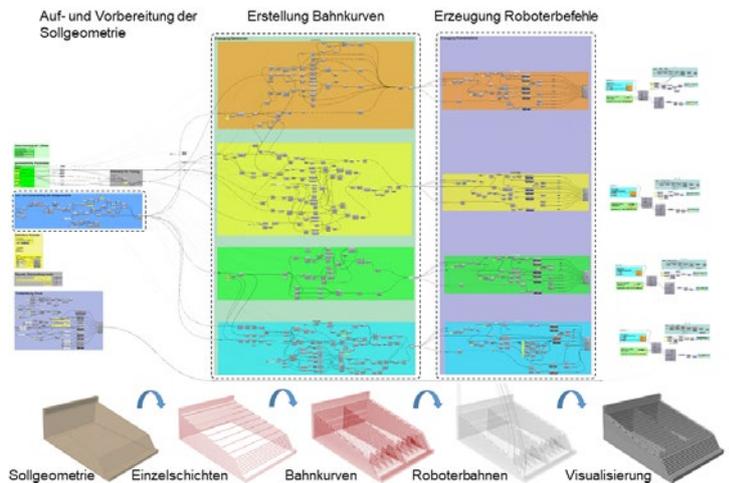


Abb. 4: Prinzipieller Aufbau eines Druckprojektes mit Grasshopper am Beispiel eines Schalkkörpers

Die mit Grasshopper erstellten Druckprogramme setzen sich grundlegend aus den folgenden Arbeitsschritten zusammen:

- Geometrierstellung bzw. Auf- und Vorbereitung der Sollgeometrie,
- Erstellung der Bahnkurven und
- Erzeugung der Roboterbefehle.

Der prinzipielle Aufbau eines Druckprojektes ist in Abb. 4 beispielhaft dargestellt.

Für die robotergestützte additive Fertigung von Betonbauteilen sind entsprechende Bahnkurven zu definieren und an den Roboter zu übergeben. Die Erstellung basiert auf den zuvor erzeugten Einzelschichten, wobei die Bahnkurven je nach Bauteilgeometrie neben der Außenkontur zusätzliche Strukturen enthalten können, die z. B. stützende Funktionen besitzen oder der gezielten Segmentierung dienen.

Die Verwendung von Grasshopper ermöglicht analog zu den Einzelschichten die einfache und schnelle Anpassung der Bahnkurven durch Anpassung des Parameters, der die Anzahl der Einteilungen (Kammern) definiert. Ein Ziel bei der Erstellung der Bahnkurven besteht darin, die Anzahl der Start- und Stopppunkte so gering wie möglich zu halten, um einen möglichst gleichmäßigen Materialaustrag zu gewährleisten. Im Idealfall wird ein sogenannter „Endlosdruck“ erreicht.

Basierend auf den Bahnkurven kann zudem die benötigte Materialmenge sowie die voraussichtliche Masse des extrudierten Körpers bestimmt werden. In Abb. 5 ist beispielhaft die Masseersparnis gegenüber einem Vollkörper für zwei Varianten eines Schalkkörpers dargestellt. Anhand der Ersparnis des extrudierten Materials lässt sich ebenfalls die proportional eingesparte Druckzeit und die somit steigende Effizienz des Druckprozesses einschätzen.

Neben der Erzeugung der Roboterbefehle können die Roboterbewegungen simuliert und der Druckprozess visualisiert werden. Die Simulation der Bewegungen trägt dabei erheblich zur Prozesssicherheit bei.

Vollkörper	2 Kammern	3 Kammern
		
ca. 91 kg (100 %)	ca. 35 kg (ca. 39 %)	ca. 41 kg (ca. 45,5 %)

Abb. 5: Masse eines additiv gefertigten gegenüber eines Vollkörpers

Mit der Fertigung erster Geometrien konnten essenzielle Einstellungen bezüglich der Druckgeschwindigkeit in Abhängigkeit von Förderrate und Materialsystem ermittelt und umgesetzt werden. Für die Abformung großformatiger Gießharzformen ist die Extrusion ausgefüllter Volumenkörper nicht zielführend. Das hohe Gewicht entsprechender massiv extrudierter Betonnegative erschwert das Handling enorm. Zur effizienten Reduktion des Gewichts wurde eine Fülltechnologie entwickelt, die auf dem Extrudieren von Hohlkammern aufbaut. Die gedruckten Kammern wurden anschließend mit drei unterschiedlichen Schüttgütern (Perlite 0-6 mm, Blähton 2-8 mm, und Quarzkies 0-4 mm) befüllt und glatt abgezogen, wodurch eine ebene Fläche erzeugt werden konnte. Bei anschließender Extrusion auf der ebenen Fläche wurden auf-

grund der hohen Korngröße sowohl einzelne Blähtonkugeln als auch Perlite heruntergeschoben. Anhand dieser Versuche wurde der o.g. Quarzkies als Füllmittel für die folgenden Arbeiten gewählt. Da das Schüttgut nach Aushärtung wieder entfernt werden kann, muss die Dichte nicht betrachtet werden. Einzig der Einfluss auf das Druckergebnis wurde als Kriterium herangezogen.

Abb. 6 zeigt den entwickelten Körper, mit dem das Erstellen schräger Flächen mittels Hohlkammertechnologie untersucht wurde. Nach Befüllen der erzeugten Kammern konnte der Körper mit einer Deckschicht geschlossen werden.

### Fräsbearbeitung und Abformung mit Gießharz

Die Fräsbearbeitung des entwickelten Betons wurde mit einem Hartmetallfräser im Trockenfräsprozess als zielführend identifiziert. Als Fräsparameter konnten eine Vorschubgeschwindigkeit im Bereich von 10-14 mm/s sowie eine Drehzahl im Bereich von 4.500-9.000 U/min bei einer Schnitttiefe bis zu 5 mm als geeignet für die Fräsbearbeitung des entwickelten Materials definiert werden. Verschiedene extrudierte Probekörper wurden bearbeitet und zeigen hochqualitative Oberflächen, welche sich zum Abformen mit einem Gießharz eignen. In Abb. 7 ist eine überfräste und mit dem Gießharz Wasa PUR Shore 65 der Wasa GmbH & Co. Kg abgeformte glatte Fläche abgebildet.



Abb. 6: Quarzkies in den Hohlräumen (a) ermöglicht Gewichtsreduktion des extrudierten Körpers (b)

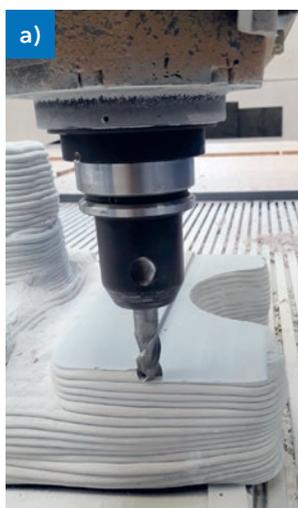


Abb. 7: Fräsbearbeitung eines extrudierten Probekörpers (a) bei anschließender Abformung mit einem Gießharz [(b) und (c)]

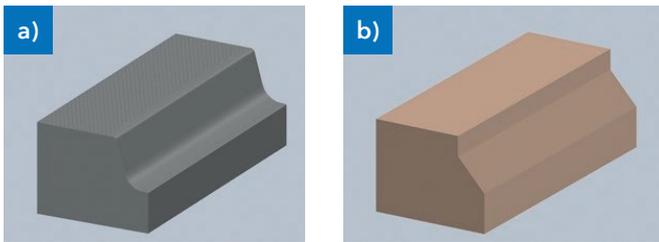


Abb. 8: Betonbordstein (a) und davon abgeleitetes Übermaßmodell (b)

Das angewandte Gießharz ließ sich durch Verwendung geeigneter Trennmittel leicht von der gefrästen Betonfläche lösen.

### Anwendung und Ausblick der Technologie

Zur Anwendung in der Praxis wurde eine Geometrie entwickelt, welche zur Fertigung eines Bordsteinelements genutzt werden soll. Die Geometrie des Fertigteils sowie ein geeigneter abgeleiteter Übermaßkörper zum Extrudieren und anschließendem Überfräsen sind in Abb. 8 dargestellt.

Zur Umsetzung des Bordsteins wurden die erforschten Grundlagen anhand eines im kleineren Maßstab gewählten Probekörpers mit einer ähnlichen Pyramidenstruktur gewählt. Dazu wurde, wie in Abb. 9 dargestellt, ein Körper in den Maßen 30 x 12 cm erfolgreich extrudiert, anschließend plan- sowie strukturgefräst und zur Abformung mit dem Gießharz Wasa Pur Shore 65 vorbereitet.

Anschließend wurde der Probekörper mit Wasa Pur abgeformt und nach 24 Stunden Aushärtung entformt. Die so hergestellte Gießharzform wurde daraufhin mit einem gießfähigen faserverstärkten Beton für Betonfertigteile gefüllt, wodurch das in Abb. 10 dargestellte Betonfertigteil hergestellt werden konnte.

Die nächsten Schritte im Forschungsprojekt sind die Fräsbearbeitung des extrudierten Bordsteinprobekörpers (Abb. 11) und die anschließende Abformung mit dem Gießharz. Abschließend folgt die Herstellung eines Fertigteildemonstrators des Bordsteins mit Hilfe der Gießharzform.

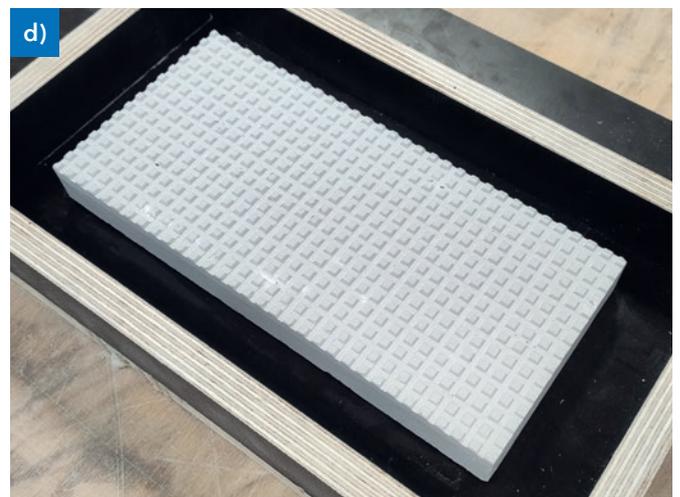
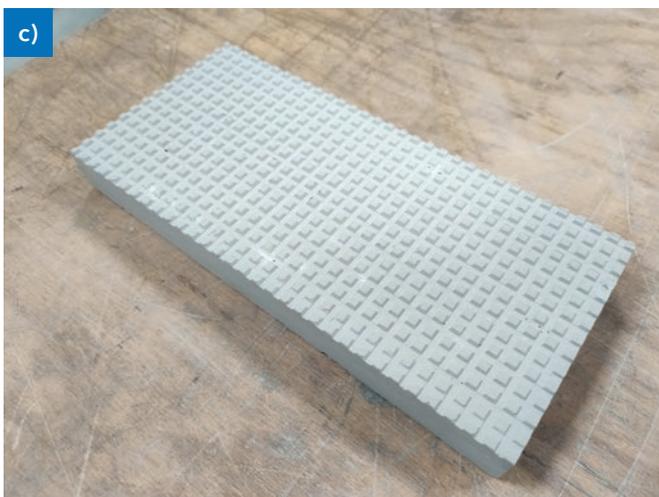


Abb. 9: Extrusion (a) und Fräsprozess (b) einer Probestruktur (c) mit anschließender Vorbereitung zur Gießharzabformung (d)

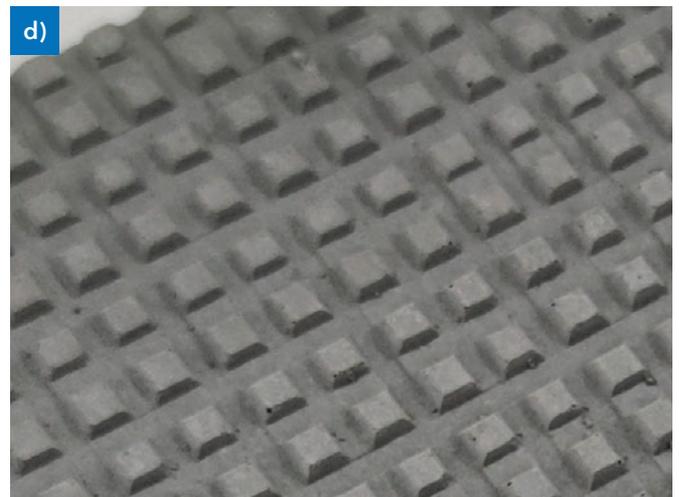
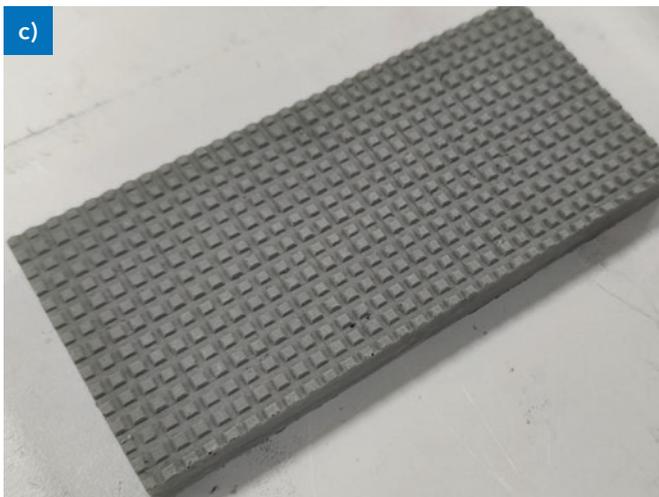
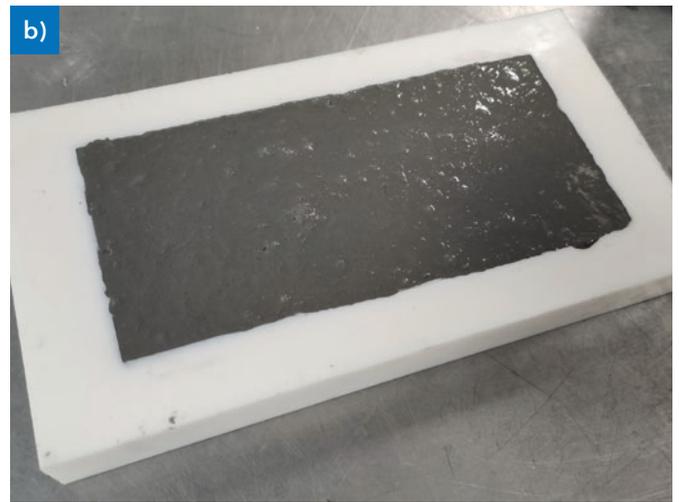
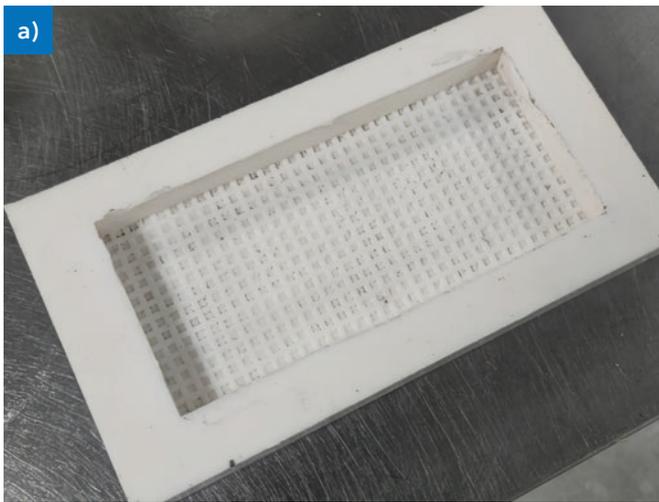


Abb. 10: Mit Hilfe der Gießharzform ((a) und (b)) hergestelltes Betonfertigelement [(c) und (d)]

**BWi** BETONWERK  
INTERNATIONAL

[www.cpi-worldwide.com/subscription](http://www.cpi-worldwide.com/subscription)

**JETZT Abonnieren**

online oder per Mail: [subscription@ad-media.de](mailto:subscription@ad-media.de)



Ihr **BWi**-Abonnement – Ihr persönlicher Schlüssel zum Erfolg!



Abb. 11: Betonbordstein mit Schüttkammern (a) und final extrudiert (b)

Die Projektpartner Wasa Construct, die Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung der Technischen Universität Chemnitz und das Steinbeis – Innovationszentrum FiberCrete werden gemeinsam im Rahmen eines FuE-Projektes gefördert. Die Projektbeteiligten bedanken sich bei der AiF Projekt GmbH für die Förderung des ZIM-Kooperationsprojektes. ■



Video zum Bericht

WEITERE INFORMATIONEN



Technische Universität Chemnitz  
 Straße der Nationen 62  
 09111 Chemnitz, Deutschland  
 T +49 371 5310  
[www.tu-chemnitz.de](http://www.tu-chemnitz.de)



Steinbeis – Innovation Center FiberCrete  
 Otto-Schmerbach-Str. 19, Halle 12  
 09117 Chemnitz, Deutschland  
 T +49 371 53132192  
[www.stw.de/su/1612](http://www.stw.de/su/1612)



WASA Compound GmbH & Co. KG  
 Meininger Straße 9  
 98617 Neubrunn, Deutschland  
 T +49 36947 5670  
 F +49 36947 56721  
[wetcast@wasa-technologies.com](mailto:wetcast@wasa-technologies.com)  
[www.wasa-technologies.com](http://www.wasa-technologies.com)



CPI Newsletter



CPI ePaper



ICCX Newsletter