

# Herausforderungen bei der Entwicklung von Werkstoff- und Strukturmodellen für additiv gefertigte Betonbauteile

Yuri Petryna<sup>1</sup>, Theresa Glotz<sup>1</sup>, Christoph Wolf<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Fachgebiet Statik und Dynamik, Technische Universität Berlin

<sup>2</sup> Bundesanstalt für Materialprüfung und -forschung, Berlin

**Zusammenfassung:** Additive Fertigung mit Beton ist eine vielversprechende Herstellungstechnologie im Bauwesen. Die Tragwerksplanung setzt allerdings rechnerische Nachweise und Baunormen voraus, die heute noch nicht zur Verfügung stehen. Dieser Beitrag adressiert einige typische Herausforderungen für die Entwicklung von entsprechenden Werkstoff- und Tragwerksmodellen, darunter die Anisotropie des Werkstoffs, die Textilbewehrung und das Verbundverhalten.

## 1 Extrusionsbasierte additive Fertigung mit Beton

Additive Fertigung mit Beton oder 3D-Druck hat einige wesentliche Vorteile im Vergleich zum traditionellen Betonbau, insbesondere bei komplexen geometrischen Formen der Bauteile wegen Wegfalls der Schalung oder direkter Umsetzung der 3D-Geometrie. Das Augenmerk beim 3D-Druck lag bislang auf der Entwicklung der Fertigungstechnologie selbst, d.h. des Druckprozesses, der zahlreiche Herausforderungen bewältigen muss [1,2]. Der vorliegende Beitrag hingegen legt den Fokus auf die Berücksichtigung der Konsequenzen des Druckprozesses für die gedruckten Bauteile im erhärteten Zustand.

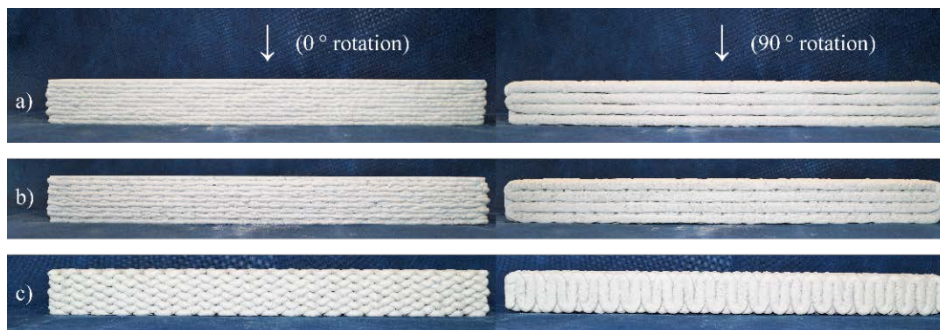
Grundsätzlich wird erwartet, dass additiv gefertigte Betonbauteile sich genauso verhalten wie Bauteile, die aus Normalbeton gefertigt sind. Dies schließt unter anderem die Anforderungen an Festigkeit, Verformbarkeit und Steifigkeit sowie Risswiderstand mit ein. Derartige Eigenschaften werden in der Entwurfsphase vorausgesetzt und bei den konstruktiven Nachweisen in einer Finite-Elemente-Simulation berücksichtigt. Leider existieren derzeit weder allgemein gültige Regelwerke für additive Fertigung mit Beton noch validierte Materialmodelle und Simulationswerkzeuge für diesen Werkstoff. Das schränkt die industrielle Anwendung von 3D-Druck signifikant ein, weshalb weltweit aktiv daran gearbeitet wird [1].

Dieser Beitrag adressiert einige typische Herausforderungen für die Entwicklung von entsprechenden Werkstoff- und Tragwerksmodellen, darunter die Anisotropie des Werkstoffs,

die Textilbewehrung und das Verbundverhalten. Diese Aspekte werden anhand eigener Versuche und Messungen an Betonproben an der Technischen Universität Berlin illustriert. Anschließend wird ein Ansatz für geeignete Simulationsmodelle dargestellt, welcher das Tragverhalten mit wenig Aufwand korrekt abbilden soll. Eine Zusammenfassung und ein Ausblick über die vielen noch offenen Forschungsfragen schließen den Beitrag ab.

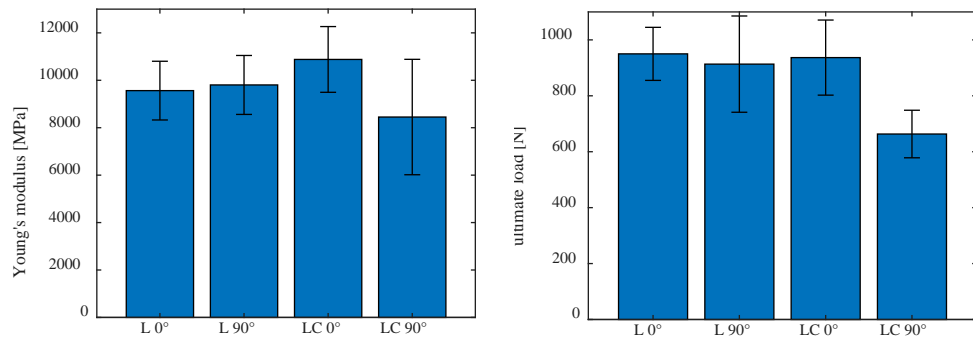
## 2 Herstellungsbedingte Anisotropie des Werkstoffs

Bei extrusionsbasierter additiver Fertigung werden Betonfilamente von einem Druckkopf schichtenweise aufeinander aufgetragen und erhärten ohne Nachbehandlung. Dabei muss der Beton vor der Ablage flüssig genug sein, um den Transport durch die Rohre der Fertigungsanlage bis zum Druckkopf nicht zu gefährden, und nach der Ablage möglichst schnell erhärten, damit der Druckkörper problemlos weitere Schichten von Frischbeton tragen kann. Die Orientierung der Druckfilamente kann grundsätzlich in Längsrichtung, in Querrichtung oder abwechselnd in Längs- und Querrichtung (kreuzweise) gestaltet werden, wie in Abbildung 1 für prismatische Probekörper dargestellt. Zwischen den Schichten und den Filamenten innerhalb der gleichen Schicht ist die Haftung untereinander zwangsweise nicht ideal und es kann zu Hohlrumbildungen zwischen den Filamenten kommen. Diese Inhomogenität oder schlechte Haftung wird auch als „cold joint“ bezeichnet und führt zu struktureller Anisotropie des Werkstoffs. Zwei identische Betonprismen unterscheiden sich folglich aufgrund dieser Anisotropie in ihrem Tragverhalten, wenn die Betonschichten horizontal bleiben (wie beim Druck, 0°-Rotation) oder mit 90° um die Längsachse gedreht werden (90°-Rotation), wie in Abbildung 1 dargestellt.

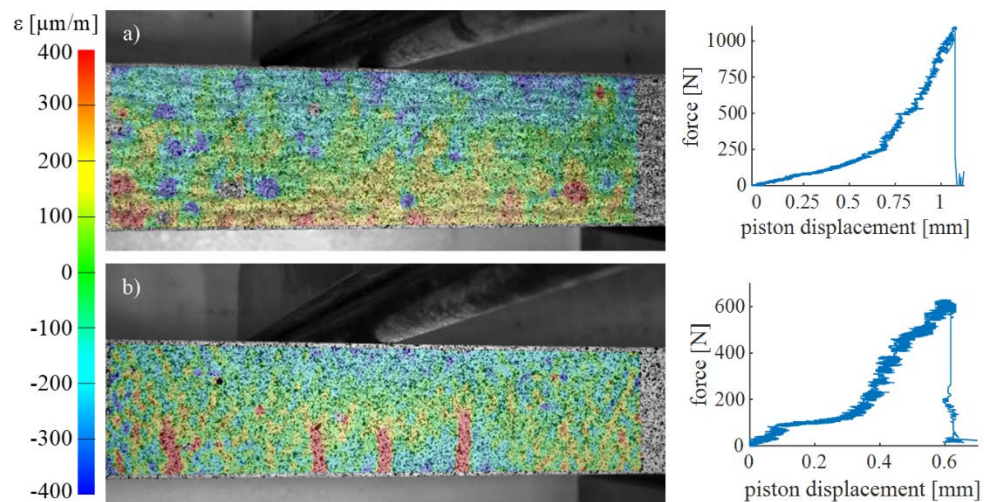


**Abbildung 1.** Gedruckte Betonprismen mit drei verschiedenen Orientierungen der Druckfilamente: a) Längsdruck; b) kreuzweiser (längs und quer) Druck; c) Querdruck

Durch eigene Dreipunkt-Biegeversuche an gedruckten Betonprismen wurde bestätigt, dass deren Tragverhalten zwei wesentliche charakteristische Merkmale aufweist. Zum einen sind der homogenisierte E-Modul, nachträglich aus den Versuchsdaten nach der linearen Balkentheorie ermittelt, und die gemessene Traglast wesentlich kleiner als diejenige gleichwertiger Betonprismen aus Normalbeton. Zweitens weisen sowohl die Steifigkeit als auch die Festigkeit der Betonprismen eine messbare Abhängigkeit von der Orientierung der Schichten auf, wie aus den Ergebnissen in Abbildung 2 zu erkennen ist. Anhand der in Abbildung 3 dargestellten optisch gemessenen Längsdehnungen ist außerdem zu sehen, dass sich auch die Rissbilder im Versagenszustand abhängig von der Orientierung der Druckschichten unterscheiden.



**Abbildung 2.** Aus dem Dreipunkt-Biegeversuch an längs- (L) und kreuzweise (LC) gedruckten Prismen ermittelte Verhaltensmerkmale: homogener E-Modul (links) und Traglast (rechts)



**Abbildung 3.** Optisch gemessene Dehnungsfelder (links) und Kraft-Verschiebungs-Diagramme aus dem Dreipunkt-Biegeversuch von unbewehrten kreuzweise gedruckten Betonprismen mit verschiedener Orientierung der Druckschichten (0° oben und 90° unten)

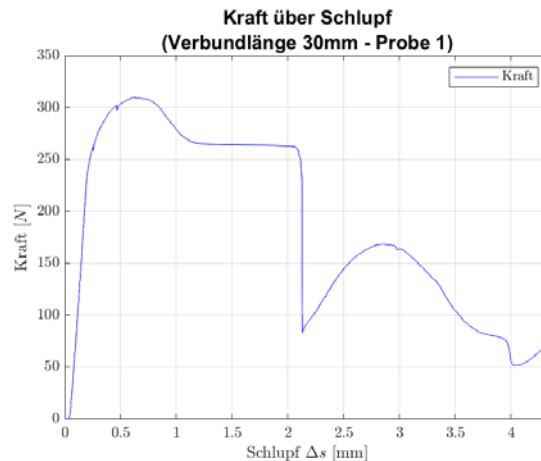
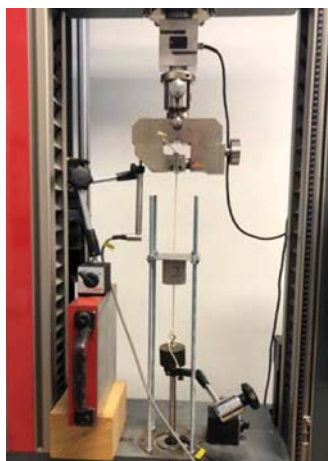
Die hier experimentell nachgewiesene strukturelle Anisotropie des additiv gefertigten Betons findet Bestätigung in den Publikationen mehrerer Wissenschaftler weltweit und stellt einen Konsensus dar. Sie sollte dementsprechend adäquat in Simulationsmodellen abgebildet werden.

### 3 Integration von Textilbewehrung und Verbundverhalten

Additiv gefertigter Beton verhält sich ähnlich zu Normalbeton in der Hinsicht, dass eine sogar mäßige Zugbeanspruchung nicht vom Beton selbst aufgenommen werden kann und zur

Rissbildung führt. Wie im klassischen Stahlbeton besteht also die Idee darin, dass die Bewehrung die Zugkräfte übernimmt. Beim additiv gefertigten Beton wird hier allerdings eine Textilbewehrung verwendet, weil diese sich leichter in den Druckprozess integrieren lässt. Es kann zwar auf die Erfahrung mit Textilbeton zurückgegriffen werden [3], allerdings lässt sich die Textilbewehrung beim 3D-Druck am einfachsten durch eine Einzelfaser realisieren, die direkt hinter dem Druckkopf verlegt wird. Zum Stand der Entwicklung kann dazu [4] herangezogen werden. Bewehrungsfasern können aus Glas, Carbon, Aramid oder anderen Materialien hergestellt werden. Das Verbundverhalten von Textilbewehrung in additiv gefertigtem Beton weist allerdings einige Besonderheiten im Vergleich zum Verbundverhalten im traditionellen Textilbeton auf, nicht zuletzt wegen der herstellungsbedingten Inhomogenitäten und der Anisotropie des Werkstoffs. Dieses Verbundverhalten in zuverlässigen Simulationsmodellen zu erfassen stellt die zweite Herausforderung dar, ohne deren Bewältigung jegliche Rechennachweise und eine industrielle Anwendung sehr problematisch erscheinen.

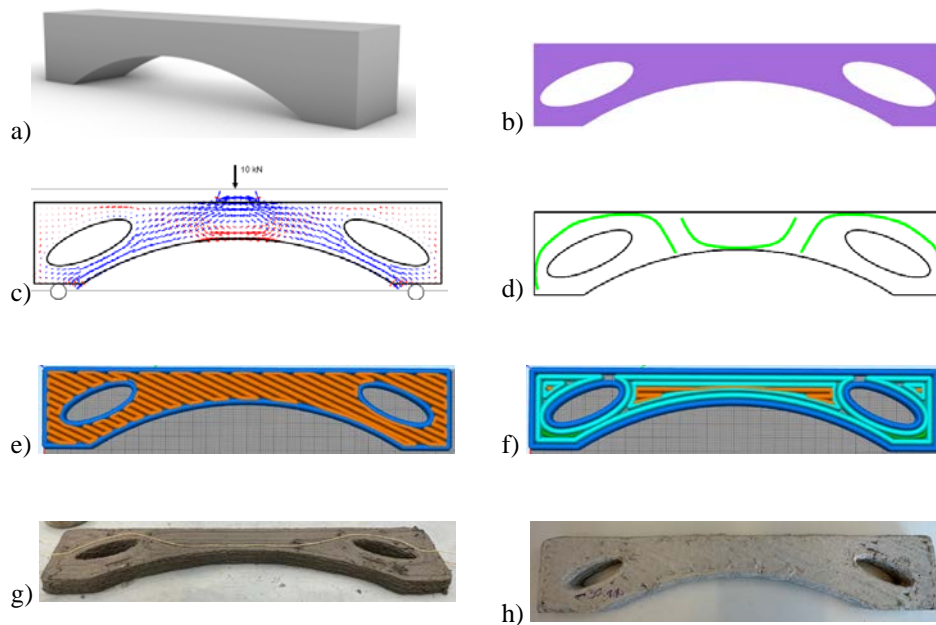
Das Verbundverhalten einzelner Aramidkordeln im Normalbeton wurde an der TU Berlin anhand von weggesteuerten Ausziehversuchen an zylindrischen Probekörpern mit verschiedenen Verbundlängen untersucht (Abbildung 4). Das Kraft-Schlupf-Diagramm in Abbildung 4 zeigt ein stark nichtlineares und komplexes Verbundverhalten, insbesondere im Nachbruchbereich. Das Ergebnis bis zum Schlupfwert von 2 mm korreliert gut mit bekannten Versuchsergebnissen an Textilbeton, z.B. in [5]. Das Verbundverhalten von Textilfasern in additiv gefertigtem Beton wird noch einige zusätzliche Einflussfaktoren beinhalten. Die entsprechenden Versuche an der TU Berlin sind derzeit in Planung.



**Abbildung 4.** Ausziehversuch für Aramidkordel (2 mm Stärke) im Normalbeton mit komplexem Verhalten im Nachbruchbereich

Weil die Bewehrungsmenge beim 3D-Druck technologisch beschränkt sein wird, gewinnt die Frage nach optimaler Bewehrungslage an Bedeutung. Die Ermittlung der Bewehrungslage wird noch anspruchsvoller angesichts der komplexen geometrischen Formen der Bauteile, die mittels additiver Fertigung hergestellt werden können und sollen. Im Rahmen des

Verbundprojektes AMCON-FIBER [6] wurde ein Algorithmus für die Berechnung der Bewehrungslage im Beton entwickelt, der verschiedene Bewehrungspfade anhand der Hauptspannungen im Beton ermittelt. Das Verfahren wurde anschließend an einem Demonstrator umgesetzt, der eine Laborstruktur (Ersatzbrücke) mit veränderlichen Querschnitten und Aussparungen darstellt (Abbildung 5,a-d). Für die Fertigung wurden alternative Druckpfade (Abbildung 5,e,f) in Betracht gezogen und realisiert. Dabei wurde der Druckprozess mit Beton und die Verlegung der Textilbewehrung technologisch und zeitlich getrennt, d.h. nacheinander geschaltet, sodass die Bewehrung nicht nur innerhalb der Betonfilamente sondern beliebig innerhalb der gesamten Druckfläche verlegt werden konnte. Die Bewehrungspfade können dabei aus technologischen Gründen angepasst werden, wie der Vergleich von Abbildung 5,d (Entwurf) und Abbildung 5,g (Realisierung) zeigt.



**Abbildung 5.** Entwurf (a), Geometrie (b), Hauptspannungen (c), Bewehrungspfade (d), alternative Betondruckpfade (e,f), teilweise gedruckter Testkörper mit Bewehrung (g) und der fertige Testkörper (h) für einen Demonstrator [6]

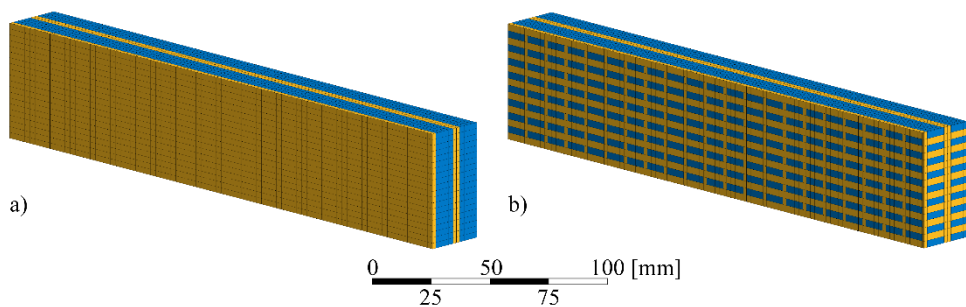
Der fertiggestellte Demonstrator wurde anschließend in einem Dreipunkt-Biegeversuch bis zum Versagen belastet (Abbildung 6). Das Versagen wurde durch einen Zugriss in der Mitte eingeleitet und durch einen Auszug der Textilbewehrung im Riss begleitet. Dabei entstand infolge der Umlenkkräfte ein zusätzlicher Riss entlang der verlegten Zugbewehrung im mittleren Abschnitt. Offensichtlich wurde der Betonquerschnitt nicht ausreichend gegen diese Umlenkkräfte dimensioniert. In der Tat konnte die Ersatzbrücke zum Zeitpunkt des Versuchs noch nicht nichtlinear mit Einbeziehung von realistischen Werkstoffmodellen für Beton, Textil und Verbund simuliert werden. Die Entwicklung von entsprechenden Modellen ist die nächste große Herausforderung für die praktische Anwendung von 3D-Druck mit Beton, welche neuer Grundlagenforschung bedarf.



**Abbildung 6.** Dreipunkt-Biegeversuch an der Laborbrücke (links) und Rissbild im Versagenszustand (rechts)

## 4 Modellbildung und Simulation

Wie aus **Abbildung 2** ersichtlich trifft die Annahme eines homogenen und isotropen Materials auf additiv gefertigten Beton nicht zu. Die Festigkeit und die Steifigkeit werden damit überschätzt, die Verformbarkeit unterschätzt. Der Einfluss des Schichtenaufbaus und der damit verbundenen Anisotropie muss im Simulationsmodell zunächst einmal qualitativ abgebildet werden. Dabei darf der Rechenaufwand des Simulationsmodells nicht in unverträgliche Dimensionen für praktische Anwendungen steigen. Die mikro- bzw. mesomechanischen Besonderheiten des Werkstoffs sollen daher homogenisiert werden, ohne die Qualität der Vorhersage über das Bauteil stark zu beeinträchtigen. Ein rationaler Vorschlag kann daher so formuliert werden, dass der Werkstoff grundsätzlich aus zwei Materialien besteht. Material 1 steht für Kernbeton innerhalb der Druckfilamente (blau in **Abbildung 7**) und Material 2 steht für homogenisierte Zwischenräume zwischen den Filamenten und den Druckschichten (gelb in **Abbildung 7**).



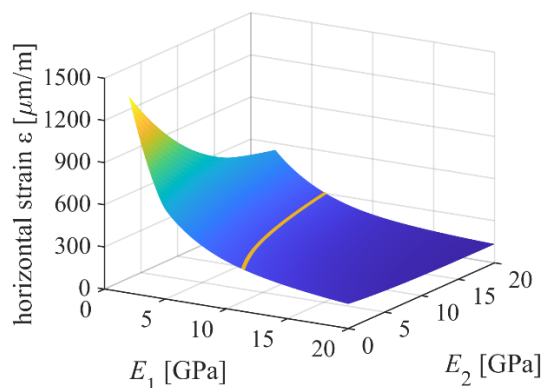
**Abbildung 7.** FE-Modelle mit Volumenelementen für Prismen mit verschiedener Orientierung der Druckfilamente und zwei Materialien: Betonfilament (Material 1, blau) und Filamente-Zwischenraum (Material 2, gelb)

Die Zwischenräume können kleine Hohlräume enthalten und die Haftung zwischen den Filamenten kann schwach ausgeprägt sein. All dies führt dazu, dass Material 2 grundsätzlich von schlechterer Qualität ist als der Kernbeton. Die Steifigkeit und Festigkeit von Material 2 muss

dabei noch definiert werden. Die Geometrie der Druckfilamente und Zwischenräume können anhand des Druckplans in digitaler Form leicht festgelegt werden. Somit ist es grundsätzlich möglich, verschiedene Druckpfade wie in Abbildung 1 im Modell adäquat abzubilden. Es wird vorgeschlagen, die FE-Diskretisierung der Probekörper mit Volumenelementen zu realisieren und dabei etablierte 3D-Werkstoffgesetze für Beton anzuwenden, vorzugsweise vom gleichen Typ für Material 1 und 2.

Die Werkstoffparameter für Material 2 (Zwischenräume) haben dabei einen künstlichen Charakter, d.h. sie sind kaum aus den Versuchen direkt zu ermitteln. Diese Vereinfachung erscheint aber wegen der Einfachheit des Ansatzes gerechtfertigt angesichts der zahlreichen Einflussfaktoren (Werkstoffzusammensetzung, -vorbereitung, Druckgeometrie und -geschwindigkeit, usw.), welche Besonderheiten wie Mikrorisse, Poren, Hohlräume, Haftung usw. direkt beeinflussen. Die Textilbewehrung kann in Form von Einzelfasern (Dehnstabelemente) in das vorhandene Netz von Volumenelementen direkt integriert werden. Der Verbund soll dabei in Form von diskreten Verbundfedern zwischen Volumen- und Stabelementen abgebildet werden, deren Steifigkeit und Festigkeit z.B. aus Ausziehversuchen zu bestimmen wären.

Der beschriebene Simulationsansatz wurde im Rahmen von ANSYS-Software zunächst für kreuzweise gedruckten Betonprismen mit  $0^\circ$ -Schichtenorientierung ohne Bewehrung umgesetzt, um die Dreipunkt-Biegeversuche nachzurechnen und den Ansatz zu testen. Als Referenzgröße für das Tragverhalten wurde die Längsdehnung  $\varepsilon$  an der Unterseite des Prismas in der Mitte, d.h. im Lastangriffsschnitt, ausgewählt. Im Rahmen einer linearen FE-Simulation wurde der Einfluss der Steifigkeiten für Kernbeton und Zwischenräume  $E_1$  und  $E_2$  auf die Referenzdehnung in der Mitte ermittelt und in Form einer Antwortfläche in Abbildung 8 dargestellt. Die Zieldehnung  $\varepsilon = 300 \mu$  ist dabei durch die orange Kurve dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass verschiedene Kombinationen von  $E_1$  und  $E_2$  zu der richtigen Dehnung führen können. Der Simulationsansatz ist zwar in der Lage die korrekten Ergebnisse für Referenzgrößen zu liefern, muss aber um weitere Aspekte erweitert werden, um eindeutige und realistische Prognosen des Tragverhaltens zu erzeugen. Auf der Tagung werden weitere Ergebnisse dieser Entwicklungsarbeit präsentiert.



**Abbildung 8.** Antwortfläche für die Längsdehnung an der Unterseite in der Mitte des kreuzweise gedruckten Prismas in Abhängigkeit von Materialsteifigkeiten  $E_1$  und  $E_2$

## 5 Schlussfolgerungen

Dieser Beitrag zeigt, dass die neuste Fertigungstechnologie im Bauwesen, der 3D-Druck mit Beton, erhebliche neue Herausforderungen für die rechnerischen Nachweise und damit für die breite industrielle Anwendung aufstellt. Eine ausgeprägte Anisotropie des Werkstoffs, resultierend aus dem Herstellungsprozess, wurde experimentell nachgewiesen und bestätigt damit Erkenntnisse anderer Forschungsgruppen. Diese Anisotropie hat ein größeres Einflusspotential im Vergleich zum Stahlbeton oder Textilbeton, weil die Orientierung der Druckschichten im Raum bei der Herstellung mit Robotern fast beliebig sein kann und damit ein breites Spektrum an Varianten hervorruft. Die erste große Herausforderung besteht in der Entwicklung von möglichst einfachen und gleichzeitig zuverlässigen Simulationsmodellen für rechnerische Nachweise.

Die zweite große Herausforderung besteht in der Integration der Bewehrung in den Druckprozess von Bauteilen mit komplexer geometrischer Form. Dabei stellt nicht nur der Druckprozess und die Verlegung der Bewehrung eine Herausforderung dar, sondern auch eine korrekte Abbildung vom Verbundverhalten zwischen der Bewehrung und dem inhomogenem und anisotropem Werkstoff Beton. Nach unserer Auffassung eignet sich Textilbewehrung für die Integration in die extrusionsbasierte additive Fertigung mit Beton am besten. Es wurde allerdings gezeigt, dass auch dafür erst zuverlässige Simulationsmodelle entwickelt werden müssen. Für eine breite Anwendung werden noch umfangreiche experimentelle und theoretische Arbeiten benötigt.

## Literatur

- [1] ROUSSEL, N.; LOWKE, D. Digital Fabrication with Cement-Based Materials. State-of-the-Art Report of the RILEM TC 276-DFC. Cham: Springer International Publishing, Vol. 36. 2022.
- [2] MECHTCHERINE, V. et al. Extrusion-based additive manufacturing with cement-based materials – Production steps, processes, and their underlying physics: A review. *Cement and Concrete Research* 132 (2020), S. 106037.
- [3] CURBACH, M.; JESSE, F. Eigenschaften und Anwendung von Textilbeton. *Beton und Stahlbetonbau* 104 (2009), S. 9–16.
- [4] MECHTCHERINE, V. et al. Integrating reinforcement in digital fabrication with concrete: A review and classification framework. *Cement and Concrete Composites* 119 (2021), S. 103964.
- [5] KRÜGER, M. Vorgespannter textiltbewehrter Beton, Dissertation. Universität Stuttgart, 2004.
- [6] PETRYNA, Y: et al. Teilprojekt: AMCON-FIBER2 Optimierung des extrusionsbasierten additiven Fertigungsprozesses mit Beton für die Integration der Faserbewehrung und Fasersensorik. Abschlussbericht, Technische Universität Berlin, 2023.