

Additiv gefertigte urbane Gestaltungsmöglichkeiten aus Leichtbeton

Elisabeth Radl, Nina Sam, Marc-Patrick Pflieger, Christian Hölzl, Markus Vill

Abstract. Durch die steigende Anzahl an Forschungstätigkeiten und Pilotprojekte gewinnt der Beton-3D-Druck durch seine Vorteile der Materialeinsparung und Formfreiheit immer mehr an Bedeutung. Dabei wird nicht nur die Möglichkeit der Herstellung von statisch konstruktiven Betonbauteilen, sondern auch nicht konstruktiver Objekte in Form von Gestaltungsobjekten geschaffen. Jedoch unterscheidet sich abhängig des Anwendungsbereichs, aufgrund unterschiedlicher Rahmenbedingungen, der Prozessablauf. Während konstruktive Bauteile hohe Festigkeitskennwerte des Druckmörtels erfordern, sind diese bei gestalterischen Objekten von untergeordneter Bedeutung. Stattdessen ist bei Gestaltungselementen eine Reduktion des Eigengewichts erstrebenswert. Der vorliegende Beitrag thematisiert die Entwicklung einer Leichtbetonrezeptur für den Beton-3D-Druck, die Beulsimulation (seitliches Ausweichen der Druckstränge) des Frischbetons während des Druckvorgangs zur Prognose der Druckbarkeit sowie erste Versuchsobjekte für Sitzmöglichkeiten.

Keywords: Beton-3D-Druck, Leichtbeton, urbane Gestaltungsmöglichkeiten

1 EINLEITUNG

In den letzten Jahren zeigte sich ein Umdenken in der Baubranche, wodurch traditionelle und bewährte Bauweisen zunehmend durch neue Lösungsansätze ersetzt werden. Dies wird maßgebend durch den wachsenden Automatisierungsgrad vorangetrieben, der innovative Lösungen in den Fokus rückt. In diesem Kontext gewinnt die additive Fertigung von Betonbauteilen zunehmend an Bedeutung. Diese Technologie ermöglicht die effiziente Herstellung von Betonbauteilen ohne aufwendige Schalungen, was wiederum zu Materialeinsparungen und damit zu einem verantwortungsvollen Umgang mit Ressourcen führen kann. Durch die Kombination der gezielten Materialapplikation und Topologieoptimierung der Querschnittsform, ist es möglich das Material nur an jenen Stellen aufzubringen, an denen es technisch notwendig ist. Zahlreiche internationale Forschungstätigkeiten zeigen, dass eine materialeffiziente und damit nachhaltige Herstellung von tragenden als auch gestalterischen Objekten mit Hilfe der additiven Fertigung möglich ist. Betonobjekte können besonders in Verbindung mit der Formfreiheit des 3D-Drucks architektonisch anspruchsvoll umgesetzt werden und bestehen durch ihre gute Dauerhaftigkeitseigenschaften unter freier Bewitterung. Es entsteht folglich bei ganzheitlicher Betrachtung eine ökologische, sowie ökonomische Lösung.

2 FORSCHUNGSPROJEKT C3PO

Im Zuge des Forschungsprojekts „Concrete ! 3D Printed Objects – C3PO“ widmet sich die

FH Campus Wien überwiegend dünnwandigen Faserbetonbauteilen für den konstruktiven Betonbau, sowie der Fertigung von modular aufgebauten, vorspannbaren Trägerelementen. Ein Auszug der aktuellen Forschungstätigkeiten zu biegebeanspruchbaren Bauteilen ist in der Abbildung 1 dargestellt. Dabei wurden Trägersegmente in Anlehnung an die Form und Proportionen von gängigen Hohlkastenquerschnitten hergestellt, aneinander gemörtelt, vorgespannt und bis zum Versagen beansprucht. Die additive Herstellung der einzelnen Segmente erfolgte mittels eines 6-Achs-Knickarmroboter von ABB auf einer 7 m langen Verfahrachse, wodurch sich ein Bauraum von ca. 7,0 x 1,0 x 1,0 m ergibt. Die Materialförderung erfolgte durch die MAI Pictor Schneckenpumpe.

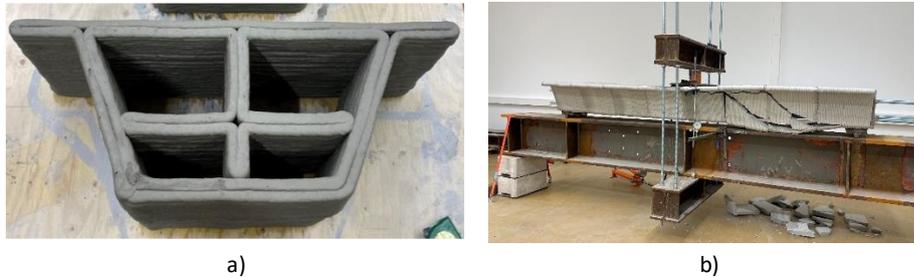


Abbildung 1: a) Additiv gefertigtes Hohlkastensegment; b) Prüfung der vorgespannten Hohlkastensegmente

Neben dem Forschungsbereich der konstruktiven Bauteile, wird in einem Teilbereich des Forschungsprojekts die innovative Nutzung von Leichtbeton im Zusammenhang mit 3D-Drucktechnologien untersucht. Dabei liegt der Fokus auf der Herstellung von gestalterischen, statisch untergeordneten Elementen mit urbanen Anwendungen. Hier wäre beispielsweise die Gestaltung von Sitzmöbeln in Freibereichen oder anderen raumbildenden Elementen für öffentliche Plätze zu nennen. Aufgrund der unterschiedlichen Rahmenbedingungen wurde der Prozessablauf für nicht-konstruktive Elemente aus Leichtbeton angepasst, auf den im Folgenden näher eingegangen wird.

3 GESTALTUNGSELEMENTE AUS LEICHTBETON

3.1 PROZESSABLAUF

Die Entwicklung eines Objekts von der Konzeption bis zur Herstellung umfasst mehrere Prozessschritte und bedingt den Einsatz unterschiedlicher Softwareapplikationen. Der erste Schritt befasst sich mit der konstruktiven Durchbildung der Bauteile mit Fokus auf der Materialoptimierung. Für die Fertigung tragenden Bauteilen wird eine Mörtelrezeptur verwendet, die darauf abzielt, hohe Festigkeitswerte zu erreichen. Jedoch sind solche Anforderungen an das Material für nichttragende Bauteile einerseits nicht erforderlich und andererseits ist eine Reduktion des Eigengewichts erstrebenswert. Den zweiten Schritt bildet die Modellierung und Analyse des Beulverhaltens, bevor die Festlegung der Druckabschnitte und die digitale Druckvorbereitung erfolgt. Der Prozessablauf ist in der

Abbildung 2 dargestellt.



Abbildung 2: Prozessablauf für die Herstellung von nicht konstruktiven Objekten

3.2 MATERIALENTWICKLUNG

Der extrusionsbasierte Beton-3D-Druck erfordert während des Herstellungsprozesses unterschiedliche rheologische Eigenschaften des Druckmörtels. Das fertig gemischte Material muss zunächst pumpfähig sein, um durch den Förderschlauch zur Extrusionsdüse transportiert werden zu können. Für die Extrusion ist eine bestimmte Stabilität erforderlich, um sowohl die Geometrie der Düse beizubehalten als auch den Belastungen der nachfolgenden Schichten standzuhalten. Die Kombination aus einer zu hohen Auflast der darüber liegende Schichten und einer unzureichenden Formstabilität führt zu einem Beulen in den Drucksträngen. Aus diesem seitlichen Ausweichen der Druckstränge kann, abgesehen von reinen Verformungen, ein Versagen des Objekts resultieren und stellt somit eine Anwendungsgrenze für die additive Fertigung dar.

Die Standardrezeptur basiert auf der Zementsorte CEM II, Quarzsand mit einem Größtkorn von 2 mm als Zuschlagsstoff und Microsilika. Zur Verbesserung der Materialeigenschaften werden Fließmittel, Stellmittel sowie Glasfasern beigemischt. Um das Gewicht des Druckmörtels zu verringern, wurde im Zuge der Materialentwicklung der Quarzsandanteil schrittweise auf 12 % reduziert und durch die beiden Leichtzuschläge Liaver und Aeropor zu jeweils 44 % ersetzt. Bei den Leichtzuschlägen handelt es sich um Recyclingprodukte aus geblähtem Glas bzw. Mineralhohlkugeln vulkanischen Ursprungs. Liaver weist eine Korngröße von 0,25 – 0,5 mm auf und Aeropor 0 – 0,18 mm.

Im Zuge der Materialoptimierung, war es relevant, dass die Beimischung der Leichtkörnungen die Konsistenz des Druckmörtels nicht beeinflusst und somit die Druckfähigkeit des Materials erhalten bleibt. Die Materialproben und Versuche zeigen einzig hinsichtlich der Verarbeitungsdauer einen merkbaren Unterschied bzgl. ihrer Verarbeitbarkeit. Der Leichtzuschlag Aeropor ist durch eine spezielle Oberflächenbehandlung nicht saugend, wohingegen Liaver saugende Eigenschaften aufweist. Daher ist es von Bedeutung, dass das Material nicht zu lange unbewegt im Förderschlauch verweilt, da es durch eine langsam voranschreitende Wasseraufnahme der Körnung zu Konsistenzänderungen und damit zu Stopfern im Mörtelschlauch kommt.

3.3 MODELLIERUNG UND BEUL-SIMULATION

Die Modellierung erfolgt mittels Grasshopperi, einem Plug-in für die Softwareanwendung Rhinoceros. Dies ermöglicht die Einbindung einer visuellen Programmierungsumgebung,

wodurch es möglich wird, ohne Programmier- und Scriptingkenntnisse parametrische Strukturen zu erzeugen. Bei der parametrischen Modellierung werden zusätzlich zu Parametern der allgemeinen Geometrie, Beziehungen bzw. Abhängigkeiten zueinander definiert, wodurch sich beispielweise bei Änderung der äußeren Abmessungen das Modell automatisch anpasst.

Darüber hinaus wird das Plug-in Karamba 3D verwendet, womit an den parametrisch modellierten Geometrien Finite-Elemente Berechnungen durchgeführt werden können. Dadurch ist es möglich Simulationen des Beulverhaltens zu erstellen. Dies ist insofern von Bedeutung, da sich ab einer bestimmten Druckhöhe ein Beulversagen zeigt. Allerdings wird das Beulverhalten von der jeweiligen Rezeptur sowie der Querschnittsform beeinflusst. Dadurch kann keine allgemeine Aussage getroffen werden, sondern muss abhängig vom Modell und der eingesetzten Materialrezeptur analysiert werden.

Die Relevanz der Bestimmung der umsetzbaren Druckabschnitte wird in Abbildung 3 anhand eines Zylinders als Beispiel veranschaulicht. Wie in a) dargestellt, kann die Durchführung des Druckprozesses in einem einzigen Abschnitt zum Beulen bzw. ungewünschten Verformen des Objekts führen. Um dieses Problem zu vermeiden, kann das Objekt in mehrere Druckabschnitte unterteilt werden. Wie in b) gezeigt, wird zunächst der Druckabschnitt DA1 hergestellt, gefolgt von einer kurzen Pause, während der das bereits extrudierte Material etwas ansteift, jedoch der Schichtverbund erhalten bleibt, bevor mit der Herstellung von DA2 fortgesetzt wird.

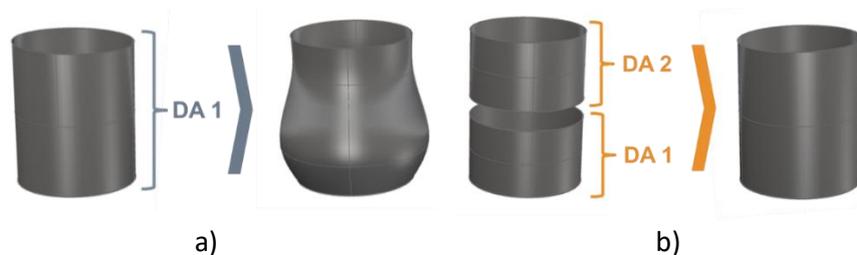


Abbildung 3: a) Herstellung des Objekts in einem Druckabschnitt – Auftreten von Beulen; b) Herstellung des Objekts in zwei Druckabschnitten – kein Beulen

Um eine Validierung der Simulationskennwerte mit dem tatsächlichen Beulverhalten zu erreichen, wurden unterschiedliche Testformen modelliert, mit Karamba 3D eine Beulsimulation durchgeführt und anschließend hergestellt. In Abbildung 4 ist die Versuchsdurchführung dargestellt. A) zeigt den Beginn des Druckprozesses und b) das Testobjekt in einer Höhe von ungefähr 16 cm. Dabei ist zu erkennen, dass das Objekt noch seine planmäßige Form beibehält. Ab einer Höhe von etwa 32 cm wird jedoch, ein Beulen der Prüfkörperenden mit den Wendepunkten ersichtlich, bevor das Objekt, wie in d) zu sehen, kollabiert.

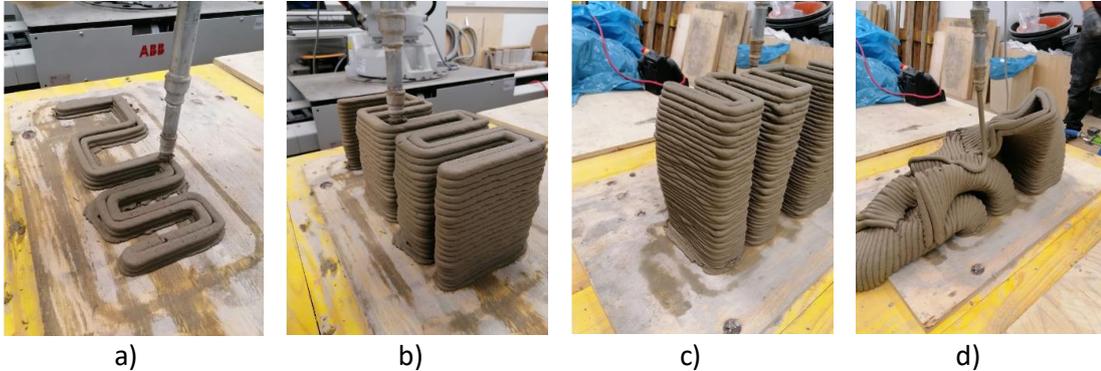


Abbildung 4: Versuch zur Validierung der Simulationskennwerte und dem tatsächlichen Beulverhalten

4 ERSTE ERGEBNISSE UND AUSBLICK

In Vorversuchen wurden erste Prototypen hergestellt, um die Verarbeitbarkeit der Leichtmörtelrezeptur umfassend zu prüfen. Ebenso wurde deren Stabilität, Dauerhaftigkeit und die Integration von Holzelemente getestet. Diese sind in Abbildung 5 dargestellt.



Abbildung 5: Vorversuche der additiven Fertigung von urbanen Gestaltungsobjekten

Basierend auf der entwickelten Leichtrezeptur und dem angepassten Prozessablauf werden in der nächsten Phase des Projekts die Anforderungen und Ansprüche an urbane Sitzmöglichkeiten analysiert. Auf Grundlage dieser Informationen werden anschließend Geometrien entworfen und hergestellt. Dadurch sollen durch die Formfreiheit des Beton-3D-Drucks, individuelle parametrisch anpassbare, dauerhafte Lösungen mit guter Materialeffizienz ermöglicht werden.

5 REFERENZEN

- [1] Pfleger, MP., Geyer, S., Hölzl, C., Vill, M. (2023). Investigations to Improve the Carbon Footprint of Thin Walled Concrete Structures by 3D Printing Prefabricated Elements. In: Jędrzejewska, A., Kanavaris, F., Azenha, M., Benboudjema, F., Schlicke, D. (eds) International RILEM Conference on Synergising Expertise towards Sustainability and

Robustness of Cement-based Materials and Concrete Structures. SynerCrete 2023. RILEM Bookseries, vol 44. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-33187-9_60

- [2] Radl, Elisabeth; Pfleger, Marc-Patrick; Geyer, Sebastian; Hölzl, Christian: Parametrische Modellierung und additive Fertigung von Betonbauteilen unter Berücksichtigung des Materialeinsatzes anhand eines Praxisbeispiels. In: Connecting Research. 16. Forschungsforum der österreichischen Fachhochschulen, 2023
- [3] Matthäus, Carla/Henke, Klaudius/Talke, Daniel/Kränkell, Thomas: Leichtbeton-3DDruck - Additive Fertigung von multifunktionalen, monolithischen Wandelementen durch Extrusion von Leichtbeton. In: BBSR-Online-Publikation. Bonn. Nr. 5/2021.
- [4] Ze Chang, Hongzhi Zhang, Minfei Liang, Erik Schlangen, Branko Šavija: Numerical simulation of elastic buckling in 3D concrete printing using the lattice model with geometric nonlinearity, Automation in Construction, Volume 142,2022.