

Studie zur digitalen Prozessentwicklung für die Integration von vorgefertigten Bewehrungskörben im 3D-Betondruck

Elisabeth Radl¹, Marc-Patrick Pflieger¹, Markus Vill¹

¹ Hochschule Campus Wien, Forschungszentrum Bauen und Gestalten, elisabeth.radl@hcw.ac.at

Abstract. Diese Arbeit zeigt erste Ansätze zur Integration eines Bewehrungskorbs in 3D-gedruckten Betonbauteilen mit Fokus auf dem digitalen Vorbereitungsprozess. Es wird ein Testbewehrungskorb gefertigt und der Druckpfad so optimiert, dass eine vollständige Ummantelung der Bewehrung ohne Kollisionen gewährleistet ist, was durch die Berücksichtigung der geometrischen Details und Fertigungstoleranzen des Bewehrungskorbs bei der Modellierung der Betongeometrie umgesetzt werden soll. Als Geometriereferenz dient ein T-Trägerquerschnitt. Im Rahmen der digitalen Modellierung und Datenaufbereitung werden verschiedene Strategien zur digitalen Erfassung der Naturmaße des Bewehrungskorbs, Modellierung der Geometrie und Generierung des Druckpfads untersucht und Probleme aufgezeigt. Ziel ist es, einen möglichen digitalen Prozessablauf zu definieren, der geeignet ist, schlaff bewehrte Betonquerschnitte im 3D-Druckverfahren herstellen zu können. Aufbauend auf diesen Ergebnissen sollen im nächsten Schritt Betonträger mit integriertem Bewehrungskorb gefertigt und experimentell hinsichtlich ihres Tragverhaltens untersucht werden, um etwaige zusätzliche Problemstellen zu identifizieren und die Methodik weiter zu optimieren.

Keywords: 3D-Betondruck, Bewehrungsintegration, Automatisierung, Teilfertigteil

Einleitung und Problemstellung

Aufgrund des steigenden Interesses und der intensiven internationalen Forschungsaktivitäten von Forschungseinrichtungen und Unternehmen entwickelt sich der 3D-Betondruck weg von experimentellen Strukturen ohne statische Anforderungen oder

Demonstratoren hin zur Herstellung tragender, statisch-konstruktiver Bauteile. Diese finden derzeit vorwiegend bei der Umsetzung von Pilotprojekten Anwendung. Die automatisierte, schalungsfreie Bauweise erlaubt eine kosteneffiziente Fertigung komplexer und ressourcenschonender Geometrien. Für tragende, statisch wirksame Bauteile ist jedoch die Integration von Bewehrungselementen technisch unerlässlich, da Beton selbst nur eine geringe Zugfestigkeit besitzt und daher unbewehrte Bauteile nur sehr bedingt biegebeanspruchbar sind. Aktuell werden verschiedene Ansätze zur Bewehrungsintegration für den additiven Fertigungsprozess verfolgt und entsprechend untersucht, darunter bspw. die Einbindung von faserartigen Bewehrungsmaterialien in und zwischen den einzelnen Drucklagen oder das nachträgliche Vorspannen von Trägersegmenten in dafür vorgesehenen Hohlräumen (Kloft et al., 2024). Im konventionellen Betonbau werden dagegen häufig starre Bewehrungskörbe bestehend aus gebogenen Stabstählen, die grundsätzlich vollständig vorgefertigt werden können, zum Einsatz gebracht. Die Integration solcher Bewehrungskörbe in den Materialextrusionsprozess des 3D-Betondrucks zeigt jedoch Herausforderungen, insbesondere durch den schichtweisen Materialauftrag. Besonders kritisch sind hierbei vor allem die vertikalen Bewehrungsstäbe bzw. im Allgemeinen quer zu den Druckschichten verlaufende Bewehrungselemente, da die Düse zur Materialextrusion mit den Bewehrungsstäben kollidieren kann. Erste Untersuchungen zeigen zudem, dass eine vollständige Ummantelung der Bewehrung mit Beton nur dann möglich ist, wenn die Düse möglichst nahe an die Bewehrung herangeführt wird, um Hohlräume zu vermeiden und so einen geeigneten Verbund zu erzeugen. Bei gängigen Bauarten von Industrierobotern, die zur Materialapplikation im 3D-Betondruck eingesetzt werden, ergeben sich dabei häufig verfahrenstechnische geometrische Problemstellungen sowie Schwierigkeiten bezogen auf die Anlagensteuerung.

Vorversuch

In einem ersten Vorversuch wurde die Integration eines starren Bewehrungskorbs in einen 3D-gedruckten Betonträger untersucht. Dazu wurde ein T-förmiger Querschnitt herangezogen, der aus einem Gurt von 200×60 mm und einem Steg von 200×75 mm besteht. Die Gesamtlänge des T-Trägers beträgt 160 cm. Innerhalb des Betonquerschnitts wurde ein ebenfalls T-förmiger Bewehrungskorb angeordnet. Dieser besteht in Längsrichtung aus zwei Bewehrungsstäben $\varnothing 12$ mm als Zugbewehrung, drei Stäben $\varnothing 6$ mm im Druckgurt sowie einem einzelnen Stab $\varnothing 6$ mm in der Stegmitte. Quer zu den gedruckten Materiallagen wurde in vertikaler Richtung eine Verbügelung aus einem Stab mit gewinkelten Enden ($\varnothing 6$ mm/15 cm) eingebracht.

Nach Festlegung der Querschnittsgeometrie wurde der Druckpfad mit einer Slicing-Software generiert. Der Abstand des Druckpfads zum Bewehrungskorb wurde dabei

auf den größten Stabdurchmesser abgestimmt. Dieses Vorgehen führt allerdings zu dem Problem, dass an Stellen ohne Bewehrungsstab ein zu großer Abstand der gedruckten Betongeometrie zu den Bewehrungsstäben entsteht und deshalb potenziell schlechte Verbundverhältnisse resultieren. Der Druckvorgang zur Herstellung der Prüfbauteile erfolgt im Extrusionsverfahren, bei dem der speziell entwickelte Druckmörtel über eine Schneckenpumpe zu einer an einem Knickarmroboter befestigten Düse gefördert, strangförmig extrudiert und schichtweise zu einem Bauteil aufgebaut wird (Radl et al., 2024).

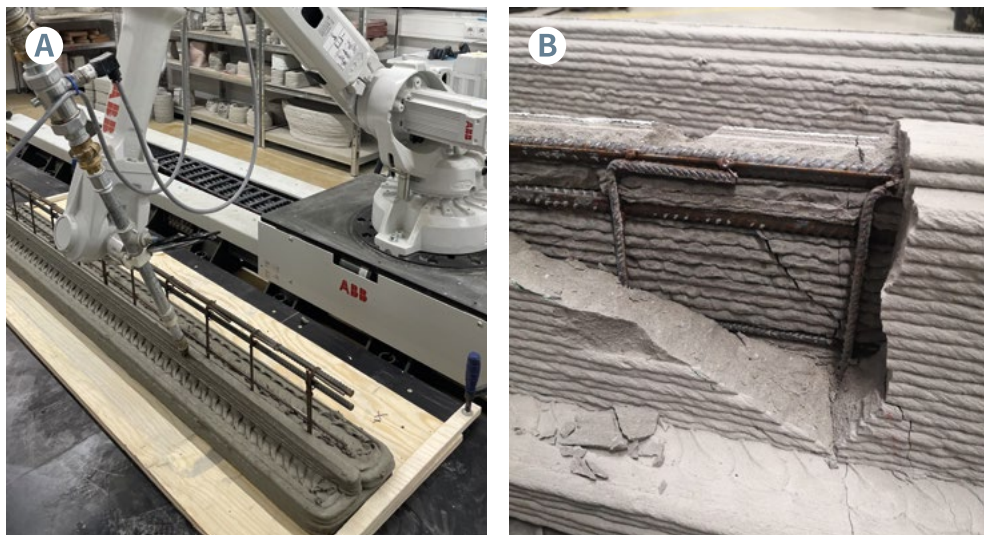


Abbildung 1: A) Herstellung des Trägers mittels 3D-Betondruck, B) Versagensbild nach Durchführung des Drei-Punkt-Biegeversuchs (eigene Darstellung)

Bereits während des Druckvorgangs zeigte sich, dass durch das Entstehen von Fehlstellen kein ausreichender Verbund zwischen Bewehrungskorb und Beton erreicht wurde. Der beobachtete Versagensmechanismus der Probe im Drei-Punkt-Biegeversuch bestätigte dieses Problem. Abbildung 1 zeigt in A) den Träger während des Druckvorgangs und in B) das Versagensbild. Es ist zu erkennen, dass der Steg im Bereich der Bewehrung aufgrund des unzureichenden Verbundes aufreißt.

Die Ergebnisse des Vorversuchs verdeutlichen die Notwendigkeit alternativer Ansätze zur Integration starrer Bewehrungskörbe in 3D-gedruckte Betonbauteile. Die Entwicklung geeigneter Konzepte wäre insbesondere hinsichtlich der besseren Herstellbarkeit von komplexen Querschnitten vorteilhaft, da diese mit konventionellen Schalungsmethoden kaum oder nur durch den Einsatz von Sonderschalungen realisierbar sind.

Überarbeiteter Prozessansatz

Ein Ansatz, um das Problem des unzureichenden Verbunds zwischen Bewehrungskorb und 3D-gedrucktem Beton zu vermeiden, ist die gezielte Anpassung des Druckpfads an die Geometrie des Bewehrungskorbs. Dabei ergeben sich jedoch zwei zusätzliche Aspekte: Zum einen variieren die Bewehrungskörbe je nach Querschnittsform und konstruktiven Anforderungen, zum anderen treten herstellungsbedingte Ungenauigkeiten bzw. Toleranzen auf. Daher kann nicht von den theoretischen Konstruktionsabmessungen ausgegangen werden, sondern es müssen die tatsächlichen Abmessungen des vorgefertigten Bewehrungselements berücksichtigt werden.

Eine mögliche Lösung besteht darin, die gefertigten Bewehrungskörbe mittels Laser-scanning zu erfassen und daraus ein 3D-Modell zu generieren, welches die beschriebenen Abweichungen von der Soll-Geometrie berücksichtigt. Auf Basis dieses Modells kann die Detailgeometrie des 3D-gedruckten Trägers so angepasst werden, dass ein Druckpfad erzeugt wird, der durchgehend einen konstanten Abstand zur Bewehrung aufweist und somit variabel an die genaue Lage der einzelnen Stäbe angepasst ist. Auf diese Weise soll ein durchgehend ausreichender Verbund zwischen Beton und Bewehrung erreicht werden. Abbildung 2 zeigt den entsprechenden Workflow zur Integration eines starren Bewehrungskorbs in ein 3D-gedrucktes Bauteil aus Beton.

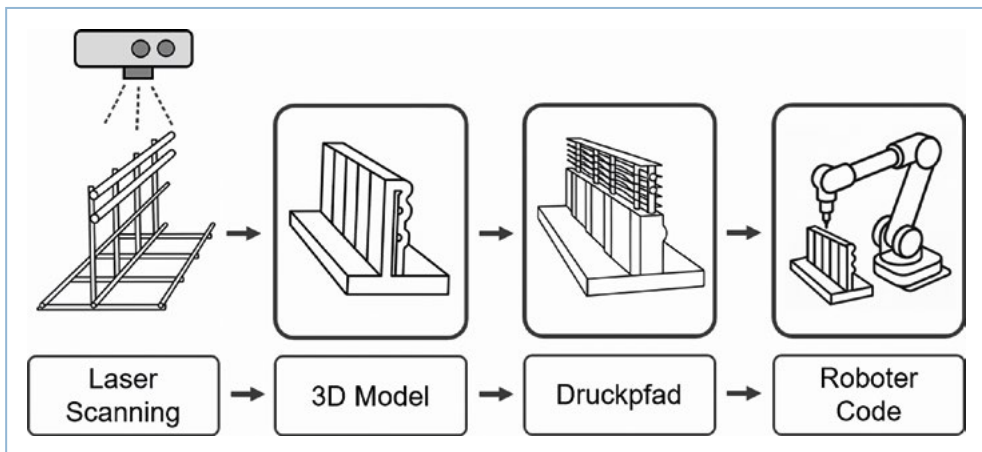


Abbildung 2: Darstellung eines möglichen Workflows zur Integration von starren Bewehrungskörben in den 3D-Betondruck (eigene Darstellung)

Abbildung 3 zeigt die Ursache des beschriebenen, nicht ausreichenden Schichtverbunds durch das Freibleiben von Hohlräumen und die Aufnahme der Bewehrungsgeometrie in das CAD-Modell des Druckobjekts. Durch das Berücksichtigen der Bewehrungslage und der Stabdurchmesser kann der Druckpfad zur Objektherstellung exakter generiert werden, wodurch ein deutlich verbesserter Materialverbund entsteht.

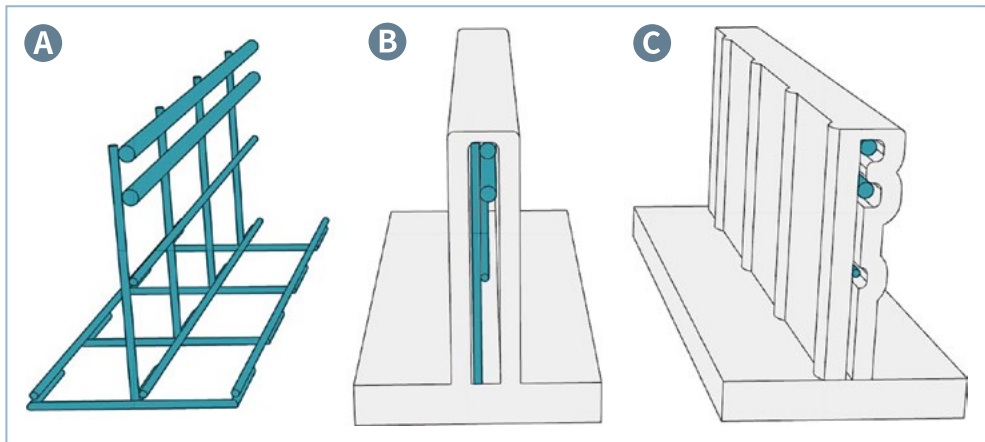


Abbildung 3: A) schematische Darstellung des 3D-Modells des Bewehrungskorbs, B) Volumenmodell gemäß Vorversuch, C) an den Bewehrungskorb angepasstes Volumenmodell (eigene Darstellung)

Zusammenfassung und Ausblick

Durch die Modellanpassung auf Basis eines Bewehrungsscans können grundlegende Verbesserungen im Bereich des Materialverbunds erreicht werden, wobei gleichzeitig die Kollisionsgefahr im Herstellungsprozess minimiert werden kann. Beide Aspekte tragen dazu bei, die Gefahr von Herstellungsfehlern oder die in Folge auftretenden mangelhaften Bauteileigenschaften deutlich zu verringern. Dazu zählt auch das vertikale Spalten bei Beanspruchung des Querschnitts entlang seiner Längsachse durch einen zu geringen Kontakt von nebeneinander aufgetragenen Materialsträngen. Durch einen zu großen Abstand des Extruders zu den Strängen des bereits gedruckten Objekts, in vertikaler sowie horizontaler Richtung, führt die ungenügende seitliche Verdrängung des extrudierten Mörtels zu verbleibenden Hohlräumen bzw. schlechter Verdichtung zwischen den Materialsträngen.

Trotzdem können sich abhängig von der Komplexität der Bewehrungsgeometrie Problematiken bei der Einbettung von horizontalen Bewehrungselementen ergeben. Diese treten insbesondere bei großen Stabdurchmessern auf, die die Schichtdicke überschreiten und zu Kollisionen des Extruders mit den Bewehrungselementen führen können.

Referenzen

- Kloft, H., Sawicki, B., Bos, F., Dörrie, R., Freund, N., Gantner, S., Gebhard, L., Hack, N., Ivaniuk, E., Kruger, J. et al. (2024). Interaction of reinforcement, process, and form in Digital Fabrication with Concrete. *Cement and Concrete Research*, 186, 107640. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.107640>
- Radl, E., Pflieger, M. P., Karolyi, J., & Vill, M. (2024). Specimen design and advanced material testing for 3D printing concretes. In *IABSE Symposium Manchester 2024* (pp.115–123). <https://doi.org/10.2749/manchester.2024.0115>