

Entwicklung praxisorientierter Methoden für den 3D-Druck des Verbundwerkstoffs Stahlbeton

Sisi Zhang, Matthias Kalus, Sven Engel, Martin Claßen

*Institut für Massivbau,
RWTH Aachen University,
Straße, 52074 Aachen, Germany*

E-Mail: szhang@imb.rwth-aachen.de

Kurzfassung

In diesem Beitrag wird ein neuartiges 3D-Druckverfahren zur automatisierten Herstellung von Stahlbetonbauteilen, mit der Bezeichnung Additive Manufacturing of Reinforced Concrete (AMoRC), vorgestellt. Das Verfahren besteht aus einem kontinuierlichen Betonextrusionsprozess und gleichzeitig ablaufenden Schweißprozess, die beide jeweils von einem Roboterarm ausgeführt werden. Durch die Anwendung eines neuen Lichtbogenbolzenschweißverfahrens wird ein räumliches Bewehrungsnetz aus vorgefertigten Stahlsegmenten herstellt, welches anschließend mit Hilfe eines neuartigen gabelförmigen Druckkopf, mit vier verstellbaren Düsen, umdruckt wird. Die Länge der gefügten Bewehrungsstäbe wird dabei an die Bauteilgeometrie und die Extrudiergeschwindigkeit angepasst. Die zu verbindenden Stabsegmente werden in einem zum Druckkopf gehörenden Magazin bereitgehalten, das die Zuführung von Stäben mit unterschiedlichen Durchmessern zum Aufbau eines belastungsgerechten und wirtschaftlichen Bewehrungsnetzes ermöglicht. Um das strukturelle Verhalten additiv gefertigter Stahlbetonbauteile zu charakterisieren wurden Vorversuche durchgeführt. In der ersten Phase lag der Fokus auf dem Betondruckverfahren, sodass die Bewehrung erstmals manuell platziert wurde. Im nächsten Schritt wurde ein zweiter Roboter in den Prozess integriert und die Umsetzung des sog. AMoRC-Verfahrens demonstriert. Die Tragfähigkeit automatisiert hergestellter Stahlbetonbauteile im großen Maßstab wurde mit Vier-Punkt-Biegeversuchen untersucht. Neben dem Tragverhalten gedruckter Stahlbetonbauteile wurde ebenfalls das Verbundverhalten zwischen Bewehrung und gedrucktem Beton mit Hilfe von Ausziehversuchen analysiert.

Keywords: 3D-Druck von Stahlbeton, AMoRC-Verfahren, Charakterisierung, Ausziehversuch, 4-Punkt-Biegeversuch

Abstract

In this paper, a novel 3D printing process for reinforced concrete structures called Additive Manufacturing of Reinforced Concrete (AMoRC) is proposed. The process consists of a continuous concrete extrusion process and an intermittent stud welding process, both carried out by a robotic arm respectively. The welding robot runs ahead of the concrete extrusion robot and produces the spatial reinforcement mesh from prefabricated reinforcing bar segments. A novel fork-shaped print head with four adjustable nozzles allows for concrete extrusion around the reinforcement with different diameters. By joining segmented rebars of limited length to a reinforcement mesh in the AMoRC process, the consumption of energy and time can drastically be reduced compared to shape welding. The length of the joined rebars can be adapted to the component geometry and the extrusion speed. The bar segments to be joined are kept ready in a magazine belonging to the print head, which enables the feeding of bars with different diameters to arrange a load-efficient and economical reinforcement mesh. The preliminary testing of the additively fabricated reinforced concrete components is also implemented to characterize the structural behaviour of those 3D-printed composite specimens. In the initial phase, the reinforcement installation was performed manually until the second robot will be added to the process and experiments were done to characterize the printed structures. The pull-out test is used to investigate the bonding behavior between reinforcement and printed concrete. The four-point bending test is also utilized to study the mechanical behavior of the printed reinforced concrete specimen in a larger scale.

Keywords: 3D-printing of reinforced concrete, AMoRC method, characterisation methods, pull-out test, 4-point-bending experiment.

1 Einleitung

3D-Betondruck (3D concrete printing) [1, 2] gehört zu den additiven Fertigungsverfahren- Additive Manufacturing (AM)- im Bereich der digitalen Fabrikation mit Beton [3], die seit Mitte der 1990er Jahre allmählich Einzug in den Bausektor fanden und auf nachhaltigere Strukturen mit höherer Produktivität abzielen, z. B. auf einen geringeren CO₂-Fußabdruck durch lastangepasste Konstruktionen. Zu Beginn wurde das AM-Verfahren im Bausektor nur zum Drucken der Außenkontur eines Bauteils verwendet [1]. Danach wurden verschiedene Verfahren entwickelt, die das Drucken ganzer Strukturen ermöglichen [4, 5]. Seitdem haben zahlreiche Universitäten und Unternehmen damit begonnen, 3D-Druckverfahren für Beton zu entwickeln, was zu einer stetig wachsenden Forschungsgemeinschaft führte [6]. Allerdings sind die meisten gedruckten Betonbauwerke heutzutage unbewehrt, obwohl die Bewehrung in den meisten Bauwerken zwingend erforderlich ist, um wichtige Anforderungen wie Tragfähigkeit, Duktilität, Robustheit usw. zu erfüllen [7]. Unterschiedliche Lösungsvorschläge wurden in der Literatur bereits vorgeschlagen, die basierend auf der Reihenfolge, in der die Bewehrung integriert wird, klassifiziert werden können: (1) Drucken oder Platzieren der Bewehrung in der Schalung vor dem Betonieren, z.B. Digital Casting System an der ETH Zürich [8] oder 3D-Spritzbeton an der TU Braunschweig [9]; (2) die gleichzeitige Zugabe von Bewehrung zum Betondruck, z. B. die Integration von Faser- oder Textilbewehrung in den Betonextrusionsprozess, was eine Bewehrung parallel zur Extrusionsrichtung ermöglicht [10]; (3) Integration der Bewehrung nach dem Druckprozess, wie z.B. das Contour Crafting-Verfahren, bei dem zunächst die äußere Betonkontur als verlorene Schalung gedruckt und dann die Bewehrung nachträglich in die Kontur eingebaut wird, die anschließend mit Beton gefüllt wird [1]. Eine detailliertere Übersicht über die wichtigsten Konzepte zur Integration von Bewehrung und deren Überprüfung findet sich in [11]. Ein Druckkonzept für Stahlbeton, das ohne manuelle Arbeitsschritte auskommt, alle Anforderungen an die Eigenschaften des gedruckten Verbundwerkstoffs erfüllt und im Bauwesen anwendbar ist, fehlt bislang noch.

2 Verfahren zu den Additive Fertigung von Stahlbeton (AMoRC)

2.1 Entwicklung des Prozesses

Im Folgenden wird die Konzeption eines neuartigen 3D-Druckverfahrens für Stahlbeton, das sogenannten Additive Manufacturing of Reinforced Concrete (AMoRC), vorgestellt. Das vorgeschlagene Verfahren wird in folgendem Bild 1 dargestellt. Die AMoRC-Methode verwendet zwei Roboterarme, einen für die schalungsfreie Ablage der Betonfilamente und den anderen für die Integration der Bewehrung. Der Schweißroboter läuft dem Betonextrusionsprozess voraus und stellt das räumliche Bewehrungsnetz aus vorgefertigten Bewehrungssegmenten her. Der Beton wird so um die Bewehrungsstäbe gelegt, dass diese einige Zentimeter aus dem gedruckten Beton herausragen, sodass das Zusammenschweißen mit der nächsten Reihe Bewehrungsstäbe ermöglicht wird. Auf diese Weise wird ein zwei- oder dreidimensionales Bewehrungsnetz erzeugt, das Fugen zwischen aufeinanderfolgenden Betonschichten überbrückt und mit Beton umhüllt wird. Die Kombination des intermittierenden Schweißverfahrens und des kontinuierlichen Betonextrusionsverfahrens ist AMoRC, ein hybrides Produktionsverfahren für Stahlbetonbauwerke.

Durch das Verbinden von segmentierten Bewehrungsstäben mit begrenzter Länge zu einem Bewehrungsnetz im AMoRC-Verfahren kann der Energie- und Zeitaufwand im Vergleich zum formgebenden Schweißen drastisch reduziert werden. Die Länge der gefügten Bewehrungsstäbe kann an die Bauteilgeometrie und die Extrudiergeschwindigkeit angepasst werden. Die zu verbindenden Stabsegmente werden in einem zum Druckkopf gehörenden Magazin bereitgehalten, das die Zuführung von Stäben mit unterschiedlichen Durchmessern ermöglicht. Da das AMoRC-Verfahren nicht auf einen bestimmten Bewehrungsdurchmesser beschränkt ist, kann das Bewehrungsnetz belastungsgerecht und damit wirtschaftlich gestaltet werden. Außerdem wird die Kraftübertragung zwischen den Bewehrungssegmenten durch das Verschweißen der Stäbe gewährleistet, sodass überlappende Bewehrungsstöße vermieden werden können. Dadurch wird weniger Material benötigt und mögliche Schwachstellen im Bauwerk können ausgeschlossen werden.

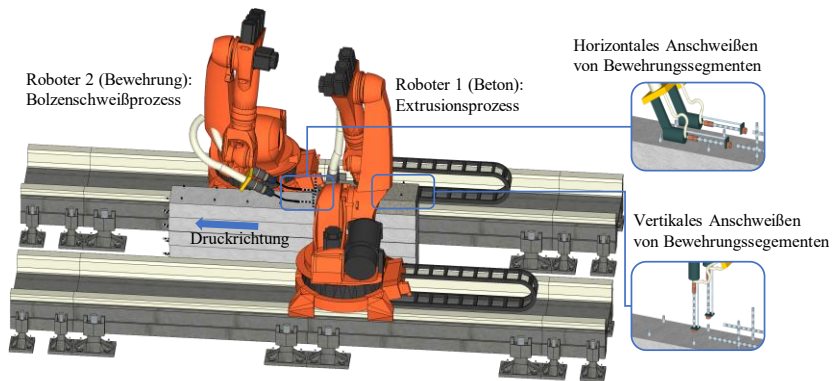


Bild 1 3D-Druckverfahren (AMoRC) zur Herstellung von Stahlbeton einschließlich Betonextrusion und Bolzenschweißen der Bewehrung

Der Beton wird mittels eines gabelförmigen Betondruckkopfes, welcher aus angeordneten Einzeldüsen besteht, um die Bewehrung herum aufgebracht. Für jede mit Beton zu umhüllende Bewehrungslage werden zwei Düsen benötigt. Der Abstand zwischen diesen Düsen kann an den jeweiligen Bewehrungsdurchmesser angepasst werden. Das AMoRC-Verfahren eignet sich besonders für die Herstellung von vertikal freistehenden, horizontal gestützten oder leicht geneigten Bauwerken. Details zur Konzeption und Entwicklung des Betondruckkopfes, der Düsenanordnung und deren Geometrie sowie der generellen Machbarkeit des Verfahrens wurden in [11, 12] analysiert. In dieser Arbeit liegt der Schwerpunkt auf den vorläufigen Prüfergebnissen der mechanischen Eigenschaften von gedruckten bewehrten Bauteilen auf der Grundlage einer ersten Anwendung des AMoRC-Verfahrens [13].

2.2 Implementierung des Verfahrens

Im Labor des Instituts für Massivbau der RWTH Aachen wurde eine Druckeinrichtung bestehend aus einem 7-achsigen System, welches in Bild 2 dargestellt wird, aufgebaut: ein 6-achsiger KUKA-Roboter KR 300 R2700-2 mit einer KRC4-Steuerung, installiert auf einer KUKA-Lineareinheit KL 4000 1CA mit einer Länge von 5,5 m. Für einen konstanten Materialfluss wurde die Einrichtung um eine MAI®MULTIMIX-3D Betonpumpe mit einer Schlauchlänge von 15 m ergänzt. Am Ende des Schlauches ist ein kundenspezifisches Extruderwerkzeug (Düse) mit einer 45x12 mm² großen Öffnung angebracht. Für das Zusammenfügen der segmentierten Bewehrungsstäbe wurde ein neues Schweißgerät angeschafft. Die Platzierung der Bewehrung erfolgt in der ersten Phase jedoch manuell, bis der zweite Roboter in den Prozess integriert wird. Zur gleichzeitigen Steuerung aller Geräte - zwei Roboterarme, Betonpumpe und Schweißgerät - wird eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) als übergeordnete Steuereinheit verwendet. In der vorliegenden Studie wird die Pumpe jedoch manuell gesteuert, so dass nur der Druckweg mit der SPS programmiert wird. Mit diesem Druckaufbau wurden die im nächsten Kapitel beschriebenen ersten Experimente durchgeführt.

Inzwischen sind weitere Untersuchungen zur Vervollständigung und zum Ausbau des AMoRC-Verfahrens vorgesehen. Zur Analyse der Verbundeigenschaften zwischen Bewehrungsstäben und gedruckten Beton sind Ausziehversuche mit Bewehrung parallel quer und vertikaler zur Druckrichtung geplant. Die Tragfähigkeit von gedruckten Stahlbetonbauteilen wurde mit 4-Punkt-Biegeversuchen untersucht. Darüber hinaus ist eine systematische Untersuchung des modifizierten Lichtbogenbolzenschweißens zum Verbinden der Bewehrung geplant. Dabei werden verschiedene Möglichkeiten zum Verbinden der Stäbe mit unterschiedlichen Durchmessern in beliebigen Winkeln im Raum erforscht. Die Qualität der Schweißverbindungen wird durch Zug-, Makroschliff- und Härteversuche usw. bewertet. Schließlich werden die für die Betonextrusion und das Bewehrungsschweißen entwickelten Verfahren zu einem gleichzeitig ablaufenden Hybridverfahren kombiniert.

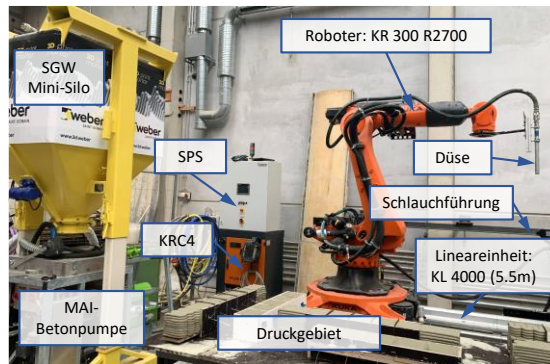


Bild 2 3D-Druckeinrichtung im Labor

3 Experimentelle Untersuchung der gedruckten Stahlbetonteile

3.1 Material

Im Versuch wurde der *Weber 3D 145-2* mit der Druckfestigkeitsklasse C35/45 von *Saint-Gobain Weber* verwendet, der aus Portlandzement CEM I, Kalkstein, Fasern, Zusatzmitteln und Zuschlägen mit einer maximalen Korngröße von 1 mm besteht. Die trockene Mischung wurde kontinuierlich mit einer Wasserdurchflussmenge von 240-250 l/h gemischt. Die Druck- (f_{cm}) und die Biegezugfestigkeit ($f_{ctm,fl}$) des in den Versuchen verwendeten Mörtels wurden an Prismen mit den Abmessungen $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ im Alter von 28 Tagen gemäß EN 196-1 [14] bestimmt.

Bei dem Versuch wurden zwei Arten von Bewehrung verwendet. Die eine ist ein konventioneller gerippter Betonstahl B500 gemäß DIN 488 [15], mit einer Streckgrenze von 500 N/mm^2 und Zugfestigkeit von 550 N/mm^2 . Die zweite Variante ist ein Bewehrungsstab, aus zusammengeschweißten Gewindebolzen ($L = 100 \text{ mm}$). Für beide Arten wurde ein Durchmesser von 10 mm gewählt, siehe Bild 3.

3.2 Versuchsprogramm

Ausziehversuch. In den Versuchen wurde der Verbund zwischen gedrucktem Beton und Bewehrung durch Ausziehversuche untersucht. Dabei wurden sowohl konventionelle Bewehrungsstäbe als auch geschweißte Gewindebolzen mit einem Durchmesser (d_s) von 10 mm untersucht, die in drei unterschiedlich Richtungen (d. h. parallel zur Druckrichtung bezeichnet als *u*-Richtung, rechtwinklig zur Druckrichtung in der Druckebene bezeichnet als *v*-Richtung, und senkrecht zur Druckebene bezeichnet als *w*-Richtung) eingelegt wurden. Die Geometrie der Probekörper ist ein Würfel mit einer Höhe von $10 \cdot d_s$ und einer Verbundlänge $l_b = 5 \cdot d_s$ gemäß RILEM RC6 [16]. Die Bewehrung mit einem Durchmesser von 10 mm und einer Länge von 350 mm wurde für die Verbundversuche verwendet. Der Bewehrungsstab hat eine Länge von 100 mm im Betonkörper, der in einen 50 mm Verbundbereich und einen 50 mm durch eine Kunststoffhülle isolierten Nichtverbundbereich unterteilt ist. Zusätzlich wurden 200 mm Bewehrungsstablängen für die spätere Platzierung im Versuchsaufbau benötigt, um die Zugkraft am Stabende aufbringen zu können. Zudem halte der Bewehrungsstab auf der lastabgewandten Seite einen Überstand von 50 mm, um dort den Schlupf mit einem induktiven Wegaufnehmer (IWA) zu messen.

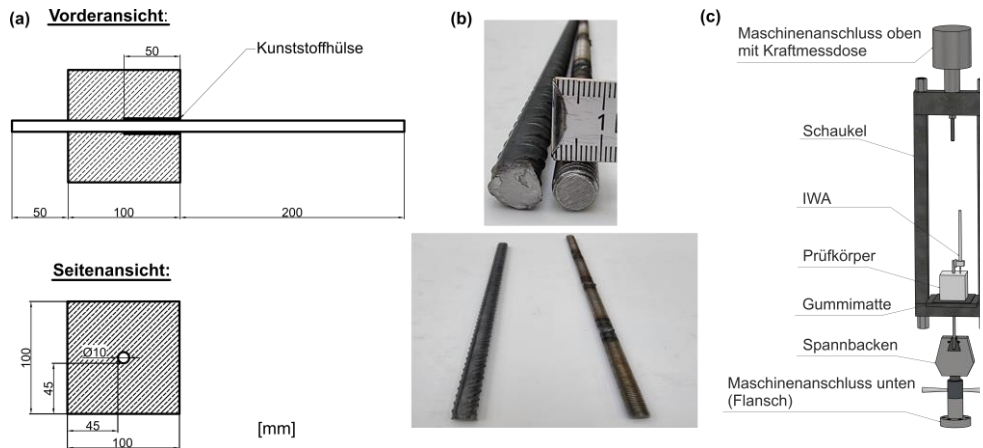


Bild 3 Ausziehversuch: (a) Geometrie des Probekörpers, (b) Bewehrungsarten und (c) Versuchsaufbau

Der Aufbau des Ausziehversuchs besteht aus einer Schaukel, die an einer 100 kN Spindelprüfmaschine Instron 5582 angeschraubt ist. Die Probe wurde an ihrem langen Bewehrungsstabe mittels Klemmbacken eingespannt und lag auf der Auflagefläche der Schaukel auf. Eine Gummimatte zwischen Probekörper und Auflagefläche sorgte für eine bessere Kraftübertragung und weniger Reibung. In der Mitte der Auflagefläche der Schaukel und der Gummimatte befand sich ein Loch, durch das der Bewehrungsstab hindurchgeführt und mit den Klemmbacken, die unten mit einem Flansch am Maschinenanschluss befestigt sind, herausgezogen werden konnte. So wurde der Bewehrungsstab am unteren Ende der Maschine gehalten und die Maschine einschließlich der Schaukel wurde während der Versuche mit einer Geschwindigkeit von 1 mm/min gesteuert. Der Schlupf des Bewehrungsstabs wurde mit einem IWA aufgezeichnet, der am kürzeren Ende der Probe angebracht war. Die Geometrie, die Bewehrungstypen und der Prüfaufbau für den Ausziehversuch sind zusammengefasst und dargestellt in Bild 3.

Tabelle 1: Übersicht über das Versuchsprogramm für den Ausziehversuch

Beschreibung	Skizze	Art der Bewehrung	Anzahl der Prüfkörper
Gegossene Probekörper		konventionell	3
Gedruckte Probekörper mit Bewehrung in u -Richtung		konventionell	3
		geschweißt	3
Gedruckte Probekörper mit Bewehrung in v -Richtung		konventionell	3
		geschweißt	3
Gedruckte Probekörper mit Bewehrung in w -Richtung		konventionell	3
		geschweißt	3
Gedruckte Probekörper mit Bewehrung in u -Richtung mit einem Zeitabstand von 1h		konventionell	3
Gedruckte Probekörper mit Bewehrung in u -Richtung mit Zeitintervall von 1h 45 min		konventionell	3

Neben der Untersuchung von Bewehrungstypen und Bewehrungsausrichtungen wurde auch der Einfluss des Zeitintervalls auf den Verbund zwischen konventioneller Bewehrung und bedrucktem Beton untersucht. Darüber hinaus wurden auch gegossene Probekörper mit konventioneller Bewehrung als Referenz hergestellt. Eine Zusammenfassung des gesamten Erfahrungsprogramms findet sich in Tabelle 1.

4-Punkt-Biegeversuch. Zur Abschätzung der gedruckten bewehrten Betonbauteile im großen Maßstab wurden Vierpunkt-Biegeversuche an Stahlbetonbalken mit einer Länge von 1600 mm, einer Breite (b) von 100 mm und Höhe (h) von 160 mm, die mit zwei normalfesten Betonstahlstäben (B500) mit einem Durchmesser von 10 mm bewehrt waren, durchgeführt. Die statische Nutzhöhe (d) des verstärkten Balkens betrug 130 mm. In den Versuchen wurden zwei gegossene und ein gedruckter Balken getestet, siehe Bild 4. Bei der gedruckten Probe besteht jede Schicht des Balkens aus zwei nebeneinander gedruckten Filamenten mit einer Schichthöhe von etwa 11 mm welche mit einer Druckgeschwindigkeit von 210 mm/s hergestellt wurden. Obwohl die Pumpeneinstellungen nicht verändert wurden, veränderte sich die Materialkonsistenz und somit die Filamentbreite während des Druckversuchs. Die Breite des gedruckten Querschnitts schwankte zwischen 140 mm (Unterseite) und 120 mm (Oberseite). Die Bewehrung wurde manuell zwischen der zweiten und dritten Lage mit einer Betonüberdeckung von 25 mm eingelegt. Nach dem Druck wurde das Bauteil an beiden Enden auf eine Trägerlänge von 1600 mm abgeschnitten. Außerdem wurde mit Gips eine glatte Oberfläche für die Krafteinleitung geschaffen.

Die Balken wurden in einem Abstand von 1500 mm auf zwei Rollenlagern gelagert. Die Durchbiegungen der Probekörper wurden mit zwei IWA in Feldmitte gemessen. Die Prüfkraften wurden mittig mit der Maschine Instron 5582 an zwei Punkten in einem Abstand von 150 mm mit einer Prüfgeschwindigkeit von 0,5 mm/min aufgebracht.

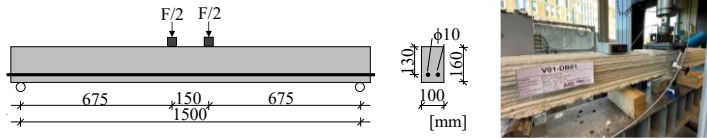


Bild 4 Prüfaufbau, Geometrie und Bewehrung der Probekörper für 4-Punkt-Biegeversuche

3.3 Versuchsergebnisse

Materialprüfung. Die gemessene Druckfestigkeit der Halbprismen wird mit Gleichung (1) und (2) in die Druckfestigkeit (d.h. Würfel mit 150 mm Kantenlänge und Zylinder mit 150 mm Durchmesser und 300 mm Höhe gemäß [17]), zur Einteilung in Betondruckfestigkeitsklassen, umgerechnet:

$$f_{ck,cyl} = (f_{c,pr} \cdot 0.9 - 8) \cdot 0.92 \quad (1)$$

$$f_{ck,cube} = (f_{c,pr} \cdot 1.06 - 8) \cdot 0.92 \quad (2)$$

wobei $f_{ck,cyl}$ und $f_{ck,cube}$ die charakteristischen Werte der Betondruckfestigkeit von Zylinder- bzw. Würfelproben sind; und $f_{c,pr}$ der Mittelwert der geprüften Druckfestigkeit der Halbprismen. Die Faktoren 0,9 und 1,06 stammen aus eigenen Versuchsergebnissen [18] die sich zur Umrechnung der Druckfestigkeit von Prismen in Zylinder- oder Würfel Druckfestigkeit gemäß [19] bewährt haben. Der Wert 8 ist die Differenz zwischen charakteristischen und Mittelwerten, während der Faktor 0,92 ein Kalibrierungswert für die Aushärtung von Beton in Luft statt in Wasser auf der Grundlage von DIN 1045-2 ist [20].

Die Proben wurden an verschiedenen Drucktagen hergestellt und der Wasserdurchfluss variierte zwischen 240-250 l/h. Die gemessenen Biege- und Druckfestigkeiten aller Probekörper sind zusammengefasst in Tabelle 2 und Tabelle 3 aufgelistet.

Ausziehversuch. Die vorhandene Verbundspannung τ die während der Versuche auftritt, kann anhand der aufgetragenen Kraft F bezogen auf die Verbundfläche $A_b = U_b \cdot l_b$ mit Gleichung (3) berechnet werden [16]:

$$\tau = \frac{F}{U_b \cdot l_b} \cdot \frac{f_{cm}}{f_c} = \frac{F}{\pi d_s \cdot 5d_s} \cdot \frac{f_{cm}}{f_c} \quad (3)$$

wobei f_{cm} der Mittelwert der Betondruckfestigkeitsklasse ist (hier=43 N/mm²), und f_c der Mittelwert der geprüften Probekörper. Mit dem Faktor $\frac{f_{cm}}{f_c}$ wird Einfluss der Zielfestigkeit (f_{cm}) zu tatsächlicher Festigkeit im Versuch (f_c) auf Verbundfestigkeit erfasst. Der Faktor $\frac{f_{cm}}{f_c}$ kann auch auf das Verhältnis

der charakteristischen Werte übertragen werden $\frac{f_{ck}}{f_c}$, wobei f_c hier den charakteristischen Wert der geprüften Ergebnisse bezeichnet und nach Gleichungen (1) oder (2) berechnet werden kann.

Bei den Ausziehversuchen gab es verschiedene Versagensarten: (a) Spaltrissversagen (SR), bei dem eine Spaltung des Betons aufgrund unzureichenden Umschnürungswirkung des Betons eintritt; (b) Schweißnahtversagen (SN), bei dem die Schweißnähte während der Versuche brechen; und (c) Scherbruchversagen (SB) aufgrund der Ablösung der Bewehrung vom umgebenden Beton. Bei den beiden erstgenannten Versagensarten handelt es sich um spröde Versagensarten, während es sich bei dem letztgenannten um duktiles Versagen handelt, siehe Bild 5. Bei Ausziehversuchen wird das Scherbruchversagen bevorzugt, um den Verbund zwischen Bewehrung und Beton zu untersuchen.

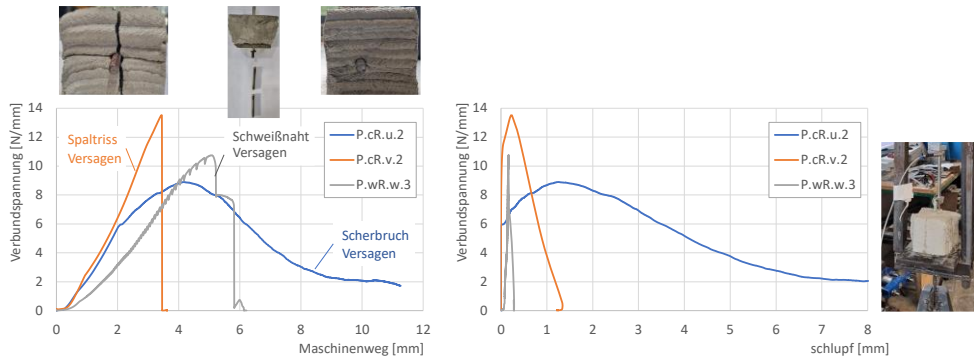


Bild 5 Ergebnisse des Ausziehversuchs: (a) Beziehung zwischen Verbundspannung und Maschinenweg; (b) Beziehung zwischen Verbundspannung und Schlupf; (c) Prüfaufbau

Ein Überblick über die Prüfergebnisse einschließlich Versagensart, maximaler Kraft (F_{max}), maximale Verbundspannung (τ_{max}), Schlupf bei maximaler Verbundspannung (S_0) und die Betondruckfestigkeit ($f_{ck,cyl}$) sind aufgeführt in Tabelle 2. Die Beschriftung der Probekörper kennzeichnet die wichtigsten Parameter der Versuche. Der erste Buchstabe P und C steht für gedruckte (printed) bzw. gegossene (cast) Probekörper. Die Bewehrungsarten werden mit cR für konventionelle Bewehrung und wR für geschweißte Bewehrung angegeben. Die Bewehrungsausrichtung (u , v und w) und die Probennummerierung (1 , 2 und 3) sind ebenfalls in der Kennzeichnung enthalten.

Es konnte festgestellt werden, dass die auf dem Gießverfahren basierende Betongeometrie ein Scherbruchversagen der gedruckten Probekörper nicht garantieren kann. In den Versuchen dominierte das Spaltrissversagen, was zu einer Unterschätzung der Verbundspannung führt. Zur Verbesserung der Ergebnisse und zur Vermeidung von Spaltrissversagen sollte die Probengeometrie geändert. Die gedruckten Probekörper, welche geringere Abmessungen hatten, werden mit Vergussbeton in Würfel mit einer Kantenlänge von 200 mm vergossen. Darüber hinaus konnte festgestellt werden, dass die Schweißnähte Schwachstellen der Bewehrung sind, was ebenfalls zu einer geringen Bemessung der Verbundspannung führt. Das Schweißnahtversagen kann in zwischen durch die Optimierung des Prozesses weitestgehend vermieden werden. In weiteren Untersuchungen werden Zugversuche an geschweißten Bewehrungsstäben durchgeführt. Die Schweißnähte werden nur im Bereich der Verbundlänge eingebettet wobei der Rest der Bewehrung durchgehend ist. Auf diese Weise könnte der Einfluss der Schweißnähte auf das Verbundverhalten untersucht werden, ohne dass die Schweißnähte außerhalb des Verbundbereichs brechen.

Aus der Tabelle 2 geht hervor, dass die gedruckten und gegossenen Proben im Allgemeinen eine ähnliche Verbundfestigkeit aufweisen. Die konventionelle und geschweißte Bewehrung zeigen jedoch ein unterschiedliches Verhalten in u - und v -Richtung. Dennoch weisen die Ergebnisse in diesen Reihen große Streuungen auf, was weitere Untersuchungen erfordert, um eine plausible Schlussfolgerung zu erhalten. Darüber hinaus führt ein Zeitintervall von mehr als 1 Stunde zu einer drastischen Abnahme der Verbundspannung.

Tabelle 2 Übersicht über die Ausziehversuchsergebnisse

Beschriftung	Versagensarten	F_{max} [kN]	τ_{max} [N/mm ²]	Mittlerer Wert von τ_{max} in einer Serie [N/mm ²]	S_0 [mm]	$f_{ck,cyl}$ [N/mm ²]
C.cR.1	SR	18.81	10.18		1.14	41.08
C.cR.2	SR	16.39	8.87	9.28	0.95	41.08
C.cR.3	SR	16.23	8.78		0.46	41.08
P.cR.u.1	SB	14.13	9.00		1.31	35.4
P.cR.u.2	SB	13.98	8.90	10.53	1.26	35.4
P.cR.u.3	SR	25.30	13.69		0.21	41.08
P.cR.v.1	SR	13.98	7.56		0.16	41.08
P.cR.v.2	SR	21.23	13.52	8.76	0.22	35.4
P.cR.v.3	SB	8.15	5.19		1.04	35.4
P.cR.w.1	SR	26.97	14.59		0.76	41.08
P.cR.w.2	SR	20.99	11.36	12.90	0.22	41.08
P.cR.w.3	SR	23.55	12.74		0.12	41.08
P.cR.u.1h.1	SR	10.71	5.80		0.18	41.08
P.cR.u.1h.2	SR	10.62	5.75	5.74	0.18	41.08
P.cR.u.1h.3	SR	10.49	5.68		0.04	41.08
P.cR.u.1h45.1	SR	7.91	4.28		0.03	41.08
P.cR.u.1h45.2	SR	6.88	3.72	4.01	0.32	41.08
P.cR.u.1h45.3	SR	7.43	4.02		0.38	41.08
P.wR.u.1	SB	7.54	4.08		0.25	41.08
P.wR.u.2	SR	21.53	11.65	8.04	0.40	41.08
P.wR.u.3	SB	15.49	8.38		0.31	41.08
P.wR.v.1	SR	22.69	12.28		0.04	41.08
P.wR.v.2	SN	22.62	12.24	11.95	0.66	41.08
P.wR.v.3	SR	20.96	11.34		0.09	41.08
P.wR.w.1	SN	24.57	13.30		0.19	41.08
P.wR.w.2	SN	22.49	12.17	12.07	0.53	41.08
P.wR.w.3	SN	19.86	10.75		0.16	41.08

4-Punkt-Biegeversuch. In der Tabelle 3 sind die Prüfergebnisse sowie die Balkengeometrie, Betondruckfestigkeit $f_{ck,cyl}$ und Biegezugfestigkeit $f_{ctm,fl}$ zusammengefasst. Um Abweichungen in den Querschnittsabmessungen zu berücksichtigen, wird die auftretende Querkraft auf die Breite und die effektive Tiefe des jeweiligen Trägers normiert.

Tabelle 3 Übersicht über die Ergebnisse der 4-Punkt-Biegeversuch

Beschriftung	F_{max} [kN]	V_{max} [kN]	V_{max}/bd [kN]	h [mm]	b [mm]	Wasser [l/h]	$f_{ck,cyl}$ [MPa]	$f_{ctm,fl}$ [MPa]
V01-DB01	32.4	16.2	1.04	150-160	120-140	250	45.96	7.5
V01-GB01	30.1	15.1	1.16	160	100	250	45.96	7.5
V01-GB02	34.4	17.2	1.32	160	100	240	48.78	7.8

Die Beziehungen zwischen normierter Lastspannung und Durchbiegung sowie die Rissbilder der geprüften Balken sind in Bild 6 dargestellt. Bei allen Trägern waren Biegerisse in der Mitte der Spannweite sichtbar. Bei beiden konventionell gegossenen Trägern kam es aufgrund der fehlenden Schubbewehrung zu einem spröden Scherversagen. Das Last-Verformungsverhalten des gedruckten Trägers zeigte jedoch ein ausgeprägtes horizontales Plateau, an dem die Bewehrung zu fließen begann. Das Verhältnis zwischen der normierten Tragfähigkeit des gedruckten und des konventionell hergestellten Probekörpers betrug $1,04/1,16 = 0,90$. Der Probekörper mit einer steiferen Betonkonsistenz (Wassergehalt 240 l/h anstelle von 250 l/h) konnte eine höhere Traglast aufnehmen.

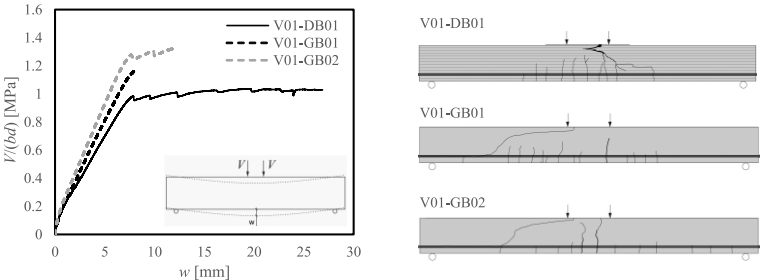


Bild 6 Beziehung zwischen normierter Lastspannung und Durchbiegung der geprüften Balken und deren Rissbilder

Für eine allgemeine Aussagen zur Tragfähigkeit gedruckter Bauteile sind weitere systematische Versuchsprogramme notwendig. Diese erste vorläufige Versuchsreihe zeigt jedoch, dass die Tragfähigkeit von additiv gefertigten Bauteilen nahe an der Tragfähigkeit von konventionell gefertigten Bauteilen liegt. Die beiden gegossene Balken zeigten kritische Schubrisse beim Versagen, die aufgrund der fehlenden Querkraftbewehrung zu einem spröden Versagen führten, während der gedruckte Balken von Biegerissen dominiert wurde, die zu einem duktilen Versagen führten. In weiteren Versuchsreihen müssen Parameter wie die Probenabmessungen und die Bewehrungsmenge angepasst werden, um ein gleiches Versagen bei allen Proben zu erreichen.

4 Schlussfolgerung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde die Entwicklung und Durchführung eines neuartigen AM-Verfahrens für die Herstellung von Stahlbeton vorgestellt. Bei dem hybriden AMoRC-Verfahren werden segmentierte Stahlbewehrungsstäbe mit Hilfe eines Bolzenschweißverfahrens zu einem dreidimensionalen Bewehrungsnetz gefügt, welches anschließend umdruckt wird. Das Konzept, dessen generelle Machbarkeit mit prototypischen Studien nachgewiesen wurde, wurde mit dem Ziel entwickelt, ein nachhaltigeres Bauverfahren zu entwickeln, das den Anforderungen von Baustellen und Fertigteilwerken entspricht. Der entscheidende Vorteil des entwickelten Verfahrens im Vergleich zu bisherigen Ansätzen für den 3D-Druck von Stahlbeton ist die Möglichkeit, den Schweißprozess und den Betonextrusionsprozess so einzustellen, dass sie mit identischen Vorschubgeschwindigkeiten arbeiten. Die Synchronisation beider Prozesse ermöglicht ihre Kombination in einem Hybriddruckkopf oder in einem Gesamtprozess mit zwei Robotern zur Herstellung von Stahlbeton.

Vorläufige Versuche deuten darauf hin, dass die Tragfähigkeit der additiv gefertigten Bauteile nahe an der Tragfähigkeit von konventionell gefertigten Bauteilen aus dem in diesem Versuchsprogramm verwendeten Material liegt. Um eine zufriedenstellende strukturelle Leistung des Verbundwerkstoffs zu

gewährleisten, sind weitere Forschungen erforderlich. Diese sollen das Verbundverhalten zwischen Bewehrung und Beton systematisch untersuchen, wobei insbesondere das Scherbruchverhalten im Fokus steht. Hierbei wird die selbst entwickelte gabelförmige Düse mit modifizierter Probengeometrie verwendet. Darüber hinaus wird eine Querkraftbewehrung in die gedruckten Balken integriert, um das Querkraftverhalten der gedruckten Balken zu untersuchen.

5 Quellen

- [1] B. Khoshnevis, “Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies,” *Automation in Construction*, vol. 13, no. 1, pp. 5–19, 2004, doi: 10.1016/j.autcon.2003.08.012.
- [2] S. C. Paul, G. P. van Zijl, M. J. Tan, and I. Gibson, “A review of 3D concrete printing systems and materials properties: current status and future research prospects,” *Rapid Prototyping Journal*, vol. 24, no. 4, pp. 784–798, 2018, doi: 10.1108/RPJ-09-2016-0154.
- [3] L. Gebhard, L. Esposito, C. Menna, and J. Mata-Falcón, “Inter-laboratory study on the influence of 3D concrete printing set-ups on the bond behaviour of various reinforcements,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 133, p. 104660, 2022, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104660.
- [4] S. Lim, R. A. Buswell, T. T. Le, S. A. Austin, A. Gibb, and T. Thorpe, “Developments in construction-scale additive manufacturing processes,” *Automation in Construction*, vol. 21, pp. 262–268, 2012, doi: 10.1016/j.autcon.2011.06.010.
- [5] R. A. Buswell, W. R. Leal de Silva, S. Z. Jones, and J. Dirrenberger, “3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research,” *Cement and Concrete Research*, vol. 112, pp. 37–49, 2018, doi: 10.1016/j.cemconres.2018.05.006.
- [6] M. Meurer and M. Classen, “Mechanical Properties of Hardened 3D Printed Concretes and Mortars-Development of a Consistent Experimental Characterization Strategy,” *Materials*, vol. 14, no. 4, p. 752, 2021, doi: 10.3390/ma14040752.
- [7] V. Mechtcherine et al., “Integrating reinforcement in digital fabrication with concrete: A review and classification framework,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 119, p. 103964, 2021, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2021.103964.
- [8] E. Lloret-Fritsch et al., “From Smart Dynamic Casting to a growing family of Digital Casting Systems,” *Cement and Concrete Research*, vol. 134, 2020, doi: 10.1016/j.cemconres.2020.106071.
- [9] H. Kloft, M. Empelmann, N. Hack, E. Herrmann, and D. Lowke, “Reinforcement strategies for 3D-concrete-printing,” *Civil Engineering Design*, vol. 2, no. 4, pp. 131–139, 2020, doi: 10.1002/cend.202000022.
- [10] F. P. Bos, Z. Y. Ahmed, R. J. M. Wolfs, and T. A. M. Salet, “3D Printing Concrete with Reinforcement,” in *High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet*, D. A. Hordijk and M. Luković, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2018, pp. 2484–2493.
- [11] M. Classen, J. Ungermann, and R. Sharma, “Additive Manufacturing of Reinforced Concrete—Development of a 3D Printing Technology for Cementitious Composites with Metallic Reinforcement,” *Applied Sciences*, vol. 10, no. 11, p. 3791, 2020, doi: 10.3390/app10113791.
- [12] M. Claßen, J. Claßen, and R. Sharma, “Konzeptionierung eines praxisorientierten 3D-Druckverfahrens für den Verbundwerkstoff Stahlbeton (AMoRC),” *Beton und Stahlbetonbau*, vol. 115, no. 12, pp. 934–942, 2020, doi: 10.1002/best.202000023.
- [13] S. Zhang, M. Kalus, S. Engel, J. Hegger, and M. Claßen, “Development of an Innovative 3D-Printing Process for Reinforced Concrete – AMoRC Method,” in *International RILEM Conference on Synergising Expertise towards Sustainability and Robustness of Cement-based Materials and Concrete Structures*, Milos Island, Greece, 2023, pp. 641–652, doi: 10.1007/978-3-031-33187-9_59.
- [14] Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit: Deutsche Fassung EN 196-1:2016, DIN EN 196-1:2016-11, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Nov. 2016.
- [15] Betonstahl - Teil 1: Stahlsorten, Eigenschaften, Kennzeichnung, DIN 488-1:2009-08, Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), Berlin, Aug. 2009.
- [16] RILEM, Bond test for reinforcement steel: 2. Pull-out test, 1983.
- [17] Prüfung von Festbeton - Teil 1: Form, Maße und andere Anforderungen für Probekörper und Formen: Deutsche Fassung EN 12390-1:2012, DIN EN 12390-1:2012-12, Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), Berlin, Dec. 2012.

- [18] J. Bielak, "Shear in slabs with non-metallic reinforcement," Dissertation, Lehrstuhl und Institut für Massivbau, RWTH Aachen University, Aachen, 2021.
- [19] Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern: Deutsche Fassung EN 12390-3:2019, DIN EN 12390-3:2019-10, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, Oct. 2019.
- [20] Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1, DIN 1045-2:2008-08, Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), Berlin, Aug. 2008.