

IAB-TAGE >>BETON<< 2025

Monolithischer Beton-3D-Druck - **Fortschritte und Herausforderungen**

Dipl.-Ing. Florian Storch¹
Dipl.-Ing. Julian Taesch¹
Dipl.-Ing. Paul Plaschnick²
Prof. Dr.-Ing. Frank Will^{1,2}

¹ Construction Future Lab gGmbH, Dresden



² Professur für Baumaschinen, Technische Universität Dresden, Dresden



Beim monolithischen Beton-3D-Druck führt ein Manipulator den Druckkopf entlang einer definierten Trajektorie. Der Druckkopf extrudiert schichtweise den Beton und hält diesen bis zum Erreichen der Grünstandfestigkeit in Form. Die Besonderheit des Verfahrens besteht darin, dass der Schichtquerschnitt in einem Arbeitsschritt vollflächig ausgetragen wird. Dies ermöglicht den Einsatz grobkörniger Betone. Auf Grund der komplexen Wechselwirkungen zwischen Material, Maschine Prozessführung unterliegt der Druckkopf kontinuierlichen Weiterentwicklungen. Der Beitrag präsentiert, mit dem Fokus auf Vielseitigkeit in der Baustoffverarbeitung, Automatisierung und Bewehrungsintegration, anhand von Versuchsergebnissen aktuelle Druckkopfontwicklungen für den monolithischen Beton-3D-Druck.

1 Beton und Druckkopf

Während des Beton-3D-Druckprozesses durchläuft der Beton mehrere Phasen, in denen jeweils spezifische Materialeigenschaften erforderlich sind. Die Phasen sind [8]:

- die Herstellung und der Transport,
- das Fördern (pumpen) zum Druckkopf
- die Extrusion und der Einbau durch den Druckkopf,
- und die abschließende Erhärtung nach der Ablage.

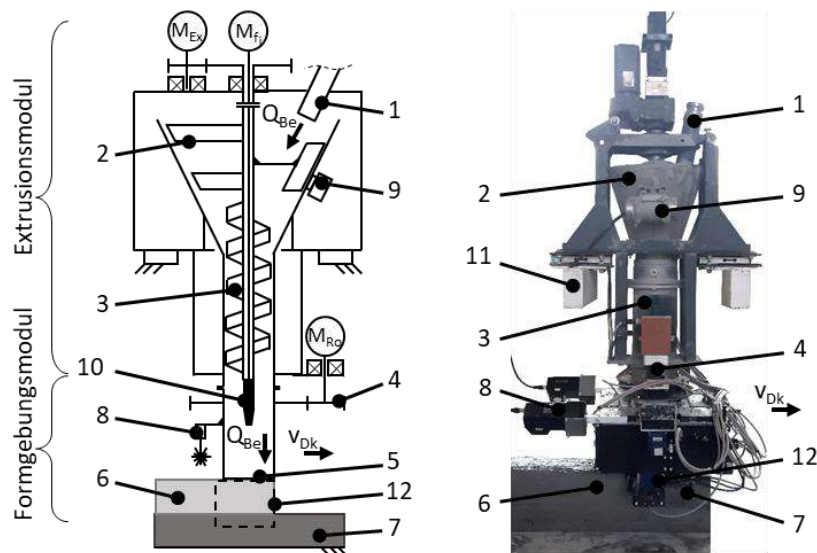
Das rheologische Verhalten des Betons in den einzelnen Prozessschritten wird durch das BINGHAM-Modell beschrieben, das die statische Fließgrenze und die Viskosität berücksichtigt, ergänzt durch den Wachstumscoeffizienten der statischen Fließgrenze [1]; [8]; [17]. Der verwendete Beton gemäß Tabelle 1 erfüllt die Anforderungen an ein 3D-druckfähiges Material mit grober Gesteinskörnung [9]; [16]; [19].

Tabelle 1: Zusammensetzung Beton – 16 mm Größtkorn nach [9]; [16]; [19]

Komponenten	Masse [kg/m ³ _{Beton}]
CEM II/C-M (S-LL) 42,5 N	464,0
Quarzsand BCS 413 0,06/0,2	136,5
Sand 0/2	516,4
Sand 2/4	286,6
Kies 4/8	266,5
Kies 8/16	415,1
Wasser	208,8
PCE-Fließmittel	nach Bedarf

Der Beton (Tabelle 1) wird mit dem Druckkopf aus Bild 1 verarbeitet. Der Druckkopf ist das Werkzeug zum Betoneinbau und besteht aus zwei Hauptbaugruppen, siehe Bild 1. Das Extrusionsmodul dosiert die Betonextrusion in Abhängigkeit der Druckkopfgeschwindigkeit und dem zu formenden Querschnitt. Das Formgebungsmodul bringt den extrudierten Betonstrang in die gewünschte Form und sorgt für dessen Stabilisierung, bis die notwendige Grünstandfestigkeit erreicht ist.

Über die Förderleitung (1) wird der Beton zum Reservoir des Extrusionsmoduls (2) gepumpt. Das Rührwerk im Reservoir durchmischt den Beton nach dem Pumpen erneut. Anschließend dosiert der Schneckenextruder (3) das Material und übergibt es an das Formgebungsmodul. Der Portalroboter (12) bewegt den Druckkopf (v_{Dk}) entlang des gewünschten Druckpfades und legt die aktuelle Schicht (6) auf der vorherigen Schicht (7) ab. Der Rotationsantrieb (4) stellt die Orientierung der Austrittsöffnung (5) nach.



Q_{Be} Betonvolumenstrom; v_{Dk} Druckkopfgeschwindigkeit;
 1 Förderleitung; 2 Rührwerk (mit Abstreifer) im Reservoir; 3 Schneckenextruder; 4 Rotationsantrieb; 5 Austrittsöffnung;
 6 aktuelle Schicht; 7 vorherige Schicht; 8 Laser-(profil-)scanner; 9 Außenrüttler; 10 Flaschenrüttler; 11 Portalroboter;
 12 bewegliche Führungselemente

Bild 1: Druckkopf nach [15]

Während der Ablage zeichnet das System aus Laser-(profil-)scannern die aktuelle Schichtgeometrie auf. Die Daten dienen der Dokumentation und Basis einer Austragsratenregelung. Die beweglichen Führungselemente (13) ermöglichen die Einstellung der Strangbreite und erlauben die Ausformung verschiedener Gebäudeelemente, bspw. Ecken.

Bild 1 zeigt exemplarisch die Montage eines Außenrüttlers (10) am Reservoir (2) oder die Integration eines Flaschenrüttlers (11) nahe der Austrittsöffnung (5) zur Vibrationsanregung des Betons während des Verarbeitungsprozesses [15]; [19].

2 Extrusionsmodul

Für die Verarbeitung grobkörniger Betone (Größtkorn ≥ 4 mm) wird häufig ein Extruder zur Dosierung der Betonaustragsrate eingesetzt. Das Bild 2 zeigt das Extrusionsmodul des Druckkopfes (Bild 1) im Detail. Es ist zu erkennen, dass die Wendel der Extruderschnecke (1) bis in das Materialreservoir (2) hineinragt. In Verbindung mit den Rührwerksflügeln und dem Abstreifer (Anstellwinkel etwa 30° , 3) wird der Materialeinzug in den Schneckenkanal verbessert, da neben der Gewichtskraft des Materials dieses aktiv in die Einzugszone gedrückt wird. Die verlängerte Schneckenwendel greift das Material effektiver auf [6].

Die Werkstoffpaarung des Schnecke-Stator-Systems ist eine Stahlschnecke (1) in einem EPDM-Stator (4). Dies führt zu einer deutlichen Verschleißminderung und Steigerung der prozesssicheren Verarbeitbarkeit grobkörniger Betone (bspw. Tabelle 1), da ein Blockieren/Verkleben des Extruders vermieden wird [14]. Die Abmessungen des Schneckenkanals entsprechen ca. dem 3-fachen Größtkorndurchmesser (in Millimetern).

Zusätzlich kann die Extrusion durch eine Vibrationsanregung des Materials (5, 6) unterstützt werden, da diese das Fließvermögen steigert [15]; [19].

Das gezeigte Extrusionsmodul erlaubt die prozesssichere Verarbeitung verschiedener 3D-druckfähiger Baustoffe (bspw. Lehm oder Beton) mit Größtkörnern von 1,2 mm bis 16 mm (Tabelle 1) [4]; [9]; [19].

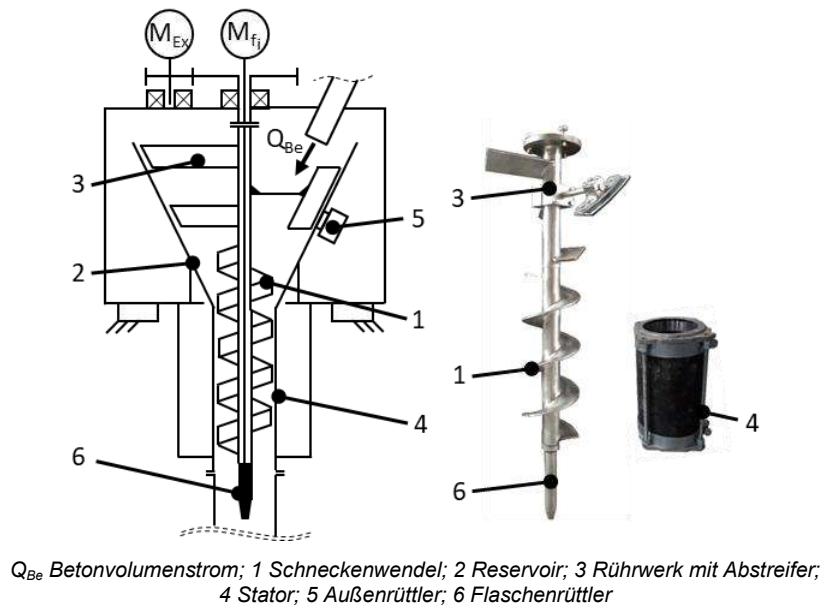


Bild 2: Extrusionsmodul mit Schneckenextruder

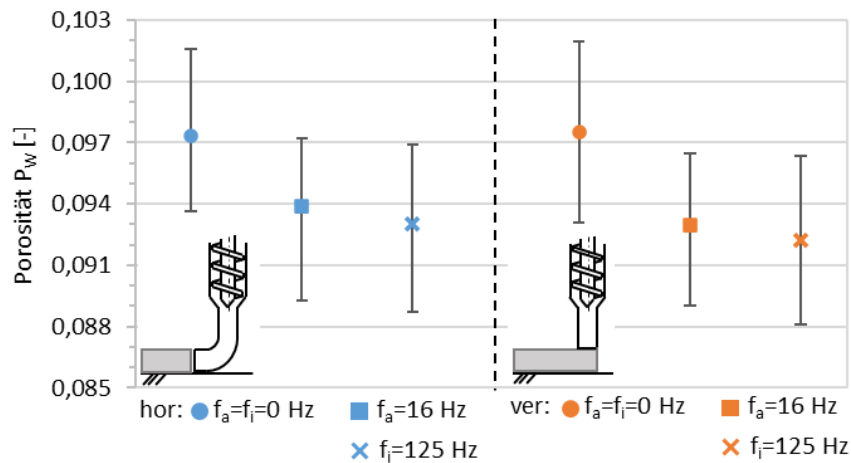
3 Formgebungsmodul

3.1 Oberflächenqualität

Während des Einbaus des Werkstoffes durch das Formgebungsmodul ist die Oberflächenqualität ein wichtiges Gütekriterium der Strangablage. Beim Einbau grobkörniger Materialien, bspw. Tabelle 1, kommt es auf Grund des geringeren Feinanteil eher zur Poren- oder Rissbildung auf der Oberfläche, welche ästhetische Ansprüche verfehlen bzw. den Widerstand gegen das Eindringen von Schadstoffen schwächen [5]; [15]; [19]. Derartige Poren und Risse sollen durch einen Vibrationseintrag während des Druckprozesses geschlossen werden.

Anhand der offenen Porosität einzelner, gedruckter Betonstränge vergleicht das Bild 3 den Einfluss verschiedener Einbauprozesse und Konfigurationen des Formgebungsmoduls auf die Qualitätssteigerung. Es werden zwei Einbausituationen unterschieden. Zum einen die horizontale Ablage, bei der sich die Austrittsöffnung innerhalb der zu druckenden Schicht befindet und zum anderen der vertikale Einbau, bei dem die Austrittsöffnung oberhalb der zu druckenden Schicht liegt, vgl. Bild 3. Die Stichprobenzahl beträgt je gezeigter Konfiguration sechs. Die offene Porosität ist das Verhältnis des Hohlraumvolumens offener Poren zum Gesamtvolumen des Probekörpers. Offene Poren sind Poren oder Kapillare zu denen die Luft oder eine Flüssigkeit einen direkten Zugang hat [5].

In Bild 3 ist zu erkennen, dass die Mittelwerte der Porosität vibrierter Betonstränge (blaue und orangene Rechtecke bzw. Kreuze) um ca. 4 bis 5 % geringer sind als die Mittelwerte nicht vibrierter Betonstränge (blauer bzw. orangener Kreis). Dies deutet auf den Verschluss von Poren während des 3D-Druckprozesses hin, da die Porosität gesunken ist. Jedoch fällt die Verdichtungswirkung sehr gering aus, da die Einwirkdauer der Vibration auf Grund der Fließgeschwindigkeit des Materials im Formgebungsmodul nur wenige Sekunden beträgt [5]; [20].



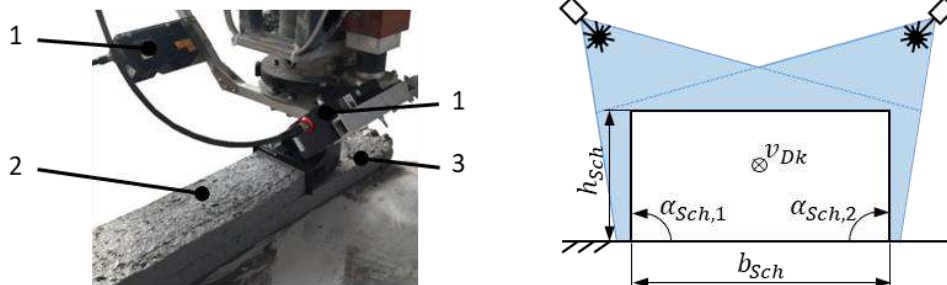
f_a Außenrüttelfrequenz; f_i Innenrüttelfrequenz; hor horizontale Ablage; ver vertikaler Einbau

Bild 3: Offene Strangporosität unter Vibrationseinfluss

Der Einbauprozess (horizontale Ablage oder vertikaler Einbau) sowie die Einleitungsorte der Vibration haben keinen signifikanten Einfluss auf die Porositätsminderung, da alle Mittelwerte (blaue und orangene Rechtecke bzw. Kreuze) im Bereich von 0,093 liegen.

Die Ergebnisse zur offenen Porosität gedruckter Betonstränge zeigen, dass ein Vibrationseintrag während des Druckprozesses die Porosität der Oberfläche mindert und die Ausführungsqualität steigt. Auf Grundlage von Bild 3 ist anzunehmen, dass der Betonstrang während der Ablage verdichtet wird.

3.2 Regelung der Betonaustragsrate



b_{Sch} Schichtbreite; h_{Sch} Schichthöhe; v_{Dk} Druckkopfgeschwindigkeit; $\alpha_{Sch,1}$ Flankenwinkel 1; $\alpha_{Sch,2}$ Flankenwinkel 2; 1 Lasermesskopf; 2 aktuelle Schicht; 3 vorherige Schicht

Bild 4: Geometriemessung mit Laserprofilscanner

Ein wesentliches Gütekriterium beim Beton-3D-Druck ist die abgelegte Stranggeometrie bzw. deren Maßhaltigkeit. Bild 4 zeigt ein System aus Laserprofilscannern (1) zur Erfassung der Stranggeometrie. Diese arbeiten nach dem Lichtschnittprinzip, d.h. das Höhenprofil des abgelegten Stranges (2) wird entlang einer projizierten Laserlinie vermessen. Die Anordnung von zwei Laserprofilscannern kann die Strangkontur ohne Verschattung erfassen. Aus dem detektierten Schichtquerschnitt lassen sich Messgrößen, wie die Schichtbreite b_{Sch} , -höhe h_{Sch} oder die Flankenwinkel $\alpha_{Sch,1}$ und $\alpha_{Sch,2}$ ableiten.

In den Diagrammen aus Bild 5 ist die detektierte Schichtgeometrie entlang der Schichtlänge dargestellt. Die rechteckige Sollgeometrie beträgt 150 x 50 mm [Schichtbreite x Schichthöhe] und die Sollflankenwinkel 90°. Die Tabelle 2 fasst die maximalen relativen Abweichungen zu den jeweiligen Sollwerten zusammen.

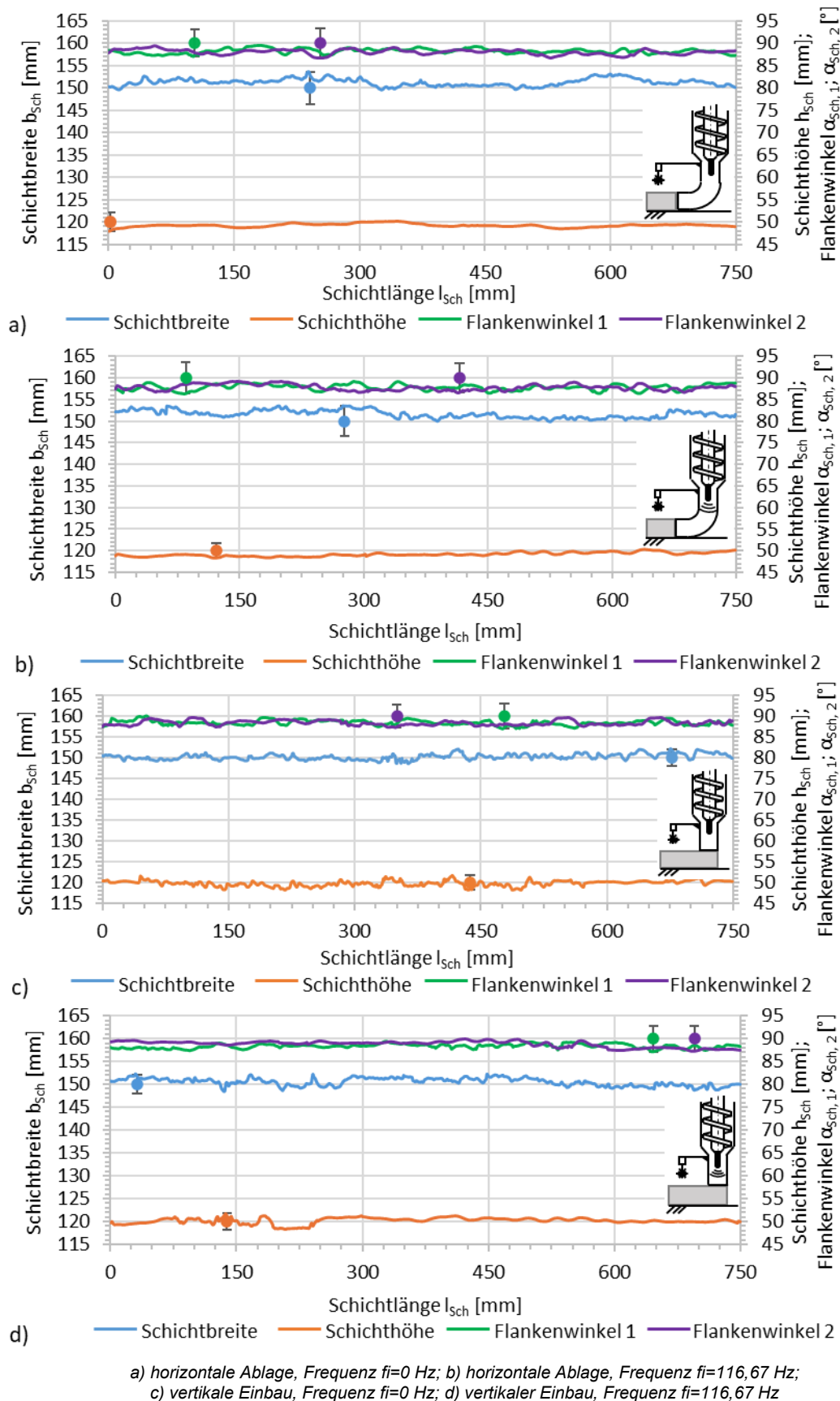


Bild 5: Maßhaltigkeit der Stranggeometrie ohne Regelung der Betonaustragsrate

Die Messstellen der größten Abweichungen sind in den Verläufen mit Kreisen und entsprechenden Fehlerindikatoren markiert.

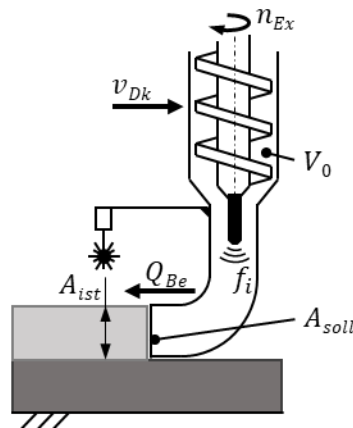
Aus den Graphen des Bildes 5 geht hervor, dass die Orte größter Abweichungen zufällig auftreten und ihr Betrag entlang der Schichtlänge schwankt. Die verschiedenen Konfigurationen zeigen ein ähnliches Verhalten. Die erkennbaren Abweichungen der Stranggeometrie sind auf Unregelmäßigkeiten der Betonaustragsrate zurückzuführen. Die hochfrequenten Abweichungen (Rauschen) ergeben sich aus der Oberflächenrauigkeit und verbleibenden Poren der abgelegten Betonstränge.

Die Ursache für die Abweichungen in der Stranggeometrie liegt in der schwankenden Konsistenz des Materials. Zum einen können nach dem Mischvorgang innerhalb des Materials Bereiche mit unterschiedlicher Konsistenz bestehen. Zum anderen kann es während der Verarbeitung zu Entmischungsprozessen kommen, die die Konsistenz verändern. In beiden Fällen führt dies dazu, dass das Material entweder weicher oder steifer reagiert, was wiederum den Förderwiderstand beim Extrudieren verringert oder erhöht [2]; [5]; [7]; [11]. Beton ist ein heterogenes Material, weshalb sich selbst bei gleichbleibender Konsistenz die Reibungsverhältnisse innerhalb des Materials sowie an den Wandungen der Förderelemente verändern können. Ursache dafür ist eine ungleichmäßige Partikelverteilung im Förderquerschnitt [5]; [11]. Die Betonaustragsrate schwankt und die extrudierte Stranggeometrie weicht von der Sollgeometrie ab.

Tabelle 2: Relative Messabweichung der Stranggeometrie – ohne Regelung

Frequenz [Hz]	relative Messabweichung des/der			
	Flanken- winkels [%]	Schicht- breite [%]	Schicht- höhe [%]	Flanken- winkels [%]
horizontale Ablage				
0	-3,31	2,42	-4,05	-3,69
116,67	-4,08	2,37	-3,37	-3,83
vertikaler Einbau				
0	-3,05	2,11	-1,82	-2,72
116,67	-3,17	1,53	3,43	-3,04

In Bezug auf die Sollgeometrie des Stranges ergeben sich aus den maximalen relativen Abweichungen gemäß Tabelle 2 folgende absolute Toleranzen: $\pm 3,9$ mm bei einer Sollschichtbreite von 150 mm, ± 2 mm bei einer Sollsichthöhe von 50 mm sowie $\pm 3,9^\circ$ bei einem Sollflankenwinkel von 90° . Aus den Verläufen des Bildes 5 geht hervor, dass die Flankenwinkel stets geringer als 90° sind, wodurch sich ein charakteristischer trapezförmiger Querschnitt nach der Ablage ergibt. Ursache ist der fließfähige (pastöse) Zustand bei der Materialablage. Infolge des Eigengewichts des Stranges wird dieser deformiert [7]; [12]. Durch die Regelung der Betonaustragsrate sollen die Schwankungen der Schichtgeometrie geglättet werden und Abweichungen möglichst minimiert werden, um die Ausführungsqualität zu verbessern. Zudem wird die Prozessführung erleichtert, da manuelle Eingriffe in den Druckprozess entfallen. Für die Regelung der Betonaustragsrate wird anhand des Bildes 6 ein Regelkreis abgeleitet.



A_{ist} Istquerschnitt; A_{soll} Sollquerschnitt; f_i Innenrüttlerfrequenz; n_{Ex} Extruderdrehzahl; Q_{Be} Betonvolumenstrom; v_{Dk} Druckkopfgeschwindigkeit; V_0 Schluckvolumen

Bild 6: Funktionsprinzip der Betonaustragsratenregelung

Die Regelung basiert auf der Bilanz des Betonvolumenstroms Q_{Be} im Formgebungsmodul. Es wird angenommen, dass keine Leckage auftritt, sodass der einströmende gleich dem ausströmenden Betonvolumenstrom ist. Der einströmende Betonvolumenstrom – das Produkt aus Extruderdrehzahl n_{Ex} und Schluckvolumen V_0 – wird durch das Extrusionsmodul bereitgestellt. Der ausströmende Betonvolumenstrom – das Produkt aus zu druckenden Schichtquerschnitt A_{soll} und der Druckkopfgeschwindigkeit v_{Dk} – wird vom Druckprozess festgelegt. Mit dem Vergleich zwischen dem Sollquerschnitt A_{soll} und dem extrudierten Istquerschnitt A_{ist} wird der Regelkreis geschlossen. Der Istquerschnitt wird mit dem Laserprofilscannersystem aus Bild 4 aufgezeichnet.

Bild 7 zeigt die Systemantwort auf eine sprunghafte Änderung der Materialkonsistenz. Diese Konsistenzänderung erfolgt im grau hinterlegten Bereich und wird durch das Einschalten des Innenrüttlers ausgelöst. Tabelle 3 stellt die maximalen relativen Abweichungen in den einzelnen Phasen zusammenfassend dar.

Tabelle 3: Relative Messabweichung der Stranggeometrie – mit Regelung

		relative Messabweichung im Bereich der Schichtlänge l_{Sch}		
Messgröße	Zustand der Regelung	0 ... 350 mm [%]	350 ... 750 mm [%]	750 ... 1250 mm [%]
horizontale Ablage				
Schichtbreite b_{Sch} [mm]	aus	2,17	12,53	5,29
	ein	-1,25	7,58	2,07
Schichthöhe h_{Sch} [mm]	aus	-5,19	11,79	7,58
	ein	-4,06	9,65	2,61
vertikaler Einbau				
Schichtbreite b_{Sch} [mm]	aus	1,7	10,51	3,51
	ein	1,44	8,34	1,65
Schichthöhe h_{Sch} [mm]	aus	1,94	11,65	7,89
	ein	-2,84	10,07	2,48

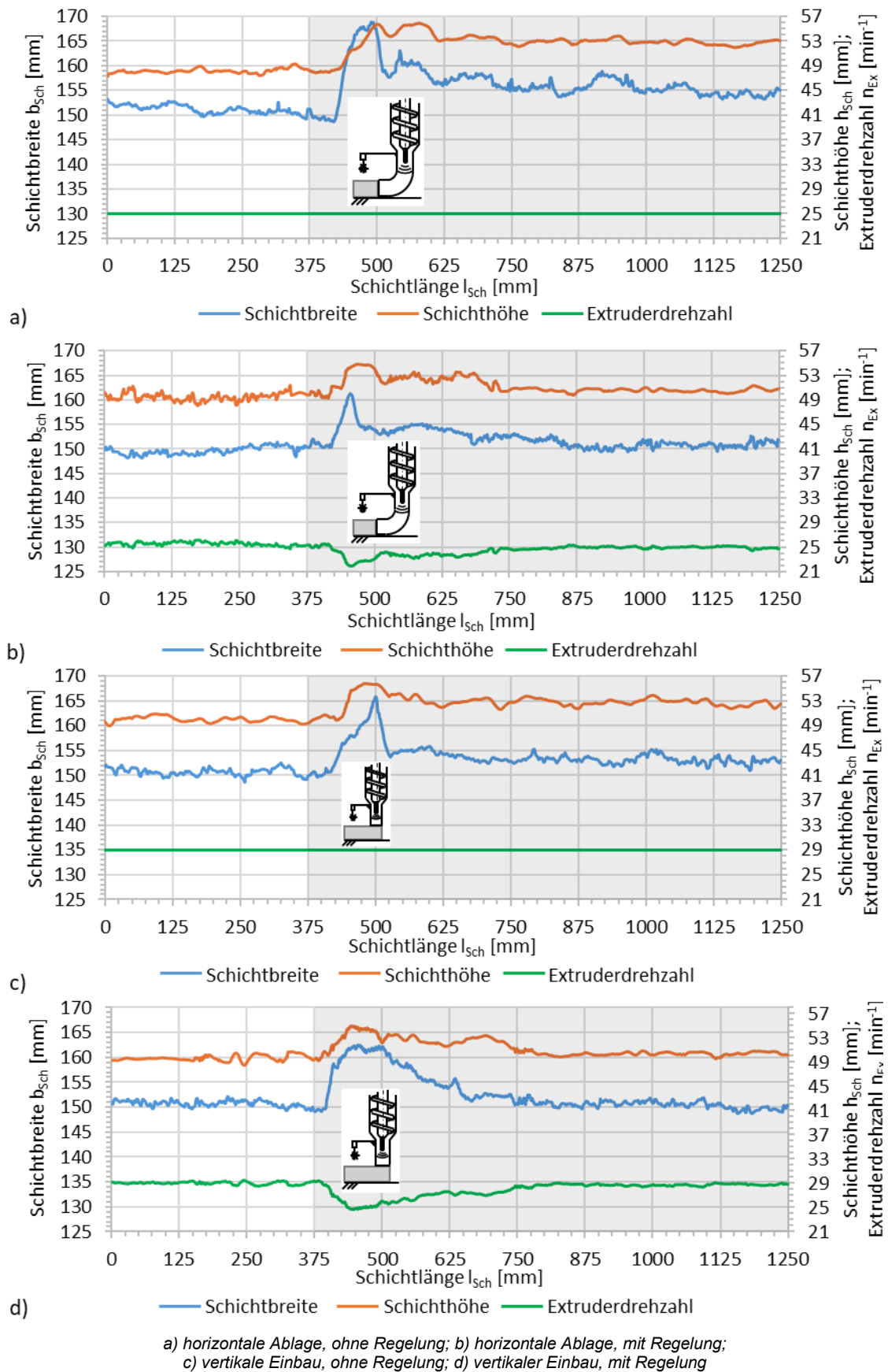


Bild 7: Maßhaltigkeit der Stranggeometrie mit Regelung

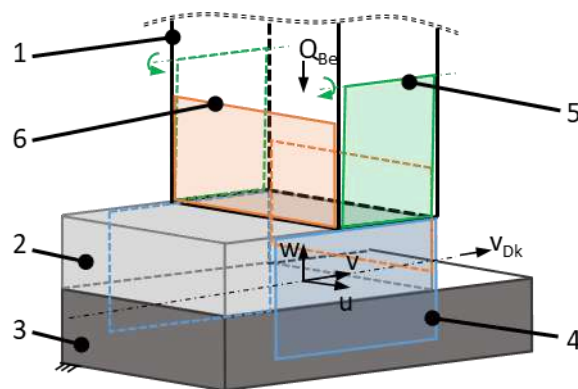
Im Bereich bis 375 mm zeigt sich ein ähnliches Systemverhalten wie bereits in Bild 5. Ab 375 mm wirkt der zusätzliche Vibrationseintrag auf die Materialkonsistenz ein. Es kommt

zu einer „Verflüssigung“ (Minderung der Konsistenz) und es setzt eine Überextrusion (steigende Schichtabmessungen) ein. Aufgrund der Betonsäule im Druckkopf sowie der Einbausituation der Laserprofilscanner (Bild 4) reagiert das System verzögert. Es tritt eine Totzeit auf. Anschließend reagiert die Regelung auf den erhöhten Materialaustrag (Überschwinger), woraufhin die Austragsrate entsprechend angepasst wird, vgl. Drehzahlverläufe. Die Maße der Schichtgeometrie nehmen beständig ab. Ab einer Position von 750 mm kann das System als eingeregelt betrachtet werden. Es ist erkennbar, dass die Drehzahlregelung den Sollquerschnitt wiederhergestellt hat, vgl. Tabelle 3. Eine Glättung der Verläufe ist nicht möglich.

Aus den relativen Abweichungen in Tabelle 3 geht hervor, dass die Regelung im Bereich des Überschwingers (375 mm bis 750 mm) in der Lage ist, die resultierenden Abweichungen der Stranggeometrie gegenüber der Sprungantwort zu verringern. Die maximale absolute Abweichung der Schichtbreite wird dabei um mindestens 3,2 mm, die der Schichthöhe um 1,0 mm reduziert. Auch im eingeregelten Zustand (ab 750 mm) zeigen sich Verbesserungen. Die maximale Abweichung der Schichtbreite wird um mindestens 2,8 mm, die der Schichthöhe um 2,4 mm verringert.

3.3 Variable Einstellung der Wandbreite

Eine Herausforderung beim monolithischen Beton-3D-Druck besteht in der kontinuierlichen Anpassung der Wandbreite. Bild 8 stellt das Funktionsprinzip eines variabel einstellbaren Formgebungsmoduls vor.

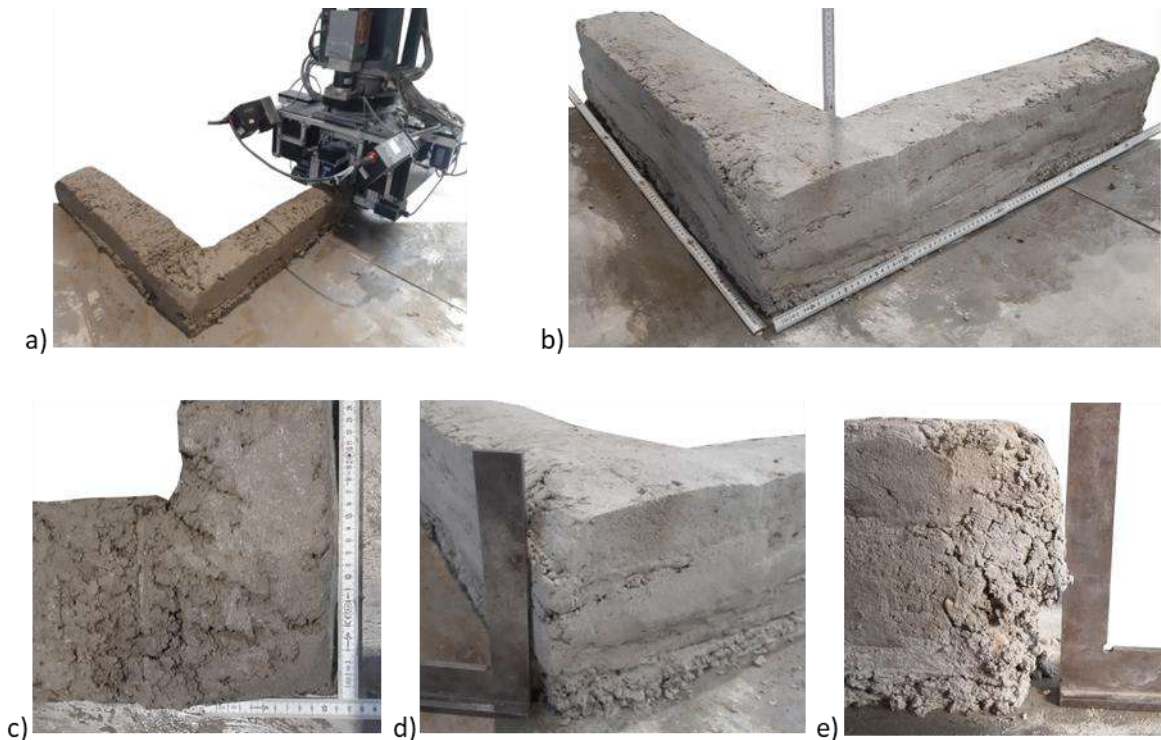


Q_{Be} Betonvolumenstrom; v_{Dk} Druckkopfgeschwindigkeit;
1 Förderkanal mit Austrittsöffnung; 2 aktuelle Schicht; 3 vorherige Schicht; 4 Streichele; 5 Klappen; 6 Schieber

Bild 8: Funktionsprinzip des Formgebungsmoduls

Das Formgebungsmodul basiert auf dem Prinzip des vertikalen Einbaus, bei dem die Austrittsöffnung (1) oberhalb der zu druckenden Schicht (2) angeordnet ist. Die seitlichen Streichele (4, blau) stützen den Fugenbereich, um die Maßhaltigkeit des Stranges sicherzustellen. Für die Einstellung der Wandbreite werden die Klappen (5, grün) gedreht und die Austrittsöffnung verkleinert sich. Gleichzeitig werden die seitlichen Führungselemente nachgeführt. Die Schieber (6, orange) dienen der Herstellung rechtwinkliger Strangabschlüsse. Sie werden abgesenkt und sperren den Betonfluss. Bei Bedarf können die seitlichen Streichele nach oben verfahren werden, um eine Kollision mit bereits gedruckten Betonsträngen zu vermeiden.

Das Bild 9 a zeigt die Herstellung einer Ecke mit alternierender Schichtfolge und unterschiedlichen Wandbreiten der Schenkel mit dem Druckkopf aus Bild 1.



Q_{Be} Betonvolumenstrom; v_{Dk} Druckkopfgeschwindigkeit;
 1 Förderkanal mit Austrittsöffnung; 2 aktuelle Schicht; 3 vorherige Schicht; 4 Streichbleche; 5 Klappen; 6 Schieber

Bild 9: 3D-gedruckte Ecke mit variierender Schenkelbreite

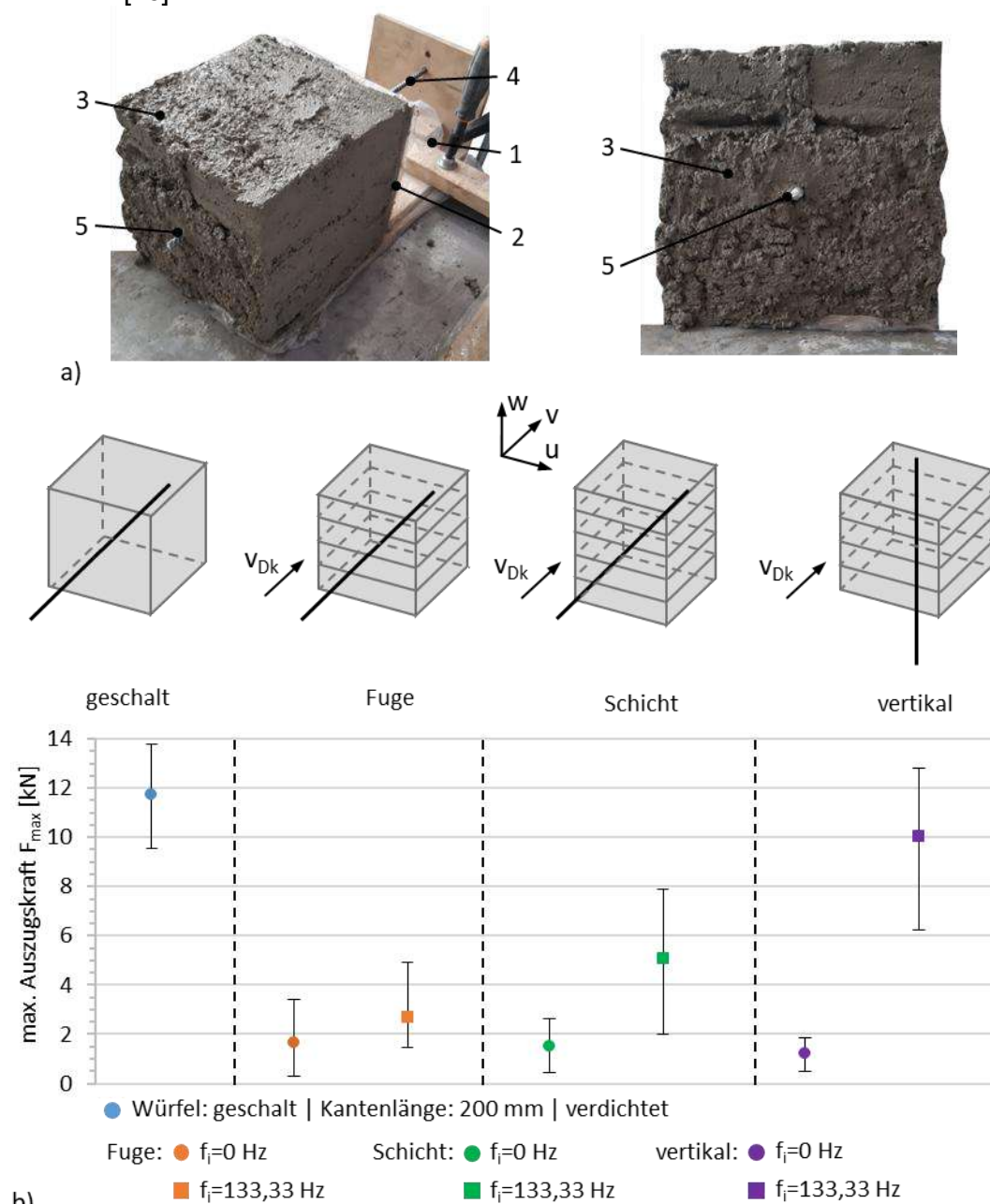
Bild 9 b zeigt das Druckergebnis. Die Schenkellänge beträgt 850 mm, die Gesamthöhe 200 mm und die Schichthöhe liegt bei 50 mm. Das seitliche Übergreifen der Führungselemente in Kombination mit dem während des Druckprozesses eingebrachten Vibrationseintrag ermöglicht die Herstellung geglätteter Schichtoberflächen. Allerdings kann die Maßhaltigkeit im Fugenbereich sowie der vollständige Verschluss von Poren in diesem Bereich nicht durchgehend gewährleistet werden, siehe Bild 9 b und d. Grund dafür ist, dass die gewählte Überdeckung von 50 % der Schichthöhe nicht ausreicht, um die jeweils vorherige Schicht stabil abzustützen. Bei einer Überdeckung von mindestens 60 % lassen sich deutlich bessere Ergebnisse erzielen.

Im Bild 9 c ist die Verfüllung des Eckstoßes der zweiten Schicht zu sehen. Die beiden Schenkel weisen eine Breite von 150 bzw. 110 mm auf. Durch den vertikalen Einbau sowie die beweglichen seitlichen Führungselementen kann die Stoßverbindung zwischen den Schenkeln lückenlos realisiert werden.

Im Bild 9 d und e ist erkennbar, dass die Maßhaltigkeit und Winkeligkeit der Strangabschlüsse noch signifikante Abweichungen aufweisen. Eine Ursache hierfür ist der diskontinuierliche Extrusionsvorgang beim Stoppen und Wiederauffahren des Druckprozesses.

3 Bewehrungsintegration

Mittels CT-Scans konnte bereits qualitativ nachgewiesen werden, dass ein vibrationsunterstützter Druckprozess den Betonumschluss bei der Integration von Bewehrung in monolithisch gedruckte Betonstrukturen verbessert. Hauptgrund ist die „verflüssigende“ Wirkung der Vibration [15].



v_{Dk} Druckkopfgeschwindigkeit; f_i Innenrüttlerfrequenz;
 1 Rahmen; 2 Anschlag; 3 Beton; 4 Bewehrungsstab; 5 Stabende
 a) Probenkörper mit Bewehrungsstab in der Fuge; b) Auszugskräfte nach 28 Tagen

Bild 10: Auszugskräfte 3D-gedruckter Probekörper

Zur quantitativen Bewertung des Verbundverhaltens wurden Auszugsproben im 3D-Druckverfahren hergestellt, siehe Bild 10 a. Der verwendete Beton entspricht Tabelle 1. Dabei kam eine geschlitzte Düse mit integriertem Innenrüttler zum Einsatz [15]. Für die Herstel-

lung wurde ein Hilfsrahmen (1) verwendet. Zunächst wurde der Probekörper (3) schichtweise bis zur vorgesehenen Höhe der Bewehrung gedruckt. Anschließend wurde der Bewehrungsstab (4) eingelegt und fixiert. Danach erfolgte der Weiterdruck bis zur finalen Probenhöhe. Die Schichthöhe betrug jeweils 50 mm. Der Druckvorgang verlief vom Anschlag (2) zum freien Ende des Bewehrungsstabs (5). Dies gewährleistet eine ebene Auflagefläche für den späteren Auszugsversuch. Die Stabachse steht senkrecht zu dieser Fläche und wurde zentrisch im Probekörper positioniert. Die theoretische Verbundlänge beträgt das 5-fache des Stabdurchmessers (8mm, doppelt gerippt). Das würfelförmige Design der Proben mit einer Mindestkantenlänge von 200 mm entspricht den Vorgaben der RILEM-Empfehlung RC 6 [13].

Bild 10 b zeigt die maximale Auszugskraft beim Herausziehen des Bewehrungsstabes aus dem Betonverbund für verschiedene Orientierungen des Stabes in Bezug zur Druckrichtung und der Lage innerhalb der gedruckten Schichten. In der Konfiguration „Fuge“ und „Schicht“ wurde der Bewehrungsstab, also parallel zur Druckrichtung, eingebaut. Der Unterschied ist die Lage des Stabes. Dieser liegt einmal innerhalb der Trennfuge zwischen zwei Schichten bzw. ist in der Mitte einer einzelnen Schicht positioniert. In der Konfiguration „vertikal“ steht der Bewehrungsstab senkrecht zur Druckrichtung. Die zugehörigen Piktogramme aus Bild 10 b veranschaulichen die jeweilige Einbaulage noch einmal grafisch. Alle Konfigurationen wurden jeweils mit (Quadrat) und ohne (Kreis) Vibrationseintrag während des Druckvorgangs hergestellt. Die Stichprobengröße beträgt jeweils 5. Als Referenz dient eine konventionell hergestellte, geschaltete Probe mit einer Stichprobenzahl von 10.

Im Vergleich zur Referenzprobe erreichen die unviбриerten, 3D-gedruckten Proben im Mittel lediglich etwa 10 bis 14 % der maximalen Auszugskraft der Referenz. Hauptursächlich hierfür ist die Ausbildung einer sog. „Windschattenzone“ auf der vom Materialfluss abgewandten Seite des Bewehrungsstabes. In diesem Bereich entsteht eine Lücke und der Stab ist nicht vollständig umschlossen. Die wirksame Kraftübertragung wird gemindert [3]; [9]; [15]. Im Fall „horizontal, Fuge“ (orangeses Quadrat) wird der Verbund durch den zusätzlichen Vibrationseintrag nicht verbessert. Der Abstand zwischen Fuge bzw. Stab und der Einleitungsstelle der Vibration (im Formgebungsmodul) ist zu groß und die Vibrationsanregung erreicht diesen Bereich nicht.

Die Ergebnisse der Konfigurationen mit Vibrationseintrag (grünes bzw. violetttes Quadrat) zeigen, dass durch Vibration während des Druckprozesses der Verbund gesteigert werden kann. Im Mittel erreichen die Proben etwa 43 % (grün) bzw. 86 % (violett) der maximalen Auszugskraft der Referenzprobe.

Beim Einbau eines horizontalen verlaufenden Bewehrungsstabes innerhalb der Schicht ist darauf zu achten, dass zwischen dem Stab und der Oberseite der zuvor gedruckten Schicht ausreichend Raum bleibt, damit der Beton den Stab vollständig umschließen kann. Der Abstand sollte dabei mindestens dem 1,3-fachen des Größtkorndurchmessers (in Millimetern) entsprechen.

Der Unterschied in den erzielten Auszugkräften zwischen den beiden Konfigurationen ist auf den Versuchsaufbau zurückzuführen. Im Fall des grünen Quadrats befindet sich die Verbundzone am Ende der Druckschicht. Hier kann durch das Stoppen und Abtrennen des Betonstrangs kein kontinuierlicher Materialfluss sichergestellt werden, wodurch die Bewehrung nicht vollständig vom Beton umschlossen wurde.

4 Zusammenfassung

Der Beton-3D-Druck entwickelt sich zu einer kommerziellen Technologie. In diesem Kontext greift der Beitrag aktuelle Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten des monolithischen Beton-3D-Drucks auf und stellt deren Ergebnisse dar. Der Fokus liegt dabei auf der Komponentenentwicklung zur Steigerung der Vielseitigkeit, dem Einsatz von Regelungskonzepten zur Verbesserung der Ausführungsqualität und Vibrationseinsatz bei der Unterstützung des Druckprozesses.

Das Extrusionsmodul des Druckkopfes ist ein Schneckenextruder. Im Beitrag wird eine konstruktive Auslegung vorgestellt, die es erlaubt 3D-druckfähige Materialien mit einem Größtkorn von 1,2 bis 16 mm (Tabelle 1) prozesssicher zu verarbeiten. Da am Druckkopf keine Zugabe von Beschleuniger erfolgt, ist die Anlage für 1K-Systeme geeignet [18]. Dies ist der erste Entwicklungsschritt in Richtung eines Multi-Materialdruckkopfes, in Analogie zum FDM-Druck bei Kunststoffen.

Das Formgebungsmodul verfügt über verschiedene Vibrationsquellen, um die, aus grobkörnigem Material gedruckten, Strangoberflächen zu glätten und deren Ausführungsqualität zu steigern. Untersuchungen mit vibrationsgestützten Einbauprozessen zeigen, dass die offene Porosität gegenüber vibrationsfreien Einbauprozessen um 4 bis 5 % geringer ist und die Oberflächen verschlossen werden. Die Ausführungsqualität wird gesteigert, da die Porosität der Oberfläche abnimmt. Inwieweit der Vibrationseintrag zu einer Verdichtung der abgelegten Betonstränge führt, kann nicht abschließend geklärt werden, da keine Untersuchungen zur geschlossenen Porosität vorliegen.

Die Integration von Sensorik ist unerlässlich, um das volle Potenzial der Automatisierung im Bereich des Beton-3D-Drucks auszuschöpfen. Im Beitrag wird eine Regelung der Betonaustragsrate auf Basis von gemessenen Geometriedaten vorgestellt, um die Maßhaltigkeit der extrudierten Stränge zu verbessern. Aus den grafischen Verläufen des Bildes 7 ist erkennbar, dass sprunghafte Schwankungen ausgeregelt werden können, da nach hinreichender Schichtlänge – etwa 350 mm – nach der Störung die Sollgeometrie wieder erreicht wird, aber keine vollständige Glättung. Die verbleibenden Abweichungen liegen im Bereich von $\pm 3,1$ mm für die Schichtbreite bzw. $\pm 1,3$ mm für die Schichthöhe. Im unmittelbaren Einflussbereich der Störung kann das Systemverhalten zwar abgeschwächt werden, aber jedoch nicht in dem Maße, dass die Querschnittsabweichungen innerhalb akzeptabler Grenzen liegen. Hauptursache hierfür ist die durch die Betonsäule bedingte Systemtotzeit. Eine optimierte Abstimmung der Regelparameter könnte gegebenenfalls eine Verbesserung bewirken.

Das in Bild 9 gezeigte Formgebungsmodul ist ein Funktionsmuster und erlaubt die Herstellung rechtwinkliger Gebäudeelemente mit variierenden Wandstärken. Die Qualität der Druckergebnisse kann durch eine weitere Optimierung des Prozessablaufs noch verbessert werden. Dies umfasst unter anderem die genauere Abstimmung der Bewegungsabläufe zwischen den beweglichen Komponenten des Formgebungsmoduls selbst bzw. dem Manipulator sowie Einbauprozesse, die ausschließlich durch Vibration (ohne die Drehung des Extruders) erfolgen. Darüber hinaus lassen sich die Überlappungslängen der Führungselemente anpassen oder der Materialfluss an Strangenden durch gezielte Einbauten (Steg) im Förderkanal („künstliche Verengung“) präziser steuern.

Der Einsatz solcher Module erhöht die Flexibilität des monolithischen Beton-3D-Drucks, da während des Fertigungsprozesses zwischen unterschiedlichen Wandbreiten unterschieden werden kann, wie es bspw. bei Außen- und Innenwänden erforderlich ist.

Die Integration lasttragender Bewehrung stellt insbesondere im monolithischen Beton-3D-Druck weiterhin eine zentrale Herausforderung dar. In diesem Beitrag wird untersucht, inwieweit ein Vibrationseintrag während des Druckprozesses den Verbund zwischen Beton und Stahlbewehrung verbessern kann. Die ermittelten Auszugskräfte zeigen, dass der Verbund – abhängig von der Lage und Orientierung der Bewehrungsstäbe – auf bis zu 43 % (horizontal, innerhalb einer Schicht) bzw. 86 % (vertikal) der geschalteten Referenzproben gesteigert werden kann.

Dabei ist es entscheidend, dass während des Druckvorgangs ein kontinuierlicher Materialfluss im Bereich der Verbundzone gewährleistet ist. Im Fall der horizontal eingebauten Bewehrungsstäbe war dies nicht gegeben, weshalb die entsprechenden Versuchsreihen mit einem angepassten Versuchsaufbau erneut durchgeführt werden sollten, um belastbare Vergleichswerte zu erhalten.

Trotz dieser Einschränkung zeigen die Ergebnisse das Potenzial eines vibrationsgestützten Druckprozesses zur Verbesserung der Bewehrungsintegration in 3D-gedruckte Betonstrukturen.

Quellenverzeichnis:

- [1] BANFILL, P.F.G. ; TEIXEIRA, M.A.O.M. ; CRAIK, R.J.M.: Rheology and vibration of fresh concrete: Predicting the radius of action of poker vibrators from wave propagation. In: *Cement and Concrete Research* Bd. 41 (2011), Nr. 9, S. 932–941
- [2] BARRY, MAMADOU ; JACQUET, YOHAN ; KACHKOUCH, FATIMA ZAHRAA ; PERROT, ARNAUD: Instrumentation of the Extruder Nozzle Using Load Cells: Towards an In-Line Quality Control Device for 3D Printed Cement-Based Materials. In: *Digital Concrete 2024 - Conference Proceedings*. München : Springer International Publishing, 2024 — ISBN 978-3-031-70030-9, S. 142–149
- [3] CLASSEN, MARTIN ; UNGERMANN, JAN ; SHARMA, RAHUL: Additive Manufacturing of Reinforced Concrete—Development of a 3D Printing Technology for Cementitious Composites with Metallic Reinforcement. In: *Applied Sciences* Bd. 10 (2020), Nr. 11, S. 3791–3805
- [4] GLEISER, LEONIE ; PIERER, ROBIN ; MARKIN, SLAVA ; BUTLER, MARKO ; MECHTCHERINE, VIKTOR: Additive Manufacturing with Earth Based Materials - Minimization of Shrinkage Deformation. In: *Proceedings of The Second RILEM International Conference on Earthen Construction ICEC2024*. Edinburgh : Springer Nature, 2024 — ISBN 978-3-031-62689-0, S. 12–21
- [5] GRÜBL, PETER ; KARL, SIEGHART ; WEIGLER, HELMUT ; KUPFER, H. (Hrsg.): *Beton: Arten, Herstellung und Eigenschaften*. 2. Aufl. Berlin : Ernst & Sohn, 2001 — ISBN 3-433-0134-3
- [6] KNAPPE, W. ; POTENTE, H. ; HENSEN, F. ; KNAPPE, W. ; POTENTE, H. (Hrsg.): *Handbuch der Kunststoff-Extrusionstechnik I - Grundlagen*. 1. Aufl. München : Carl Hanser, 1989 — ISBN 3-446-14339-4
- [7] MECHTCHERINE, VIKTOR ; BOS, F.P. ; PERROT, A. ; DA SILVA, W.R. LEAL ; NERELLA, VENKATESH NAIDU ; FATAEI, S. ; WOLFS, R.J.M. ; SONEBI, M. ; U. A.: Extrusion-based additive manufacturing with cement-based materials – Production steps, processes, and their underlying physics: A review. In: *Cement and Concrete Research* Bd. 132 (2020), Nr. 1, S. 1–14
- [8] MECHTCHERINE, VIKTOR ; NERELLA, VENKATESH NAIDU: Beton-3D-Druck durch selektive Ablage: Anforderungen an Frischbeton und Materialprüfung. In: *Beton- und Stahlbetonbau* Bd. 114 (2019), Nr. 1, S. 24–32

- [9] MECHTCHERINE, VIKTOR ; TAUBERT, MARKUS ; MÜLLER, STEFFEN ; BUTLER, MARKO ; WILL, FRANK ; STORCH, FLORIAN ; PLASCHNICK, PAUL ; OTTO, JENS ; U. A.: Integration of Steel Reinforcement into Extrusion-Based 3D Concrete Printing of Monolithic Concrete Elements. In: *Digital Concrete 2024 - Conference Proceedings*. München : Springer International Publishing, 2024 — ISBN 978-3-031-70030-9, S. 311–318
- [10] MECHTCHERINE, VIKTOR ; TAUBERT, MARKUS ; MÜLLER, STEFFEN ; WILL, FRANK ; STORCH, FLORIAN ; PLASCHNICK, PAUL ; OTTO, JENS ; MAIWALD, PATRICK: 3D-gedruckte monolithische Stahlbetonwände im CONPrint3D-reinforced Verfahren. In: *Beton- und Stahlbetonbau* Bd. 117 (2022), Nr. 3, S. 1–10
- [11] NERELLA, VENKATESH NAIDU: *Development and characterisation of cement-based materials for extrusion-based 3D-printing*. Dresden, Technische Universität Dresden, Dissertation, 2019
- [12] ROUSSEL, NICOLAS: Rheological requirements for printable concretes. In: *Cement and Concrete Research* Bd. 112 (2018), Nr. 10, S. 76–85
- [13] SADEGHI, NADER ; SHARMA, AKANSHU: Pull-out test for studying bond strength in corrosion affected reinforced concrete structures - A review. In: *Otto-Graf-Journal* Bd. 18 (2019), Nr. 1, S. 259–272
- [14] STORCH, FLORIAN ; PLASCHNICK, PAUL ; WILL, FRANK: CONPrint3D - Aktuelle Entwicklungsschwerpunkte beim Beton-3D-Druck. In: *Tagungsband 9. Fachtagung Baumaschinentechnik 2022*. Dresden, 2022, S. 63–81
- [15] STORCH, FLORIAN ; PLASCHNICK, PAUL ; WILL, FRANK: Monolithischer Beton-3D-Druck - Prozessoptimierung mittels Vibrationseintrag. In: *Tagungsband 10. Fachtagung Baumaschinentechnik 2024*. Dresden, 2024, S. 333–348
- [16] TAUBERT, MARKUS ; MECHTCHERINE, VIKTOR: Mix Design for a 3D-Printable Concrete with Coarse Aggregates and Consideration of Standardisation. In: *Digital Concrete 2022 - Conference Proceedings*. Loughborough : Springer International Publishing, 2022. — DOI: 10.1007/978-3-031-06116-5 — ISBN 978-3-031-06115-8, S. 59–64
- [17] WANGLER, TIMOTHY ; LLORET, ENA ; REITER, LEX ; HACK, NORMAN ; GRAMAZIO, FABIO ; KOHLER, MATTHIAS ; BERNHARD, MATHIAS ; DILLENBURGER, BENJAMIN ; U. A.: Digital Concrete: Opportunities and Challenges. In: *RILEM Technical Letters* Bd. 1 (2016), Nr. 1, S. 67–75
- [18] WANGLER, TIMOTHY ; PILEGGI, RAFAEL ; GÜREL, SEYMA ; FLATT, ROBERT J.: A chemical process engineering look at digital concrete processes: critical step design, inline mixing, and scaleup. In: *Cement and Concrete Research* Bd. 155 (2022), Nr. 1, S. 1–17
- [19] WILL, FRANK ; STORCH, FLORIAN ; PLASCHNICK, PAUL ; TAUBERT, MARKUS ; BUTLER, MARKO ; MECHTCHERINE, VIKTOR: Large-scale Monolithic Printing with Ready-Mixed Concrete: Challenges and Solutions. In: *Digital Concrete 2024 - Supplementary Proceedings*. München : Springer International Publishing, 2024, S. 1–10
- [20] WORKU, SEBLEWORK ABRAHAM ; ASRAT, FESEHA SAHILE ; WOTANGO, MEKDES DAWIT: Effect of Vibration Time on The Mechanical and Durability Properties of Previous Concrete. In: *International Journal of Current Research in Science, Engineering & Technology* Bd. 7 (2024), Nr. 2, S. 1–14