

Schlussbericht vom 05.10.2023

zu IGF-Vorhaben Nr. 21574 BR

Thema

Digitales Bauen – Großformatiger 3D-Druck mit Transportbeton (ready2print)

Berichtszeitraum

01. Januar 2021 bis 31. März 2023

Forschungsvereinigung

Forschungsgemeinschaft Transportbeton e.V. - FTB

Forschungseinrichtung(en)

Forschungseinrichtung 1: Technische Universität Dresden
Institut für Baustoffe
01062 Dresden


Prof. Dr.-Ing. V. Mechtcherine
Direktor des Instituts für Baustoffe

Forschungseinrichtung 2: Technische Universität Dresden
Institut für Mechatronischen Maschinenbau
Professur für Baumaschinen
01062 Dresden


Technische Universität Dresden
Institut für Mechatronischen Maschinenbau
Professur für Baumaschinen
Prof. Dr.-Ing. Frank Will
01062 Dresden

Gefördert durch:

Inhalt

Thema.....	1
Berichtszeitraum.....	1
Forschungsvereinigung	1
Forschungseinrichtung(en).....	1
1 Ergebnisse der Forschungseinrichtung 1	4
1.1 Ausgangssituation.....	4
1.2 Anforderungen an Betone für den großformatigen 3D-Druck mit Transportbeton	5
1.3 Betonentwurf	6
1.3.1 Zementleimrheologie.....	6
1.3.2 Sieblinienberechnung für hohe Packungsdichte der Haufwerkspartikel.....	8
1.3.3 Kornformanalyse	11
1.3.4 Sensitivität des Betonentwurfs	11
1.3.5 Untersuchungen zur Pumpbarkeit der Betone.....	13
1.3.6 Viskositätsmodifizierung mittels Luftporenbildner	15
1.4 Messkonzepte	16
1.4.1 Rotationsrheometrie	16
1.4.2 Penetrationstest	18
1.4.3 Setz- und Ausbreitmaß einschließlich digitaler Auswertung.....	20
1.4.4 Inline-Auswertung der Geometrie und Oberflächenstruktur extrudierter Stränge ..	23
1.4.5 Bildbasierte Konformitätsprüfung der Geometrie abgelegter Strukturen	24
1.4.6 Zusammenstellung untersuchter Frischbetonprüfungen	26
1.5 Mechanische Eigenschaften 3D-gedruckter Betone	26
1.5.1 Druckfestigkeit.....	28
1.5.2 Biegezugfestigkeit	28
1.5.3 Spaltzugfestigkeit	30
1.5.4 Zugfestigkeit.....	31
1.5.5 Elastizitätsmodul (Druckbelastung)	32
1.5.6 Schichtenverbund in Abhängigkeit von der Interlayerzeit	33
1.5.7 Zusammenstellung der Frischbetonprüfung	35
1.6 Zusammenfassung und Ausblick.....	35
2 Ergebnisse der Forschungseinrichtung 2	40
2.1 Ausgangssituation.....	40
2.2 Anforderungsliste	41
2.3 Druckkopf.....	42

2.3.1	Extrusionsmodul.....	43
2.3.2	Formgebungsmodul	47
2.3.3	Inline-Messtechnik	52
2.4	Kompensationseinheit	60
2.4.1	Definition des Arbeitsraumes und der Freiheitsgrade	60
2.4.2	Auswahl einer Vorzugsvariante	62
2.4.3	Konstruktion	64
2.5	Theoretische Betrachtung: Druckprozess mit Transportbeton	71
2.5.1	Modifikation der Autobetonpumpe	71
2.5.2	Einbauvolumenstrom.....	74
2.6	Zusammenfassung und Ausblick.....	76
3	Verwendung der Zuwendung	79
4	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	79
4.1	Forschungseinrichtung 1	79
4.2	Forschungseinrichtung 2	80
5	Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen für KMU	81
6	Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft	83
	Literaturverzeichnis	86
	Anhang	90
	Anforderungsliste	90
	Ergebnisübersicht Zementleim-Messungen.....	96
	Ergebnisübersicht Messungen an Beton, Größtkorn 16 mm, w/z=0,4	97
	Entwurfswerkzeug Beton.....	99

1 Ergebnisse der Forschungseinrichtung 1

1.1 Ausgangssituation

Die Digitalisierung und Automatisierung von Bauprozessen kann helfen, dringenden Herausforderungen mit Blick auf die Kosten, den Arbeitskräftemangel aber auch die Qualität von Bauarbeiten bewältigen. 3D-Druck mit Beton hat ein hohes Potenzial, ein Schlüsselement dieser Lösung zu sein.

Derzeit konzentrieren sich die Arbeiten der meisten Forschungsgruppen und Industrieunternehmungen auf den Mörtel- bzw. Feinbetondruck unter Werksbedingungen. Für das monolithische Bauen vor Ort sind diese aber ungeeignet, da die verwendeten feinkörnigen Mörtel/Betone nicht den gültigen Betonnormen entsprechen. Darüber hinaus weisen sie einen hohen Bindemittelbedarf und infolge dessen hohes Schwinden und Kriechen, geringen Elastizitätsmodul, höhere Kosten und schlechtere Umweltbilanz im Vergleich zu regulärem Beton auf. Für monolithische Bauweisen sollten Betone mit üblichem Größtkorn bis 16 mm und Zusammensetzung innerhalb geltender Normen als Druckmedium Anwendung finden und im Vollformatdruck abgelegt werden.

Das Ziel des hier berichtenden Vorhabens war und ist die Schaffung des wissenschaftlich-technischen Rahmens für die Anwendung eines den heutigen Regelwerken weitestgehend entsprechenden Transportbetons für den großformatigen 3D-Druck. Dabei wurden folgende wissenschaftlich-technischen Herausforderungen auf dem Kompetenzgebiet der FTB adressiert:

- Entwicklung von technologiekonformen Lösungsansätzen zur Herstellung, Transport, Förderung und Einbau von Betonen im Rahmen der 3D-Druck- Bauweise;
- Erarbeitung einer praxistauglichen Vorgehensweise zur Festlegung, Einstellung und Prüfung der erforderlichen Materialeigenschaften von frischem und erhärtendem Beton für die 3D-Druck-Bauweise;
- Vorbereitung von technologiefördernden, normativen Anpassungen.

Die Forschung und Entwicklung im Verantwortungsbereich der Forschungseinrichtung 1 war auf folgende Teilziele fokussiert:

- Entwicklung und Bereitstellung allgemeingültiger Prinzipien zur Herstellung robuster, praxistauglicher Transportbetone mit Größtkorn bis 16 mm für die Anwendung in vollformatigen 3D-Druckverfahren;
- Formulierung eines Leitfadens zur stofflichen Entwicklung druckbarer Betone unter Einhaltung der Randbedingungen aus aktuellen, einschlägigen Regelwerken;
- Die Entwicklung und Erprobung von Methoden zur Untersuchung der Eigenschaften der Betone im frischen, erhärtenden und erhärteten Zustand unter systematischer Verwendung herkömmlicher und neuer, zu entwickelnder Prüfverfahren.

Zu Projektbeginn definierten die Forschungseinrichtungen (FE) eine gemeinsame und mit dem projektbegleitenden Ausschuss abgestimmte Anforderungsliste (siehe Anhang). Anhand dieser entwickelte FE 1 (Institut für Baustoffe) eine numerisch unterstützte Betonentwurfsmethode, die sich anwenderfreundlich an wechselnde Rohstoffe und Randbedingungen anpassen lässt. Parallel wurden Messmethoden für die Frisch- und Festbetonuntersuchung adaptiert, erprobt und weiterentwickelt. Anhand dieser wurde abschließend eine Charakterisierung der Materialeigenschaften und die Validierung der Forschungsergebnisse durchgeführt.

1.2 Anforderungen an Betone für den großformatigen 3D-Druck mit Transportbeton

Grundlegende Anforderungen aus dem Fertigungsverfahren an Betone für den großformatigen 3D-Druck mit Transportbeton werden als 3D-Druckbarkeit zusammengefasst. Nach dem Stand der wissenschaftlichen Diskussion fallen hierunter die Anforderungen Pumpbarkeit im Sinne der Eignung zum energieeffizienten, verstopfungsfreien und verschleißarmen maschinellen Fördern durch Rohr- oder Schlauchleitungen, die Extrudierbarkeit hinsichtlich eines kontinuierlichen und regelbaren Volumenstroms an der Düsenöffnung, wobei das Material die festgelegte Querschnittsgeometrie nicht verlässt und schließlich die Verbaubarkeit, welche sich aus der Standsicherheit des extrudierten Filaments, dessen Kapazität zum Lastabtrag nachfolgender Schichten sowie der Qualität des Bauteils unter Tragfähigkeits- und Dauerhaftigkeitsgesichtspunkten zusammengesetzt ist [4]; [35]. Zu bemerken ist dabei ein Zielkonflikt der Materialeigenschaften. Während ein beliebig fließfähiger Beton zum Pumpen optimal ist, wird unmittelbar nach der Extrusion eine grundlegende Grünstandsfestigkeit vorausgesetzt.

Neben diesen grundlegenden Anforderungen, die von allen frischbetonverarbeitenden additiven Verfahren beherrscht werden müssen, wurden für dieses Forschungsprojekt weiterführende Anforderungen in eine gemeinsamen Anforderungsliste aufgenommen, die mit erreichten Erfüllungsgraden im Anhang an dieses Dokument zu finden sind. Maßgebendes Entwicklungsziel war dabei ein Betonentwurf, der die Vorgaben aller einschlägigen Regelwerke berücksichtigt und als Transportbeton geeignet ist. Der großen Mehrzahl der Anforderungen konnte entsprochen werden. Die Mindestanforderung eines 8 mm-Größtkorns konnte durch das zuverlässige Verarbeiten eines 16 mm-Größtkorns übertroffen werden. Mit Einschränkungen erreicht wurden die Richtungsanforderungen nach einem möglichst nachhaltigen Material. Dies insofern erfüllt, dass deutlich weniger Zement erforderlich ist, als bei der Mehrzahl der bisher publizierten Rezepturen [32]; [63]. Zudem ist der Klinkeranteil im gewählten Bindemittel auf 50 % reduziert. Dennoch orientiert sich die Zementzugabe in Rücksicht auf die Frischbetoneigenschaften am Maximum des nach den Regelwerken Zulässigen.

Die aus der EN 206 übernommene Forderung nach einem Mindestsetzmaß von 10 mm konnte zurückgezogen werden. Die weiteren Ausführungen werden darstellen, dass es durch den Einsatz von Rütteltechnik am Druckkopf möglich ist, auch sogenannte „no-slump-concretes“ zu extrudieren. Die Richtungsanforderungen an die rheologischen Anforderungen konnten mit Einschränkungen sichergestellt werden. Fließgrenzen und thixotropes Verhalten sind demnach stark von der Rheologie des eingesetzten Bindemittels abhängig, sodass die Reproduzierbarkeit stark von diesen sowie dessen Charge und Alter abhängt. Insofern können diese Frischbetoneigenschaften nicht als Projektergebnis sichergestellt werden und bedürfen auch in Zukunft einer individuellen Feineinstellung.

Hinter den Erwartungen zurück bleiben Anforderungen an die Pumpbarkeit. Mangels Pumpen im Labor, die Beton mit einem 16 mm Größtkorn fordern können, konnte die Pumpbarkeit nicht umfassend in die Materialentwicklung einbezogen werden.

Detaillierter untersucht wurden Normvorgaben aus der EN 206 und der DIN 1045-2. Das Ausgangsmaterial der Entwicklung entsprach demnach in zwei Aspekten nicht den Regelwerken. Zum einen lag die Zusammensetzung der Bindemittelphase aus Portlandzement, Flugasche und Sillikastaub außerhalb der Normalzementarten und der k-Wert-Methode zur Anrechnung von Typ-II Zementzusatzstoffen. Dies wurde über die Umstellung auf einen CEM II/C-M (S-LL) 45,5 N

nach EN 197-5 gelöst. Zum anderen lag der Mehlkorngelhalt, also der Anteil fester Mischungsbestandteile mit einer Partikelgröße kleiner als 0,125 mm über den Grenzwerten, die die DIN 1045-2 zur Sicherung der Dauerhaftigkeit vorgibt. Die Maximalgehalte werden dabei in Abhängigkeit der zu erreichenden Druckfestigkeitsklasse, der Expositionsklassen, des Zementgehalts und des Größtkorns definiert. Die Regelungen sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Um ein möglichst hohes Anforderungsniveau abzubilden, wurde der Zielwert des Mehlkorngelhalts zu kleiner 500 kg/m³ gewählt.

Tabelle 1: Maximal zulässiger Mehlkorngelhalt nach DIN 1045-2:2008

Druckfestigkeitsklasse nach EN 206	bis C50/60				ab C55/67		
Expositionsklasse	XF, XM			andere	alle		
Zementgehalt [kg/m ³]	≤ 300	↔ linear interpolieren	≥ 400	alle	≤ 400	↔ linear interpolieren	≥ 500
maximal zulässiger Mehlkorngelhalt [kg/m ³]	400		500	550	500		600
wenn Größtkorn = 8 mm	+ 50 kg/m ³				+ 50 kg/m ³		

Zum Berichtszeitpunkt ist die Neufassung DIN 1045-2 (2023-08) veröffentlicht. Hier wurden Vorgaben zu den Mehlkorngelhalten gestrichen. In der zuvor diskutierten Entwurfsfassung wurde eine Veränderung der Mehlkorngrenzen wie in Tabelle 2 dargestellt vorgeschlagen. Dieser Vorschlag enthielt einige Schwächen wie fehlende Hinweise auf das Interpolieren der Grenzwerte für kleine Festigkeitsklassen. Die Forschungseinrichtung 1 hat den Normungsausschuss mit Eingaben auf diese und weitere Aspekte aufmerksam gemacht.

Tabelle 2: Maximal zulässiger Mehlkorngelhalt nach Normentwurf DIN 1045-2:2022

Druckfestigkeitsklasse		≤ C60/75 (≤ LC35/38)			≥ C70/85 (≥ LC40/44)			Selbstverdichtender Beton
Expositionsklasse		XF2 - XF4; XM2 - XM3		andere	alle			
Zementgehalt [kg/m ³]		≤ 300	300 ... 350	≥ 350	alle	≤ 400	≥ 500	
maximaler Mehlkorngelhalt [kg/m ³]	Größtkorn 16 bis 63 mm	400	unbegrenzt	450	unbegrenzt	500	600	650
	Größtkorn 8 mm					550	650	
Erhöhung um Typ II-Zusatzstoff-Zugabe					bis 50 kg/m ³			

1.3 Betonentwurf

1.3.1 Zementleimrheologie

In Absprache mit dem Projektbegleitenden Ausschuss und mit Rücksicht auf die ökologische Qualität des Baustoffs wurde entschieden, die Bindemittelauswahl auf Hochofenzemente CEM III/A und Portlandkompositzemente der noch jungen Normalzementart CEM II/C-M (S-LL) zu begrenzen. Beide reduzieren den Zementklinkeranteil um etwa 50 % im Vergleich zum treibhausgasintensiven Portlandzement. Entsprechende Bindemittelproben wurden von Schwenk,

Holcim und Dyckerhoff zur Verfügung gestellt. Deren rheologisches Verhalten in Zementpasten mit einem w/z-Wert von 0,4 wurde mit dem Hägermann-Ausbreittisch (DIN EN 1015-3), im Rotationsrheometer (Haake Mars II) und mittels Penetrationstests untersucht [24]; [31]. Dafür wurden neben dem Ausbreitmaß statische und dynamische Fließgrenzen sowie plastische Viskositäten, Strukturaufbauarten, die Scherverdünnung und die Verarbeitungszeit ermittelt. Ergänzend wurden Biegezug- und Druckfestigkeiten an Mörteln nach 24 h und 28 d geprüft (DIN EN 196-1). Eine Übersicht der Daten ist im Anhang „Ergebnisübersicht Zementleim-Messungen“ und Anhang „Ergebnisübersicht Messungen an Beton, Größtkorn 16 mm, w/z=0,4“ abgelegt. In Abbildung 1 ist eine Übersichtsdarstellung des Zusammenhanges von Dynamischer Fließgrenze (Dynamic Yield Stress, DYS) sowie Statischer Fließgrenze (Static Yield Stress, SYS) und dem Ausbreitverhalten auf dem Hägermann-Ausbreittisch (HFT) angegeben. Mit guter Näherung kann für beide rheologische Kennwerte (DYS, SYS) ein linearer Zusammenhang zum Ausbreitmaß festgestellt werden.

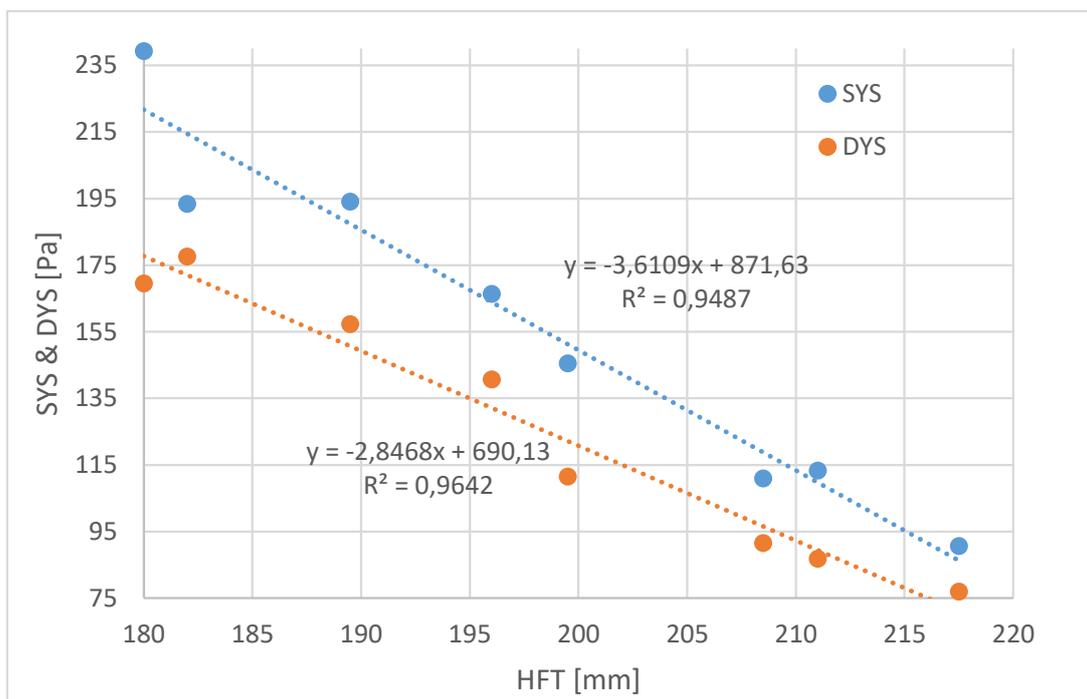


Abbildung 1: Zusammenhang von Ausbreitmaß auf dem Hägermann-Ausbreittisch (HFT) sowie Dynamischer Fließgrenze (DYS) und Statischer Fließgrenze (SYS).

Ausschlaggebend für die Wahl des Bindemittels war entsprechend der Anforderungsliste eine möglichst niedrige plastische Viskosität in Verbindung mit einer Verarbeitungszeit größer als zwei Stunden und einem zügigen Strukturaufbau. Für die weiteren Versuche wurde daher der CEM II/C-M (S-LL) von Holcim gewählt. Aufgrund von Lieferschwierigkeiten kam in der Schlussphase die gleiche Zementart von der Firma Schwenk zum Einsatz. Dessen Leim besitzt eine niedrigere Fließgrenze sowie geringere Viskosität, was bei sonst unveränderter Betonmischung zu einem fließfähigeren Verhalten führte, das den Einsatz von Fließmitteln bei einem w/z-Wert von 0,45 obsolet macht. Im Gegenzug führte der geringere Strukturaufbau zu plastischem Versagen bei Druckversuchen mit raschem vertikalem Baufortschritt. Dieses Ergebnis verdeutlicht, dass eine bewusste Bindemittelwahl ausschlaggebend für das zum angestrebten Prozess passende rheologische Frischbetonverhalten ist.

1.3.2 Sieblinienberechnung für hohe Packungsdichte der Haufwerkspartikel

Kernherausforderung für den Betonentwurf ist das Zusammenstellen einer Rezeptur, welche sich gut umformen lässt, dennoch formstabile Stränge ermöglicht und ohne den Einsatz von Verdichtungsenergie ein dichtes Gefüge mit akzeptabler Oberflächenqualität sicherstellt. In vielen Fällen werden hierfür hohe Bindemittelgehalte eingesetzt. Dabei wird die thixotrope Natur des Zements ausgespielt, die durch elektrostatische Partikelladungen zu Agglomeration und damit zur reversiblen Verfestigung des Frischbetons führt.

Wird der Mehlkorngehalt reduziert, wird eine kritische Schwelle erreicht, unterhalb derer die schmierende Wirkung der kornumschließenden Zementleimschicht reduziert wird. Dies äußert sich in einer steiferen Frischbetonkonsistenz und abnehmender Kohäsion, was ungünstig für den Druckprozess ist. Folglich bedarf es eines Ansatzes, um den Mehlkornbedarf zu reduzieren. Hierfür bietet sich eine hohe Packungsdichte an. Eine geeignete Sieblinie zeichnet sich dadurch aus, dass die Haufwerksporen der groben Gesteinskörnung durch jeweils feinere Fraktionen gefüllt werden. Ein solches Optimum fanden Fuller und Thompson 1907 durch empirische Versuche. Die Sieblinien beschrieben sie geometrisch mit Wurzelfunktionen und Tangenten [15]. Die Ergebnisse wurden 1930 in weiten Teilen von Andreasen und Andersen bestätigt, die jedoch einen analytischen Ansatz verfolgten. Sie bedienten sich einer Ähnlichkeitsbetrachtung, wonach eine Korngrößenverteilung dann konstant sei, wenn die Partikelproportion eines Ausschnitts des Korngemischs immer gleich sei, egal wie stark dieser vergrößert würde [1]. Aus dieser Überlegung leiteten sie eine Exponentialfunktion ab, die heute fälschlich oft als Fuller-Parabel bezeichnet wird:

$$A(d) = 100 \% * \left(\frac{d}{D}\right)^q$$

Das Sieblinienmodell an Andreasen und Andersen wird insofern als geeignete Grundlage für den Betonentwurf herangezogen, da es zum einen auch Grundlage für die Regelsieblinien nach DIN 1045-2 ist, sich leicht in numerische Anwendungen integrieren und problemlos in den Feinstpartikelbereich erweitern lässt.

Dabei berechnet sich der Siebdurchgang A einer Korngröße d als Quotient dieser Korngröße durch das Größtkorn D potenziert um den Verteilungsmodul q. Der Verteilungsmodul ist einheitenlos und liegt für Beton typischerweise zwischen 0,3 und 0,5. Je kleiner dieser ist, desto feiner ist die Sieblinie und desto höher ist der Mehlkorngehalt. Es ist entgegen früherer Publikationen jedoch nicht möglich einen allgemeingültigen Optimalwert für diesen anzugeben. Ein wesentlicher Einflussfaktor ist die Kornform. Kornfraktionen aus runden Körnern benötigen für ähnliche Frischbetoneigenschaften oft kleinere Feinkornanteile als gebrochene oder gedrungene Gesteinskörnung. Hinzu kommt, dass der Mehlkorngehalt bei gleichem Verteilungsmodul vom Größtkorn abhängig ist (vgl. Abbildung 2).

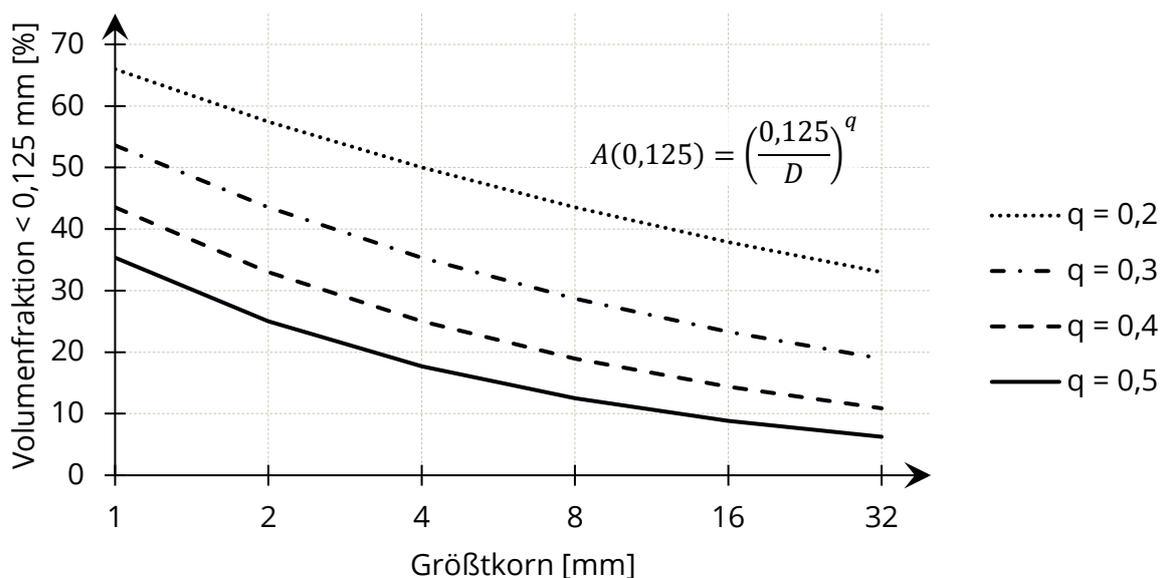


Abbildung 2: Zusammenhang von Mehlkorngesamt, Größtkorn und Verteilungsmodul der Sieblinie nach Andreasen und Andersen.

Eine triviale Berechnung des Verteilungsmoduls ist jedoch auch dann nicht möglich, wenn gewünschtes Größtkorn und maximaler Mehlkorngesamt gegeben sind, da sich das Andreasen-Modell auf Volumenanteile bezieht. Folglich müssen Korndichtedifferenzen der Gesteinskörnung und der Bindemittelphase berücksichtigt werden. Die bestmögliche Anpassung einer Sieblinie an das Andreasen-Optimum muss folglich iterativ erfolgen, was durch eine numerische Implementierung erheblich beschleunigt werden kann.

Daher wurde ein digitales Betonentwurfswerkzeug entwickelt, welches ein zentrales Projektergebnis darstellt. Ziel war dabei eine gute Implementierbarkeit bei Marktakteuren. Insofern wurde Microsoft Excel als Softwaregrundlage herangezogen. Eine dokumentierte Version liegt der digitalen Version dieses Dokuments bei. Es bedarf lediglich Grundkenntnisse, um die Materialliste um lokal verfügbare Bindemittel oder Gesteinskörnungen zu erweitern. Von diesen müssen die Reindichte sowie die Partikelgrößenverteilungen bekannt sein. Im Projekt wurde hierbei auf Analysesiebe und im Mehlkornbereich auf die Laserbeugungsanalyse zurückgegriffen. Das Entwurfswerkzeug berücksichtigt Korngrößen in Potenzschritten zwischen 2^{-11} mm und 32 mm.

Im Kern übernimmt der Excel-Solver die Optimierung, ein Plug-In, das standardmäßig vorinstalliert ist und nur aktiviert werden muss. Von diesem werden Zellen variiert, die den Verteilungsmodul sowie die Volumenanteile der Sieblinie enthalten. Als Zielgröße wird die Minimierung der mittleren relativen betragsmäßigen Abstands der Sieblinie zum Andreasen-Optimum vorgegeben:

$$\text{Abweichung} = \frac{1}{n} * \sum \frac{|\text{Sieblinie}_d - \text{Andreasen}_d|}{\text{Andreasen}_d}$$

Die Betragsbildung verhindert, dass sich positive und negative Abweichungen egalalisieren können. Die Angabe einer relativen Abweichung im Vergleich etwa zu einer quadratischen Abweichung sorgt zudem für eine höhere Auflösung des Mehlkornbereichs.

Zum Optimierungsergebnis wird entsprechend des gewählten w/z-Werts Wasser hinzugerechnet. Unter Berücksichtigung der Materialdichten folgt daraus die Betonrezeptur sowie eine Reihe weiterer Parameter. So dienen die Körnungsziffer und die D-Summe als Vergleichsmöglichkeit mit herkömmlichen Entwurfsansätzen. Weiterhin werden der Zementleim- und der Mehlkorngehalt ausgegeben. Die Implementierung weiterer Kennzahlen ist anwendenden Personen problemlos möglich. So lassen sich auch Umweltkennzahlen wie das globale Erwärmungspotential oder der Materialpreis leicht berechnen, wenn den Materialien entsprechende Rohdaten zugeordnet sind.

Der Excel-Solver erlaubt außerdem die Vorgabe von Randbedingungen. Erforderlich sind zum Beispiel Vorgaben, dass der Siebdurchgang der 32 mm-Fraktion 100 % beträgt oder die Definition des Mehlkorngehalts. Nebenbedingungen sind jedoch auch für Anwendende eine gute Möglichkeit, um den Mischungsentwurf an spezielle Anforderungen anzupassen.

Unter Anwendung dieser Methode wurde folgende Betonzusammensetzung entworfen, die alle Normvorgaben für alle Expositionsklassen erfüllt und sich in Laborversuchen zuverlässig extrudieren lässt (vgl. Tabelle 3, Basis-Zusammensetzung). Nach der oben begründeten Umstellung auf ein fließfähigeres Bindemittel konnte bei einem w/z-Wert von 0,45 sogar ganz auf Fließmittel verzichtet werden. Da es jedoch durch Nachdosierung von PCE-Fließmitteln leichter ist, die Fließfähigkeit zu Erhöhen statt umgekehrt, wird für die Praxis eine leichte Reduzierung des w/z-Werts empfohlen.

Tabelle 3: Zusammensetzung von 3D-druckbaren Normalbetonen mit 16 mm Größtkorn.

	Basis-Zusammensetzung	zementreduzierte Zusammensetzung
Zement CEM II/C-M	464,0 kg/m ³	350,0 kg/m ³
Kalksteinmehl	0,0 kg/m ³	55,0 kg/m ³
Quarzsand BCS 413	136,5 kg/m ³	178,3 kg/m ³
Sand 0/2	516,4 kg/m ³	542,9 kg/m ³
Kies 2/4	286,6 kg/m ³	320,1 kg/m ³
Kies 4/8	266,5 kg/m ³	292,9 kg/m ³
Kies 8/16	415,1 kg/m ³	463,0 kg/m ³
Wasser	208,8 kg/m ³	157,5 kg/m ³
Fließmittel	0,0 kg/m ³ / nach Bedarf	3,5 kg/m ³ / nach Bedarf
w/z-Wert	0,45	0,45
Mehlkorngelalt	500 kg/m ³	450 kg/m ³

Ohne nennenswerten Aufwand ist es insofern möglich, aus und mit vorhandenen Partikeln eine packungsdichte-optimierte Betonzusammensetzung unter Vorgabe anderer Randbedingungen zu generieren. Aus ökologischen Gründen sollte der Zementgehalt außerdem auf den dafür erforderlichen Wert von 350 kg/m³ reduziert werden. Als Ausgleich für den Mehlkornverlust wurde inertes Kalksteinmehl hinzugegeben. Dies ist ohne weiteres durch Nebenbedingungen abbildbar (vgl. Tabelle 3, Zementreduzierte Zusammensetzung).

Da die Wasserzugabe mit dem Zementgehalt sinkt, wird der Einsatz von PCE-Fließmittel erforderlich. Das schlägt sich in einer höheren Viskosität nieder. Im Übrigen scheint aber auch diese Rezeptur für den 3D-Druck geeignet. In Vorgriff auf das Kapitel „Mechanische Eigenschaften“ sei darauf hingewiesen, dass sich die Druckfestigkeit durch die Modifikation um 26 % auf 29,6 MPa und die Spaltzugfestigkeit um 6,4 % auf 4,4 N/mm² reduziert.

1.3.3 Kornformanalyse

Ergänzend zur Betrachtung der Korngrößen im Sieblinienverlauf, wurde in Absprache mit dem projektbegleitenden Ausschuss auch der Effekt der Kornform untersucht. Grundlage ist eine Computerized Particle Analysis (CPA) mit dem HAVER CPA 2-1 (vgl. Abbildung 3). Bei diesem Verfahren wird eine trockene Gesteinskörnungprobe über die Kante einer Vibrationsförderrinne gekippt. Im freien Fall werden die Partikel von einem Linienscanner erfasst. Anschließend werden Kennzahlen der Kornform für jedes Partikel aus dessen Projektion berechnet und über den gesamten Probenumfang Eigenschaftsverteilungen berechnet.

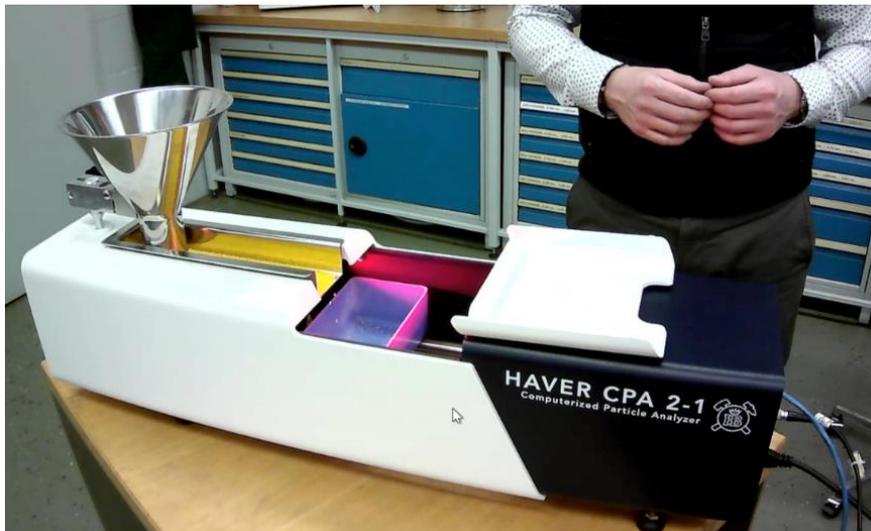


Abbildung 3: Partikelanalysegerät HAVER CPA 2-1

Analysiert wurden alle eingesetzten Kornfraktionen. Begrenzt ist die Methode nach unten bei einer Partikelgröße von 100 μm . Kleinere Partikel werden durch zu wenige Pixel aufgelöst, um daraus Geometriedaten abzuleiten. Ausgewertet wurden die Parameter maximaler Feret-Durchmesser Äquivalentdurchmesser, geodätische Länge und maximale Breite, welche alternative Korngrößenbeschreibungen darstellen. Als Referenz dient der minimale Feret-Durchmesser, der eine gute Deckung mit einer herkömmlichen Siebanalyse zeigt. Weiterhin wurden die Kennzahlen Zirkularität, Rundheit, Symmetrie und Seitenverhältnis einbezogen. Weitere Ausführungen hierzu sind dem Handbuch zu entnehmen (HAVER & BOECKER (2023): HAVER CpaServ PROFESSIONAL/EXPERT, Handbuch. Release V5.4, 05.01.2023.). Die Rohdaten werden hier zunächst nach Korngrößen klassifiziert. Anschließend wird anhand der Sieblinie ein gewichtetes Mittel für die gesamte Kornfraktion berechnet. Die Auseinandersetzung mit den Daten ist dem folgenden Abschnitt „Sensitivität des Betonentwurfs“ zu entnehmen.

1.3.4 Sensitivität des Betonentwurfs

Die dargestellte Methode für den Betonentwurf mit Nutzung eines iterativen Optimierungsalgorithmus zur Einstellung einer hohen Packungsdichte stellt ein zentrales Projektergebnis der FE 1 dar. Dieses wurde ausführlich validiert. Zunächst wurde das Größtkorn variiert. Eine Umstellung auf 8 mm ist in kürzester Zeit umgesetzt. Die generierte Rezeptur erwies sich in Laborversuchen ohne zusätzliches Nachjustieren als gleichwertig brauchbar.

Für eine Kooperation mit der RWTH Aachen wurde außerdem eine Feinkornrezeptur mit einem 2 mm, später 1 mm Größtkorn erzeugt. Hierfür kamen ausschließlich in Aachen verfügbare Materialien zum Einsatz. Die obligatorische Partikelgrößenanalyse stellte sich als aufwendig heraus,

liefert aber belastbare Daten für zukünftige Mischungsentwürfe. Grundsätzlich wurde so gezeigt, dass das Entwurfstool auf lokal verfügbare Ressourcen anwendbar ist.

Eine 3D-druckbare Feinkornmischung, welche die oben diskutierten Mehlkorngrenzen einhält, konnte jedoch nicht gefunden werden. Der Frischbeton stellte sich als zu steif und brüchig dar. Die Ursache ist in der größeren spezifischen Oberfläche der Sieblinie zu finden, welche von Zementleim benetzt werden muss. Daher wurde zusätzlich die Sensitivität des Materialverhaltens hinsichtlich des Verteilungsmoduls untersucht.

Hierfür wurde dieser aus der Variation durch den Excel-Solver herausgenommen. Es wurden Betonzusammensetzungen mit Verteilungsmoduln zwischen 0,35 und 0,50 generiert. Anschließend wurden alle Betonzusammensetzungen in ihrem Gesamtvolumen so skaliert, dass sie den gleichen absoluten Bindemittel- und somit auch Wassergehalt haben. Nun wurde von der grobkörnigsten Mischung (mit dem größten Verteilungsmodul) ausgehend, jeweils die Sieblinie der nächst feineren Mischung abgezogen. So werden Ergänzungssieblinien erhalten. Die Versuchsdurchführung beginnt mit der feinkörnigsten Mischung und beschränkt sich auf eine Konsistenzmessung mittels Hägermann-Ausbreittisch. Anschließend werden die Ergänzungssieblinien sukzessive hinzugegeben und jeweils ein Ausbreitmaß aufgenommen. Durch die vorangegangene Skalierung werden weder Zement noch Wasser nachdosiert, sodass der w/z-Wert unverändert bleibt. Im Gegenzug können Überlagerungen mit Effekten aus der Scherhistorie und dem Leimalter nicht ausgeschlossen werden. Abbildung 4 zeigt exemplarisch die Versuchsergebnisse für einen Beton mit 2 mm Größtkorn und einen w/z-Wert von 0,45 ohne den Einsatz von Fließmitteln.

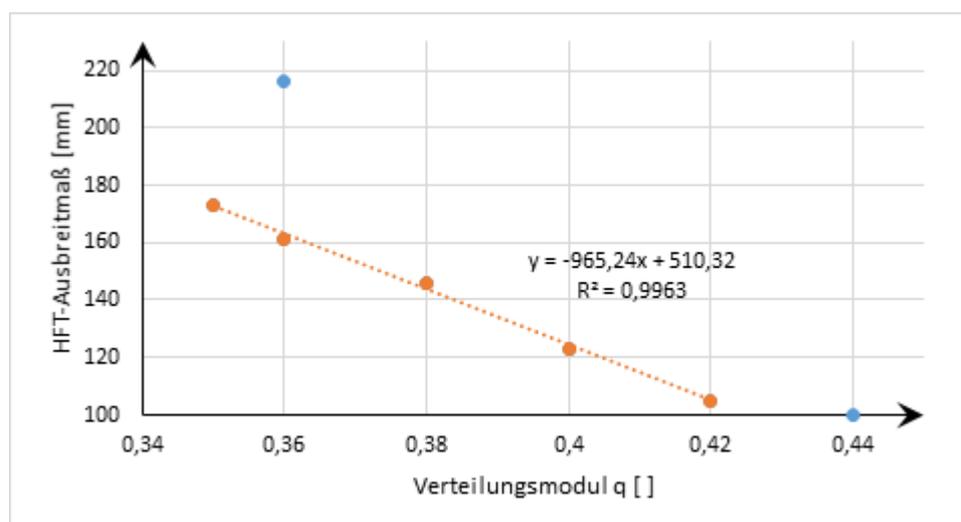


Abbildung 4: Zusammenhang der Mörtelkonsistenz vom Verteilungsmodul q.

Deutlich zeigt sich eine lineare Abnahme des Ausbreitmaßes mit dem Verteilungsmodul. Folglich wird der Beton mit zunehmendem Verteilungsmodul infolge abnehmender Leimkonzentration steifer. Dieser Zusammenhang setzt sich bis zu einem Ausbreitmaß von 100 mm fort, was dem Basisdurchmesser des Aufsetzkonus entspricht und keine Umformung nach 15 Stößen bedeutet. Weitere Versuche bestätigen auch bei Verwendung von 16 mm Größtkorn und dem Ausbreitmaß nach DIN EN 12350-5 diesen Kurvenverlauf. Zusätzlich kann ein kritischer Verteilungsmodul beobachtet werden, unterhalb dem eine Leimübersättigung einsetzt und keine Vergrößerung des Ausbreitmaßes zu beobachten ist.

Insofern ist es möglich einen maximal wirksamen Mehlkorngelalt zu bestimmen. Der lineare Zusammenhang ermöglicht außerdem die Berechnung eines optimalen Verteilungsmoduls, wenn das erforderliche Ausbreitmaß für den 3D-Druckprozess bekannt ist. Zu beachten ist jedoch, dass dieser Zusammenhang jeweils nur für eine konkrete Zusammensetzung aus Gesteinskörnung und Zementleim Gültigkeit besitzt. Zum einen ist ein erheblicher Einfluss der Leimrheologie zu erwarten. Darüber hinaus bezieht die Sieblinienoptimierung aber lediglich die Korngrößen ein und lässt den zu erwartenden Einfluss der Kornform unberücksichtigt.

1.3.5 Untersuchungen zur Pumpbarkeit der Betone

Grundsätzliche Untersuchungen zur Pumpbarkeit des Basisbetons sowie des zementreduzierten Betons (vergl. Tabelle 3 wurde mit Hilfe des Gleitrohrrheometers (Sliper, Fa. Schleibinger) durchgeführt [36]; [48]. Die Betone wurden in der gegebenen Zusammensetzung mit einem Volumen von 30 Liter hergestellt, die Einhaltung ausgewählter, dokumentierter Frischbetonkennwerte nachgewiesen (Ausbreitmaß, Luftporengehalt, Frischbetonrohddichte) und anschließend im Gleitrohrrheometer mit je 3 zunehmenden Ballastierungen geschert [49]. In Abbildung 5 ist die Experimentieranordnung nach Abschluss der Vorscherung und zu Beginn der Messhübe mit geringstem Ballast zu sehen. Abbildung 6 zeigt die Oberfläche des zementreduzierten Betons nach Abschluss der Versuche. Die rissartigen Deformationen sind eine Indikation für einen hochviskosen Beton an der Grenze zur Pumpbarkeit.



Abbildung 5: Gleitrohrrheometer (Fa. Schleibinger) befüllt mit Basisbeton, Ballaststufe 1.



Abbildung 6: Oberflächenmorphologie des zementreduzierten Betons nach Abschluss der Messungen im Gleitrohrrheometer (1+9 Hübe).

Die Messergebnisse aus den Gleittheometerversuchen sind in Abbildung 7 für den Basisbeton und in Abbildung 8 für den zementreduzierten Beton dargestellt. Beim Basisbeton sind die drei Messpunkte aus jeder Ballastierungsstufe eng gruppiert. Dies zeigt ein homogenes gutartiges Scherverhalten an. Die Fördermenge-Druck-Beziehung deutet auf eine mäßige Viskosität und

mutmaßlich gute Pumpbarkeit. Für den zementreduzierten Beton ist der Anstieg der Fördermenge-Druck-Beziehung dagegen viel steiler, da die hohe Reibung des Betons am Rohr sowie die hohe Viskosität deutlich höherer Drücke bedingen, um auch nur einen geringen Volumenstrom an Beton zu ermöglichen. Dieser Beton ist schlecht pumpbar.

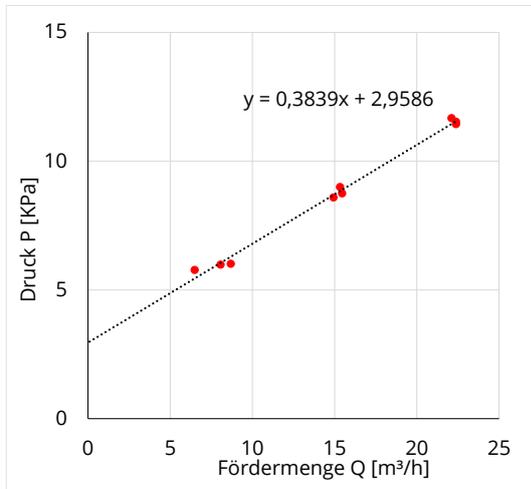


Abbildung 7: Ergebnisse der Gleitrohrreometer-Messung am Basisbeton.

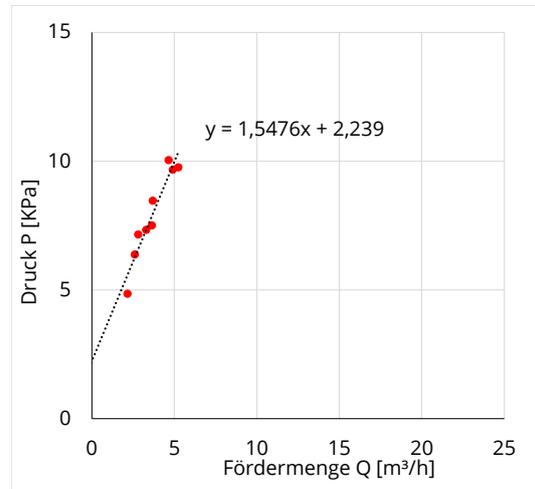


Abbildung 8: Ergebnisse der Gleitrohrreometer-Messung am zementreduzierten Beton.

Die Ergebnisse aus dem Geitrohrreometer wurden für eine Prognose des Pumpendruckes für folgendes Einsatzszenario ermittelt [49]: Förderung des Betons mit einer Betonpumpe mit 36-m-Mast (3 m Rohrlänge mit 150 mm Durchmesser, 36 m Förderleitung mit 125 mm Durchmesser, Übergabe des Betons gepumpten Betons in einer relativen Förderhöhe von 2 m. Abbildung 9 zeigt die für diese Rohleitungskonfiguration erforderlichen Pumpendruck für angestrebte Fördermengen von 5, 20 und 40 m³/h. Die Werte liegen in für die Betonförderung üblichen Bereichen. Für die bei einem 3D-Druck-Szenario anzunehmenden sehr kleinen Fördermengen liegt der Förderdruck in der Größenordnung von < 5 bar. In Abbildung 10 stellt sich für den zementreduzierten Beton die Situation deutlich anspruchsvoller dar. Erwartungsgemäß ist hier der Förderdruck zum Erreichen der Fördermengen von 5, 20 und 40 m³/h mehrfach höher und liegt bei hohen Volumenströmen im Grenzbereich üblicher Pumpendrucke. Bei kleinen Fördermengen kann allerdings auch der zementreduzierte Beton mit Pumpendruck < 10 bar gefördert werden.

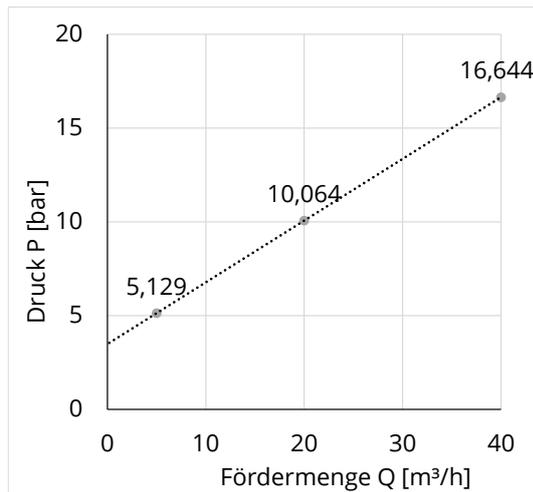


Abbildung 9: Druck-Fördermengen-Prognose für den Basisbeton (Betonpumpe mit 36 m -Mast).

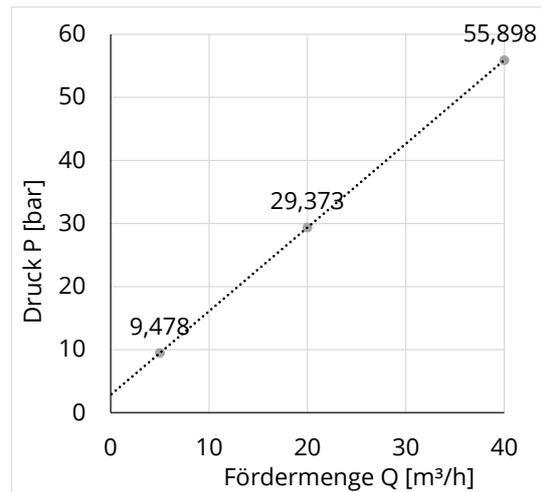


Abbildung 10: Druck-Fördermengen-Prognose für den zementreduzierten Beton (Betonpumpe mit 36 m -Mast)..

Die Experimente mit dem Gleitrohrreometer und die daraus abgeleiteten Prognosen zum Pumpendruck sind aber noch keine hinreichenden Aussagen und garantieren nicht notwendigerweise die Pumpbarkeit der Betone. Vor allem beim zementreduzierten Beton besteht aufgrund der Eigenschaften des frischen Betons ein Risiko zur Blockierung in der Pumpleitung, vor allem beim Füllen der Förderleitung aber auch beim Wiederanpumpen nach (längeren) Unterbrechungen des Förderprozesses.

Ein quantitatives Modell zum Einfluss der Betonzusammensetzung auf das Pumpverhalten und zur technischen Konzipierung pumpwiderstandsreduzierter und blockierungsresistenter Betone wurde im IGF-Vorhaben Nr. 20947 BG „Sichere Betonförderung – Pumpbarkeit und Pumpstabilität“ erarbeitet [34]. Dort wurde gezeigt, dass u.a. die Leimschichtdicke und die Feststoffkonzentration des Leims wesentlichen Einfluss sowohl auf die Pumpbarkeit als auch Blockierneigung haben.

1.3.6 Viskositätsmodifizierung mittels Luftporenbildner

Mit dem projektbegleitenden Ausschuss wurde diskutiert, ob der Einsatz von instabilen Luftporenbildnern geeignet ist, um die komplexen Anforderungen an den Frischbeton zu erfüllen. Diese Additive werden üblicherweise eingesetzt um eine definierte Porenverteilung im Beton zu erzeugen, was dessen Frostbeständigkeit erhöht. Bekannt ist aber weiterhin, dass die Luftporen im Frischbeton wie Kugellager wirken und dessen Fließfähigkeit erhöhen. Diese Vorzüge gehen zu Lasten der Festigkeit. Seitens des projektbegleitenden Ausschusses wurde auf ein Produkt hingewiesen, durch das Luftporen eingebracht werden, die während der Verdichtung wieder ausgetrieben werden. Auf die additive Fertigung übertragen hieße das, dass der Frischbeton mit hohem Porengehalt ausgestattet und so leicht gepumpt werden kann. Während der Extrusion würden die Poren wieder zerstört, sodass der Beton in eingebauten Zustand mit einem üblichen Luftporengehalt vorliegt.

Im Rahmen eines Screenings wurde diese These untersucht. Neben dem instabilen Luftporenbildner wurden zwei weitere Produkte zu Vergleichszwecken eingesetzt. Tatsächlich erhöhten alle die Fließfähigkeit stärker als es ein PCE-Fließmittel bei gleicher Dosierung (1 M%_{Zement}) ermöglicht. Abbildung 11 zeigt die Konsistenz anhand von Setzmaßen nach DIN EN 12350-2. Diese

wurden zweimal wiederholt, wobei jede Wiederholung mit einer Verdichtung und dem damit verbundenen Austrieb von Luftporen verbunden ist. Folglich wird die Konsistenz steifer und das Setzmaß somit kleiner. Die Abbildung zeigt aber auch, dass der Effekt bei allen eingesetzten Produkten ähnlich ausgeprägt ist.

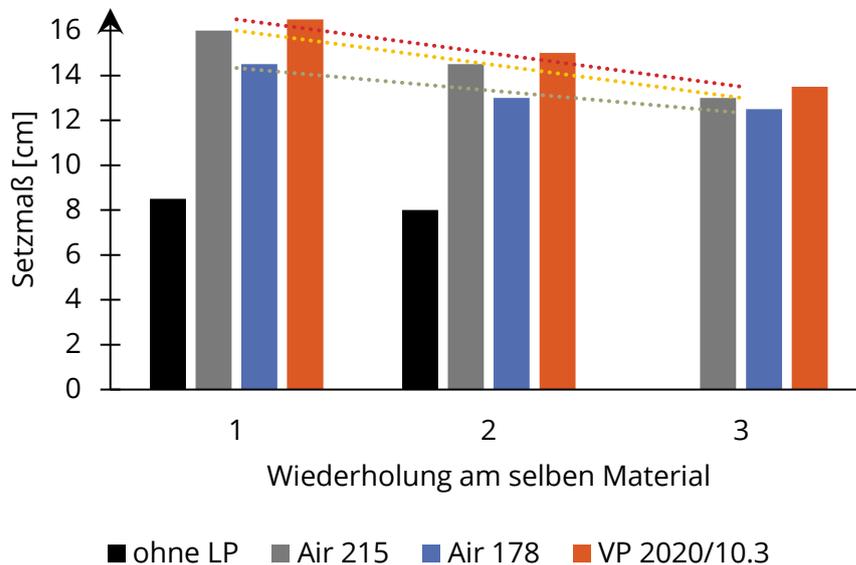


Abbildung 11: Auswirkung von Luftporenbildnern auf die Frischbetonkonsistenz.

Weiterführende Versuche bestätigten die Literatur hinsichtlich des Einflusses des Mischregimes. Auch deswegen gilt LP-Beton als besonders anspruchsvoll. Da die Anforderungen an die Handhabung von 3D-druckbarem Beton jedoch ohnehin komplex ist, werden Luftporenbildner nicht für den 3D-Druck empfohlen. Diese Einschätzung wird von der qualitativen Beobachtung gestützt, dass der Frischbeton mit einem hohen LP-Gehalt stark an Kohäsion verliert. Dies wirkt sich nachteilig auf das gleichmäßige und rissfreie Extrusionsbild aus.

1.4 Messkonzepte

1.4.1 Rotationsrheometrie

Standardverfahren der Rheometrie ist die Rotationsrheometrie, bei der ein Fluid im Spalt zwischen einer Messgeometrie und der Wandung des Probenkopfs geschert wird. Aufgenommen werden dabei die Drehgeschwindigkeit und das Drehmoment, welche in Scherrate und Scherspannung umgerechnet werden können. Die Vorgabe scherraten- oder scherspannungsgesteuerter Prüfzyklen erlaubt das Messen aller relevanten rheologischen Parameter.

Voraussetzung für die Anwendbarkeit klassischer Auswertungsmodelle ist eine laminare Strömung im Scherspalt. Die Rheometrie geht von einem linearen Scherratenverlauf aus. An der Wandung des Probenkopfs ist demnach die Scherrate null; an der Kontaktfläche zur Messgeometrie ist sie maximal und proportional zur vorgegebenen bzw. gemessenen Drehgeschwindigkeit. Die Erfahrung zeigt, dass diese Annahme bei Messgeometrien mit glatter Oberfläche nicht zutreffend ist, da sich hier eine Gleitfuge ausbildet und der Beton nahezu ungeschert bleibt [24].

Um dies zu vermeiden, werden für die Betonrheometrie Messspitzen mit profilierter Oberfläche verwendet. Die Lamellen stellen eine Verzahnung mit dem Beton her. Die Laborpraxis zeigt jedoch, dass es auch dann zur Scherfugenbildung kommt. Die aufgezeichneten Messkurven ermöglichen insofern lediglich qualitative Auswertungen. Quantitativ kann nur die Scherspannung zur Ausbildung einer Scherfuge plausibel aufgenommen werden.

Es ist daher infrage zu stellen, ob rotationsrheometrische Verfahren geeignet sind, um strukturviskose Medien wie z. B. Mörtel und Beton zu messen. Um Alternativen zu entwickeln, wurden das Konzept der Kugelmesssonde herangezogen. Statt mit einer zylindrischen Messgeometrie wurde das Rheometer hierfür mit einer exzentrisch angeordneten und an einem dünnen Stab montierten Kugel ausgestattet. Eingetaucht in das Material verdrängt die Sonde das Medium, was eine Neuordnung des Gefüges erzwingt. Der Widerstand wird als Drehmoment aufgenommen.

Vorteil des Messkonzepts ist, dass sie kontinuierliche statische Messungen erlaubt. Während in der klassischen Rotationsrheometrie das vollständige Volumen nach der initialen Bewegung als gesichert anzusehen ist, steht vor der Kugel während der ersten Umdrehung ungesichertes Material an. Mit einem quasistatischen Belastungszyklus ließe sich so der Zeitverlauf des Strukturaufbaus aufzeichnen.

Entsprechende Rheometer sind am Markt verfügbar (vgl. Schleibinger). Um mehr Freiheitsgrade untersuchen zu können, wurde jedoch ein eigener Entwurf für die Laboranwendung umgesetzt. Variierbare Faktoren sind dabei der Durchmesser der Kugel, deren Exzentrizität sowie die Eintauchtiefe. Denkbar ist außerdem die gleichzeitige Kombination mehrerer Kugeln (Abbildung 12).



Abbildung 12: Links: Untersuchte Durchmesser und Anordnungen von Kugelgeometrien im Rotationsrheometer. Rechts: Schematischer Aufbau eines Rotationsscherversuches mit exzentrischer Kugel.

Die Vorversuche zeigten jedoch, dass der zum Drucken verwendete Beton zu steif für eine solche Messung ist. Zum einen wird so leicht die Belastungsgrenze des Rheometers erreicht. Zum anderen wurden von der Kugel Hohlräume im Beton hinterlassen. Damit kommt es zu einer globalen Umformung, wodurch Randbedingungen wie die Eintauchtiefe nicht mehr als konstant angenommen werden können und zusätzliche unkontrollierte Einflussfaktoren in der Auswertung zu berücksichtigen sind. Außerdem ändert sich damit auch die Kontaktfläche der Kugel mit dem Beton. Modelle, die von einem vollständigen Umschließen der Kugel ausgehen, werden so, analog zu den Zylindergeometrien der klassischen Rotationsrheometrie, ungültig. Die Erforschung dieser

dennoch vielversprechenden Methode konnte insofern nicht im Rahmen dieses Projekts geleistet werden.

1.4.2 Penetrationstest

Weiterhin eingesetzt wurden Penetrationstests nach Lootens [31]. Eine Frischbetonprobe wird dafür weggesteuert von einer Messspitze penetriert. Die Messspitze besitzt einen Durchmesser von 8 mm und ist aus einem Zylinder mit einer Kegelspitze zusammengesetzt. Die Messspitze ist an einer Universalprüfmaschine montiert. Aufgezeichnet wird die zum Penetrieren erforderliche Kraft.

Lootens et al. zufolge lässt sich die gemessene Kraft anhand der Geometrie in eine Scherspannung umrechnen [31]. Unter der Bedingung einer quasistatischen Versuchsdurchführung ist so eine kontinuierliche Aufzeichnung der zeitlichen Entwicklung der statischen Fließgrenze mit zunehmendem Alter des Penetrationsmediums möglich. Als geeignet stellte sich eine Maschinengeschwindigkeit von 10 mm/h heraus, nachdem die Messspitze zuvor mit 1 mm/s vollständig eingetaucht wurde.

Entsprechende Kurven zeigen zunächst einen konstanten Verlauf auf niedrigem Niveau, bevor ein sich beschleunigender Scherspannungszuwachs, angezeigt durch einen zunehmenden Penetrationswiderstand eintritt (siehe z.B. Abbildung 13). Für eine Auswertung hinsichtlich der Verarbeitungszeit ist eine kritische Scherspannung festzulegen, oberhalb der Beton als nicht mehr verarbeitbar gilt. Lootens et al. schlagen hierfür 3,5 MPa vor, was ihren Versuchen zufolge der Scherspannung beim Erreichen des Erstarrungspunkts nach dem Vicat-Versuch nach Norm entspricht.

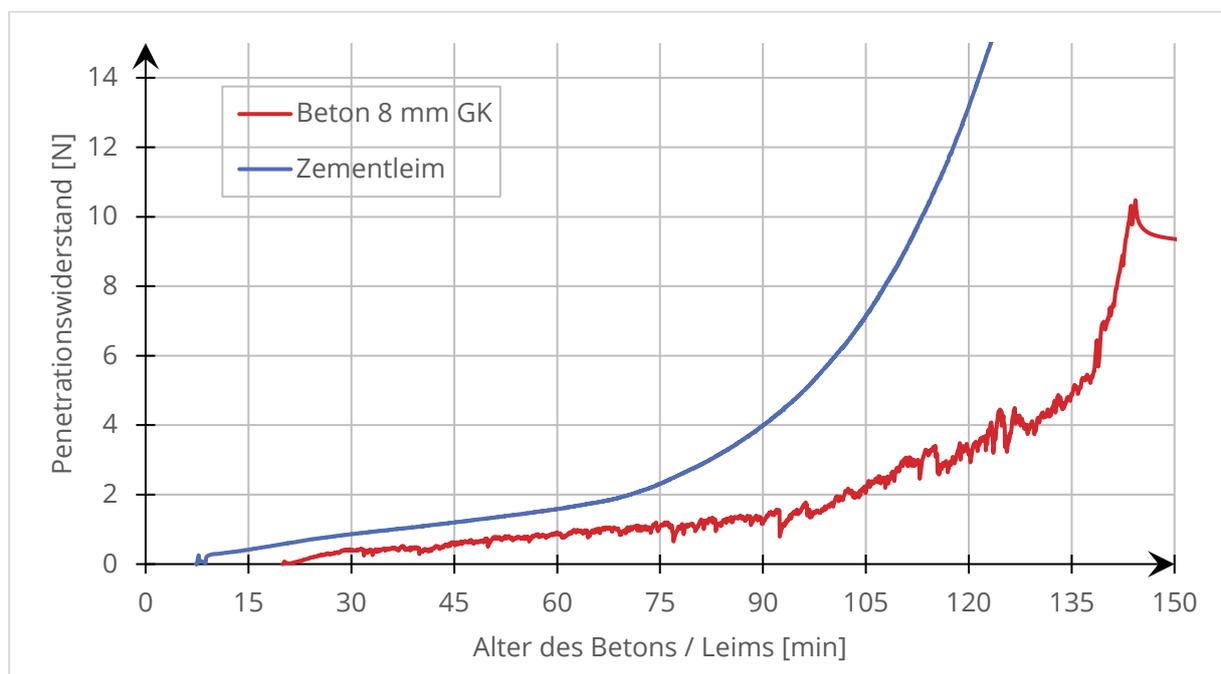


Abbildung 13: Messwerte eines quasistatischen Penetrationsversuches nach Lootens [31] an Zementleim und 3D-Druckbeton mit Größtkorn der Gesteinskörnung 8 mm

Für die Dokumentation des Erhärtungsverlaufs ist das Verfahren ungeeignet. Ab einer nicht näher bestimmten Grenze geht der Beton von einem Fließen in ein mechanisches Versagen über. Dies

ist dem Kurvenverlauf nicht zu entnehmen, markiert jedoch die Grenze, ab der eine Interpretation der Daten nicht mehr plausibel ist.

Eine weitere Limitierung besteht hinsichtlich des Größtkorns. Bei einem Messspitzendurchmesser von 8 mm und einem Größtkorn von 16 mm ist der Einfluss der Kornkontakte groß. Der Kurvenverlauf ist dann einer statistischen Unschärfe mit größeren Ausschlägen unterworfen. Durch die sehr langsame Penetrationsgeschwindigkeiten müssen so Beobachtungsabschnitte > 30 min verworfen und interpoliert werden.

Abhilfe schafft die Vergrößerung der Messgeometrie. Ist der Messspitzendurchmesser größer als das Größtkorn, darf von einer statistischen Verteilung der Kornkontakte ausgegangen werden. Validierungsversuche bestätigen einen geringeren Störeinfluss. Außerdem zeigt sich, dass der elektrische Widerstand des Frischbetons und die Abnahme des Hägermann-Ausbreitmaßes einen ähnlichen Verlauf zeigen, sodass die Verwendung des slow-penetration-Test zur Aufzeichnung des Ansteifungsverlaufs geeignet ist (siehe Abbildung 14 und Abbildung 15).



Abbildung 14: Experimentieranordnung zur gemeinsamen Erfassung der Penetrationskraft in einem quasistatischen Versuch sowie des elektrischen Widerstandes an einem 3D-Druckbeton.

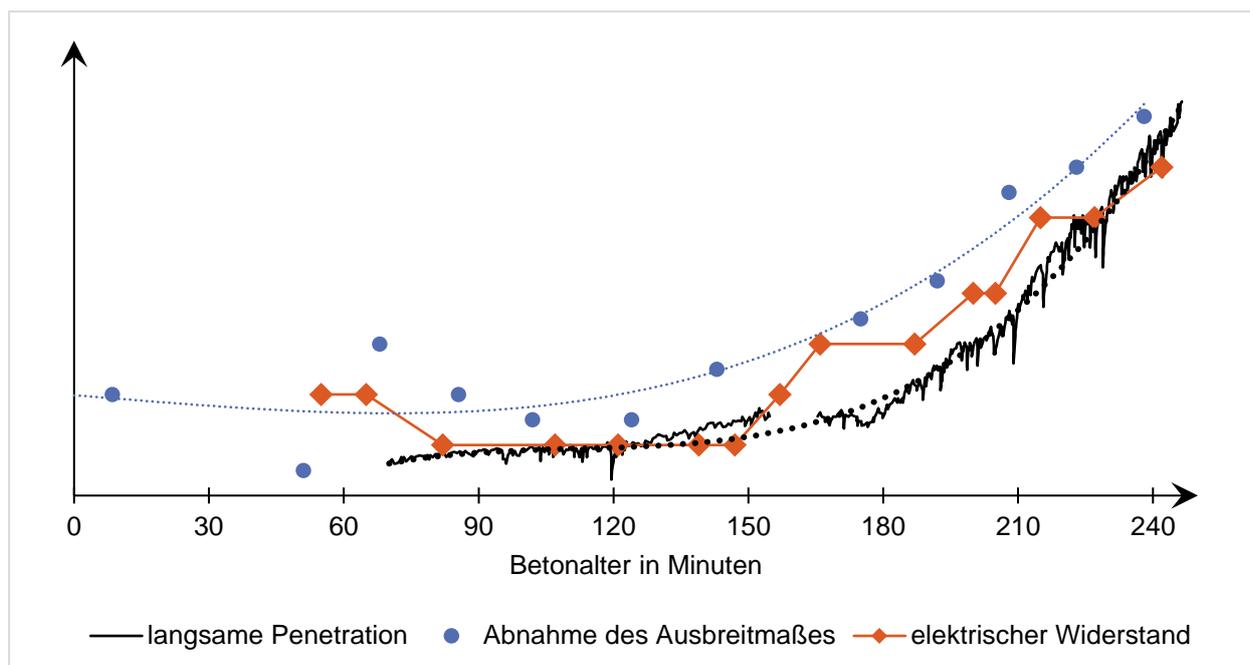


Abbildung 15: Zusammenhang der Messgrößen aus einem quasistatischen Penetrationstest an einem 3D-Druckbeton, dem Ausbreitmaß auf dem Hägermantisch sowie dem elektrischen Widerstand..

Diese Methode wird für die Laboranwendung zur Einstellung des Frischbetonverhaltens empfohlen. Die insitu-Anwendung im Kontext des Beton-3D-Drucks unterliegt der Hürde, dass eine genommene Probe im weiteren Verlauf anderen Randbedingungen unterliegt. Das betrifft insbesondere die Schereinwirkung. Während das für den 3D-Druck prozessierte Material während des Vorhaltens, Pumpens und Extrudierens weiter geschert wird, kommt es bei der entnommenen und ruhig gestellten Parallelprobe zum ungehinderten Strukturaufbau. Zwar liegt das Erreichen von gewählten Scherspannungsgrenzwerten der Parallelprobe dann auf der sicheren Seite. Die Annahme, dass damit jedoch direkt auf das Materialverhalten des Betons im Drucksystem geschlossen werden kann, muss zurückgewiesen werden.

1.4.3 Setz- und Ausbreitmaß einschließlich digitaler Auswertung

Als praktikabel im Versuchsablauf und damit im übertragenen Sinne im Bauablauf stellten sich das Setz- und Ausbreitmaß nach Norm heraus. Verstopfer und Diskontinuitäten während der Extrusion traten bei Setzmaßen kleiner 8 cm ein. Bei Setzmaßen größer als 12 cm wurde die vorgesehene Stranghöhe von 50 mm nicht mehr erreicht, da das Material dann zu fließfähig war.

Das Setzmaß wurde nur in Anlehnung an DIN EN 12350- 2 durchgeführt. Tatsächlich wurde der Versuchsablauf gemäß Norm ausgeführt, allerdings wurde der Hohlkegel des Ausbreitmaßes (DIN EN 12350-5) angewendet um die Versuchseinrichtungen auf eine Geometrie zu reduzieren. Dieses Vorgehen erleichtert auch den ordnungsgemäßen Füllgrad ohne Lufteinschlüsse, da die Öffnung oben größer und die Höhe reduziert ist. Damit wurde eine andere Kegelstumpfgeometrie genutzt als in der Norm vorgesehen. Das Vorgehen erleichtert jedoch den Versuchsablauf. Typische Ausbreitmaße druckbarer Betone lagen zwischen 40 cm und 48 cm. Es wird empfohlen, das Setzmaß zum Einstellen der Konsistenz durchzuführen und das Ausbreitmaß als Ergänzung hinzuzunehmen. Auch wenn keine präzisen Empfehlungen für Zielwerte des Ausbreitmaßes gegeben werden, erlaubt das Materialverhalten während der Erschütterungen Betontechnologinnen und Betontechnologen sowie erfahrenen Maschinenführerinnen und Maschinenführern einen wertvollen subjektiven Eindruck.

Ergänzend wurden verschiedene Betone dieser Messprozedur sowohl mit dem Setzmaßkegel als auch dem Ausbreitmaßkegel unterzogen. In Abbildung 16 sind jeweils die Setzmaße als auch die Ausbreitmaße übereinander aufgetragen. Die Regressionskurven zeigen eine sehr gute Annäherung der Daten. Vergleiche zwischen Ausbreitmaßen nach EN 12350 und Ausbreitmaßen mit dem Hägermann-Ausbreittisch bestätigen dies für feinkörnige Rezepturen. Es wird daraus geschlossen, dass Setz- und Ausbreitmaße von einer Kegelform in eine andere umgerechnet werden können. Vermutet wird, dass sich empirisch Formeln finden lassen, die eine Umrechnung nur anhand gegebener Geometrieparameter erlauben.

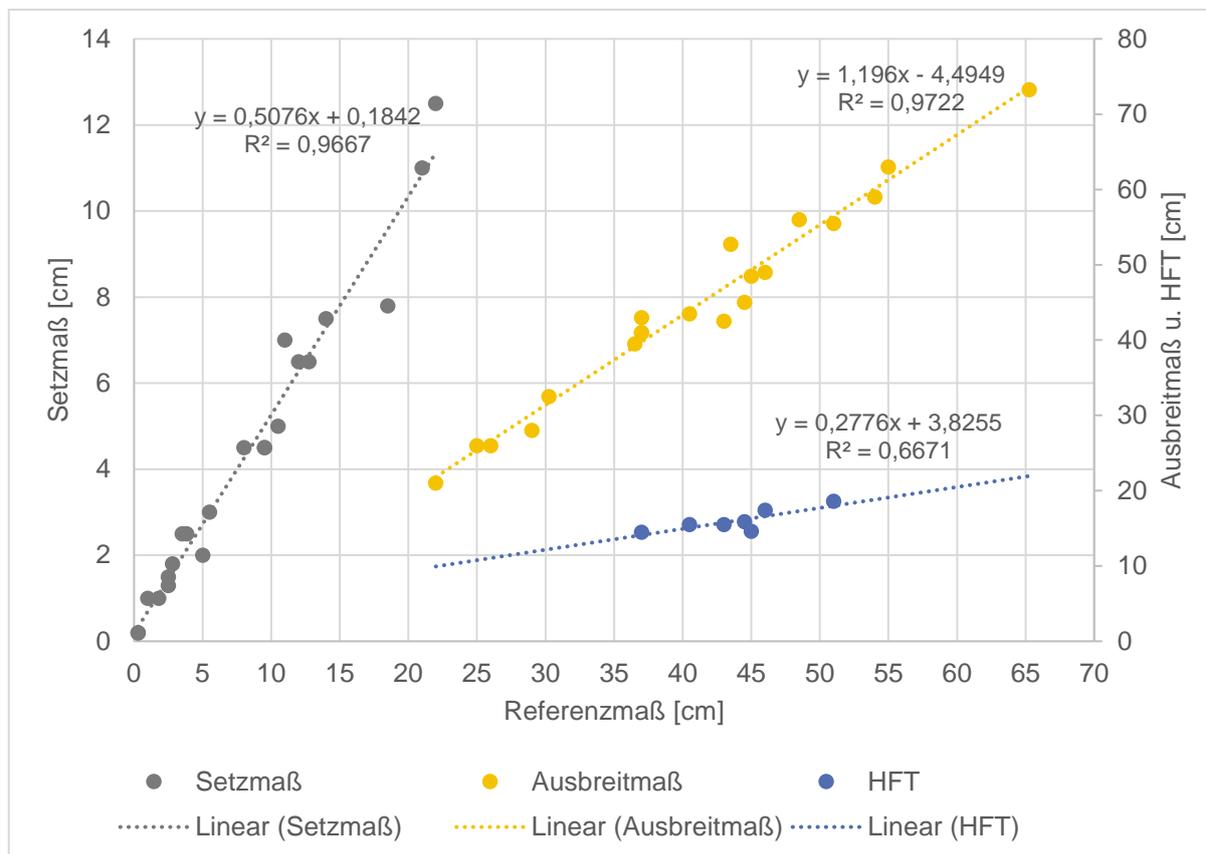


Abbildung 16: Auftragung der Messwerte für Setzmaß (in Anlehnung an DIN EN 12350-2), Ausbreitmaß (DIN EN 12350-5) und Hägermannstisch (nur bei feinkörnigen Betonen) für verschiedene Betonzusammensetzungen für den 3D-Druck über einem Referenzmaß.

Weiterhin wurde der These nachgegangen, dass die Gestalt des Setzmaßes Resultat eines Fließens ist und folglich durch rheologische Parameter bestimmt ist. Die Auswertung sollte also über globale Parameter wie absolute Höhe hinaus vertieft werden und z.B. Deformationen des Betonkonus berücksichtigen. Für diese Untersuchungen wurde ein Workflow entwickelt, bei dem eine Kamera automatisiert den Betonkonus umfährt (Abbildung 17) und aus verschiedenen Winkeln und Perspektiven Fotos des Setzmaßes (z.B. Abbildung 18) aufnimmt. Die Bildserien für einen Betonkonus wurden an eine individuell angepasste Photogrammetrie-Prozedur übergeben, die aus den Bildern eine 3D-Oberfläche des Betonkonus errechnete. Diese Oberflächenkontur wurde parametrisiert und an ein neuronales Netzwerk übergeben. Parallel wurden die im Setzmaß abgebildeten 3D-Druckbetone in (möglichst exakten) rotationsrheometrischen Experimenten untersucht und die ermittelten Daten und Kennwerte (dynamische Fließgrenze, statische Fließgrenze, plastische Viskosität) ebenfalls an das neuronale Netzwerk übergeben. Insgesamt wurden mit

dieser Methode 67 Datensätze erzeugt. Die Zusammensetzung des Betons wurde jeweils geringfügig modifiziert, so dass zwar nur wenige Datensätze zum Training des neuronalen Netzes vorlagen, die aber zumindest ein breites Spektrum an Ergebnissen abbilden.

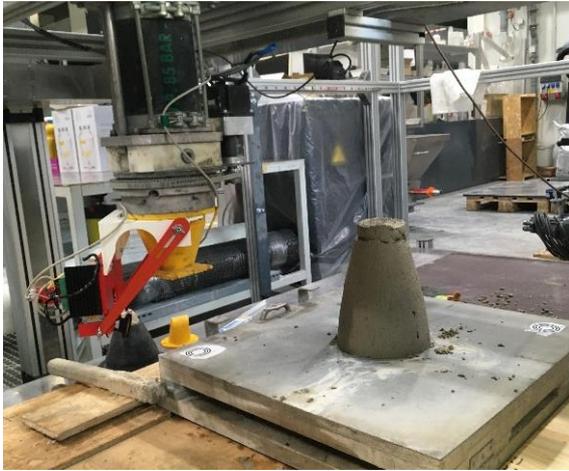


Abbildung 17: Experimentieranordnung für die automatisierte Abbildung des Setzmaß-Konus aus verschiedenen Raumrichtungen.



Abbildung 18: Abbildung des Setzmaßkonus aus einer spezifischen Perspektive.

Nach dem Training des neuronalen Netzes wurden 6 weitere 3D-Druck-Betone hergestellt und mit o.g. Methoden die Prognosequalität des trainierten neuronalen Netzes validiert (Abbildung 19). Eine exakte, belastbare Vorhersage der Rheologie aus den Geometriedaten konnte nicht nachgewiesen werden. Jedoch wurde oben bereits diskutiert, dass die Methoden zur Ermittlung der exakten rheologischen Kennwerte, die für das Training als auch die Validierung herangezogen wurden, nur uneingeschränkt zutreffende Daten liefert. Weiterhin wurde das neuronale Netz nur mit 67 Datensätzen trainiert. Insgesamt scheint der hier vorgestellte Ansatz aber vielversprechend, auch mit Blick auf die Anwendung bei konventionellen Betonen ohne spezifische Ausprägungen für den 3D-Druck.

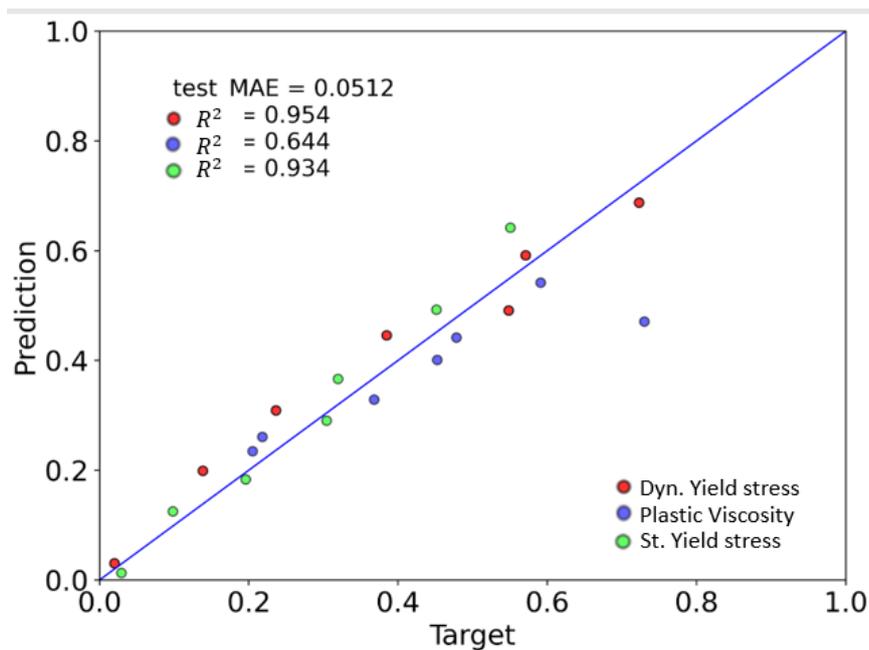


Abbildung 19: Vorhersagequalität der Frischbetonkennwerte Dynamische Fließgrenze, Statische Fließgrenze sowie Plastische Viskosität auf Grundlage von parametrierter Abbildungen des Setzkonus mit Hilfe eines trainierten neuronalen Netzes.

1.4.4 Inline-Auswertung der Geometrie und Oberflächenstruktur extrudierter Stränge

Zur Messung der Schichtgeometrie während des Extrusionsprozesses wurde ein Linienlaser-Sensorsystem eingesetzt. Das Messgerät besteht aus zwei Linienlaser-Sensorköpfen (Keyence LJ-V7300), die zueinander geneigt am Druckkopf angebracht wurden (Abbildung 20). Die Linienlaser tasten auf einer Messlänge von 160 mm im Raster von 0,3 mm beliebige, nicht total reflektierende Untergründe ab und übergeben mit hoher Messfrequenz diese geometrischen Daten an einen Auswerterechner.

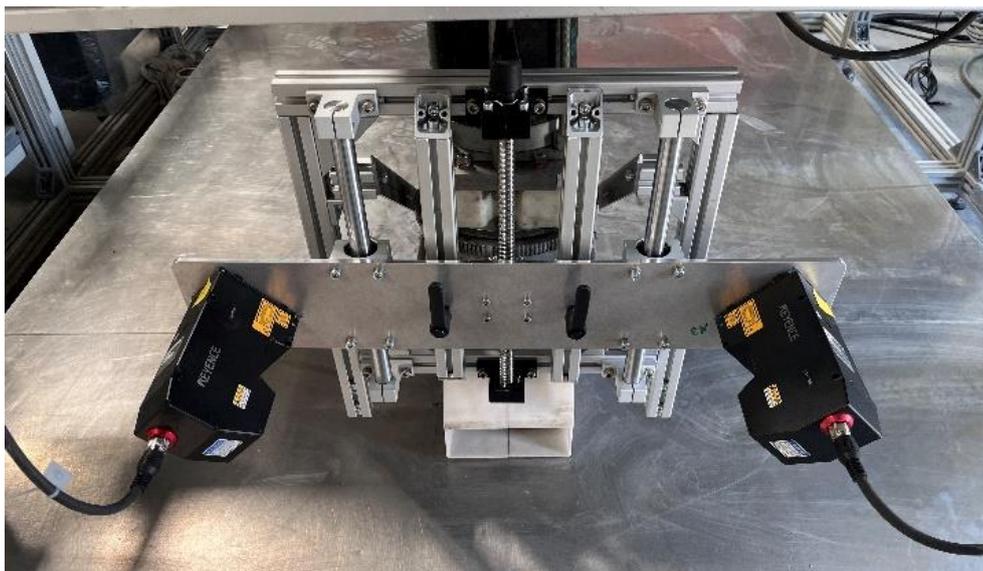


Abbildung 20: Extruderdüse mit zwei Linienlaser-Sensoren zur kontinuierlichen Messung der Geometrie des Extrudierten Stranges.

Dort werden die quasi-kontinuierlich erfassten Einzelprofile des extrudierten Stranges unter Einsatz spezifisch entwickelter Softwareroutinen und unter Berücksichtigung der Bahndaten des Extruderkopfes zu einer 3D-Oberfläche des Stranges zusammengeführt. Die Software ermöglicht folgende Auswertungen bzw. Nutzungen der 3D-Daten:

- Echtzeit-Visualisierung des Druckprozesses
- Echtzeit-Qualitätsprüfung mittels Rauheitsmessung nach DIN EN ISO 25178
- Generierung von Signalen für eine exakte und effektive Steuerung des Extrusionsprozesses durch die Nachregelung der Fahrgeschwindigkeiten der Maschinenachsen, so dass der Strang in der angestrebten Geometrie extrudiert wird.

Die Echtzeit-Visualisierung erfolgt durch ein polygonales Modell, das automatisch aus den gescannten Einzelprofilen während des Scanvorgangs erstellt wird (Abbildung 21). Dieses Modell kann anschließend als STL-Datei gespeichert werden.

Die Echtzeit-Qualitätsprüfung erfolgt durch die Messung der Rauheit an einer bestimmten Stelle der Schichtoberfläche (z.B. Abbildung 22), die frei wählbar ist, aber relativ zum sich bewegenden Sensor positioniert werden muss. Während des Druckvorgangs bewegt sich die ausgewertete Stelle zusammen mit dem Druckkopf. Die an dieser Stelle berechnete Rauheit (S_a) des gerade gedruckten Materials wird kontinuierlich ausgegeben und kann als weitere Dimension mit der Trajektorie des Druckpfades und den weiteren Prozessparametern der Extrusion gespeichert und bewertet werden.

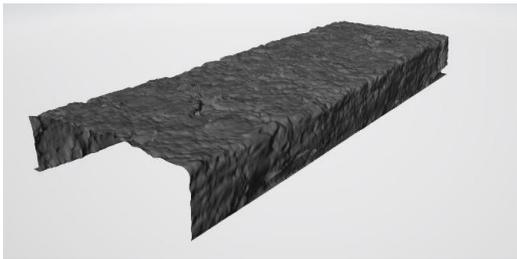


Abbildung 21: 3D-Oberfläche des extrudierten Stranges (Polygonnetz).

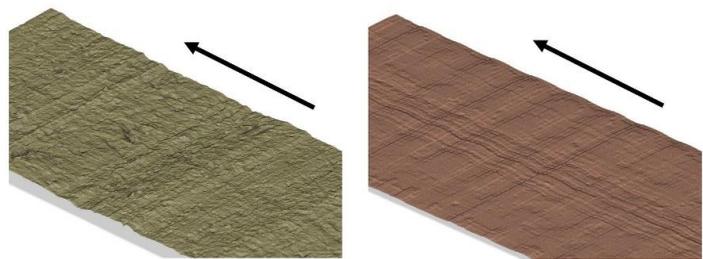


Abbildung 22: Abbildung verschiedener Oberflächenstrukturen am extrudierten Strang als Ausgangspunkt zur Ermittlung von Rauheitsparametern.

1.4.5 Bildbasierte Konformitätsprüfung der Geometrie abgelegter Strukturen

Die Überprüfung der Ist-Geometrie und der geometrischen Konformität gegenüber dem Soll-Zustand der mittels Extrusion gefertigten Strukturen erfolgte mit Methoden der Photogrammetrie. Zur Datengewinnung wurde am Druckkopf eine Kamera installiert. Die Kamera erfasst das abgelegte bzw. 3D-gedruckte Objekt aus verschiedenen Perspektiven und übergibt den Bilddatensatz an eine Software. Die Software steuert zum einen die Kamera und nutzt zum anderen die Bibliothek Alicevision Meshroom, um aus den Bilddaten ein geometrisches Modell herzustellen. Mit Hilfe der Software wird auch eine geometrische Überlagerung bzw. Kalkulation der Abweichungen des gemessenen bzw. berechneten Ist-Zustandes vom ursprünglichen Modell durchgeführt. Die Überlagerung wird durch ein gemeinsames Referenzsystem möglich. Hierfür kommt ein CCTag-Netz zum Einsatz, bei dem die Tags als Positionierungsmarker dienen (Abbildung 23).

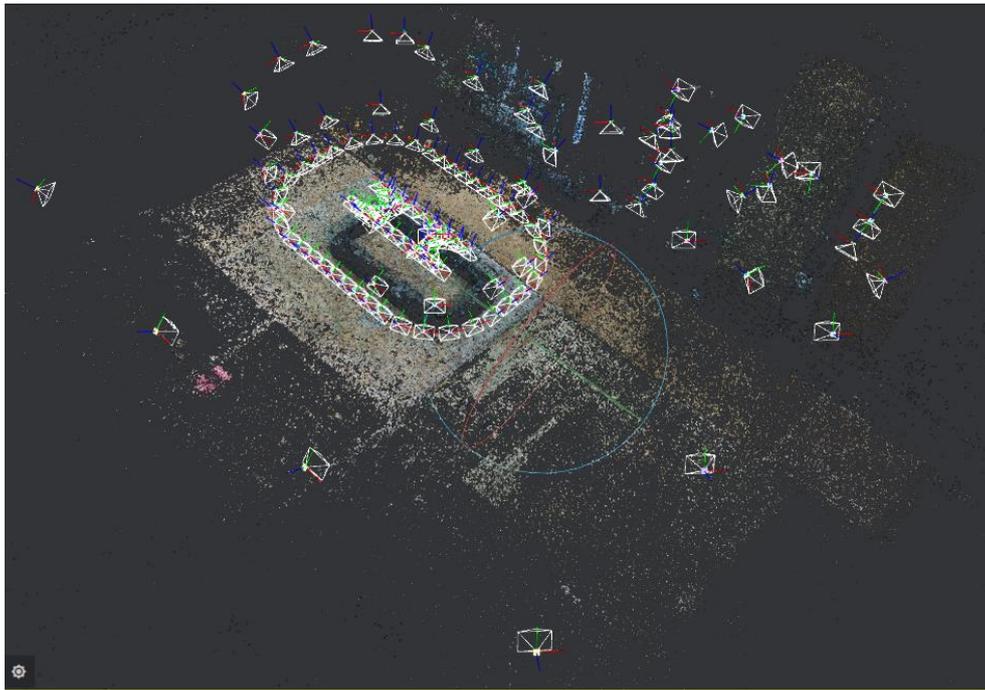


Abbildung 23: Visualisierung des CCTag-Netztes mit Angabe der Positionen der Kamera für die Bildgewinnung zur photogrammetrischen Auswertung.

Durch dieses Messverfahren wird die vorhandene, durch Extrusion hergestellte Objektstruktur gegen den CAD-Datensatz vermessen und die geometrische Konformität bewertet. Das Maß der Abweichungen von der Sollgeometrie wird in der Visualisierung durch eine Farbpalette angezeigt (Abbildung 24). Im numerischen Datensatz können die geometrischen Abweichungen als beliebig orientierte Vektoren ermittelt und ausgegeben werden.

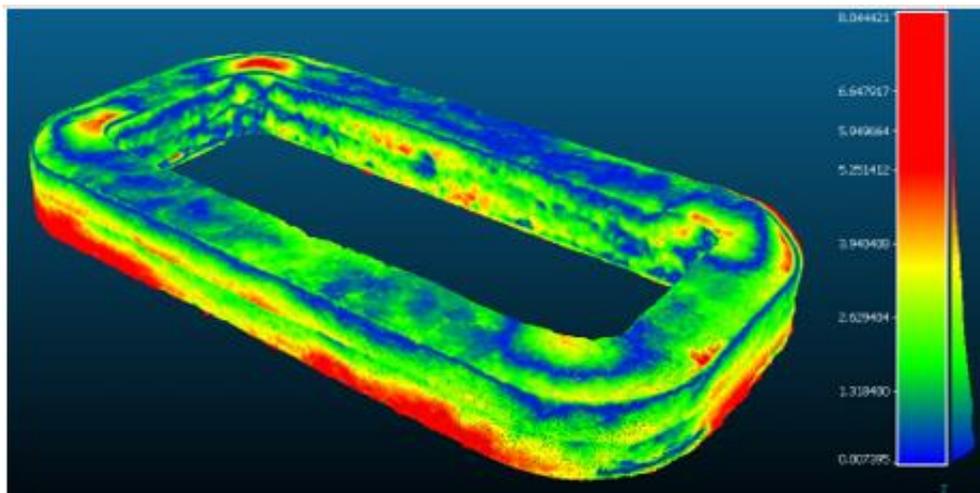


Abbildung 24: Falschfarbenbild einer einfachen 3D-gedruckten Struktur zur Darstellung der geometrischen Abweichungen vom Sollzustand (CAD-Modell). Rot: Ist-Zustand ragt über Sollzustand hinaus. Blau: Ist-Zustand liegt innerhalb der durch den Sollzustand definierten Oberfläche.

1.4.6 Zusammenstellung untersuchter Frischbetonprüfungen

Tabelle 4: Zusammenstellung der im Vorhaben in Experimenten eingesetzten und untersuchten Frischbetonprüfungen.

	gemessene Eigenschaft	Aussagekraft	Baustellentauglichkeit
koaxiale Rotationsrheometrie	u. a. statische Fließgrenze, dynamische Fließgrenze, plastische Viskosität, Strukturaufbaurrate, Thixotropie	Sehr gute theoretische Grundlagen für umfassende Materialanalysen. Wegen Abscherens des Volumens an der Messgeometrie sind Modelle häufig nicht quantitativ anwendbar.	Keine baustellentauglichen Gerätekonfigurationen bekannt. Laborgeräte sind sehr preisintensiv und nicht hinreichend robust.
Kugelmesssonde	u. a. statische Fließgrenze, dynamische Fließgrenze, plastische Viskosität, Strukturaufbaurrate, Thixotropie	Hoch, wenn Umschluss der Sonde sichergestellt ist. Theoretische Grundlagen ausbaufähig.	Kommerzielle Geräte für Baustelleneinsatz verfügbar.
langsame Penetration	zeitlicher Verlauf der statischen Fließgrenze bis zum Erstarren	Hoch mit der Einschränkung, dass die weitere Scherhistorie des Materials im Drucksystem nicht abgebildet wird.	Denkbar als paralleles Materialmonitoring, sobald robustes Setup verfügbar ist.
Setzmaß/Ausbreitmaß	Konsistenz	Hinreichend, hoher Operator-Einfluss. Erfahrenes Personal gewinnt u. a. aus Fließverhalten und Oberflächenbeschaffenheit qualitativen Eindruck des Materialverhaltens.	Etabliert und genormt.
Photogrammetrie des Setzmaßes	Aufgenommene Geometrie möglicherweise mit rheometrischen Parametern korrelierbar.	Unklar, möglicherweise hoch. Weitere Forschung erforderlich.	Als Smartphone-App denkbar. Gute Einbindbarkeit in digitale Prozesskette. Versuchsaufbau wie Setzmaß etabliert und genormt.
Inline-Scan	Geometrie und Oberflächenbeschaffenheit und daraus Abweichung vom Soll	Hoch, sehr gute Auflösung.	Gegeben, wenn Robustheit und Reinigungsfähigkeit verbessert ist. Preisintensive Messtechnik.
bildbasierte Konformitätsprüfung	Abweichung Soll- zu Istgeometrie	Hoch, sehr gute Auflösung.	Gut in digitale Prozesskette integrierbar. Preisintensive Messtechnik.

1.5 Mechanische Eigenschaften 3D-gedruckter Betone

Zur Beschreibung der mechanischen Eigenschaften von Strukturen wurden als Prüfvolumen zur Probengewinnung mit dem vorhandenen 3D-Druck-Laborprüfstand sechs Wände mit Soll-Abmessungen 140 cm * 50 cm * 15 cm (L x H x B) gedruckt. Als Beton kam der im Vorhaben entwickelten Basisbeton (siehe Tabelle 3). zum Einsatz. Für den zementreduzierten Beton wurden nur ausgewählte mechanische Eigenschaften mit reduzierter Stichprobengröße geprüft. Als 3D-Druckverfahren wurde die horizontale Extrusion von Strängen und nachfolgende Ablage nur unter Wirkung der Gewichtskraft angewendet (Abbildung 25).



Abbildung 25: Wand mit den Maßen $u/v/w$ 140/15/50 cm³ zur Probekörpergewinnung.

Nach dem 3D-Druck wurden die Wandstrukturen für einen Tag auf der Fertigungsplattform belassen und danach bis zum Alter von 28 Tagen in einem Wasserbad gelagert. Mit diesem Vorgehen sollte eine weitgehende Übereinstimmung der Nachbehandlung mit dem Stand der Technik bei der Herstellung von Prüfkörpern aus Beton gewährleistet werden. Anschließend wurden aus den Wänden verschiedene Probekörper zur Untersuchung (struktur)mechanischer Eigenschaften (Druckfestigkeit, Biegezugfestigkeit im 3-Punkt-Biegeversuch, Spaltzugfestigkeit, zentrische Zugfestigkeit, E-Modul bei Druckbelastung) gewonnen. Die Proben wurden so entnommen, dass die Belastung in den 3 wesentlichen Raumrichtungen u , v , w (siehe [39] sowie Abbildung 26) erfolgen kann. Für jede Raumrichtung wurden jeweils fünf Proben geprüft.

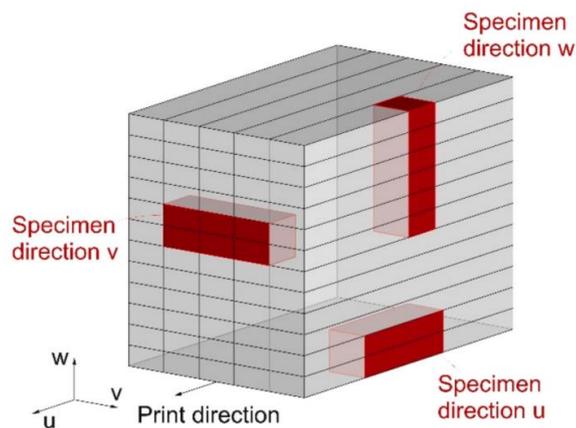


Abbildung 26: Orientierung der Raumrichtungen u , v , w in einem mittels Extrusion von Strängen 3D-gedruckten Objekt [39]

1.5.1 Druckfestigkeit

Zur Ermittlung der Druckfestigkeit wurden aus den Wandstrukturen Würfel mit 15 cm Kantenlänge herausgesägt sowie Zylinderproben mit Durchmesser 15 cm und Länge 15 cm aus an Bohrkernen gewonnen. Die Gewinnung, Konditionierung sowie Prüfung der Proben erfolgte in strenger Anlehnung an die noch nicht veröffentlichte „Test Specification Compression“ des RILEM TC „Assessment of Additively Manufactured Concrete Materials and Structures“. Die Ergebnisse aus den Prüfungen sind in Abbildung 27 dargestellt und zeigen an, dass die 3D-gedruckten Proben (BK-150 x, W-150 x) zum einen keine ausgeprägte Richtungsabhängigkeit der Druckfestigkeit zeigen und zum anderen (nur) eine geringfügig kleinere Druckfestigkeit aufweisen als konventionell hergestellte Proben (W-150 cast). Die im Mittelwert etwas geringen Druckfestigkeiten der Zylinder aus Bohrkernen BK-150 x gegenüber gesägten Würfelproben W-150 x kann aus den vorliegenden Daten nicht begründet werden. Möglicherweise führt die geringfügig größere Schlankheit der Zylinderproben zu geringerer Querdehnungsbehinderung bei der Prüfung und damit kleiner gemessenen Bruchkräften. Einige Zylinderproben vor und nach der Prüfung sind in Abbildung 29 dargestellt.

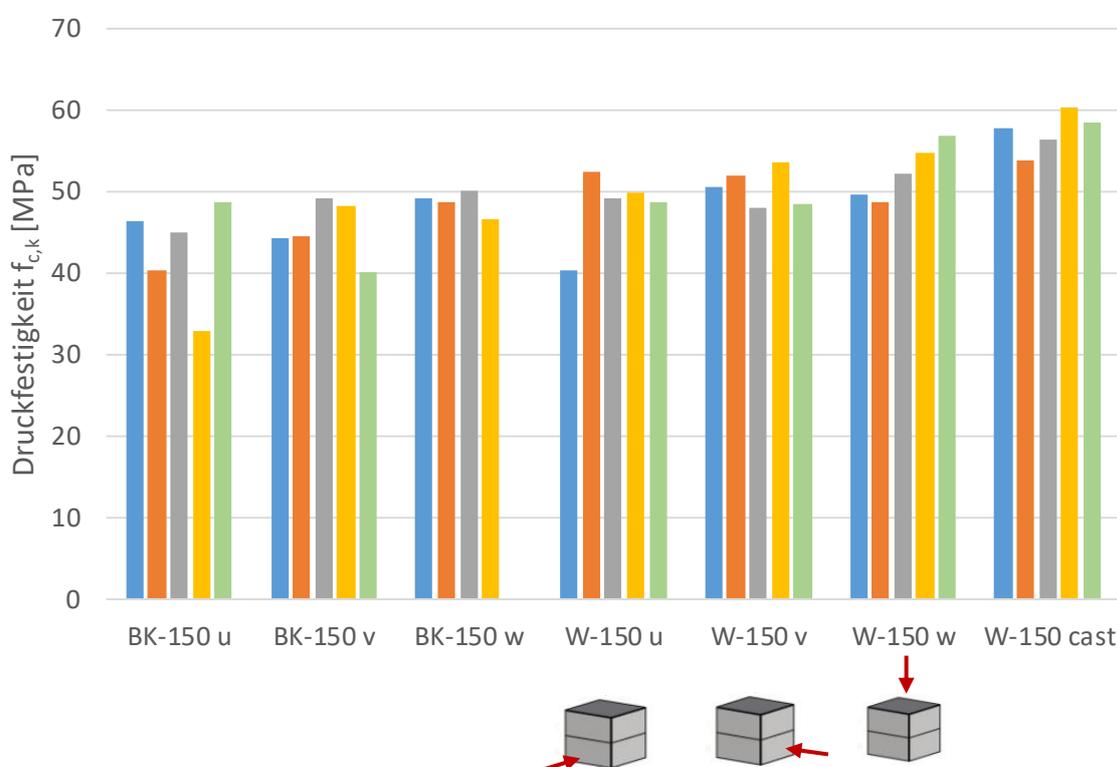


Abbildung 27: Druckfestigkeit an Bohrkernen (BK-150) und Würfeln (W-150) aus einer 3D-gedruckten Struktur in Abhängigkeit von der Orientierung der Lastachse (u, v, w) und im Vergleich zu konventionell in einer Form hergestellten Würfelproben (W-150 cast). Die farbigen Balken repräsentieren je eine geprüfte Probe.

Ein Screeningversuch (n = 3) an 10 cm Würfeln mit der zementreduzierten Rezeptur ergab eine mittlere Druckfestigkeit nach sieben Tagen von 30 MPa, was einer Festigkeitsminderung auf 75 % der Basisrezeptur im gleichen Alter entspricht, für viele konstruktive Anwendungen jedoch hinreichend ist.

1.5.2 Biegezugfestigkeit

Die Biegezugfestigkeit der 3D-gedruckten Struktur wurde an gesägten Prismen mit den Abmessungen 40 cm x 10 cm x 10 cm im 3-Punkt-Biegeversuch (Stützweite 300 mm) in

Anhängigkeit von den drei wesentlichen Orientierungen u , v , w ermittelt. Die Gewinnung, Konditionierung sowie Prüfung der Proben erfolgte in strenger Anlehnung an die noch nicht veröffentlichte „Test Specification Flexural Strength“ des RILEM TC „Assessment of Additively Manufactured Concrete Materials and Structures“. Die Ergebnisse aus der Prüfung sind in Abbildung 28 dargestellt und durch Skizzen zur Orientierung der Lastschneide zum Eintrag der Prüfkraft (erster Buchstabe in der Nomenklatur) sowie der Orientierung der Längsachse der gedruckten Wand (zweiter Buchstabe der Nomenklatur) ergänzt. Die Messungen zeigen, dass 3D-gedruckte Proben mit Probenorientierung u (P-400 v.u sowie P-400 w.u) eine höhere Biegezugfestigkeit als konventionell hergestellte Betone (P-400 cast) aufweisen. Dies kann auf den Extrusionsprozess zurückgeführt werden, bei dem eine Nachverdichtung und Texturierung des Betonstranges in Richtung der Extrusion erfolgt. Die im Vergleich zum Strangbeton geringere Schubfestigkeit in den Interlayern der Stränge hat offensichtlich keinen negativen Einfluss auf die Biegetragfähigkeit der Proben P-400 v.u. Einen deutlichen Einfluss zeigt der lagenweise Aufbau der Probe bei der Probenorientierung w (P-400 u.w). Hier beschränken Imperfektionen sowie strukturelle Störungen in den Interlayern die Biegetragfähigkeit und führen zu einer geringeren Biegezugfestigkeit im Vergleich zu konventionellen Proben (P-400 cast). In Abbildung 30 ist das Bruchbild einer Probe P-400 u.w im Vergleich zu dem einer konventionell hergestellten Probe dargestellt. Der versagensbestimmende Riss entwickelte sich im Interlayer der 3D-gedruckten Probe, der durch einen höheren Anteil an Feinstoffen gekennzeichnet ist. Eine Kornverzahnung durch grobe Gesteinskörnungen findet de-facto nicht statt, so dass hier auch ein spröderes Versagen im Vergleich zu den anderen Belastungsrichtungen und Probenarten zu vermuten ist.

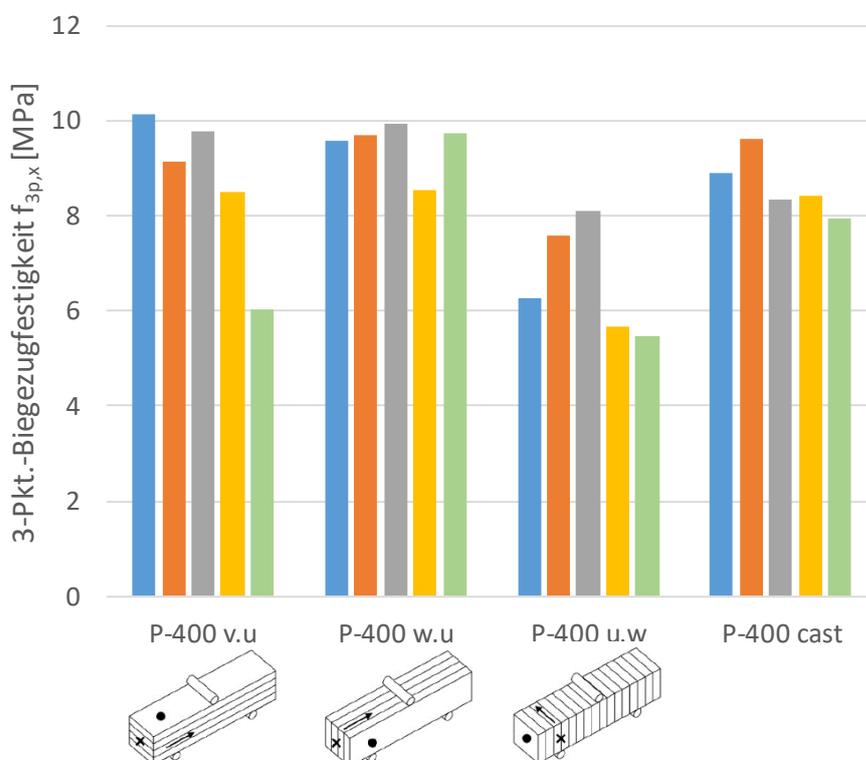


Abbildung 28: Biegezugfestigkeit an Prismen (P-400) aus einer 3D-gedruckten Struktur in Abhängigkeit von der Orientierung der Lastachse (u , v , w) und im Vergleich zu konventionell in einer Form hergestellten Prismen (P-400 cast). Die farbigen Balken repräsentieren je eine geprüfte Probe.



Abbildung 29: Zylinderproben für den Druckversuch nach (links) und vor (rechts) der Belastung.



Abbildung 30: Bruchfläche von Prismen aus dem Biegezugversuch. Links: Probe aus konventioneller Herstellung in Schalung (P-400 cast). Rechts: 3D-gedruckte Probe mit Orientierung u.w (P-400 u.w).

1.5.3 Spaltzugfestigkeit

Die Spaltzugfestigkeit der 3D-gedruckten Struktur wurde an Zylindern mit Durchmesser 150 mm und Länge 300 mm (die aus Bohrkernen zubereitet wurden) in Abhängigkeit von den drei wesentlichen Orientierungen u, v, w ermittelt. Die Gewinnung, Konditionierung sowie Prüfung der Proben erfolgte unter Beachtung der „Test Specification Splitting Tension“ des RILEM TC „Assessment of Additively Manufactured Concrete Materials and Structures“. Als Vergleichsprobe wurden Zylinder mit gleichen Zielabmessungen konventionell in Schalungen hergestellt. Die Ergebnisse aus der Prüfung sind in Abbildung 31 dargestellt und durch Skizzen zur Orientierung der Krafttrichtung und Orientierung der Schichtung in der Probe ergänzt. Die geringste Spaltzugfestigkeit zeigen die Proben vom Typ w.u/v. Demgegenüber zeigen die anderen 3D-gedruckten Proben ca. 1 MPa höhere Werte. Die höchste Spaltzugfestigkeit wurde an den konventionell hergestellten Proben Z-150 cast ermittelt. Die Einordnung der Prüfergebnisse an den gedruckten Proben fällt schwer: Der Autor würde die geringste Spaltzugfestigkeit an Proben vom Typ v.u/w vermuten, da hier die (Spalt)zugkräfte senkrecht zu den Interlayern orientiert sind und in Analogie zur Biegezugprüfung hier größer Störungen beim Lastübertrag zu erwarten wären. Für die beiden anderen Orientierungen würden dagegen höhere, ca. gleich große Spaltzugfestigkeiten erwartet. Der Sachverhalt, dass an in Schalung hergestellten Proben höherer Werte ermittelt wurden als an den Zylindern aus Bohrkernen kann auf die höhere Rauigkeit und ggf. Welligkeit der Mantelfläche der gebohrten Proben zurückgeführt werden. Die Lastschneide zum Eintrag der Prüfkraft liegt dann nicht vollflächig auf, so dass unter den Kontaktpunkten Spannungskonzentrationen entstehen, die zu einem ungleichmäßigen Querspannungszustand im Inneren der Proben führen. Lokal höhere Querspannungen (bzw. Spaltzugspannungen) initiieren dann ein Globalversagen schon bei geringeren Druckkräften. Bei geschalteten Proben ist die Mantelfläche dagegen eben, die Druckspannungen werden gleichverteilt eingetragen, der Querspannungszustand im Inneren der Zylinder ist demzufolge homogen und das Globalversagen findet erst bei höherer Druckspannung statt. In Abbildung 33 ist das Bruchbild einer gedruckten Spaltzugprobe mit Orientierung v.u/w dargestellt.

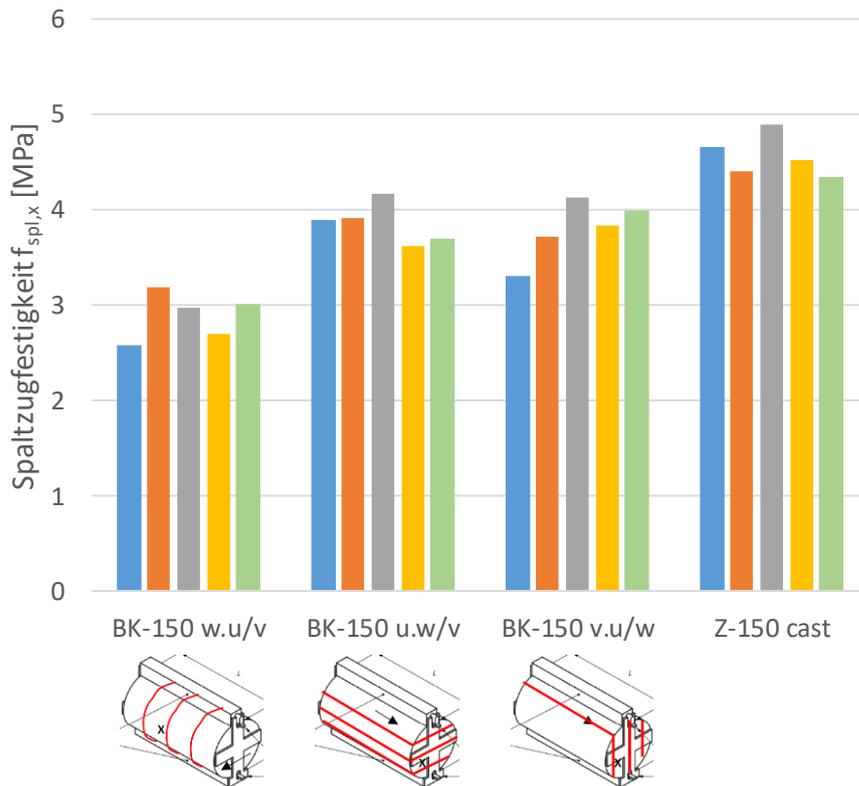


Abbildung 31: Spaltzugfestigkeit an Bohrkernen (BK-150) aus einer 3D-gedruckten Struktur in Abhängigkeit von der Orientierung der Lastachse (u, v, w) und im Vergleich zu einer konventionell in einer Form hergestellten Zylinderprobe (Z-150 cast). Die farbigen Balken repräsentieren je eine geprüfte Probe.

Ein Screeningversuch ($n = 3$) zur Spaltzugfestigkeit an 10 cm Würfeln mit der zementreduzierten Rezeptur ergab eine mittlere Spaltzugfestigkeit nach sieben Tagen von 4,4 MPa, was einen Festigkeitsminderung auf 94 % der Basisrezeptur im gleichen Alter entspricht.

1.5.4 Zugfestigkeit

Die zentrische Zugfestigkeit der 3D-gedruckten Struktur wurde an Zylindern mit Durchmesser 100 mm und Länge 300 mm in den Orientierungen u und w ermittelt. Die Zylinder wurden aus Bohrkernen zugeschnitten. Deren Gewinnung, Konditionierung sowie Prüfung erfolgte unter Beachtung der „Test Specification Tension“ des RILEM TC „Assessment of Additively Manufactured Concrete Materials and Structures“. Als Vergleichsprobe wurden Prismen mit Abmessungen 100 mm x 100 mm x 300 mm konventionell in Schalungen hergestellt. Die Ergebnisse aus der Prüfung sind in Abbildung 32 dargestellt und durch (die Probengeometrie falsch abbildende) Skizzen zur Orientierung der Krafrichtung und Orientierung der Schichtung in der Probe ergänzt. Die Ergebnisse zur zentrischen Zugfestigkeit sind plausibel: Bei den 3D-gedruckten Proben mit Krafortientierung in Richtung w ist die Zugfestigkeit aufgrund der zu erwartenden Gefügestörungen in den Interlayers zu den geringsten Werten. Die Zugfestigkeit in Richtung der Extrusion (Krafortientierung u) ist dagegen mehr als doppelt so hoch und im Mittel geringfügig größer als die geschaltete Proben. Für die Prüfung der Zugfestigkeit mit Orientierung der Kraft in Richtung v konnten aufgrund der Wanddicke von nur ca. 150 mm keine Proben mit hinreichender Länge gewonnen werden. Daher wurden dazu keine Experimente durchgeführt. Diese Verhältnisse der Zugfestigkeiten in Krafrichtung w und u sind plausibel und harmonisieren mit den Ergebnissen aus der Biegezugprüfung. Das Bruchbild entlang des Interlayers einer Zugprobe BK-100 w ist in Abbildung 34 dargestellt.

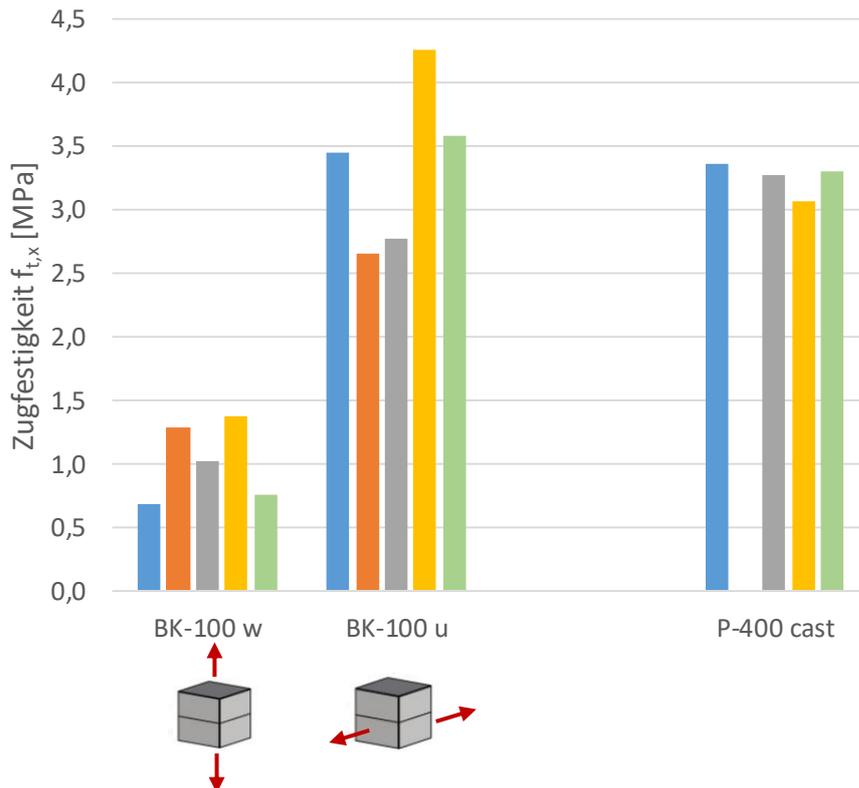


Abbildung 32: Zentrische Zugfestigkeit an Bohrkernen (BK-100) aus einer 3D-gedruckten Struktur in Abhängigkeit von der Orientierung der Lastachse (u, w) und im Vergleich zu konventionell in einer Form hergestellten Prismen (P-400 cast). Die farbigen Balken repräsentieren je eine geprüfte Probe.



Abbildung 33: Zylinderprobe vom Typ: BK-150 v.u/w nach dem Spaltzugversuch.



Abbildung 34: Bruchfläche einer Zugprobe vom Typ BK-100 w.

1.5.5 Elastizitätsmodul (Druckbelastung)

Der Elastizitätsmodul (Sekanten-Modul bei Druckbelastung) der 3D-gedruckten Struktur wurde an Zylindern mit Durchmesser 100 mm und Länge 200 mm in den Orientierungen u und w ermittelt. Als Vergleichsproben wurden Prismen mit Abmessungen 100 mm x 100 mm x 200 mm konventionell in Schalungen hergestellt. Die Gewinnung, Konditionierung sowie Prüfung der Bohrkerns bzw. Zylinder erfolgte unter Beachtung der „Test Specification Secant E-Modulus“ des RILEM TC „Assessment of Additively Manufactured Concrete Materials and Structures“. Die Ergebnisse aus der Prüfung sind in Abbildung 35 dargestellt und durch (die Probengeometrie falsch abbildende) Skizzen zur Orientierung der Krafrichtung und Orientierung der Schichtung in der Probe ergänzt. Der E-Modul des 3D-gedruckten Betons ist in beiden untersuchten

Orientierungen kleiner als derjenige der in Schalung hergestellten Betone. Die Messwerte an Proben mit Belastungsrichtung u (in Richtung der Extrusion) zeigen eine hohe Streuung. Eine plausible, widerspruchsfreie Begründung für die vorliegenden Verhältnisse bei Berücksichtigung der zuvor postulierten Thesen zu den anderen Materialkennwerten fällt schwer und findet daher nicht statt. Hinreichend lange Proben für die Belastung in Richtung v konnten aus den gedruckten Wänden nicht gewonnen werden, so dass keine Ergebnisse für diese Lastorientierung vorliegen.

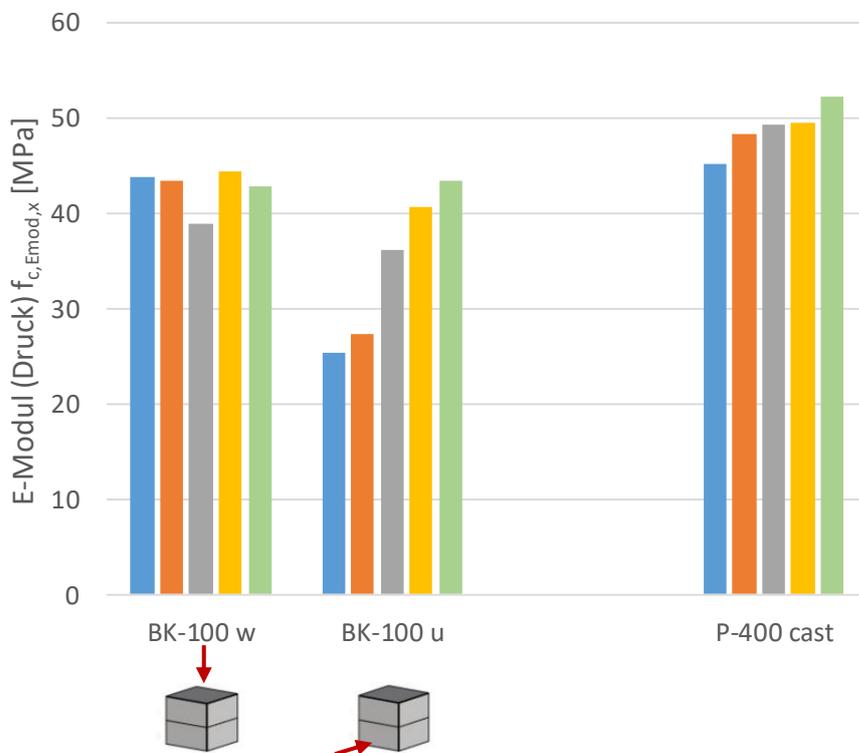


Abbildung 35: E-Modul an Bohrkernen (BK-100) aus einer 3D-gedruckten Struktur in Abhängigkeit von der Orientierung der Lastachse (u , w) und im Vergleich zu einer konventionell in einer Form hergestellten Prismen (P-400 cast). Die farbigen Balken repräsentieren je eine geprüfte Probe.

1.5.6 Schichtenverbund in Abhängigkeit von der Interlayerzeit

Wie im voranstehenden Abschnitt gezeigt hat der Verbund zwischen zwei aufeinanderliegenden Strängen (Schichtenverbund) eine hohe Bedeutung für die mechanische Leistungsfähigkeit 3D-gedruckter Strukturen, da die Verbundzone (sog. Interlayer) zwischen den Schichten i.d.R. eine strukturelle und stoffliche Störstelle bildet. Die Qualität des Interlayers ist von zahlreichen beton-technologischen und prozesstechnischen Faktoren abhängig [35]. Im folgenden Abschnitt sind Ergebnisse dargestellt, bei denen der Einfluss der Wartezeit zwischen der Ablage des unten liegenden Betonstranges und dem Auflegen des nächsten Betonstranges (Interlayerzeit) untersucht wurde. Die Experimente wurden mit dem im Vorhaben entwickelten Basisbeton (siehe Tabelle 3, Basisbetontabelle 3) durchgeführt. Als 3D-Druckverfahren wurde die horizontale Extrusion von Strängen und nachfolgende Ablage nur unter Wirkung der Gewichtskraft angewendet. Bei den Experimenten wurden wandartige Strukturen mit Interlayerzeiten zwischen ca. 1 min und ca. 16 min hergestellt und für die Probengewinnung genutzt. Die Verbundqualität wurde mit Hilfe von Spaltzugversuchen an Zylinderproben aus Bohrkernen mit Orientierung $v.u/w$ ([39], siehe auch Abbildung 31) bewertet. Die Probengewinnung, -konditionierung und -prüfung erfolgte in Anlehnung an die „Test Specification Splitting Tension“ des RILEM TC „Assessment of Additively Ma-

nufactured Concrete Materials and Structures“. In Abbildung 36 sind die Ergebnisse der Untersuchungen dargestellt und mit einer hyperbolischen Trendlinie zusammengefasst. Für sehr geringe Interlayerzeiten zeigen die Daten einen guten Übergang zu den in Abbildung 31 dokumentierten Spaltzugversuchen und damit Konsistenz bei der Prozessführung sowie Versuchsdurchführung an. Mit zunehmender Interlayerzeit (hier: bis ca. 16 min) nimmt die Spaltzugfestigkeit deutlich ab. Für darüber hinausgehende Interlayerzeiten ist mit einer weiteren abnehmenden Verbundqualität zu rechnen. Dann werden zusätzliche Maßnahmen (z.B. Aufräuen der Oberfläche) notwendig, um einen akzeptablen Schichtenverbund zu erzielen um den angestrebten Verbund und damit Kraftübertragung zwischen den Strängen der 3D-gedruckten Struktur abzubilden. Zur Einordnung der hier vorliegenden Werte der Spaltzugfestigkeit wird abschließend darauf hingewiesen, dass für den hier untersuchten Beton das Verhältnis von Spaltzugfestigkeit zu zentrischer Zugfestigkeit ca. 3/1 beträgt (vgl. Abbildung 31 und Abbildung 32).

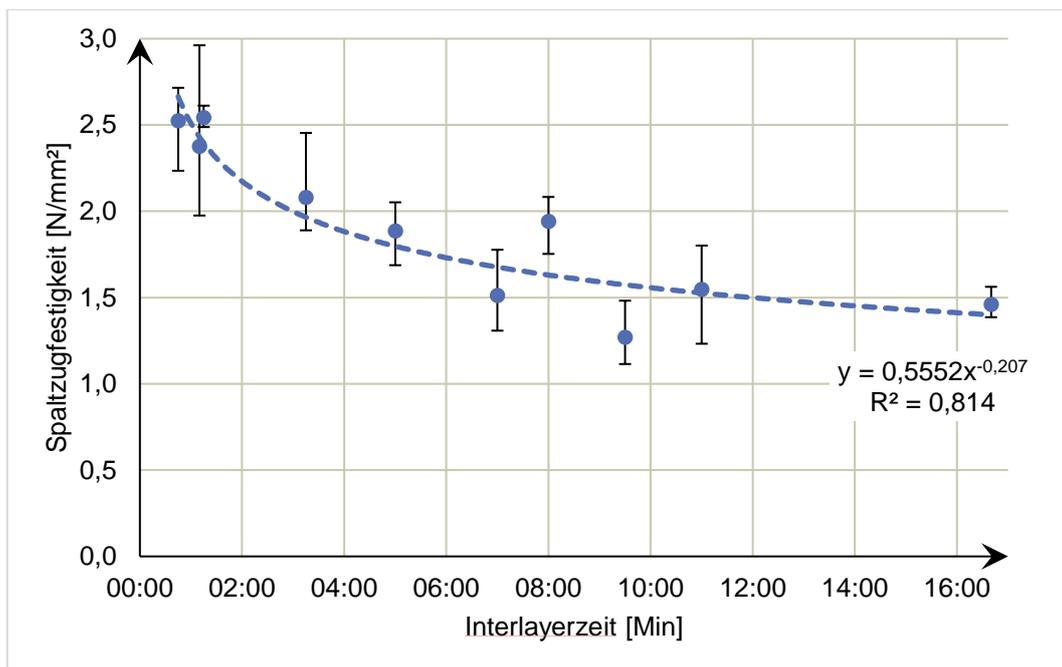


Abbildung 36: Spaltzugfestigkeit der Verbundfuge von 3D-gedruckten Strukturen (Material: Basisbeton) in Abhängigkeit von der Interlayerzeit. Messung an Bohrkernen mit Orientierung v.u/w. Probenalter ca. 28 Tagen.

1.5.7 Zusammenstellung der Prüfungen am Festbeton

Tabelle 5: Zusammenstellung und Bewertung der mechanischen Prüfungen an Proben, die aus einer erhärteten, gedruckten Wand entnommen wurden.

Art der Prüfung	Richtungsabhängigkeit	Heranreichen an geschalte Referenz	Bewertung
Druckfestigkeit	bei homogenem Material gering. Orientierungen u und v können Interlayer-Schwäche anzeigen	84 %	Entwicklungsbedarf gering. Vorzug für Zylinderproben (Anlehnung DIN EN 12504-1)
Biegezug	bei Lasteinleitung parallel zu Fugen schwächer (Orientierung u.w)	bei Lasteinleitung parallel zu Fugen 84 %, sonst gleichauf	Hoher Aufwand bei Probenpräparation. Keine zentrale Optimierungsgröße
Spaltzug	Orientierung w.u/v zeigt Interlayer-Schwäche an	84 %	Entwicklungsbedarf gering. Priorisiert für Prüfung des Schichtverbundes.
Zugfestigkeit	w erwartungsgemäß schwächer	w 32 %; u gleichauf	Hoher Aufwand bei Probenpräparation und Versuchsdurchführung.
Elastizitätsmodul	u mit größerer Streuung	w 87 %; u 70 %	Entwicklungsbedarf gering.
Schichtverbund	keine Differenzen zwischen u und v; starke Zeitabhängigkeit	-	Wichtiges Entwicklungsziel in Beeinflussbarkeit und Beschreibbarkeit

1.6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Arbeiten an der Forschungseinrichtung 1 (FE1, Institut für Baustoffe an der Technischen Universität Dresden) betriebenen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten hatten die Entwicklung eines pumpbaren und für die Anwendung in großformatigen 3D-Druckprozessen geeigneten Beton, der alle derzeit bestehenden normativen Vorgaben einhält, zum Ziel. Weiterhin sollten Messtechniken zur Beschreibung des Materialverhaltens solcher Betone im frischen und erhärteten Zustand entwickelt oder verbessert sowie auf den Beton angewendet werden.

Die Arbeiten fanden in enger Abstimmung mit Forschungseinrichtung 2 (FE2, Professur für Baumaschinen an der Technischen Universität Dresden) und dem Projektbegleitenden Ausschuss für dieses Vorhaben statt. Zu Beginn der Arbeiten wurde mit diesen Partnern eine abgestimmte Anforderungsliste an den Beton und die Prozessführung im 3D-Druck formuliert.

Für den Beton werden diese grundlegenden Anforderungen aus dem Fertigungsverfahren großformatiger 3D-Druck mit Transportbeton als 3D-Druckbarkeit zusammengefasst. Das ist die Pumpbarkeit (energieeffizientes, verstopfungsfreies und verschleißarmes maschinelles Fördern durch Rohr- oder Schlauchleitungen), die Extrudierbarkeit (kontinuierlicher und geregelt ausgezogener Volumenstrom an der Düsenöffnung, wobei der extrudierte Strang die aufgeprägte Querschnittsgeometrie beibehält) und die Verbaubarkeit (Standicherheit des extrudierten Filaments und dessen Kapazität zum Lastabtrag nachfolgender Schichten). Weitere Anforderungen z.B. zur Qualität des Bauteils sowie zur Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit von Strukturen, die mit dem angestrebten Verfahren gefertigt werden sollen, wurden ebenfalls erarbeitet und in einer gemeinsamen Anforderungsliste verfasst.

Die Kernherausforderung im Forschungsvorhaben war die Erarbeitung von normkonformen Betonzusammensetzungen, welche sich gut pumpen und umformen lassen, aber dennoch als formstabile Stränge abgelegt werden können. Dabei sollte zunächst ohne den Einsatz von Verdichtungsenergie ein dichtes Gefüge mit akzeptabler Oberflächenqualität sichergestellt werden. Da aufgrund der gesetzten Randbedingungen der Bindemittel- und Feinststoffgehalt im Beton beschränkt war, führte kein Weg an der Optimierung der Packungsdichte der Haufwerkspartikel vorbei. Dazu wurde das Sieblinienmodell an Andreasen und Andersen herangezogen. Dieses Modell ist auch Grundlage für die Regelsieblinien nach DIN 1045-2, lässt sich leicht analytisch und numerisch handhaben und kann auf die gesamte Bandbreite der in einer Betonzusammensetzung vorhandenen (oder benötigten) Partikel angewendet werden. Auf Grundlage dieses Modells wurde ein digitales Betonentwurfswerkzeug entwickelt, erprobt und für die Anwender bereitgestellt. Um eine gute, niederschwellige Implementierung bei Marktakteuren zu erreichen wurde Microsoft Excel als Softwaregrundlage herangezogen. Vom Anwender werden müssen (nur) die Korngrößenverteilungen aller zum Einsatz kommenden Partikelgruppen sowie weitere betontechnologische Randbedingungen (z.B. w/z-Wert, Zementgehalt, etc.) festgelegt werden. Dann übernimmt der Excel-Solver die Optimierung der Betonzusammensetzung. Als Zielgröße für die Optimierung ist die Minimierung des mittleren relativen betragsmäßigen Abstands der Sieblinie zum Andreasen-Optimum vorgegeben. Dieses digitale Betonentwurfswerkzeug stellt aus Sicht der FE1 das zentrale Projektergebnis dar.

Unter Anwendung dieser Methode wurden verschiedene Betonzusammensetzung entworfen und beprobt, welche die Normvorgaben erfüllen und in Laborversuchen zuverlässig extrudiert werden konnten. Für den Hauptteil der weiteren Arbeiten wurde ein sog. Basisbeton formuliert und für zahlreiche weitere Untersuchungen vielfach hergestellt und erfolgreich im bei FE1 vorhandenen großformatigen 3D-Druckprozess verbaut und untersucht.

Die entwickelte digitale Betonentwurfsmethode zeigte naturgemäß eine hohe Sensitivität bei Partikeln mit geringer Korngröße und relativ hoher spezifischer Oberfläche. Daher wurde der Einfluss verschiedener Zementarten auf das rheologische Verhalten der Bindemittelleime detailliert untersucht und die damit einhergehenden Auswirkungen auf die Extrudierbarkeit und Verbaubarkeit des Betons diskutiert. Dabei wurde auch versucht, den Einfluss der Kornform auf das Verhalten des Bindemittels bzw. Betons zu quantifizieren. In der Folge war es möglich, durch gezielte Auswahl eines Zementes mit guten Leimeigenschaften (u.a. aufgrund günstiger Kornform) eine im Vergleich zum Basisbeton zementreduzierte Betonzusammensetzung zu formulieren. Diese erfüllte auch alle grundlegenden Anforderungen an einen Transportbeton für 3D-Druckprozesse, stellt aber nach dem Stand der Technik einen Grenzfall vor allem mit Blick auf die Pumpbarkeit dar.

Die digitale Betonentwurfsmethode wurde im Rahmen des Vorhabens auch extern an der RWTH Aachen validiert und dabei gezeigt, dass sie universell und mit schnellem Erfolg auf die jeweils lokal verfügbaren Ressourcen angewendet werden kann. Die obligatorische Partikelgrößenanalyse stellte sich als aufwendig heraus, liefert aber belastbare Daten für zukünftige Mischungsentwürfe.

Grundsätzliche Untersuchungen zur Pumpbarkeit des Basisbetons sowie des zementreduzierten Betons wurde mit Hilfe des Gleitrohrrheometers (Sliper, Fa. Schleibinger) durchgeführt. Die Betone wurden in der vorgegebenen Zusammensetzung hergestellt, die Einhaltung ausgewählter, dokumentierter Frischbetonkennwerte nachgewiesen und anschließend im Gleitrohrrheometer ge-

schert. Für den Basisbeton deutete die Fördermenge-Druck-Beziehung auf eine mäßige Viskosität und mutmaßlich gute Pumpbarkeit hin. Beim zementreduzierten Beton ergab sich eine deutlich ungünstigere Fördermenge-Druck-Beziehung. Die Ergebnisse aus der Messung mit dem Gleitrohrreometer wurden für eine Prognose des Pumpendruckes für eine übliche Pumpleitungsgeometrie an einer mobilen Betonpumpe mit 36 m – Mast genutzt und gezeigt, dass der Basisbeton im Rahmen der üblichen technischen Spezifikation dieser Fördermaschinen gut gepumpt werden kann. Beim zementreduzierten Beton wurden kritisch hohe Pumpendrucke schon bei geringem Fördervolumenstrom ausgewiesen. Jedoch kann auch hier noch von einer vorliegenden Pumpbarkeit ausgegangen werden, da bei 3D-Druckprozessen nur geringe Betonvolumen/Zeit benötigt werden.

Mit Blick auf die Verbesserung der Pumpbarkeit wurde die Methode zur Viskositätsmodifizierung mittels Luftporenbildner untersucht. Dazu wurde ein instabiler Luftporenbildner (Kollaps der Luftporen bei Verdichtung) im Vergleich zu zwei weiteren Produkten eingesetzt. Alle untersuchten Luftporenbildner zeigten in ähnlicher Weise den gewünschten Effekt. Bei vorhandenen Luftporen konnte eine erhöhte Fließfähigkeit der Betone festgestellt werden. Durch eine nachfolgende Verdichtung (analog zu den Vorgängen im Extruder) und dem damit verbundenen Austrieb/Kollaps von Luftporen wurde die Fließfähigkeit wieder geringer. Der Einsatz von instabilen bzw. drucksensitiven Luftporen bietet demnach die Möglichkeit zur Modifikation der Viskosität der Betone in Abhängigkeit vom Prozessdruck auf den Beton. Das Verhalten der Luftporen beim Pumpen der Betone wurde allerdings nicht untersucht.

Methoden der Rotationsrheometrie können geeignet sein, um die i.d.R. empirisch ermittelte Konsistenz eines Frischbetons mit Hilfe von exakten Kennwerten wie z.B. Fließgrenze und Viskosität abzubilden. Für fließfähige Betone ist dieses Vorgehen zumeist möglich. Bei steiferen Betonen, wie sie für den angestrebten 3D-Druck-Prozess benötigt werden, stoßen die üblichen Verfahren der Rotationsrheometrie oft an ihre Grenzen. Im Vorhaben wurde daher eine alternative Messmethode in Anlehnung an das Konzept der Kugelmesssonde betrachtet. Statt mit einer zylindrischen Messgeometrie wurde das Rheometer hierfür mit einer exzentrisch angeordneten und an einem dünnen Stab montierten Kugel ausgestattet. Eingetaucht in das Material verdrängt die Sonde das Medium, was eine Neuordnung des Gefüges erzwingt. Der Rotationswiderstand wird als Drehmoment aufgenommen und in eine Scherspannung umgerechnet. Die Versuche zeigten jedoch, dass der zum Drucken verwendete Beton zu steif für die Messmethode ist. Die Kugel hinterlässt im Beton Hohlräume. Die damit einhergehende globale Umformung des Messvolumens, die nur teilweise Umschließung der Kugel mit Beton sowie zusätzliche unkontrollierte Einflussfaktoren verhindern eine zielführende, reproduzierbare Auswertung der Messdaten. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

Mit größerem Erfolg wurde ein Penetrationstest (Messgeometrie: Zylinder mit Kegelspitze) eingesetzt. Bei angemessenem Größenverhältnis zwischen Messgeometrie und Größtkorn der Gesteinskörnung im Beton können hinreichend gut reproduzierbar Aussagen zum Eigenschaftsprofil des frischen Betons sowie zu dessen Erhärtungsverlauf formuliert werden.

Um auch die baupraktisch üblichen Messverfahren an steifen Betonen Ausbreitmaß und Setzmaß zur Gewinnung von exakten rheologischen Kennwerten heranziehen zu können, wurde ein Verfahren mit Hilfe eines neuronalen Netzes (KI-Methoden) entwickelt und erprobt. Ausgangspunkt war die These, dass die Gestalt des Setzmaßes das Resultat eines Fließens ist und folglich durch rheologische Parameter bestimmt ist. Bei der entwickelten Methode wird der deformierte Betonkonus aus dem Setzmaßversuch aus verschiedenen Perspektiven digital abgebildet. Die Bilder

für einen Betonkonus wurden an eine individuell angepasste Photogrammetrie-Prozedur übergeben und mit deren Hilfe in eine 3D-Oberfläche des Betonkonus überführt. Diese Oberflächenkontur wurde parametrisiert und an ein neuronales Netzwerk übergeben. Parallel wurden die 3D-Druckbetone in (fehlerbehafteten) rotationsrheometrischen Experimenten untersucht und die ermittelten Daten und Kennwerte (dynamische Fließgrenze, statische Fließgrenze, plastische Viskosität) ebenfalls an das neuronale Netzwerk übergeben. Das neuronale Netz wurde mit 67 Datensätzen trainiert. Danach konnten mit Hilfe des trainierten Netzes beispielhaft an 6 weiteren Betonen eine gute Prognose zu den o.g. rhologischen Kennwerten formuliert werden. Der vorgestellte Ansatz ist vielversprechend, auch mit Blick auf die Anwendung bei konventionellen Betonen ohne spezifische Ausprägungen für den 3D-Druck.

Neben der Charakterisierung von Materialeigenschaften des Betons wurden auch inline-Methoden zur geometrischen Beschreibung der extrudierten Stränge sowie ein offline-Verfahren zur Validierung der geometrischen Präzision des 3D-gedruckten Bauteils erarbeitet. Die Inline-Auswertung der Geometrie und Oberflächenstruktur extrudierter Stränge mittels Laserprofilmessung und anschließender Echtzeit-Datenverarbeitung ermöglicht die Echtzeit-Visualisierung des Druckprozesses, die Echtzeit-Qualitätsprüfung mittels Rauheitsmessung sowie die Generierung von Signalen für eine exakte und effektive Steuerung des Extrusionsprozesses durch die Nachregelung der Fahrgeschwindigkeiten der Maschinenachsen. Die Off-Line-Überprüfung der Ist-Geometrie und der geometrischen Konformität gegenüber dem Soll-Zustand der mittels Extrusion gefertigten Strukturen erfolgte mit Methoden der Photogrammetrie. Zur Datengewinnung wurde am Druckkopf eine Kamera installiert. Die Kamera erfasst das abgelegte bzw. 3D-gedruckte Objekt aus verschiedenen Perspektiven und übergibt den Bilddatensatz an eine Software. Mit Hilfe von Standard-Bibliotheken für Photogrammetrie wird ein 3D-Oberflächenmodell berechnet und dem digitalen Modell aus der Fertigungsplanung gegenübergestellt. Abweichungen des Soll-Zustandes vom Ist-Zustand werden ausgegeben.

Zur Beschreibung ausgewählter mechanischer Eigenschaften von 3D-gedruckten Strukturen wurden mit dem vorhandenen 3D-Druck-Laborprüfstand und mit Einsatz des Basisbetons Wände mit Soll-Abmessungen 140 cm x 50 cm x 15 cm gedruckt und zur Probengewinnung genutzt. Als 3D-Druckverfahren wurde die horizontale Extrusion von Strängen und nachfolgende Ablage nur unter Wirkung der Gewichtskraft angewendet. Aus den Wänden wurden Probekörper zur Untersuchung der Druckfestigkeit, Biegezugfestigkeit, Spaltzugfestigkeit, zentrische Zugfestigkeit und des E-Modul bei Druckbelastung) in Anhängigkeit von den 3 wesentlichen Raumrichtungen gewonnen. Die Ergebnisse der Prüfungen zeigen zumeist plausible Zusammenhänge zwischen der Größe der Messwerte und der Orientierung der Proben sowie zu Referenzproben aus konventioneller Herstellung in einer Schalung. Weiterhin wurde der Schichtenverbund zwischen aufeinanderfolgenden Strängen in Abhängigkeit von der Interlayerzeit untersucht. Auch hier waren die Ergebnisse plausibel und zeigten eine hyperbolisch abnehmende Qualität des Schichtenverbundes mit zunehmender Interlayerzeit. In der Gesamtschau der Ergebnisse kann festgestellt werden, dass am mit 3D-Druckverfahren prozessierte Basisbeton nur geringfügige Veränderungen der mechanischen Kennwerte im Vergleich zu den Referenzproben vorliegen. Dies deutet auf ein hohes Anwendungspotential normkonformer, grobkörniger Transportbetone für Verfahren des großformatigen 3D-Druckes hin.

Die für die Arbeiten der Forschungseinrichtung 1 definierten Teilziele

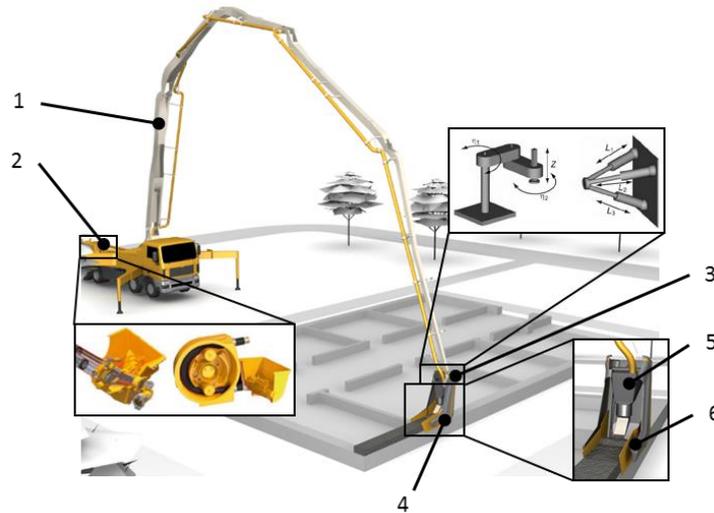
- Entwicklung und Bereitstellung allgemeingültiger Prinzipien zur Herstellung robuster, praxistauglicher Transportbetone mit Größtkorn bis 16 mm für die Anwendung in vollformatigen 3D-Druckverfahren,
- Formulierung eines Leitfadens zur stofflichen Entwicklung druckbarer Betone unter Einhaltung der Randbedingungen aus aktuellen, einschlägigen Regelwerken sowie
- Die Entwicklung und Erprobung von Methoden zur Untersuchung der Eigenschaften der Betone im frischen, erhärtenden und erhärteten Zustand unter systematischer Verwendung herkömmlicher und neuer, zu entwickelnder Prüfverfahren

(vgl. auch Abschnitt 1.1) wurden überwiegend erreicht. Die in einigen Arbeitsfeldern fortbestehenden wissenschaftlich-technischen Defizite sind benannt und können Ausgangspunkt weiterer Forschungsarbeiten sein.

2 Ergebnisse der Forschungseinrichtung 2

2.1 Ausgangssituation

Für die additive Fertigung zementgebundener Werkstoffe kommen diverse Drucksysteme zum Einsatz [6]. Die Gemeinsamkeit aller Systeme besteht darin, dass ein Manipulator einen speziellen Druckkopf entlang einer geforderten Trajektorie bewegt. Die grundlegende Struktur der Drucker ist am Beispiel des ConPrint3D in Abbildung 37 zu sehen. Das, an der Technischen Universität entwickelte, ConPrint3D-Verfahren zählt zu den extrusionsbasierten Prozessen und verfolgt das Prinzip des Vollwanddrucks [33]; [37]; [53].



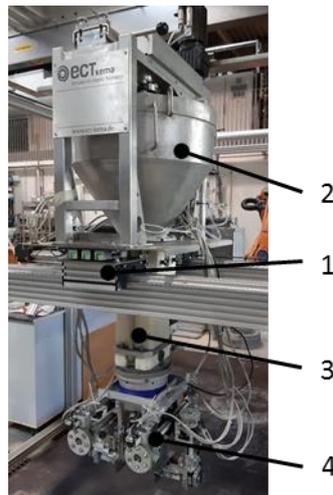
1 Manipulator; 2 Fördersystem; 3 Kompensationseinheit; 4 Druckkopf; 5 Extrusionsmodul; 6 Formgebungsmodul

Abbildung 37: Maschinenkonzept des ConPrint3D-Verfahrens [28]; [54]; [61]

Der Manipulator (1) soll eine modifizierte Autobetonpumpe sein, welche den Druckkopf (4) entlang des Druckpfades bewegt und die Betonfördertechnik (2) trägt. Die Betonfördertechnik setzt sich aus einem klassischen Pumpaggregat, wie Kolben- oder Rotorpumpe, mit Leitungssystem zusammen. Der Mechanismus zur Kompensation (3) ist eine zusätzliche Kinematik, die mögliche Positionsabweichungen in Folge mangelnder Systemsteifigkeiten des Manipulators ausgleichen soll. Es könne sowohl serielle als auch parallele Kinematiken eingesetzt werden.

Der Druckkopf ist das Werkzeug des Betoneinbaus. Dazu besteht dieser aus einer Reihe von Unterbaugruppen, welche spezielle Aufgaben übernehmen. Es existieren zwei Hauptsysteme. Das Extrusionsmodul (5) ist eine Unterbaugruppe des Druckkopfes, welche die Dosierung des Betons in Abhängigkeit der Druckgeschwindigkeit und des zu extrudierenden Querschnitts übernimmt. Das Formgebungsmodul (6) stellt ein Subsystem des Druckkopfes dar, welches den Betonstrang in die gewünschte Form bringt und stabilisiert bis die Grünstandfestigkeit erreicht ist.

Der grundsätzliche Aufbau des Druckers im Versuchsstand (Stand: 2020) lässt sich anhand von Abbildung 38 erläutern. Ein Portalroboter (1) trägt und positioniert den Druckkopf. Am Druckkopf befindet sich ein Speicher (2). Ein Rührwerk im Speicher sorgt für eine permanente Scherung des verwendeten Materials, während die eigentliche Dosierung mittels einer Extruderschnecke (3) realisiert wird. Diese beiden Bauteile bilden den Extruder. Der Betonstrang wird letztendlich durch einen Formgeber (4) abgelegt, mit dessen Hilfe sich verschiedene Strangquerschnitte und -geometrien realisieren lassen. Das bisher genutzte 3D-druckfähige zementgebundene Material hat eine maximale Korngröße im Bereich von 2 – 4 mm Durchmesser.



1 Portalroboter; 2 Reservoir; 3 Extruder; 4 Formgeber

Abbildung 38: Mechanischer Aufbau des Druckers (Stand 2020) [53]

Die Inhalte des Projektes ready2print lassen sich in die zwei großen Teilaufgaben Material- und Maschinenentwicklung untergliedern. Um in Zukunft Transportbeton mit Rezepturen innerhalb der Normung für den Beton-3D-Druck einsetzen zu können, muss das Betonkonzept verändert werden. Das betrifft insbesondere die Wahl des Bindemittels und den Mehlkorngelalt. Ziel ist die Herstellung eines leicht pumpbaren, fließfähigen sowie eines steifen, formstabilen Betons. Die Betone sollen 16 mm Größtkorn enthalten. An diese veränderten Materialeigenschaften muss der Druckkopf angepasst werden.

Neben der Anpassung des Druckkopfes an ein neues Material ist die Autobetonpumpe als Manipulator des ConPrint3D-Verfahrens auf theoretischer Ebene weiterzuentwickeln. Dies umfasst im Wesentlichen die Konzeptionierung einer Kompensationseinheit zur Steigerung der Positioniergenauigkeit. Lösungsansätze für die Steuerung der Mastkinematik bieten die Dissertationen „Regelungsstrategien für den Ausleger einer Autobetonpumpe“ (Henikl) bzw. „Modellbasierte aktive Schwingungstilgung eines Multilink-Großraummanipulators“ (Zorn) oder die Machbarkeitsstudie zum ConPrint3D „Machbarkeitsuntersuchungen zu kontinuierlichen und schalungsfreien Bauverfahren durch 3D-Formung von Frischbeton“ (Krause et al.) [20]; [30]; [64].

Auf der Grundlage typischer Kennwerte, dem aktuellen Forschungsstand und konservativen Annahmen des ConPrint3D-Bauprozesses sind allgemeine Leistungsparameter für die Autobetonpumpe abzuleiten und die technische Realisierbarkeit eines Bauprozesses mit Transportbeton zu bewerten.

2.2 Anforderungsliste

Der Entwicklungsprozess zur Anpassung des Druckkopfes bzw. die Konzeptionierung der Autobetonpumpe basiert auf dem V-Modell [3]; [16]; [59]. Nach der Anforderungsdefinition wird entlang des linken Schenkels das System in seine Teilelemente zerlegt. Die schrittweise Integration von Elementen zum finalen Prototyp oder Produkt erfolgt entlang des rechten V-Schenkels. Die Planung und Durchführung der Eigenschaftsabsicherung, welche parallel zu den Entwicklungsaufgaben abläuft, ist die Verifikation bzw. Validierung zwischen den Schenkeln des V-Modells [59].

Die Definition einer Anforderung wird in DIN 69901-5 gegeben und die Kriterien qualitativ „hochwertiger“ Anforderungen in den Richtlinien IEEE Std 610.12 und VDI/VDE 2206 beschrieben [8]; [51]; [59]. Die Anforderungen an die Entwicklung eines Beton-3D-Druckers ergeben sich

im Wesentlichen aus baubetrieblichen, baustofftechnischen und maschinenbaulichen Aspekten [38]; [53]. Die Tabelle 6: Anforderungsliste der Kompensationseinheit (Auszug) zeigt einen Auszug der Anforderungsliste für die Kompensationseinheit. Die vollständige Anforderungsliste befindet sich im Anhang.

Tabelle 6: Anforderungsliste der Kompensationseinheit (Auszug)

ID	Art	Beschreibung
3.2 Kompensationseinheit		
3.2.1 Geometrie		
32101	MF	Die maximalen Abmessungen sind 1000 x 1000 x 1000 mm (Länge x Breite x Höhe).
32103	FF	Der Arbeitsraum beträgt $\pm 300 \times \pm 300 \times \pm 300$ mm (Länge x Breite x Höhe).
3.2.2 Kinematik		
32203	FF	Der Einstellbereich der Orientierung beträgt um alle Achsen $\pm 10^\circ$.
32204	MF	Die minimale Bewegungsgeschwindigkeit des Kompensationssystems beträgt 0,2 m/s.
3.2.3 Kinetik		
32301	MF	Die maximale Eigenmasse beträgt 150 kg.
32302	MF	Die maximale Traglast beträgt 300 kg.
3.2.4 Energie		
32401	WB	Es sind elektrische Antriebe zu verwenden.
3.2.5 Signale		
32502	MF	Die Messgenauigkeit muss mindestens ± 5 mm betragen.
3.2.6 Sicherheit		
32601	MF	Die Schutzklasse ist IP65 oder höher.
3.2.7 Montage		
32702	WC	Es ist eine werkzeuglose Montage und Demontage im täglichen Betrieb möglich.
32703	MF	Die Montage und Demontage ist von maximal 2 Personen durchführbar.

Die Anforderungen sind in Forderungen und Wünsche kategorisiert. Forderungen sind quantifizierbar und müssen erfüllt werden. Sie sind entsprechend der Präzisierung unterteilt in [3]:

- Festforderung (FF): ein konkreter Zahlenwert,
- Mindestforderung (MF): ein Grenzwert der nicht über- oder unterschritten werden darf,
- Richtungsforderung (RF): eine Trendrichtung.

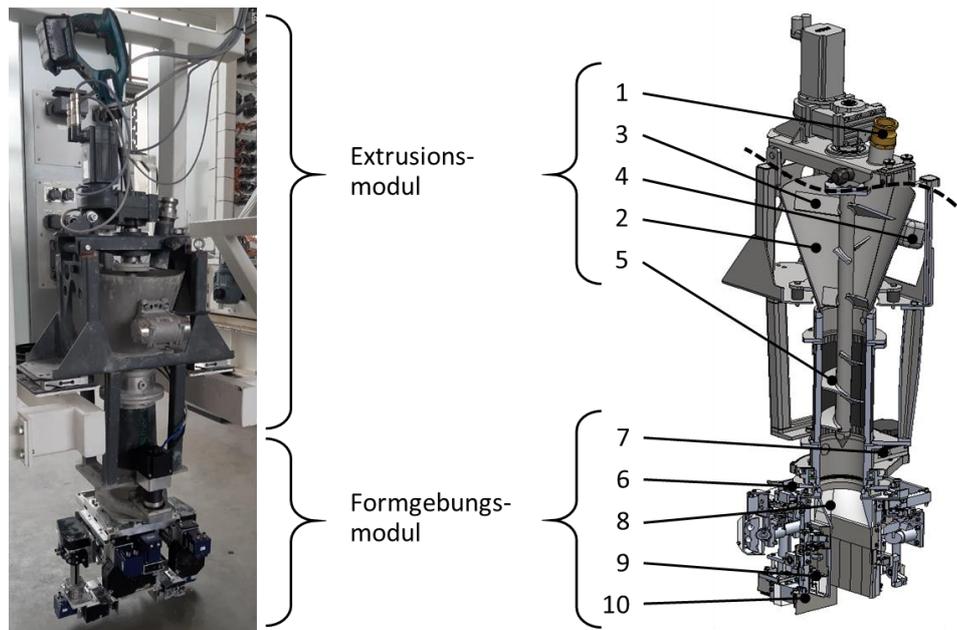
Wünsche sind (meist) nicht quantifizierbar und es besteht kein Zwang diese zu erfüllen. Sie entsprechend gegliedert [3]:

- Wunsch A (WA): Wunsch hoher Priorität,
- Wunsch B (WB): Wunsch mäßiger Priorität,
- Wunsch C (WC): Wunsch geringer Priorität.

Die Anforderungen sind die Basis für die folgenden Weiterentwicklungen des Druckkopfes bzw. Konzeptionierungen der Autobetonpumpe und des Prozesses.

2.3 Druckkopf

Die Abbildung 39 visualisiert den überarbeiteten Druckkopf der TU Dresden bestehend aus den Hauptsystemen Extrusions- und Formgebungsmodul.



1 Schlauchkupplung; 2 Reservoir; 3 Rührwerk; 4 (Außen-)Rüttler; 5 Schneckenextruder; 6 Schnellwechsler; 7 Drehantrieb; 8 Querschnittsübergang; 9 Cutter; 10 Formungsbleche

Abbildung 39: Mechanischer Aufbau des Druckkopfes (Stand: 2023) [52]; [54]

An der standardisierten Schnellkupplung (1) wird das Förderleitungssystem mit der Betonpumpe angeschlossen, um den Druckkopf mit Beton zu beschicken. Im Reservoir (2) wird der Beton vorgehalten und durch das Rührwerk (3) nach dem Pumpvorgang noch einmal durchmischt. Der Schneckenextruder (5) dosiert die für den Einbau benötigte Betonmenge in Abhängigkeit von der Druckgeschwindigkeit und Querschnittsfläche des zu extrudierenden Strangprofils. Während des Extrusionsprozesses versetzt der Rüttler (4) den Beton in Vibration. Dies hält den Beton im gescherten Zustand, wodurch das Ansteifen verhindert und der Extrusionsvorgang erleichtert wird. Der Schneckenextruder ist als Hohlwelle ausgeführt, was die Integration eines Innenrüttlers erlaubt, welcher die Schnecke in Vibration versetzen kann bzw. den Beton innerhalb des Förderkanals.

Die Verbindungsstelle zwischen Extrusions- und Formgebungsmodul bildet ein Schnellwechsler (6), der als Bajonett-Verschluss ausgeführt ist. Der Drehantrieb (7) stellt die Orientierung der Austrittsöffnung entsprechend der Druckrichtung ein. Im Querschnittsübergang (8) wird die grundlegende rechteckige Strangform erstellt. Der Cutter (9) und die Formungsbleche (10) modellieren die Gebäudeelemente und formen die finale Stranggeometrie. Die Inline-Messsysteme zur Regulierung der Prozessgrößen sind nicht dargestellt. Der Füllstand des Druckkopfes wird mit einer Wägezelle erfasst. Die Betonstrangabmessungen werden mit einem Laserprofilscanner vermessen und zur Regulierung der Betonaustragsrate genutzt.

Im Folgenden wird die Weiterentwicklung des Druckkopfes näher erläutert und die Projektergebnisse vorgestellt und erörtert.

2.3.1 Extrusionsmodul

2.3.1.1 Schnecke-Stator-System

Für die prozesssichere Extrusion von Beton ist es wichtig, dass die Maschine eine ausreichende Widerstandsfähigkeit gegenüber dem Verklemmen von Gesteinskörnung und Verschleiß hat.

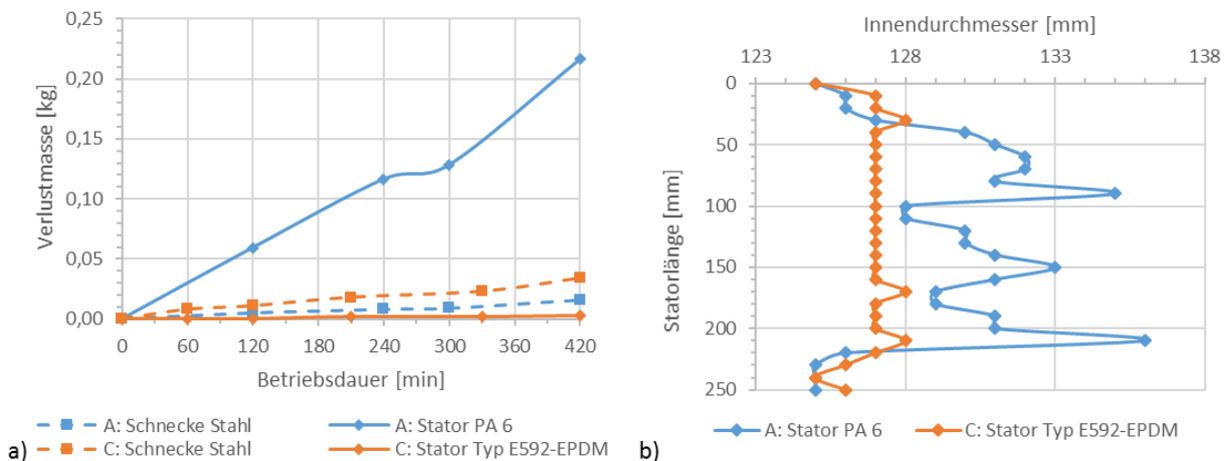
Hierfür kommen verschiedene Kombinationen von Schnecke/Stator-Materialpaarungen entsprechend Abbildung 40 in Frage. Diese Materialpaarungen wurden im Rahmen von Druckversuchen an der TU Dresden experimentell untersucht und bewertet.



Links: X5CrNi18-10; Mitte: PA 6; Rechts: Schlauch Typ E592-EPDM

Abbildung 40: Schnecke/Stator-Systeme [54]

Alle Varianten haben zu Beginn des Dauertests ein Spaltmaß von 2 mm. Während der Testreihe wird ein Betonsubstrat auf Basis der Tabelle 3: Zusammensetzung von 3D-druckbaren Normalbetonen mit 16 mm Größtkorn. Tabelle 3 (Spalte 2) mit 16 mm Größtkorn und gebrochener Gesteinskörnung verwendet, um das abrasive Materialverhalten des Betons nachzubilden. Die Verschleißbewertung erfolgt an Hand der Verlustmasse der Systemkomponenten und der Konturabnutzung des Stators nach Beendigung der Testreihe. Die Ergebnisse zeigt Abbildung 41.



- a) Massenverlust Schnecke / Stator bei den Materialkombinationen Stahl / PA 6 (blau) bzw. Stahl / EPDM (orange);
- b) Abrasion der Statorinnenkontur für die Varianten PA 6 (blau) bzw. EPDM (orange)

Abbildung 41: Verschleißbewertung verschiedener Schnecke/Stator-Systeme [54]

Die Kombination Stahl/Stahl ist gänzlich ungeeignet für einen extrusionsbasierten Beton-3D-Druck mit grober Gesteinskörnung, da es regelmäßig zu Verklebungen im Extruder kommt. Im Fall der Variante Stahl/Kunststoff PA 6 beträgt die Verlustmasse der Schnecke 0,4 % (bezogen auf die Ausgangsmasse 4,1 kg) und des Stators 13 % (bezogen auf die Ausgangsmasse 1,67 kg) bei der gewählten Versuchsdauer von 7 Stunden. Die Kombination Stahl/Gummi E592-EPDM verlor an der Schnecke 0,8 % der Ausgangsmasse und am Stator 0,06 % (bezogen auf die Ausgangsmasse 5,13 kg). In beiden Fällen ist der Schneckenverschleiß sehr gering, siehe Abbildung 41 a. Der große Verschleiß am Stator PA 6 ist darauf zurückzuführen, dass auf Grund der starren

Wandung eine Abrasion durch Furchung auftritt. Die elastische Gummiewandung hingegen ist verformbar und weicht der Gesteinskörnung aus, weshalb deutlich weniger Furchung zu beobachten ist, vgl. Abbildung 41 b. Der Abfall am Anfang und Ende der Statorlänge entsteht durch die Klemmung des Gummischlauchs im Flansch, siehe Abbildung 40.

Aus den Messdaten geht hervor, dass ein Stator aus Gummi zu einer Verschleißminderung und Steigerung der Prozesssicherheit führt und für den Einsatz extrusionsbasierter Beton-3D-Druckverfahren mit grober Gesteinskörnung besonders geeignet ist. Als Nachteil kann die größere Masse des Schlauchzylinders gesehen werden. Diese rührt daher, dass es sich bei diesem Schlauch um einen herkömmlichen Betonförderschlauch handelt, der eine Stahleinlage und dicke Wandstärke besitzt, um die notwendige Drucksicherheit zu erreichen. Wird das Schlauchkonzept an die Nutzung in einem Betonextruder für grobe Gesteinskörnungen hinsichtlich der auftretenden Förderdrücke angepasst, ergeben sich signifikante Einsparungen bei der Masse. Es wird davon ausgegangen, dass dadurch die Verschleißigenschaften nicht beeinflusst werden, da die Materialkombination von Schnecke und Stator gleich bleibt und das tribologische System nicht verändert wird.

2.3.1.2 Vibrationstechnik

Die dauerhafte Einwirkung einer konstanten Scherbeanspruchung (Vibration) senkt die Viskosität des Betons ab (sog. thixotropes Verhalten) und die Extrudierbarkeit verbessert sich [25]; [45]; [46]. Abbildung 42 zeigt die Veränderung der Fließfähigkeit in Abhängigkeit verschiedener Erregerkräfte des Außenrüttlers aus Abbildung 39. Die verwendeten Betone entsprechen der Tabelle 3 (Spalte 2).

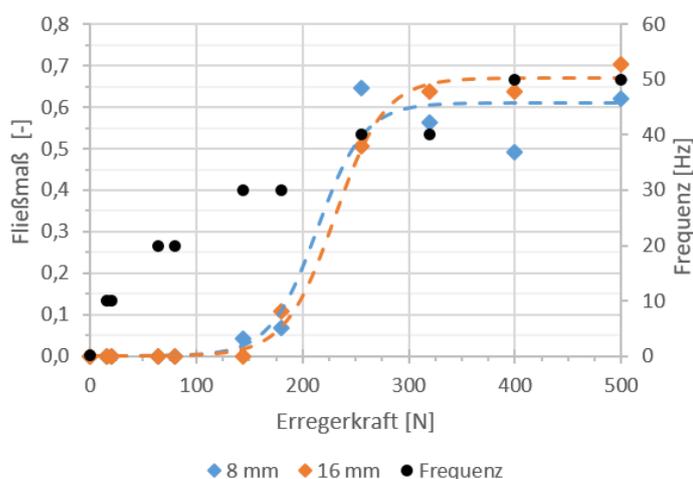


Abbildung 42: Vibrationsanregung durch Außenrüttler [52]; [54]

Das Fließmaß wird mit einem Steigrohrversuch analog der DIN EN 12350-10 ermittelt [12]. Für beide Betone ist zu erkennen, dass erst ab einer Erregerkraft von 250 N eine Beeinflussung der Fließfähigkeit durch Vibrationsanregung einsetzt. Im Bereich von 325 bis 500 N Erregerkraft weisen die Verläufe keine signifikanten Veränderungen auf. Die Betone zeigen ein sprunghaftes Verhalten bei der Beeinflussung des Fließverhaltens, welches beim Druckkopf aus Abbildung 39 ab 40 Hz einsetzt.

Abbildung 43 stellt die Austragsmasse verschiedener Vibro-Extrusionen bei konstanter Schneckendrehzahl (25 1/min) gegenüber und erlaubt die quantitative Bewertung des Vibrationseinflusses. Tabelle 7 enthält die zugehörigen Erregerkräfte.

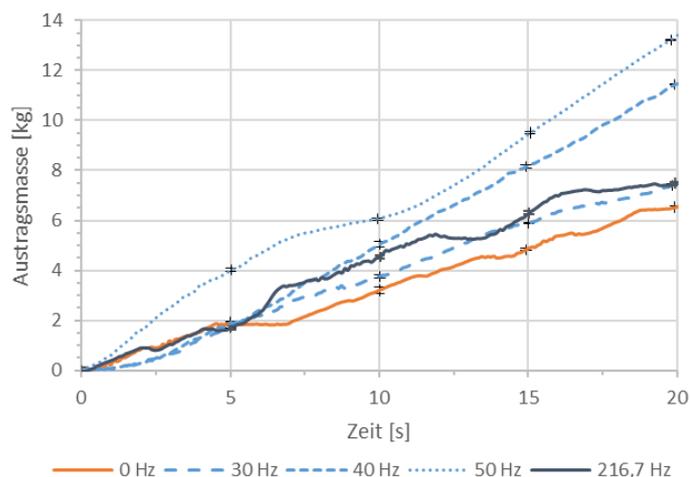


Abbildung 43: Durchfluss mit Vibration, Größtkorn 16 mm, Extruderdrehzahl 25 1/min

Tabelle 7: Vibrationsanregung und Wirkungsgrad während der Extrusion

Erregerart	Frequenz [Hz]	Erregerkraft [N]	Wirkungsgrad (volumetrisch) [%]
Außenrüttler	0	0	42,50
	30	180	44,22
	40	320	65,21
	50	500	68,11
Innenrüttler	216,7	235	45,08

Die ausgetragene Masse wird mit einer Wägezelle gemessen. Die Funktionsweise ist im Kapitel Inline-Messtechnik erläutert. Die Abbildung 43 zeigt, dass bei steigender Intensität der Anregung (ab 40 Hz Außenrüttlerfrequenz) der Materialdurchfluss im Vergleich zur nicht vibrierten Extrusion (0 Hz Außenrüttlerfrequenz) zunimmt, da die Graphen deutlich steiler ansteigen. Dieses Verhalten zeigt, dass bei Vibro-Extrusion mit Niederfrequenzrütteltechnik die Extrudierbarkeit 3D-druckfähiger Betone verbessert wird. Neben den Erregerkräften sind in Tabelle 7 die volumetrischen Wirkungsgrade η_{vol} angegeben, berechnet nach Gleichung 1.

$$\eta_{vol} = \frac{Q_{gem}}{Q_{th}} \quad (1)$$

Der gemessene Volumenstrom Q_{gem} wird aus dem Steigungsdreieck der Graphen aus Abbildung 43 nach Gleichung 2 bestimmt. Der Betonmassenstrom \dot{m}_{Be} wird in einen Volumenstrom überführt. Die Betondichte ρ_{Be} beträgt 2,35 g/cm³ [56]; [57].

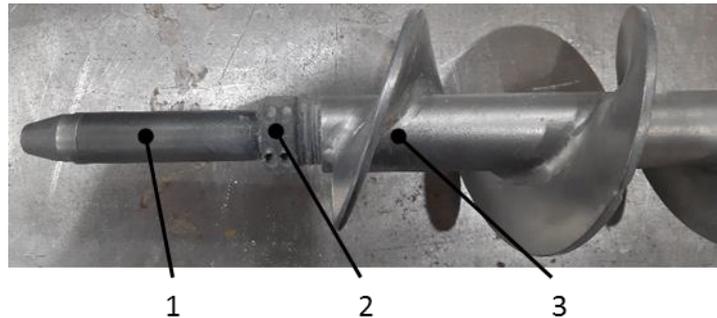
$$Q_{gem} = \frac{\dot{m}_{Be}}{\rho_{Be}} = \frac{\Delta m_{Be}}{\Delta t \cdot \rho_{Be}} \quad (2)$$

Der theoretische Volumenstrom Q_{th} ist gemäß Gleichung 3 das Produkt aus der Drehzahl n und dem Schluckvolumen V_0 des Extruders. Bei der Bestimmung des Schluckvolumens wird das Spaltmaß zwischen Extruderschnecke und zylindrischem Stator nicht berücksichtigt. Es beträgt 0,98 dm³.

$$Q_{th} = n \cdot V_0 \quad (3)$$

Die sprunghafte Steigerung des volumetrischen Wirkungsgrades entspricht dem Materialverhalten aus Abbildung 42. Bei einer Erregerkraft unter 250 N tritt keine Veränderung der Fließfähigkeit ein, da sich die Wirkungsgrade nicht signifikant vom vibrationsfreien Extrudieren (0 Hz Außenrüttlerfrequenz) unterscheiden. Bei größeren Erregerkräften steigt die Fließfähigkeit sprunghaft an.

Zwischen dem Einsatz des Außenrüttlers (30 Hz) und dem Innenrüttler besteht kein signifikanter Unterschied. Dies liegt zu einen daran, dass die Konfiguration des Innenrüttlers ähnlich des Außenrüttlers (30 Hz) ist und die Schwelle zur Beeinflussung des Materials, vgl. Abbildung 42, nicht überschreitet. Zum anderen ist der Flaschenfortsatz des Innenrüttlers (1) auf der Hälfte mit einer Klemmung (2) ausgangsseitig an der Extruderschnecke (3) fixiert, siehe Abbildung 44.



1 Flaschenfortsatz; 2 Klemmteil; 3 Extruderschnecke

Abbildung 44: Einbau Innenrüttler

Dieser Einbau mindert den Vibrationseintrag, da der Fortsatz nicht frei unterhalb der Schnecke vibrieren kann bzw. nicht die gesamte Vibrationsenergie auf die Schneckenflügel übertragen wird, da der Fortsatz auf halber Länge an der Schnecke befestigt ist.

2.3.2 Formgebungsmodul

2.3.2.1 Konstruktive Überarbeitung

Wesentliche Entwicklungsschwerpunkte für das Formgebungsmodul sind eine hohe Zuverlässigkeit während des Betriebes sowie eine große Vielseitigkeit bei der Herstellung verschiedener Gebäudeelementen und eine einfache Handhabung bzw. geringe Eigenmasse.

Die Abbildung 45 zeigt eine überarbeitete Version des Formgebungsmoduls. Als Grundlage dient der an der TU Dresden bereits entwickelte Formgeber sowie ein umfangreicher mechatronischer Entwicklungsprozess [37]; [53]; [54].



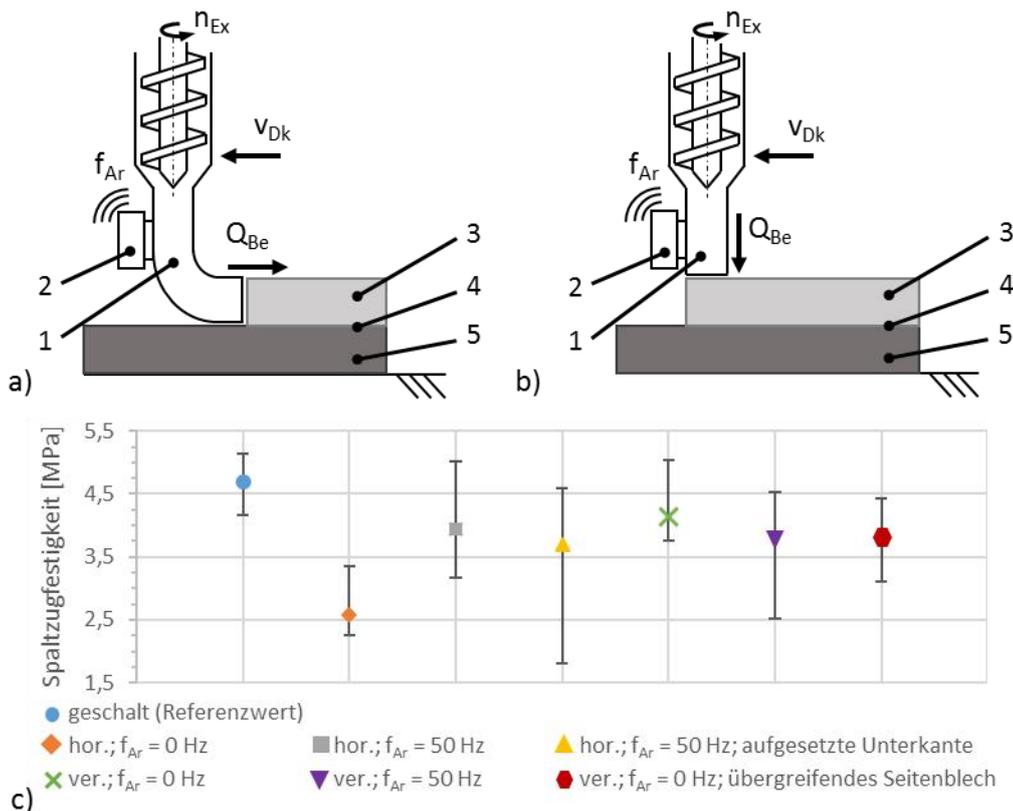
Abbildung 45: Gleitende Schalung als Formgebungsmodul [52]; [54]

Zur besseren Verarbeitung grobkörniger Betone sind etwaige Engstellen und Einbauten innerhalb der Förderleitung minimiert bzw. entfernt worden, sodass der Betonfluss nicht gehemmt wird und die Verstopfungsneigung minimiert ist. Zur Vereinfachung der Handhabung ist durch Schnellwechselsysteme und Schraubstecker eine weitestgehend werkzeugfreie Montage möglich und die Rüstzeit wird signifikant verkürzt. Zur Einstellung der Strangbreiten zwischen 80 und 150 mm sowie der Realisierung weiterer Gebäudeelemente, wie T-Verbindungen oder Kreuzungen, sind am Formgeber diverse Motoren eingesetzt. Die gröbere Granulometrie des neu entwickelten Betons führt dazu, dass die zuvor verwendeten Motoren an ihrer Leistungsgrenze arbeiteten bzw. diese überschritten. Deshalb sind die bisherigen Motoren durch leistungstärkere Antriebe ersetzt worden, um eine ausreichende Prozesssicherheit zu gewährleisten. Zur Senkung der Komplexität des Formgebungssystems sind alle Motoren baugleich. Des Weiteren entsprechen die eingesetzten elektrischen Leitungen, die verwendeten Steckverbinder sowie die Motoren selbst der Schutzart IP65. Damit sind auch die sensibelsten Bauteile am Druckkopf staubdicht und gegen Strahlwasser geschützt.

Das Formgebungsmodul, aus Abbildung 45, arbeitet nach dem Prinzip einer gleitenden Schalung. Die Austrittsöffnung für den Beton befindet sich oberhalb der aktuell zu druckenden Schicht. Entsprechend der globalen Druckkopfposition bewegen die Hilfsantriebe die Gleitbleche. Diese formen den Betonstrang bzw. die Geometrielemente aus.

2.3.2.2 Einbaurichtung

Auf Grund des schichtweisen Aufbaus haben 3D-gedruckte Betonbauteile eine Anisotropie der Festbetoneigenschaften. Die Ausprägung des richtungsabhängigen Verhaltens wird durch das Zeitintervall zwischen der Ablage zweier Schichten aufeinander und den Einbauprozess bestimmt [39]; [47]. Die Abbildung 46 stellt zwei verschiedene Einbauprozesse dar.



f_{Ar} (Außen-)Rüttlerfrequenz; n_{Ex} Extruderdrehzahl; Q_{Be} Betondurchfluss; v_{Dk} Druckkopfgeschwindigkeit
 1 Formgebungsmodul; 2 (Außen-)Rüttler; 3 Aktuelle Schicht; 4 Fuge; vorherige Schicht
 a) Horizontaler Austrag; b) Vertikaler Austrag; c) Spaltzugfestigkeit

Abbildung 46: Verbund bei verschiedenen Einbauzuständen

Die beiden Einbauprozesse unterscheiden sich in der Austrittsrichtung des Betons (Q_{Be}) am Formgebungsmodul (1). In Abbildung 46 a erfolgt die Materialablage horizontal (hor.) in der aktuellen Schicht (3). Im Gegensatz dazu wird in Abbildung 46 b das Material vertikal (ver.) von oben in die aktuelle Schicht eingebracht. In beiden Varianten ist ein Außenrüttler (2, f_{Ar}) am Formgebungsmodul montiert, damit dieses beim Materialaustrag in Vibration versetzt werden kann. Bei der horizontalen Ablage mit ausgesetzter Unterkante (Abbildung 46 c, gelbes Dreieck) berührt die vibrierende Unterseite des Formgebungsmoduls (1) die Oberseite der vorherigen Schicht (5). Im Falle des vertikalen Übergreifens (Abbildung 46 c, rotes Sechseck), umschließt das Seitenblech des Formgebungsmoduls (1) die aktuelle Schicht (3) und die vorherige Schicht (5). Abbildung 46 c zeigt die Spaltzugfestigkeit nach DIN EN 12390-6 für verschiedene Einbauprozesse bei gleichem Zeitintervall (2 Min.) zwischen der Schichtablage [13]. Die Stichprobenanzahl je Variante ist sechs. Die Entnahme des Bohrkerns erfolgte quer zur Druckrichtung (in Richtung

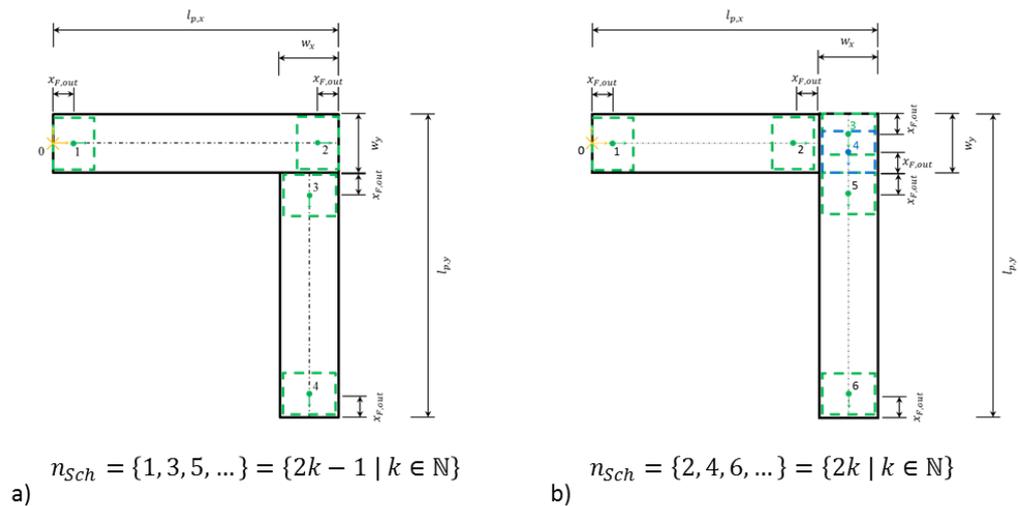
der Schichtbreite), dabei lag der Fugenspalt in der Mitte. Zur Prüfung wurde die Last entlang der Fuge eingeleitet. Das Prüfscenario entspricht dem Fall *w.u/v* der Veröffentlichung „A Roadmap for quality controll of hardening and hardened printed concrete“ (Mechtcherine et al.) [39]. Die Prüfung erfolgte 7 Tage nach der Herstellung.

Im Diagramm, Abbildung 46 c, ist zu erkennen, dass die Spaltzugfestigkeit einiger gedruckter Proben im Bereich der geschalteten Referenzprobe liegt. Allerdings weisen die Messwerte eine größere Streuweite auf. Dies liegt an der Inhomogenität des Materials, da prozessbedingt nach der Ablage keine intensive Verdichtung mit daraus resultierender Beanspruchung darunter liegender Schichten stattfinden kann. Eine Vibration am Formgebungsmodul homogenisiert das Material nicht. Das Eindrücken liefert größere Spaltzugfestigkeiten als die horizontale Ablage des Materials. Der Grund ist, dass beim vertikalen Einbau die aktuelle Schicht (3) mit zusätzlicher kinetischer Energie auf die vorherige Schicht (5) gepresst wird und sich der Schichtverbund entlang der Fuge (4) verbessert. Das Übergreifen (Abbildung 46 c, rotes Sechseck) soll ein seitliches Ausweichen (Ausbeulen) der vorherigen Schicht verhindern, einen höheren Anpressdruck ermöglichen und folglich einen verbesserten Schichtverbund im Vergleich zur Variante ohne Übergreifen (Abbildung 46 c, grünes Kreuz). Die Messergebnisse lassen diesen Schluss nicht zu. Mit der Hilfe des Vibrationseintrags auf der Oberseite der vorherigen Schicht (Abbildung 46 c, gelbes Dreieck) soll diese aktiviert werden, sodass die Ablage frisch in frisch erfolgt und die Schichtverbundfestigkeit gesteigert. In Folge der Vibrationsanregung kommt es teilweise zur Kollabierung der vorherigen Schicht, weshalb die Verbundfestigkeit nicht steigt und die Streubreite größer wird, vgl. Abbildung 46 c.

Das Materialhandling während des Druckprozesses ist mit einem Formgebungsmodul zur horizontalen Ablage einfacher als beim vertikalen Einbau. Auf Grund der Umlenkung des Förderkanals stützt sich die Betonsäule im Formgebungsmodul ab und ein unkontrolliertes Herausrutschen des Materials wird verhindert. Dieser Umstand vereinfacht auch die Herstellung scharfkantiger Strangabschlüsse, siehe Abbildung 48. Im Falle des vertikalen Einbaus wird die Betonsäule nur durch die Wandreibung und Thixotropie im Formgebungsmodul gehalten, wodurch das Risiko des Durchrutschens bei Erschütterungen steigt. Dieses Risiko kann durch eine Verjüngung des Förderkanals im Formgebungsmodul oder den Einbau einer gezielten Verengung reduziert werden, allerdings steigt das Risiko des Verstopfens.

2.3.2.3 Druckprozess

Das Formgebungsmodul, aus Abbildung 45, erlaubt den Druck verschiedener Gebäudeelemente, wie Ecken, T-Verbindungen oder Kreuzungen. Abbildung 47 zeigt das Bewegungsschema mit globalen Positionen zum Druck einer Ecke.

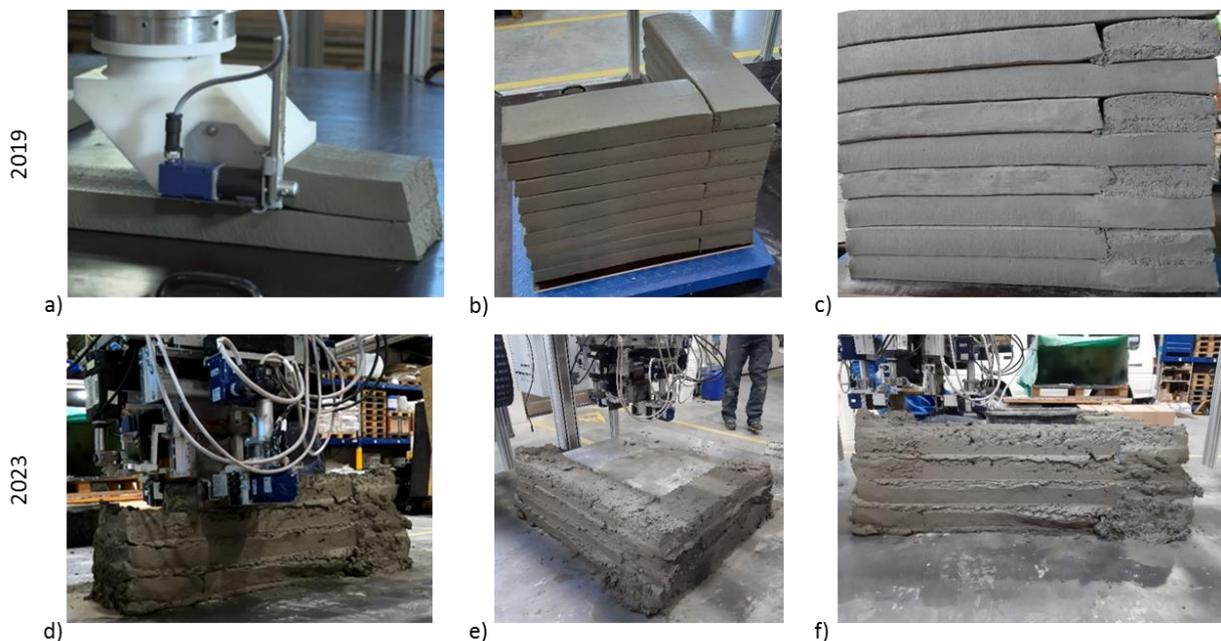


$l_{p,\dots}$ Länge des Schenkels; $n_{Sch,\dots}$ Schichtnummer (-index); w,\dots Schenkelbreite; $x_{F,out,\dots}$ Länge der Austrittsöffnung in Druckrichtung

Abbildung 47: Pfadplanung [52]; [54]

Die Bewegung des Druckkopfes erfolgt entlang der Mittellinie des geplanten Objektes. Am Anfang und Ende eines Stranges ist ein Vor- bzw. Nachlauf entsprechend der Länge der Austrittsöffnung in Druckrichtung $x_{F,out}$ zu berücksichtigen. Zur Steigerung der Tragfähigkeit der Struktur werden die Schichten mit einander verzahnt [29]; [54]. In der Pfadplanung wird dies durch die Verfüllung der Wandbreite des ersten gedruckten Stranges (w_y , Schritt 4) während des Drucks einer Schicht mit geradem Index n_{Sch} berücksichtigt, vgl. Abbildung 47 b.

Die Abbildung 48 zeigt die Herstellung einer rechteckigen Ecke mit verschiedenen Entwicklungsständen des Druckkopfes der TU Dresden.



Stand 2019: a) Druckprozess; b) Gesamtansicht; c) Seitenansicht;
Stand 2023: d) Druckprozess; e) Gesamtansicht; f) Seitenansicht

Abbildung 48: Herstellung einer scharfkantigen Ecke

Die Schenkellänge der Ecke betrug 2019 600 mm und 2023 700 mm. Die wesentlichen Unterschiede sind das verwendete Material und die Einbaurichtung. Im Fall der Abbildung 48 a betrug das Größtkorn 4 mm und das Material wurde horizontal abgelegt. Im Gegensatz dazu wurde bei der Herstellung entsprechend Abbildung 48 d Material mit einem Größtkorn von 16 mm vertikal eingebaut. In beiden Fällen beträgt der Schichtquerschnitt 150x50 mm und der Eckstoß ist verzahnt, vgl. Abbildung 48 b und e.

Im Vergleich ist auffällig, dass die Schichtoberflächen des Druckobjektes 2023 wesentlich mehr Poren und Risse aufweist, vor allem an der Schichtoberseite, siehe Abbildung 48 e. Grund sind die gröbere Gesteinskörnung in der Betonrezeptur und fehlende Rundungen an den Kanten der Austrittsöffnung bzw. Formgebungsbleche. In Abbildung 46 b wird der gleiche vertikale Einbau vorgenommen, wie in Abbildung 48 d. Die größeren Rundungen an der Austrittsöffnung verbessern die Oberflächenqualität deutlich.

Am Beginn oder Ende eines Betonstranges quillt teilweise Beton unter dem Formgebungsblech heraus, da die Steifigkeit der Hubmechanik nicht ausreicht und der Beton die Seitenbleche wegdrückt, vgl. Abbildung 48 d und f. Zudem kommt es auf Grund der Entfernung aller Einbauten und der nur minimalen Verengung des Förderkanals zu einem Herausrutschen von Beton, dadurch wird das Einbauen eines definierten Betonvolumens als Strangbeginn oder -ende erschwert. Abhilfe schafft der Einsatz einer künstlichen Verengung kurz vor der Austrittsöffnung des Formgebungsmoduls.

Im Stand 2019, Abbildung 48 c sind deutliche Kerben entlang der Schichtgrenzen zu erkennen. In diesen können sich leicht Medium, wie Wasser ansammeln, und zu einem stärkeren (chemischen) Angriff am Beton führen. Im Vergleich mit Abbildung 48 f ist festzustellen, dass hier die Ausprägung nicht so stark ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Einbaurichtung des Materials vertikal in die aktuelle Schicht ist und das Formgebungsblech die Kerbe übergreift, sodass auch in diesen Bereich Material eingebaut wird. Ebenfalls erlaubt die vertikale Einbaurichtung des Materials, innerhalb der Schichtverzahnung die Lücken zu verschließen, vgl. Abbildung 48 b und c mit Abbildung 48 e und f.

2.3.3 Inline-Messtechnik

Ziel der Integration von Messtechnik in den Beton-3D-Druck ist die Steigerung des Automatisierungsgrades, der Prozesssicherheit und der Bauqualität. Zum Erreichen dieser Ziele sind Inline-Messsysteme notwendig, da Sie die Grundlage der späteren Steuerungen bzw. Regelungen sind. Die Abbildung 49 zeigt die entwickelten Inline-Messsysteme und Regelkreise entlang der Prozessschritte beim Beton-3D-Druck.

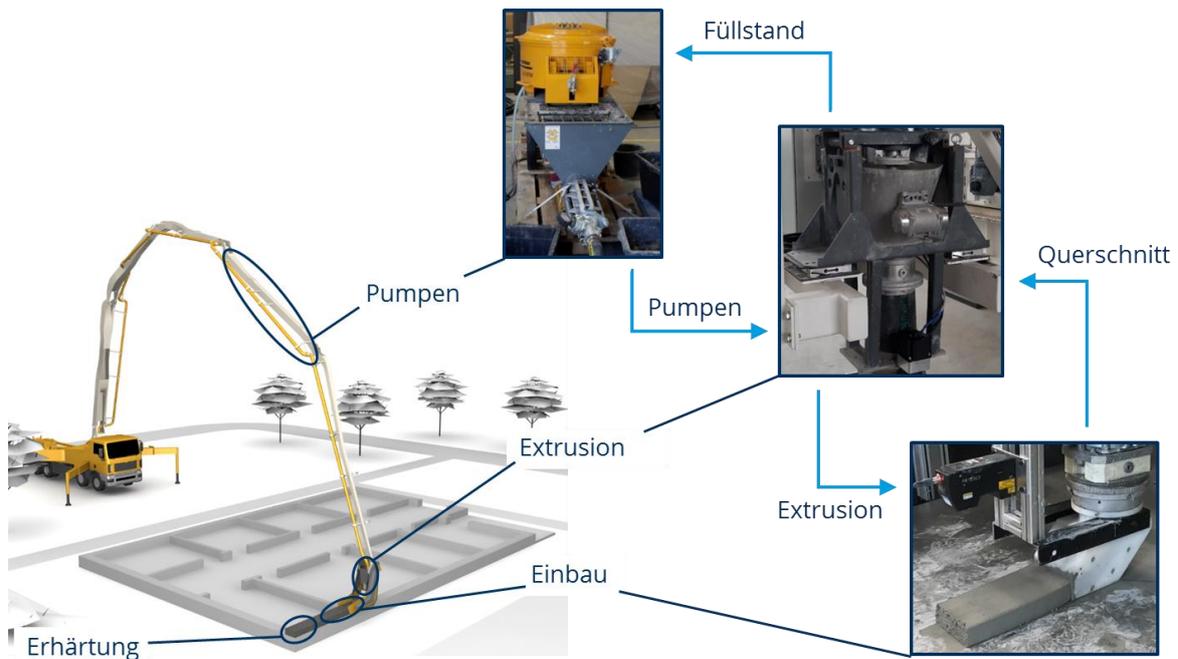


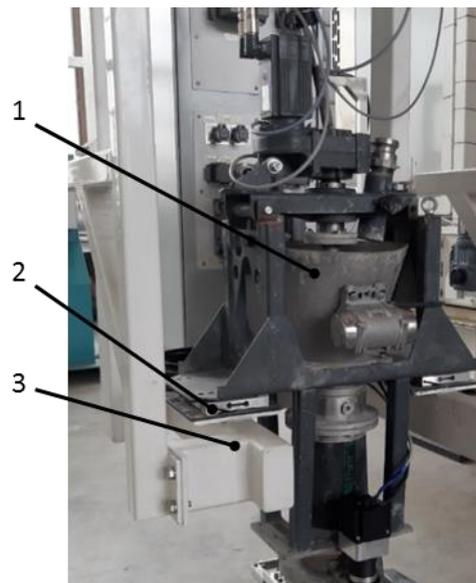
Abbildung 49: Inline-Messsysteme beim Beton-3D-Druck

Neben der Erfassung von Prozessgrößen, wie dem Füllstand, zur Regelung der Beschickung des Druckkopfes mit Beton ist auch die Messung geometrischer Eigenschaften, wie Schichtbreite und -höhe, beim Einbau notwendig. Sie dokumentieren den Bauprozess und können, als Information über den abgelegten Querschnitt, zur Regelung der Betonaustragsrate genutzt werden. Zudem ist die Erfassung von Materialkennwerten unerlässlich, da so etwaige Veränderungen des Materials erkannt werden können und Gegenmaßnahmen ergriffen werden können, bspw. die Beschleunigerzugabe oder Auftrag eines Haftvermittlers. Ebenfalls können die erfassten Größen in die Dokumentation des Bauprozesses mit einfließen oder zur Ableitung von Sollwertvorgaben für die Prozessregelung genutzt werden.

Auf die Entwicklung und Konzeptionierung der Inline-Messsysteme wird im Folgenden eingegangen.

2.3.3.1 Füllstand

Zur automatisierten Beschickung des Extrusionsmoduls mit Beton muss dessen Füllstand messtechnisch erfasst werden. Eine Möglichkeit ist die Messung der aktuellen Betonmasse im Reservoir (1) mit Hilfe einer Wägezelle (2), siehe Abbildung 50. Hierbei wird die Dehnung in Folge der aktuellen Druckkopfmasse an einem Biegebalken bestimmt und als elektrisches Signal bereitgestellt. Mit einem 2-Punkt-Regler kann die Förderpumpe anschließend je nach Füllstand Ein oder Aus geschaltet werden, um den Füllstand zwischen einem Minimal- und einem Maximalwert zu halten.



1 Reservoir; 2 Wägezelle; 3 Rahmenaufnahme

Abbildung 50: Extrusionsmodul mit Wägezelle

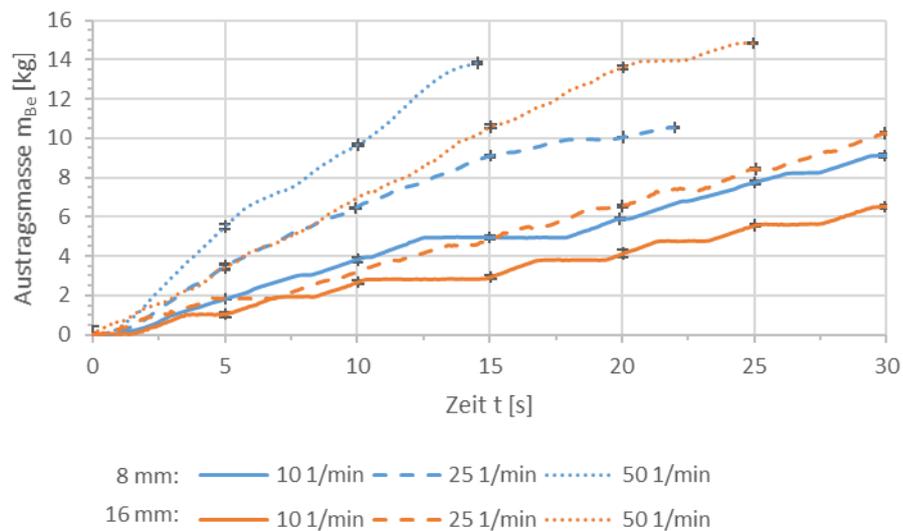


Abbildung 51: Relativer Fehler der Wägezelle

Zur Überprüfung der Messgenauigkeit zeigt Abbildung 51 eine Auswahl von Durchflüssen, welche mit der Wägezelle erfasst wurden. Zu Beginn der Versuche ist der Druckkopf mit einer Betonmasse $m_{Be,0}$ von 30 kg befüllt. Anschließend wird der Extrusionsvorgang gestartet und die ausgetragene Betonmasse m_{Be} im Druckkopf nimmt bis zu einem Maximalwert zu. Dieser ist nicht 30 kg, weil mit abnehmender Betonmasse die Druckkraft, welche den Materialeinzug in die Schnecke unterstützt, abnimmt. Die treppenartigen Verläufe, vor allem bei einer Extruderdrehzahl 10 1/min, rühren daher, dass sich bei der Extrusion an der Düse ein freihängender Strang bildet, der erst nach einer gewissen Zeit abfällt und eine Abnahme der Druckkopfmasse bewirkt.

Die gezeigten Fehlerindikatoren stellen die relative Messabweichung f zum entsprechenden Zeitpunkt dar. Für die Bestimmung des Bezugswertes wird die bis zum Zeitpunkt extrudierte Betonmasse $m_{Be,ex}$ aufgefangen und gemessen. Die Differenz zwischen der Befüllung zu Beginn $m_{Be,0}$ und extrudierten Masse $m_{Be,Ex}$ ist der Bezugswert. Die relative Messabweichung ergibt sich für den gemessenen Wert der Wägezelle $m_{Be,gem}$ entsprechend der Gleichung 4. Die maximale relative Messabweichung beträgt 1,46 % (aus Abbildung 51 für $t=0$ s; $n=25$ 1/min). Für die weiteren Messpunkte beträgt der relative Fehler maximal 0,44 %.

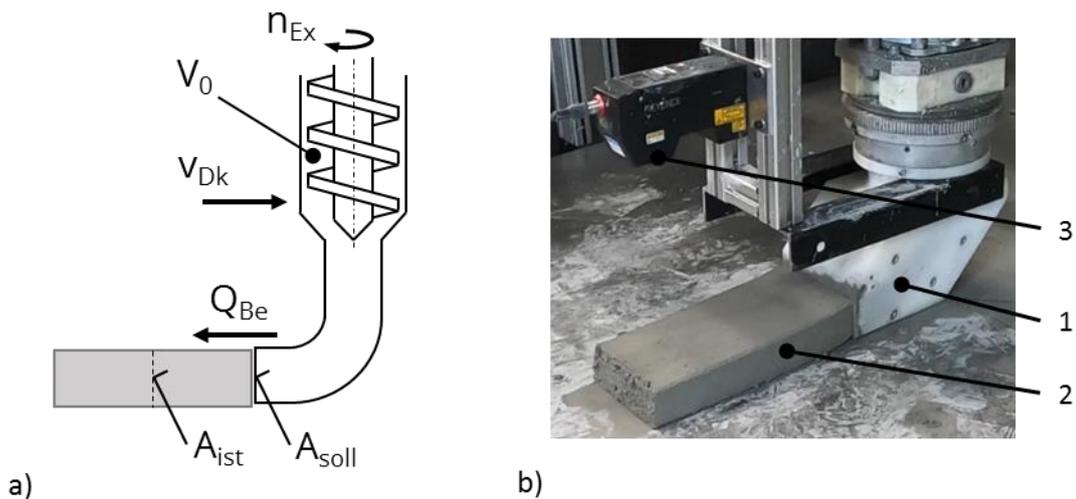
$$f = \left(\frac{m_{Be,gem}}{m_{Be,0} - m_{Be,Ex}} - 1 \right) \cdot (100 \%) \quad (4)$$

Die Graphen zeigen, dass mit steigender Drehzahl die Austragsrate zunimmt, da die Verläufe steiler ansteigen. Das Größtkorn hat keinen Einfluss auf dieses Verhalten. Ursache der unterschiedlichen Anstiege bei gleicher Extruderdrehzahl ist die Konsistenz (Extrudierfähigkeit) der Materialien. Die Rezeptur für 8 mm hat ein Ausbreitmaß (gemäß DIN EN 1015-3) von 147 mm und das Material mit 16 mm Größtkorn 139 mm, d.h. die 16 mm Mischung ist steifer und somit schwerer extrudierbar [9].

Wie bereits erläutert, wird ein Rüttler zur Beeinflussung der Fließfähigkeit eingesetzt. Dieser trägt am Druckkopf Vibrationen ein, die als Schwingungen für eine zusätzliche Verformung der Wägezellen sorgen. Diese zusätzliche Verformung ist eine Störgröße, deren Einfluss zu bewerten ist. Abbildung 43 ist ein entsprechendes Durchflussdiagramm mit den eingezeichneten relativen Messabweichungen. Die Ergebnisse sind analog den Ergebnissen aus Abbildung 51 ermittelt worden. Die relative Messabweichung wird laut Gleichung 4 bestimmt. Die maximale relative Messabweichung ist 1,46 % (aus Abbildung 43 für $t=0$ s; $n=25$ 1/min). Für die weiteren Messpunkte beträgt der relative Fehler maximal 0,46 %. Auf Grundlage der ähnlichen Messabweichungen im Vergleich zur nicht vibrierten Extrusion lässt sich sagen, dass die Wägezellen durch die Nutzung eines Rüttlers nicht beeinflusst werden.

2.3.3.2 Schichtquerschnitt

Eine wichtige Messgröße zur Bewertung des Druckprozesses ist der Querschnitt des extrudierten Profils. Zur Detektion der Schichtabmessungen kann ein Laserprofilscanner eingesetzt werden. Neben der Datenerfassung zur Detektion des Bauprozesses erlaubt diese Technik auch die automatisierte Regelung der Betonaustragsrate. Zur Regelung wird zunächst der Schichtquerschnitt aus den Plandaten bestimmt und einen aktuell notwendigen Fördervolumenstrom umgerechnet. Bei einer Abweichung zwischen gemessenem Ist-Querschnitt und gewünschtem Soll-Querschnitt wird eine entsprechende Drehzahlkorrektur berechnet und dem Motor des Extrusionsmoduls aufgeprägt. Abbildung 52 zeigt schematisch das Regelungskonzept und einen Aufbau im Labor.



A_{ist} Ist-Querschnitt; A_{soll} Soll-Querschnitt; n_{Ex} Extruderdrehzahl; Q_{Be} Betondurchfluss; v_{Dk} Druckkopfgeschwindigkeit
 1 Formgebungsmodul; 2 Betonstrang; 3 Laserscanner
 a) Schematische Darstellung; b) Laboraufbau

Abbildung 52: Formgebungsmodul mit Laserscanner

Basierend auf der Abbildung 52 a und der Kontinuitätsgleichung der Strömungsmechanik kann die notwendige Drehzahlkorrektur Δn für den Extrudermotor nach Gleichung 5 berechnet werden.

$$\Delta n = \frac{(A_{soll} - A_{ist}) \cdot i_{ges} \cdot v_{Dk}}{V_0} \quad (5)$$

i_{ges} ist die Gesamtübersetzung zwischen Schneckenwelle und Motorschaft. Abbildung 53 zeigt das Ergebnis der Drehzahlregelung des Motors der Extruderschnecke in Abhängigkeit der gemessenen Schichtgeometrie.

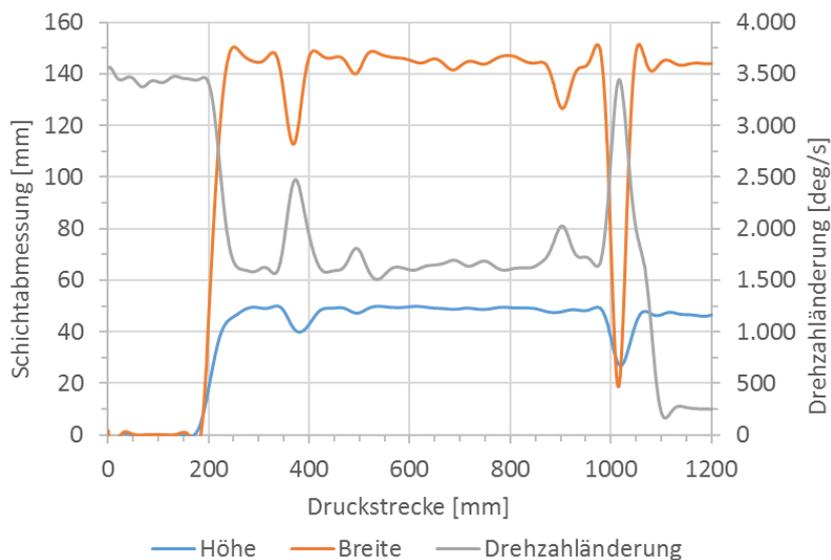


Abbildung 53: Drehzahlregelung

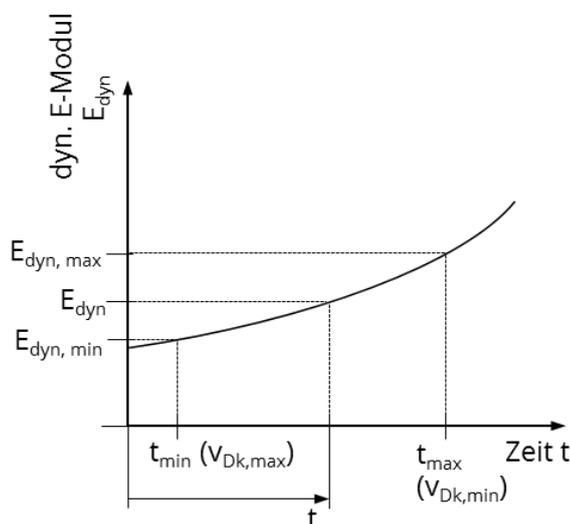
Der geforderte Schichtquerschnitt betrug 150 x 50 mm. Die Druckgeschwindigkeit betrug 40 mm/s, damit eine ausreichende Drehzahlreserve für die Regelung zur Verfügung stand. Die

Messdaten zeigen, dass eine Regelung der Motordrehzahl stattfindet und sich der Drehzahlverlauf in Abhängigkeit der Querschnittsdimensionen ändert. Der relative Fehler der geregelten Schichtbreite beträgt $\pm 3,5\%$ und der Schichthöhe $\pm 2,7\%$. Im Fahrbereich bis 200 mm wurde vom Laserscanner noch kein Material detektiert, da der Betonstrang noch nicht bis unter das Laserprofil extrudiert war, weshalb die Schichtabmessungen Null sind. Der Peak der Drehzahlkennlinie bei einem Fahrweg von 1.100 mm entstand, als der Betonstrang, in Folge des Materialmangels im Betonreservoir, abbriss.

Vorteilhaft ist bei dieser Regelungsstruktur, dass keine spezifischen rheologischen Parameter des Betons bekannt sein müssen. Es ist nur sicherzustellen, dass die Betonrezeptur 3D-druckfähig ist.

2.3.3.3 Erhärtungszustand

Für einen guten Verbund der Schichten untereinander ist neben der Druckrichtung, vgl. Abbildung 46, das Zeitintervall bei der Ablage von entscheidender Bedeutung, siehe Abbildung 36. Das Zeitintervall wird durch die Druckgeschwindigkeit bestimmt. Die Abbildung 54 erläutert das Prinzip zur Ableitung einer Druckgeschwindigkeit.



$E_{dyn, max}$ bzw. $E_{dyn, min}$ Obere bzw. untere Grenze des Bereichs des dynamischen Elastizitätsmoduls; t_{max} bzw. t_{min} Obere bzw. untere Grenze des Zeitintervalls; $v_{Dk, max}$ bzw. $v_{Dk, min}$ maximale bzw. minimale Druckgeschwindigkeit

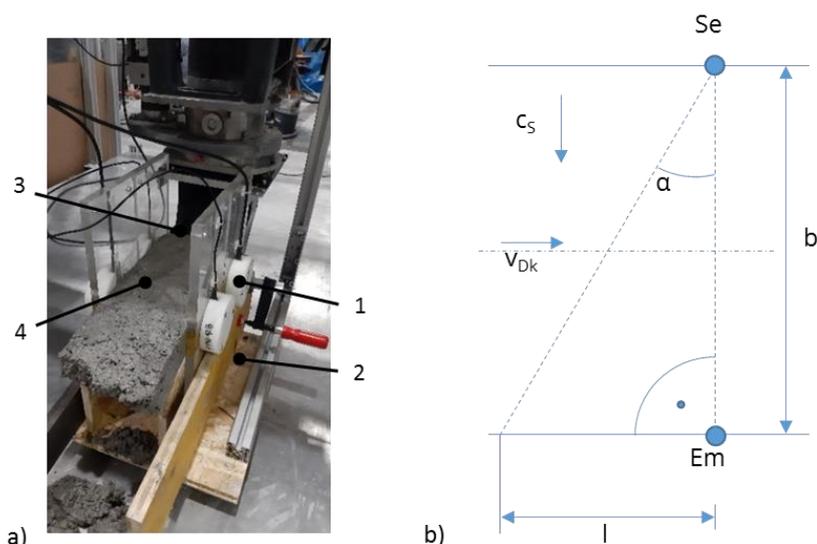
Abbildung 54: Konzept zur Druckgeschwindigkeitsvorgabe

Der zeitliche Verlauf des (dynamischen) Elastizitätsmoduls wird bei der Materialentwicklung als Datensatz erfasst und ist bekannt. Unter Beachtung der materialtechnischen Grenzen (Verbaubarkeit) und der geplanten Druckpfadlänge werden die Grenzen des Zeitintervalls t_{min} bzw. t_{max} festgelegt. Die untere Grenze t_{min} ergibt sich aus der Prämisse, dass die unterste nicht vollständig ausgehärtete Schicht die Last der folgenden Schichten tragen muss. Dies führt zu einer maximal möglichen Druckgeschwindigkeit $v_{Dk, max}$. Die obere Grenze t_{max} ergibt sich aus der Forderung eines optimalen Verbundes, d.h. die Ablage der Schichten muss frisch in frisch geschehen, damit kalte Fugen vermieden werden. Hieraus kann die minimale Druckkopfgeschwindigkeit abgeleitet werden $v_{Dk, min}$ [42]; [60].

Aus diesem Zeitfenster ergibt sich auch ein Bereich für den (dynamischen) Elastizitätsmodul $E_{dyn, min}$ bzw. $E_{dyn, max}$, welcher mit dem Abbindeverhalten des Betons korreliert. Wird wäh-

rend des Druckprozesses der Elastizitätsmodul E_{dyn} gemessen, kann daraus eine Druckgeschwindigkeit bestimmt werden. Diese kann mit den Grenzen verglichen werden und ggf. eine neue Druckgeschwindigkeit vorgegeben werden, die anschließend auf herkömmliche Weise von den Antriebsachsen des Manipulators eingeregelt wird. Die Zeitskala beginnt mit der Wasserzugabe, d.h. im Falle eines Transportbetons ab Werk.

Die Nutzung von Ultraschallmessungen zur Bestimmung von Betoneigenschaften ist hinreichend bekannt [5]; [14]; [17]; [19]; [21]. Für die Nutzung dieser Technik beim Beton-3D-Druck ist zu nächst zu prüfen, ob diese durch den Druckprozess zu stark beeinflusst wird, sodass keine korrekten Messungen möglich sind. Hierbei ist zu prüfen, ob die Messung während des Druckvorganges, d.h. Bewegung des Betonflusses möglich ist. Abbildung 55 a zeigt einen einfachen Messaufbau zum Test der grundlegenden Eignung.



b Schichtbreite; c_s Schallgeschwindigkeit; l Weg (Versatz); Em Empfänger; Se Sender; v_{Dk} Druckkopfbewegung; α Ablenkwinkel

1 Sender / Empfänger; 2 Wagen; 3 Austrittsöffnung; 4 Material

a) Mechanischer Aufbau; b) Schematische Darstellung

Abbildung 55: Versuchsaufbau Ultraschallmessung

Zur Detektion und Auswertung der Ultraschallsignale wird das Messsystem (Smartmote FreshCon) verwendet [17]. Zur Transmissionsmessung sind der Sender/Empfänger für P- und S-Welle (1) des Gerätes auf einem beweglichen Wagen (2) montiert, sodass das Messsystem hinter der Austrittsgeometrie des Druckkopfes (3) hergezogen wird. Das Material (4) wird während der Fahrt zwischen die Sensoren extrudiert. Die Ultraschallwelle transmittiert durch den Betonstrang, schematisch dargestellt in Abbildung 55 b.

Zur theoretischen Abschätzung einer Beeinflussung des Messgerätes durch die Druckkopfbewegung wird davon ausgegangen, dass die Schallwellenausbreitung c_s und die Druckkopfbewegung v_{Dk} zeitgleich ablaufen. Entsprechend Gleichung 6 legt die Schallwelle die Schichtbreite b zurück und der Druckkopf den Weg l .

$$\Delta t = \frac{l}{v_{Dk}} = \frac{b}{c_s} \quad (6)$$

Der Ablenkwinkel α ergibt sich aus dem rechtwinkligen Dreieck der Abbildung 55 b als:

$$\tan \alpha = \frac{l}{b} = b \cdot \frac{v_{Dk}}{c_S} \quad (7)$$

Für den Versuchsaufbau aus Abbildung 55 ergibt sich ein Ablenkwinkel von $0,014^\circ$ bei einer Schichtbreite von 150 mm, Druckgeschwindigkeit 50 mm/s^2 und Schallgeschwindigkeit des Frischbetons 200 m/s [17]. Diese Ablenkung wird als unbedenklich eingestuft, da die Schallwelle nicht stark genug durch die Fahrbewegung abgelenkt wird. Die Welle kann am Empfänger ordnungsgemäß empfangen werden. Abbildung 56 zeigt das Ergebnis einer Messung des dynamischen Elastizitätsmoduls während der Fahrt. Das Material war ein Betonsubstrat basierend auf Tabelle 3 (Spalte 2).

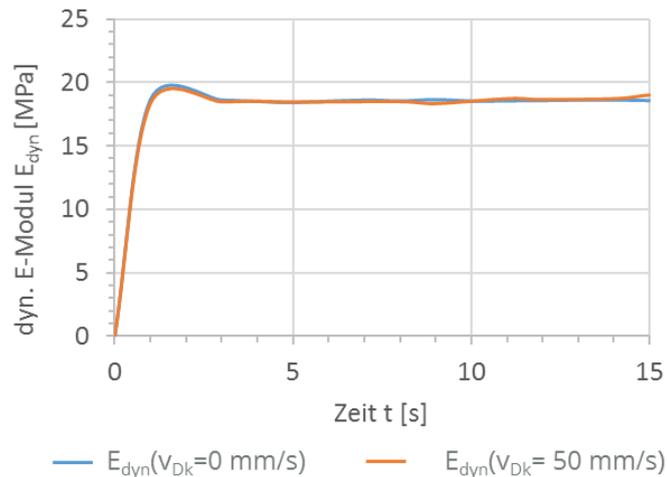


Abbildung 56: Einfluss der Fahrbewegung auf die Ultraschallmessung

Das Ergebnis zeigt, dass die Messung während der Fahrt nicht beeinträchtigt wird, da die Kurven identisch sind. Als Referenz gilt die unbewegte Probe. Der Anstieg zu Beginn liegt an der Taktrate der Messung. Diese lag bei 1 Hz , weshalb zu Beginn der E-Modul 0 kPa ist und dann erst auf einen konstanten Wert steigt. Über die absolute Richtigkeit des Wertes lässt sich keine Aussage treffen, da ein Betonsubstrat verwendet wurde und für dieses keine vergleichbaren Messdaten existieren.

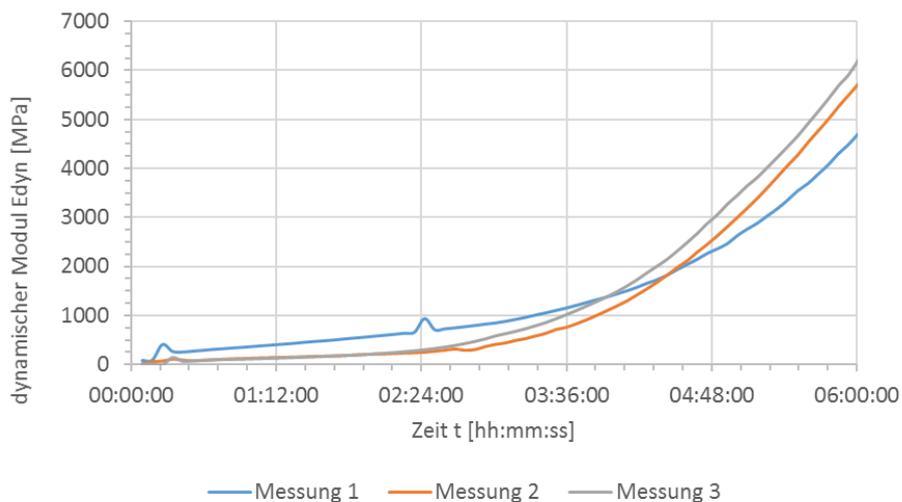


Abbildung 57: Zeitlicher Verlauf des dynamischen Elastizitätsmoduls

Die Abbildung 57 zeigt den Ausschnitt einiger Langzeitmessungen (über 24 h) an unbewegten Proben aus Beton. Die Rezeptur entspricht Tabelle 3 (Spalte 2). Die Transmissionsstrecke (Breite der Probe) beträgt 50 mm. Das Material wurde mit einer Spachtel zwischen die Sensoren gefüllt und leicht verdichtet. Dies sollte die Porigkeit (bzw. Inhomogenität des Stranginneren) aus Abbildung 55 a simulieren. Die Ergebnisse zeigen eine gute Korrelation mit dem Abbindeverhalten aus Abbildung 15. Hier setzt ein beschleunigter Abbindeverlauf ebenfalls ab etwa 4 h bis 4:30 h:min ein.

Die Untersuchungen zeigen, dass mittels der Ultraschalltransmission auch während des Beton-3D-Drucks im bewegten Zustand Messungen möglich sind. Bevor dieses Messprinzip für den Aufbau einer Sollwertvorgabe für die Druckgeschwindigkeit eingesetzt werden kann, sind weitere Störeinflüsse gezielt zu untersuchen. Diese Störeinflüsse sind bspw. die Variation der Fahrgeschwindigkeit; die Porigkeit der Strangoberfläche bzw. Inhomogenität im Inneren des Stranges, Stöße aus dem Förderprozess des Druckkopfes oder die Größe des zu druckenden Querschnitts, da dies einen Einfluss auf die Ausbildung der Wellencharakteristik hat.

2.4 Kompensationseinheit

2.4.1 Definition des Arbeitsraumes und der Freiheitsgrade

Eine Herausforderung für den Beton-3D-Druck sind die Ausführungstoleranzen im Hochbau gemäß DIN 18202 [11]. Zur Erfüllung der gestellten Anforderungen muss die Robotik den Druckkopf auf wenige Millimeter genau positionieren. Systembedingt neigen einige Robotersysteme, wie die Autobetonpumpe, zur mechanischen Verformung und Schwingungsanregung, die letztlich in einer Positionsabweichung resultieren. Verschiedene Systemanpassungen können diese Abweichungen reduzieren aber unter Umständen nicht gänzlich kompensieren. Für die verbleibenden Positionsabweichungen soll eine Kompensationseinheit eingesetzt werden, die im Zusammenspiel mit der Robotik den Druckkopf zielgenau positioniert und bewegt [52]; [54].

Ein entscheidendes Kriterium zur Auslegung einer Kinematik ist der benötigte Arbeitsraum. Prinzipiell ist der Einsatz einer abgewandelten Autobetonpumpe als Manipulator realisierbar. Das ergaben Fachgespräche mit dem projektbegleitenden Ausschuss. Dennoch sind für eine Umsetzung Adaptionen, wie ein angepasster Auslegerarm, eine globale Steuerung der gesamten Kinematik sowie die Integration zusätzlicher Sensorik unabdingbar [52]. Derzeit gibt es keine vollumfänglichen Studien zur Definition des Positionsfehlers, womit die maximale Abweichung einer Ist-Trajektorie des Tool Center Points (TCP) von einer Soll-Trajektorie gemeint ist. Abweichende Konfigurationen von Autobetonpumpen erschweren die Quantifizierung zusätzlich.

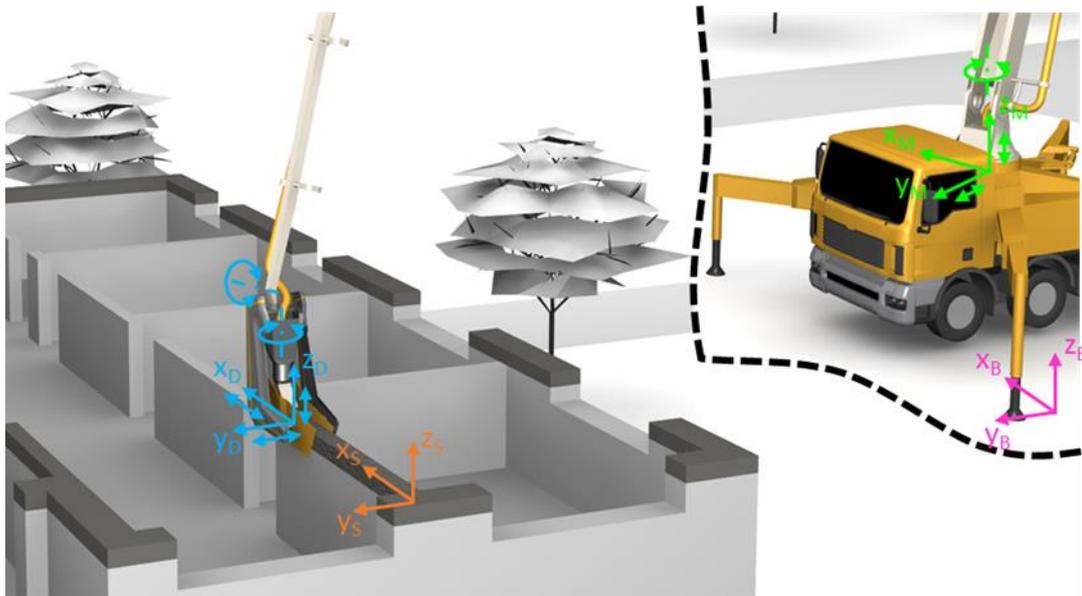
Im Rahmen einer Machbarkeitsuntersuchung konnten erste Erkenntnisse zur Definition des Positionsfehlers gesammelt werden. Hierfür wurde der letzte Arm eines 5-Arm-Betonpumpenmastes durch einen Druckkopfdummy ersetzt und diverse Trajektorien abgefahren. Die Abweichungen des TCP wurden mit einem Tachymeter erfasst [30]; [37]. Die Ergebnisse dieser Versuche sowie die Aussagen der Mitglieder des Projektausschusses, welche auf Erfahrungen und Abschätzungen beruhen, sind in Tabelle 8 gegenübergestellt.

Tabelle 8: Voraussichtliche Abweichungen des TCP einer Autobetonpumpe

Abweichung	TU Dresden [30]	Partner 1	Partner 2	Partner 3
x-Koordinate	± 237 mm	± 500 mm	± 200 mm	± 300 mm
y-Koordinate	± 208 mm	± 500 mm	± 200 mm	± 300 mm
z-Koordinate	± 435 mm	± 500 mm	± 200 mm	± 300 mm

Die Abweichungen sind in kartesischen Koordinaten angegeben. Die x- und y-Koordinaten des Koordinatensystems verlaufen horizontal, wobei die x-Koordinate in der Mastebene liegt. Die z-Koordinate erstreckt sich in vertikaler Richtung. Für den endgültigen Arbeitsraum der Kompensationseinheit wurde das arithmetische Mittel gebildet und entsprechend gerundet. Ergebnis ist ein Quader mit den Kantenmaßen $\pm 300 \times \pm 300 \times \pm 300 \text{ mm}^3$.

Die notwendigen Bewegungsfreiheitsgrade der Kompensationseinheit sind in Abhängigkeit der Autobetonpumpe (Manipulator) und des geplanten Druckprozesses festzulegen. Die Abbildung 58 verdeutlicht das Vorgehen [52]; [54].

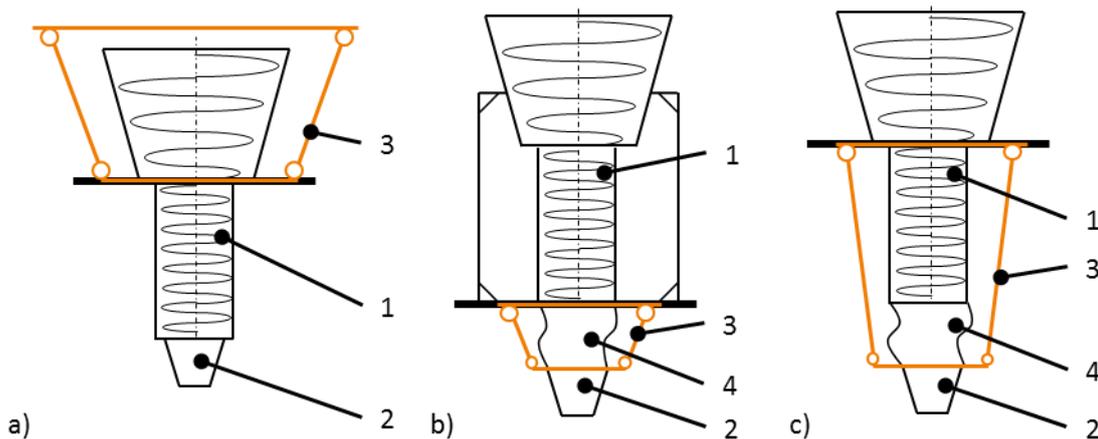


B... Baustelle; D... Druckkopf; M... Mast; S... Schicht

Abbildung 58: Freiheitsgrade der Kompensationseinheit [52]; [54]

Die aktuell zu druckende Betonschicht wird mit dem Koordinatensystem S beschrieben und befindet sich innerhalb der Baustelle. Die Autobetonpumpe wird im globalen Koordinatensystem B platziert. M steht für das Koordinatensystem, welches zur Beschreibung der Maststellung genutzt wird. Das Drehwerk führt eine Rotation um die z_M -Achse aus und dreht das Koordinatensystem in B mit. Dadurch entspricht die $y_M z_M$ -Ebene immer der Mastebene und beschreibt somit die Auslegerbewegung.

Zunächst ist sicherzustellen, dass die z_{Dk} -Achse des Druckkopfes immer senkrecht steht, dadurch ist die $x_{Dk} y_{Dk}$ -Ebene und die $x_S y_S$ -Ebene der aktuell zu druckenden Schicht parallel. Die Senkrechtstellung realisiert das letzte Mastsegment oder ein weiteres Drehgelenk, das durch ein Watt'sches oder Stephenson'sches Koppelgetriebe angetrieben wird. Mit der Drehung um die z_{Dk} -Achse wird die Orientierung des Druckkopfes nachgestellt, sodass die Druckkopf- x_{Dk} -Achse und die x_S -Achse der aktuellen Schicht parallel sind. Abschließend werden die translatorischen Abweichungen in x_{Dk} -, y_{Dk} - und z_{Dk} -Richtung ausgeglichen.



1 Extrusionsmodul; 2 Formgebungsmodul; 3 Kompensationseinheit; 4 flexible Förderleitung
 a) Gesamter Druckkopf; b) Direkt am Formgebungsmodul; c) Übergreifen des Extruderstators

Abbildung 59: Strukturelle Integration der Kompensationseinheit

Als letzter Schritt der strukturellen Systemkonzeptionierung ist festzulegen, wie die Kompensationseinheit zwischen Autobetonpumpe und Druckkopf geschaltet werden soll. Verschiedene Varianten sind in Abbildung 59 dargestellt.

Die Variante a bewegt den gesamten Druckkopf, wohingegen die Varianten b und c nur das Formgebungsmodul bewegen. Letztere haben den Vorteil, dass das zu bewegende Gewicht und die Baugröße der Kinematik minimal sind, da nur die Austrittsöffnung des Formgebungsmoduls exakt positioniert sein muss. Für die Varianten b oder c muss eine flexible Förderleitung zwischen dem Extruderausgang und Formgebereingang installiert sein.

2.4.2 Auswahl einer Vorzugsvariante

Grundlegend können bewegliche Mechanismen in serielle und parallele Kinematiken eingeteilt werden. Bei einer seriellen Kinematik befinden sich sämtliche Antriebe in Reihe und greifen nacheinander am Endeffektor an. Sie bilden eine offene kinematische Kette. Im Gegensatz dazu greifen bei einer parallelen Kinematik alle Antriebe simultan am Endeffektor an. Es ergeben sich mehrere geschlossene kinematische Ketten. In der Tabelle 9 sind beide Konzepte mit einer Auswahl an Kriterien gegenübergestellt.

Tabelle 9: Vergleich serieller und paralleler Kinematiken [22]

Kriterium	Serielle Struktur	Parallele Struktur
Strukturschema [28]		
Struktursteifigkeit	klein	groß
Messfehler in der Struktur	addierend	mittelwertbildend
Objekt- zu Maschinenmasse	klein	groß
Trägheitskräfte	groß	klein
Arbeits- zu Bauraum	groß	klein

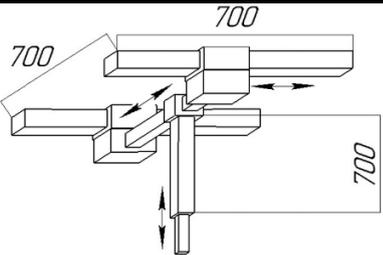
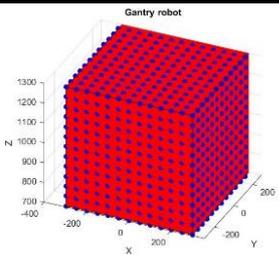
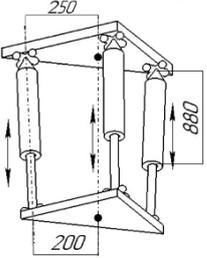
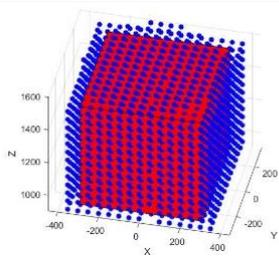
Beweglichkeit im Arbeitsraum	groß	eingeschränkt
Kalibration	einfach	kompliziert
Beispiele	<ul style="list-style-type: none"> • Portalsystem • Gelenkarmroboter • SCARA-Roboter 	<ul style="list-style-type: none"> • Stabkinematik • Delta-Roboter • Seilroboter

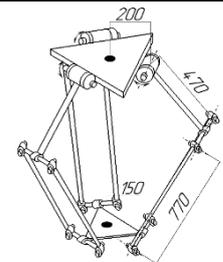
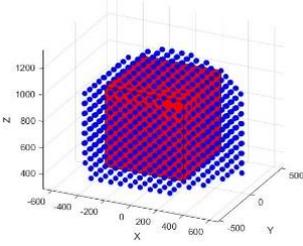
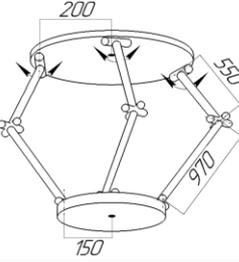
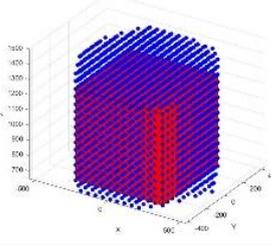
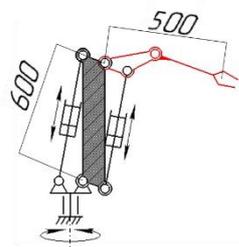
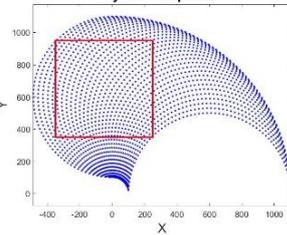
Der Vergleich zeigt, dass serielle Strukturen eine bessere Beweglichkeit aufweisen, wohingegen Parallelkinematiken ein besseres Tragverhalten erzielen. Der Einsatz von Strukturergänzungen erlaubt die Kombination beider Mechanismen, sog. hybride Kinematiken. Es sind zwei Konzepte möglich. Bei einer prinzipiell seriellen Struktur werden an einen bereits bestehenden Mechanismus weitere Gelenke vor oder nach geschaltet. Im Fall eines grundsätzlich parallelkinematischen Aufbaus werden zusätzliche kinematische Ketten ergänzt oder in eine bestehende Kette weitere Gelenke integriert [44].

Für die Auswahl einer geeigneten Kinematik sind neben den notwendigen Freiheitsgraden auch dynamische und konstruktive Aspekte zu beachten. Typische dynamische Fragestellungen betreffen die Traglastverhältnisse, die posenabhängigen Systemsteifigkeiten oder das Beschleunigungsvermögen. Zudem ist bei der Auswahl zu berücksichtigen, welche Art von Betonförderleitung innerhalb der Kompensationseinheit eingesetzt wird und wie die Kinematik in den Beton-3D-Drucker integriert wird. Ohne kinematische Analysen sind zu diesen Punkten keine exakten Aussagen möglich, da diese Faktoren stark von der finalen Konstruktion bestimmt sind.

Die Tabelle 10 listet aus einer Vielzahl von kinematischen Strukturen mit 3 translatorischen Freiheitsgraden eine Auswahl auf. Eine entsprechende Legende zu den genutzten Abkürzungen befindet sich am Ende der Tabelle. Die Arbeitsräume der Manipulatoren sind mit der direkten und inversen Kinematik ermittelt worden, vgl. entsprechende Literaturverweise in der Tabelle 10.

Tabelle 10: Variantenvergleich Kompensationseinheit [52]; [54]

Typ	Kinematische Struktur	Dimensionen	Arbeitsraum
serielle Struktur	Portalroboter (PPP) [40]		
parallele Struktur	3-UPU [23]		

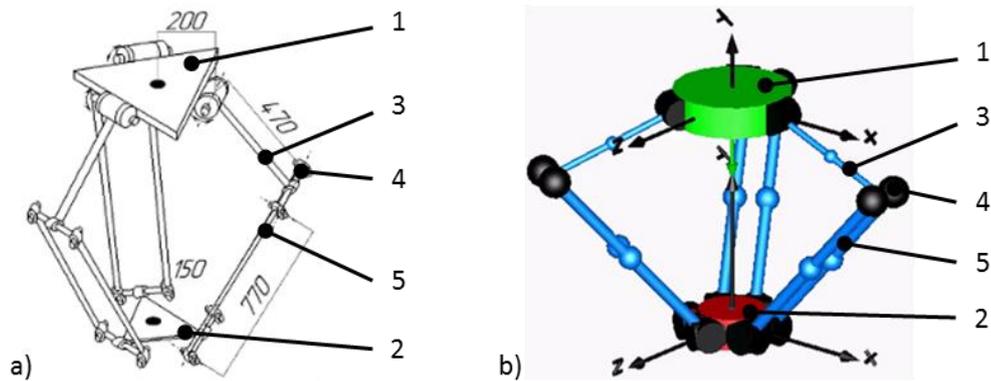
	3- <u>R</u> RR [50]		
	3- <u>R</u> UU [2]		
hybride Struktur	elektrischer Arm (R(R <u>P</u> R)+R(R <u>P</u> R) [41]		
Legende:		<p>— angetriebenes Gelenk der Kette P translatorisches Gelenk R rotatorisches Gelenk U Kardangelenke blaue Punkte Arbeitsraum der Kinematik roter Würfel notwendiger Arbeitsraum</p>	

Im Variantenvergleich stechen die Varianten Delta-Roboter nach Clavel (3-RRR) und der „elektrische Arm“ heraus, da diese die maximalen Maschinenabmessungen des Anforderungskataloges nicht überschreiten. Im weiteren Verlauf soll der Delta-Roboter als Vorzugsvariante untersucht werden, da dieser sehr schnelle und präzise Bewegungen ausführen kann. Zudem wird dieser durch die Parallelschaltung der drei „Beine“ (Gelenkketten) eine hinreichende Systemsteifigkeit in allen Posen erreichen. Weitere Gründe für die Auswahl sind das Leichtbaupotenzial und die Einfachheit der Konstruktion. Für die weitere Entwicklung wird ein dezentralisiertes Konzept des Druckkopfes ausgewählt, entsprechend Abbildung 59 b, da dieses mit einer Delta-Robotik (nach Carvel) am besten harmonisiert.

2.4.3 Konstruktion

Mit der Hilfe von Simulationen soll die mechanische Auslegung der Delta-Kinematik als Kompensationseinheit erfolgen. Eine Mehrkörpersimulation (MKS) ermittelt die notwendigen Antriebsmomente bzw. inneren Schnittreaktionen bei der Bewegung. Diese dienen als Lastannahmen bei der Finiten-Elemente-Modellierung (FEM) zur Bewertung des strukturellen Verhaltens der Bauteile. Hierbei handelt es sich um einen iterativen Prozess, der solange wiederholt wird, bis ein Kompromiss aus minimal notwendigem Antriebsmoment, maximaler Bauteilsteifigkeit und Leichtbau der Gesamtkonstruktion gefunden ist.

Im ersten Schritt wird ein MKS-Modell der Delta-Robotik zur Ermittlung der dynamischen Belastungen und notwendigen Antriebsmomente abgeleitet. Der Modellaufbau erfolgt in der Software OpenModelica.

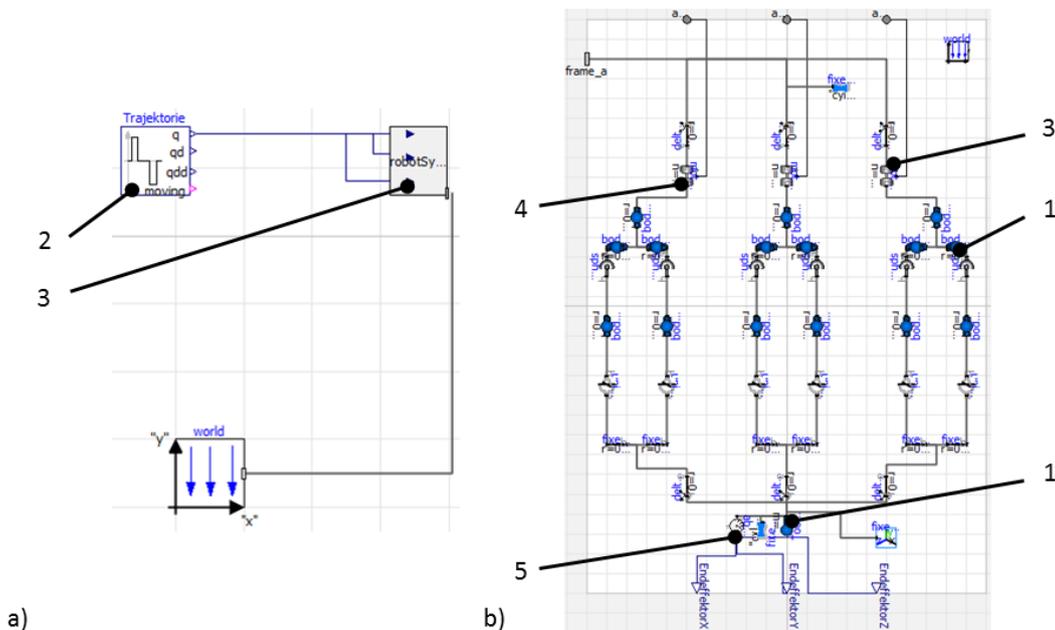


1 Basisplattform; 2 Endeffektorplattform; 3 Oberarm; 4 Kardangelenke; 5 Unterarm
 a) Kinematische Struktur; b) Animation des Starrkörpermodells

Abbildung 60: Aufbau Starrkörpermodell nach [50]

Den Modellaufbau zeigt Abbildung 60 b. Es handelt sich um ein Starrkörpermodell. Die Körper (Bauteile) werden mit einer Masse und Ausdehnung beschrieben. Die Gelenke mit ihren Freiheitsgraden verbinden entsprechend des kinematischen Schemas, vgl. Abbildung 60 a, die einzelnen Körper miteinander und ermöglichen das Bewegungsverhalten [62].

Die Basisplattform (1) ist unbeweglich (fixiert) und entspricht der Systemgrenze, d.h. an dieser Stelle würden die Lasten der Antriebsmomente des Deltaroboters in den Mast der Autobetonpumpe eingeleitet. Die Masse des Formgebungsmoduls, der flexiblen Rohrleitung und deren Beton sind an der Endeffektorplattform (2) mit einem festen Abstand bzw. im Schwerpunkt berücksichtigt. Das Modell enthält keine inneren oder äußeren Lasten, wie Reibungswiderstände der Gelenklager, Windlasten, posenabhängige Verschiebungen der Betonmasse in der flexiblen Förderleitung, Anregungen durch den Pump- oder Extrusionsvorgang.

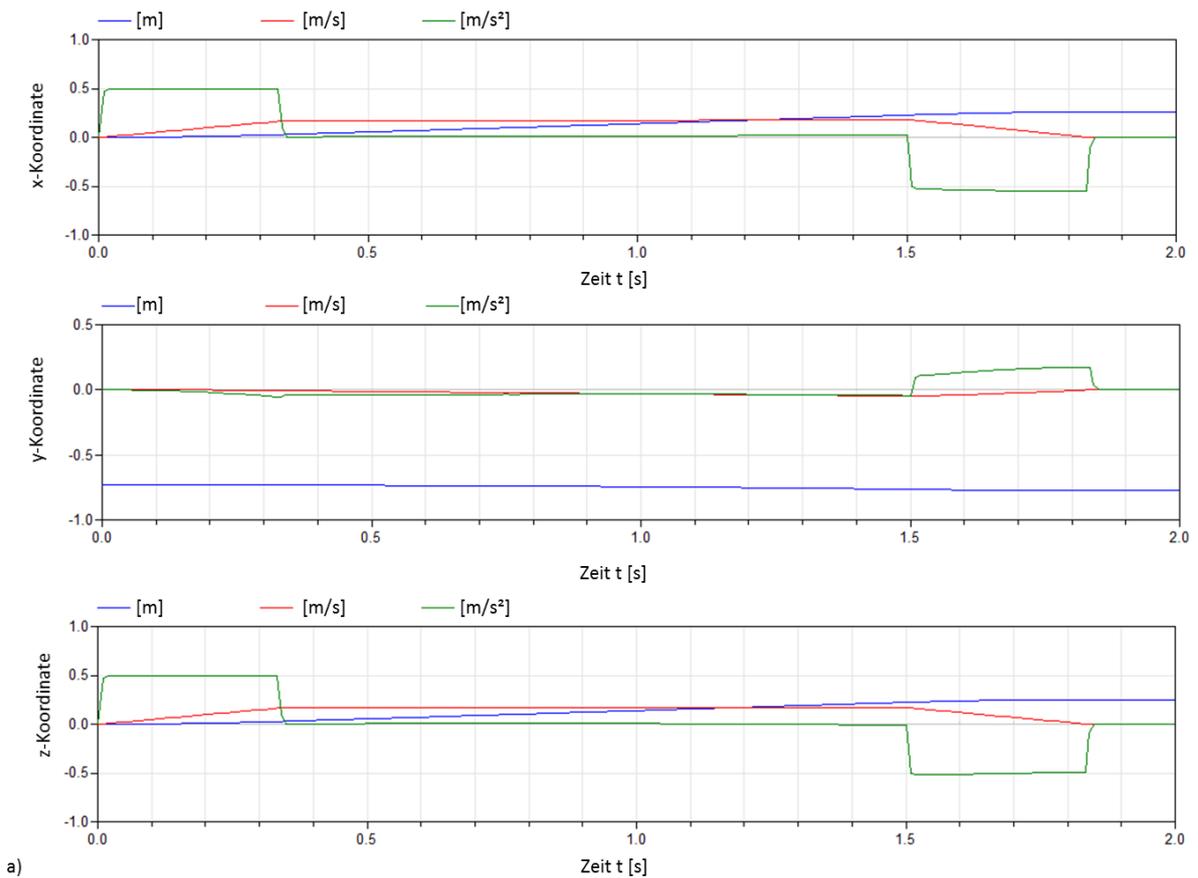


1 Parametrierung; 2 Trajektorienvorgabe; 3 Inverse Kinematik; 4 Gelenkreaktionen; 5 Pose
 a) Trajektorienvorgabe; b) Elemente des Starrkörpermodells

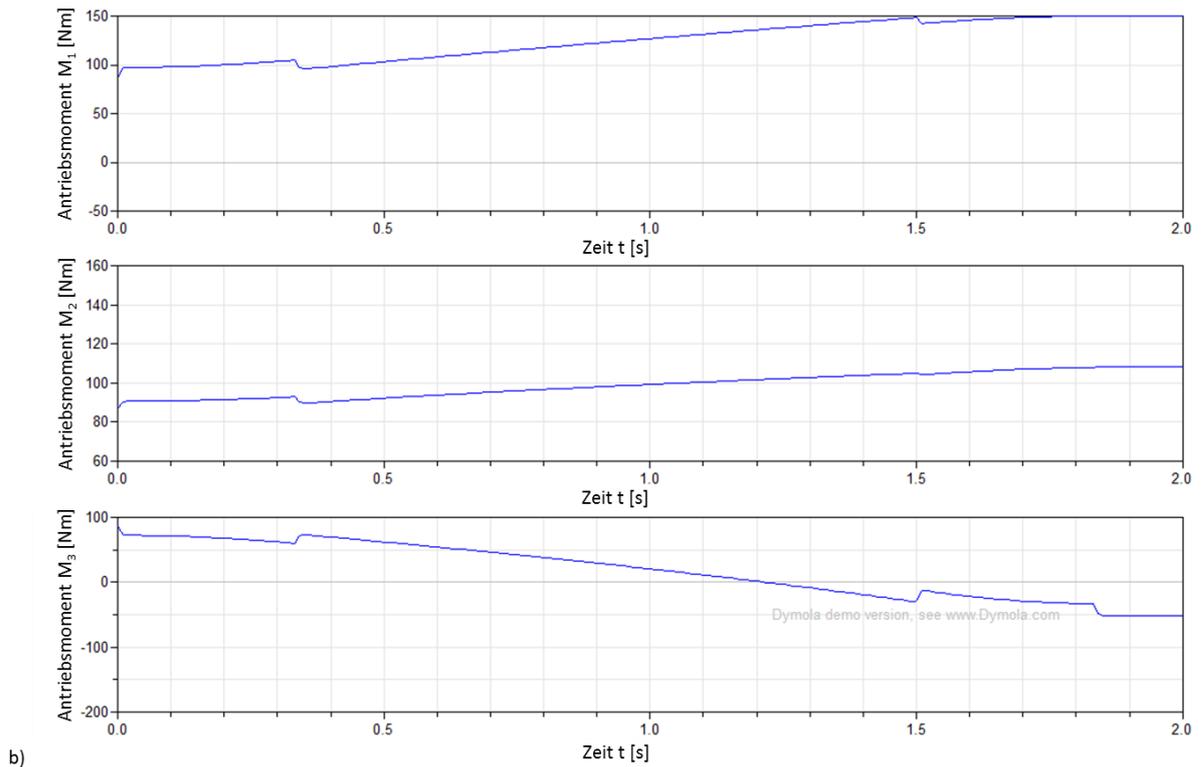
Abbildung 61: Graphische Darstellung des Starrkörpermodells

Abbildung 61 zeigt das MKS-Modell in der grafischen Elementansicht aus OpenModelica. Die Simulation des Bewegungsverhalten läuft wie folgt ab:

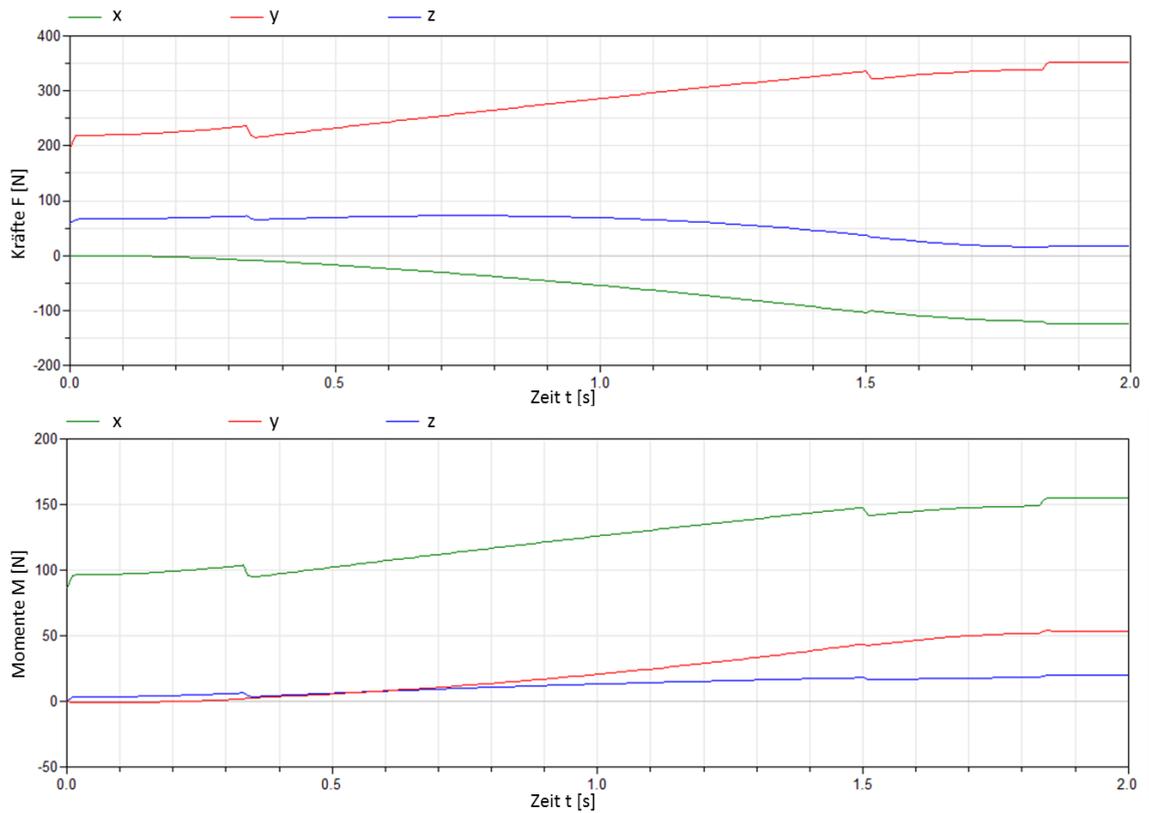
- Parametrierung der Elemente (1),
- Vorgabe der Trajektorie des Endeffektors (2),
- Inverse Kinematik ermittelt aus Endeffektortrajektorie eine Vorgabe für die Rotation der Antriebsgelenke (3),
- Vorwärtskinematik (MKS) ermittelt aus Gleichgewichtszustand der Kräfte und Momente (4) sowie Endeffektorpose (5).



a)



b)



c)

a) Trajektorie; b) Antriebsmomente; c) Schnittreaktionen Oberarm 1 im Koordinatensystem der FEM

Abbildung 62: Simulationsergebnisse Oberarm 1

Abbildung 62 stellt die Simulationsergebnisse einer Trajektorienvorgabe, Abbildung 62 a des Oberarms 1, dar. Das Bein 1 befindet sich in Richtung der x-Achse, vgl. Abbildung 60 b. Die anderen Beine zeigen ein analoges Verhalten. Die weitere Analyse erfolgt exemplarisch am Oberarm der Beinstruktur des Delta-Roboters, da dieser eine Kombination aus Zug/Druck und Biegebelastung erfährt [44].

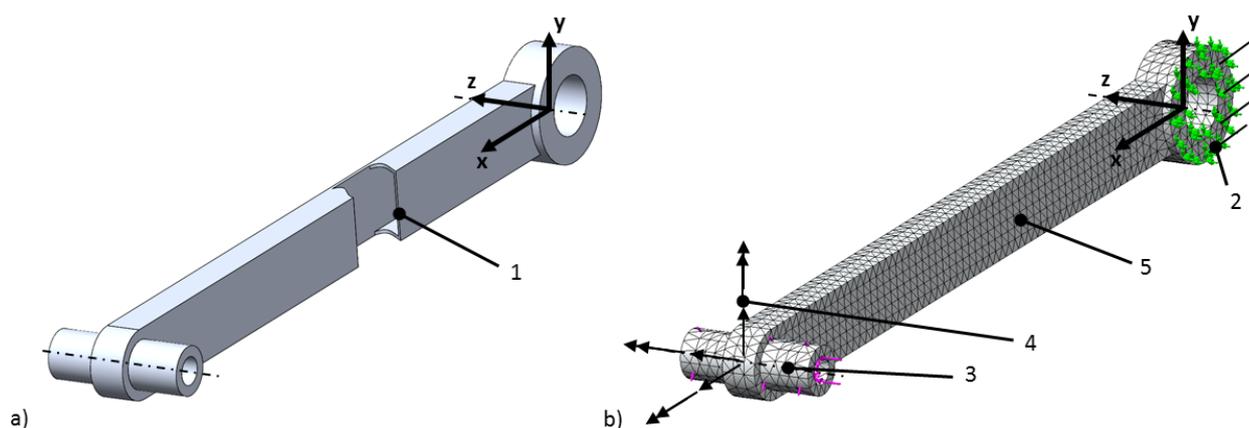
In Tabelle 11 sind die Modellparameter der Starrkörper aufgelistet, welche bei der Simulation vorgegeben wurden.

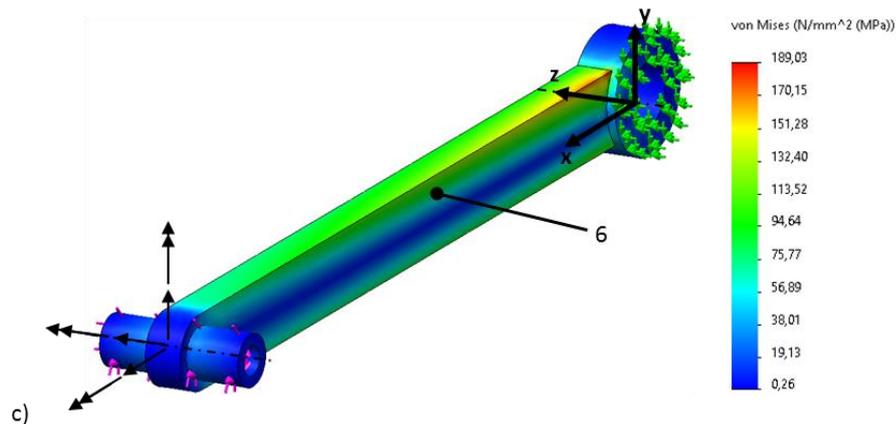
Tabelle 11: Parameter des Starrkörpermodells

Bauteil im MKS-Modell	Abmessung [mm]	Bauteilmasse [kg]
Basisplattform	Radius: 200	-
Oberarm	Länge: 470	0,53
Kardangelenk	Länge: 152	0,17
Unterarm	Länge: 770	0,56
Endeffektorplattform (+Beton + Schlauch)	Radius: 150	3,39 (+ 5,87 + 1,40)
Formgebungsmodul	Abstand: 119	29,0

Die größte Belastung ergibt sich beim Anfahren der Mittelpunkte der vertikalen Kanten des Arbeitsraumes. Bei der Planung der Trajektorie wurde die maximale Geschwindigkeit 0,2 m/s und Beschleunigung 0,6 m/s² genutzt, siehe Abbildung 62 a. Das maximale Antriebsmoment während der Beschleunigungsphase beträgt 154 Nm, siehe Abbildung 62 b. Es ergeben sich die Schnittgrößenverläufe gemäß Abbildung 62 c.

Zur Überprüfung und Bewertung des strukturellen Verhaltens werden die inneren Schnittreaktionen aus der MKS entsprechend der Pose an den Bauteilen angetragen. Die FEM-Analyse ist quasi-statisch. Die FEM-Analyse wird mit dem Tool zur strukturmechanischen Analyse der Software SolidWorks 2022 durchgeführt.





1 Bauteilgeometrie; 2 Einspannung; 3 Freies Ende; 4 Lastvorgabe; 5 Vernetzung; 6 Statische Analyse
 a) CAD-Geometrie; b) Randbedingung, Lastvorgabe und Vernetzung; c) Statische Analyse

Abbildung 63: Graphische Darstellung des FEM-Modells für den Oberarm

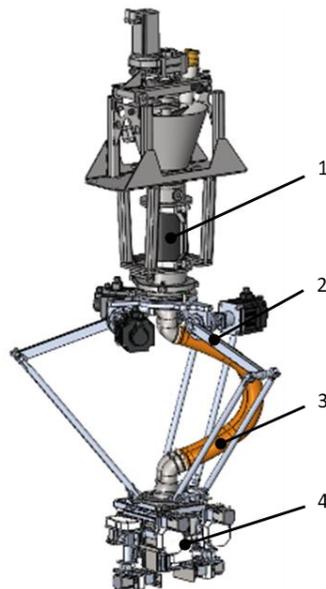
In Abbildung 63 ist der Modellaufbau dargestellt. Die FEM-Analyse läuft wie folgt ab:

- Erstellung der CAD-Geometrie des Bauteils und Festlegung des Werkstoffes (1),
- Festlegung der Randbedingungen (2 - motorseitige Einspannung, 3 - freibewegliche Kardanbolzenaufnahme) und Antragen der externen Lasten (4 - Schnittreaktionen gemäß MKS-Modellierung),
- Vernetzung des Körpers (5),
- Statische Analyse (6) und Berechnung des Sicherheitsfaktors.

Beim Querschnitt des Oberarms handelt es sich um ein Hohlrechteck 40 x 20 x 2 mm. Das Halbzeug ist aus Aluminium EN-AW 3004 (Werkstoffnummer: 3.0526). Die Vernetzung erfolgt mit Tetraedern. Die Vergleichsspannung σ_{Mises} wird nach dem von Mises-Kriterium bestimmt. Gemäß dem Ergebnis der FEM-Simulation, Abbildung 63 c, beträgt diese 189 MPa. Der Sicherheitsfaktor S_F ist der Quotient gemäß Gleichung 8.

$$S_F = \frac{\sigma_S}{\sigma_{Mises}} \quad (8)$$

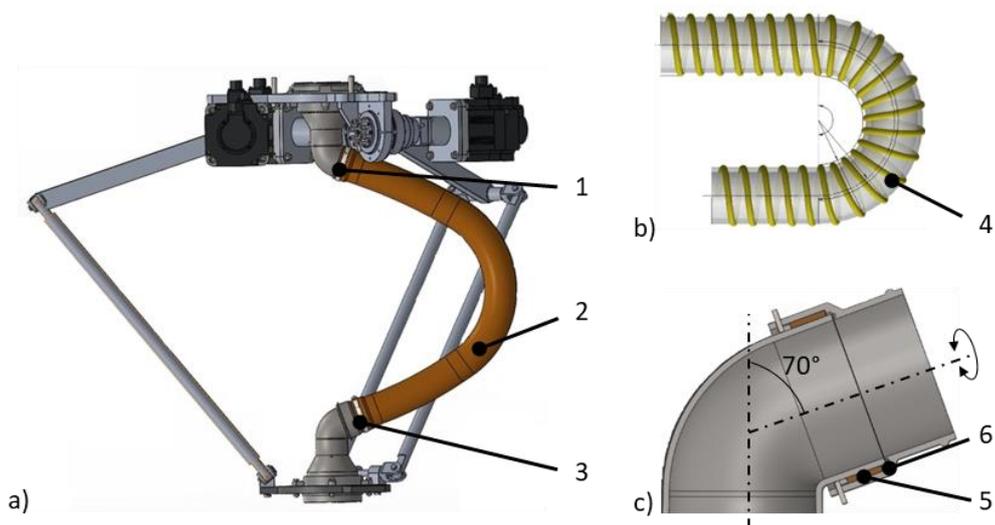
Für den gewählten Aluminiumwerkstoff beträgt die Fließgrenze 240 MPa. Der Sicherheitsfaktor für den Oberarm ist 1,27. Die Verformung beträgt 8 mm, weshalb die Simulation des Bewegungsverhaltens als Starrkörpermodell gerechtfertigt ist.



1 Extrusionsmodul; 2 Kompensationseinheit; 3 Betonschlauch; 4 Formgebungsmodul

Abbildung 64: Druckkopf mit Kompensationseinheit

Die Abbildung 64 stellt den Druckkopf mit Kompensationseinheit im CAD dar. Der Aufbau entspricht der Konzeptionierung aus Abbildung 59 b. Während des Druckprozesses wird der Beton in den Druckkopf gepumpt. Anschließend fördert das Extrusionsmodul (1) den Beton über den flexiblen Schlauch (3) in das Formgebungsmodul (4). Dort wird der Beton ausgetragen. Die Kompensationseinheit (2) führt die gewünschten Ausgleichsbewegungen durch und trägt nur das Formgebungsmodul mit dem Schlauch. Es wird ein flexibler Schlauch als Förderleitung eingesetzt, da dieser verhältnismäßig leicht ist und die Bewegungsfähigkeit der Kinematik nicht beeinflusst.



1 Fixe Verbindung; 2 Schlauchleitung; 3 Rotatorische Verbindung; 4 Metallspirale; 5 Gleitlager; 6 Dichtung
a) Gesamtansicht; b) Versteifung; c) Drehgelenk

Abbildung 65: Flexible Schlauchleitung der Kompensationseinheit

In Abbildung 65 sind die Komponenten der flexiblen Schlauchleitung detailliert gezeigt. Der Schlauch (2) ist an der Basisplattform mit entsprechenden Klemmschellen fixiert (1). Der Nenn-durchmesser (DN) des Schlauches beträgt 60 mm (Wandstärke 5 mm) und ist 890 mm lang. Die Schlaufenlegung stellt eine ausreichende Bewegungslänge sicher. Als Werkstoff kommt Styrol-Butadien-Kautschuk (sog. SBR-Gummi) zum Einsatz. Die Auswahl wird mit einer guten Manipulierbarkeit, da kleine Biegeradien möglich sind, und hinreichenden Abrasionsfestigkeit und Dehnfähigkeit begründet. Der Schlauch kann, wie in Abbildung 65 b, mit einer spiralförmigen Einlage ausgestattet werden, um ggf. Einschnüren des Schlauches zu verhindern [18]; [27].

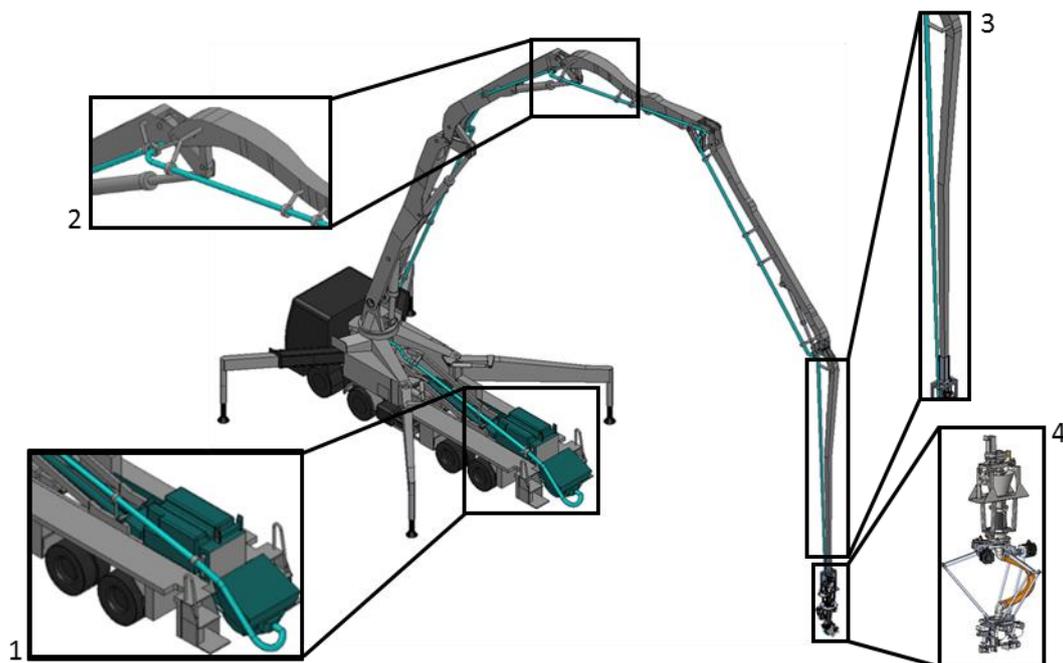
An der Endeffektorplattform (3) wird der Schlauch beweglich montiert. Das Drehgelenk (6), aus Abbildung 65 c, besitzt einen Freiheitsgrad um die Schlauchlängsachse und ist entsprechend gegenüber dem Beton abzudichten [55].

2.5 Theoretische Betrachtung: Druckprozess mit Transportbeton

2.5.1 Modifikation der Autobetonpumpe

Das Konzept ConPrint3D greift für den Beton-3D-Druck auf konventionelle Maschinenteknik zurück und will diese für den Beton-3D-Druck modifizieren. Als Manipulator bietet sich eine Autobetonpumpe an. Vorteilhaft an dieser Technik ist die große Reichweite des Mastes, der schnelle Aufstellvorgang und die bereits integrierte Fördertechnik für den Beton [37]; [52].

Neben der Anpassung der Mastkinematik an die 3D-Druckarbeitsweise muss auch die Förder-technik an diese angepasst werden [52]. Abbildung 66 zeigt die wesentlichen Elemente des Förder-systems einer Autobetonpumpe für den Beton-3D-Druck.



1 Kolbenpumpe; 2 Rohrleitung und -bögen; 3 Fallbremse; 4 Druckkopf

Abbildung 66: Pump- und Fördertechnik beim Beton-3D-Druck [52]

Die Abschätzung des notwendigen Pumpendrucks erfolgt mit Hilfe des Betondruck-Leistungs-Nomogramm, da es eine einfache und verbreitete Methode ist und der entwickelte Beton ohne

Fließmittel auskommt [26]. Alternativ kann auch das Gleitrohrreometer „SLIPER“ genutzt werden, vgl. Abbildung 5 [58]. Es ist anzumerken, dass zur tatsächlichen Pumpbarkeit des entwickelten Betons weitere Untersuchungen notwendig sind.

Der entwickelte 3D-druckfähige Beton hat 16 mm Größtkorn und ein Ausbreitmaß ≥ 40 cm, darin ist er mit konventionellen Betonen vergleichbar., siehe Tabelle 12.

Der Volumenstrom Q ist das Produkt aus Druckkopfgeschwindigkeit v_{Dk} und zu druckenden Schichtquerschnitt A gemäß Gleichung 9.

$$Q = v_{Dk} \cdot A \tag{9}$$

Die maximale Druckkopfgeschwindigkeit beträgt 0,15 mm/s. Der Druckkopf der TU Dresden liefert maximal Querschnitte von 150 x 50 mm. Es wird davon aufgegangen, dass im Vollwanddruck die Schichtabmessungen von 300 x 150 mm realisierbar sind [37]; [43]. Nach Gleichung 9 beträgt der maximale Fördervolumenstrom 24 m³/h, etwa 1/10 des Volumenstroms konventioneller Anlagen, siehe Tabelle 12.

Unter Berücksichtigung dieses Volumenstroms kann mit Hilfe des Betondruck-Leistung-Nomogramms, Abbildung 67, der notwendige Pumpendruck abgeschätzt werden.

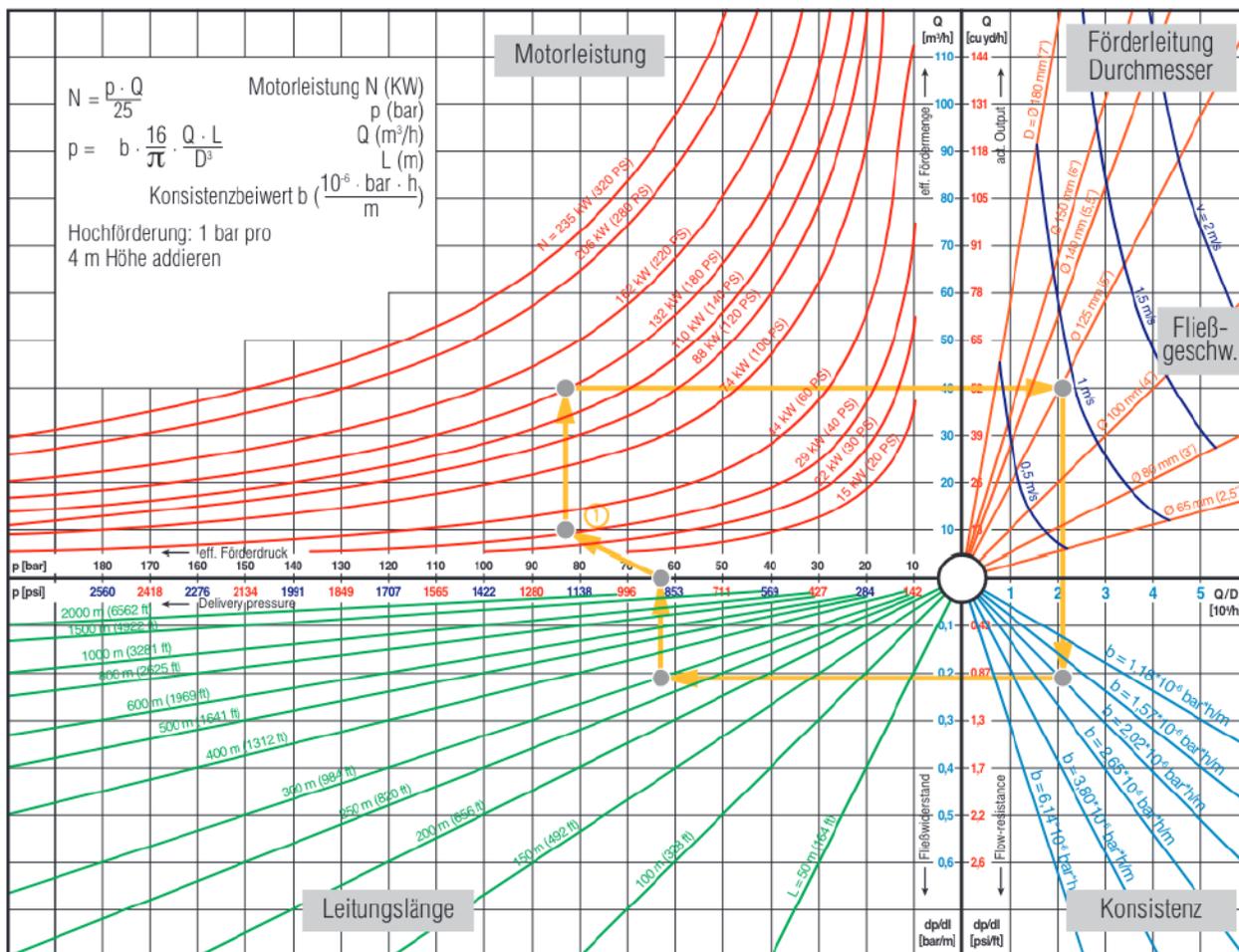


Abbildung 67: Betondruck-Leistung-Nomogramm [26]

Es wird angenommen, dass der Rohrinne Durchmesser 80 mm beträgt, damit ist dieser min. 3-mal größer als das Größtkorn, damit eine gute Pumpbarkeit gewährleistet wird und Randeffekte minimiert werden [26]. Der Viskositätsparameter b ergibt sich aus dem Ausbreitmaß 40 cm. Für

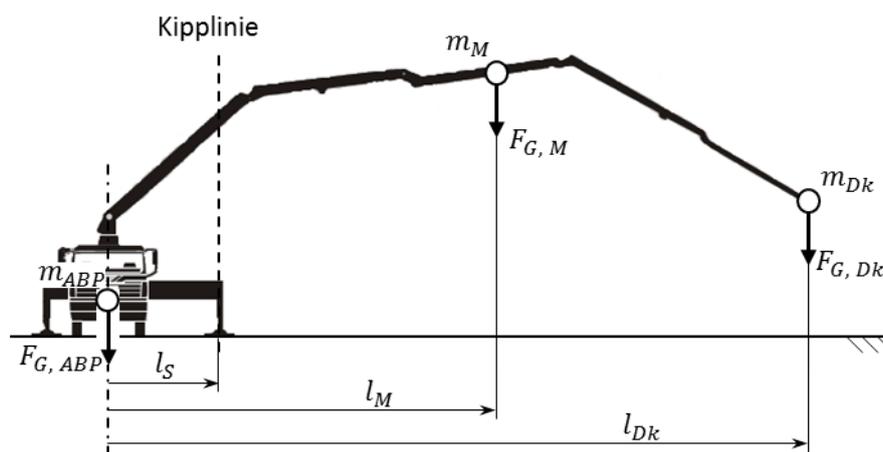
die dargestellte 5-gliedrige Autobetonpumpe aus Abbildung 66 beträgt die äquivalente Rohrlänge 75 m. Diese setzt sich aus 50 m gerader Leitungslänge und Beachtung der Rohrbögen entsprechend dem Betondruck-Leistung-Nomogramm zusammen. Mit der Berücksichtigung des geodätischen Drucks für die halbe Länge der Förderleitung ergibt sich ein Systemdruck von 33 bar. Tabelle 12 stellt die Leistungsparameter noch einmal gegenüber

Tabelle 12: Leistungsparameter der Autobetonpumpe

Prozessparameter	3D-Druck	Konventionell
Beton:		
- Größtkorn [mm]	≤ 16	≤ 32
- Ausbreitmaß [cm]	~ 40	~ 35 bis 62 cm
Volumenstrom [m ³ /h]	≤ 24	200
Förderdruck [bar]	33	85

Für die in Abbildung 66 genannten Elemente des Pump- und Leitungssystem ergeben sich keine zwingend erforderlichen konzeptionellen Veränderungen. Sie müssten lediglich an die veränderten Systemdrücke bzw. Volumenströme angepasst werden. Ein Beispiel sind die Komponenten der funktionalen Sicherheit der Fördertechnik, wie Überdruckventile der Hydraulikkomponenten oder Dichtungsstellen der Rohrleitung [10]. Die geringeren Durchflüsse und Systemdrücke würden eine Verkleinerung der Rohrleitungen ermöglichen. Dies führt zu einer Reduktion der Masse entlang des Mastes, sodass eine Verbesserung der dynamischen Eigenschaften des Bewegungssystems zu erwarten ist. Die Intensität von möglichen Pumpstößen sollte geringer ausfallen, da die Leistungsanforderung der Pumpe geringer ausfällt. Diese Anpassungen können zu einer Verbesserung der Positioniergenauigkeit führen [52].

Die Nutzung des Druckkopfes an der Mastspitze der Autobetonpumpe ist ein grundlegender Eingriff in die kinematische Struktur, welche eine Veränderung der Standsicherheit mit sich bringt. Die Abbildung 68 zeigt die Autobetonpumpe aus Abbildung 66 als statisches Starrkörpermodell mit der Kipplinie entlang der Abstützung [7].



$F_{G, ABP}$ Gewichtskraft der Autobetonpumpe; $F_{G, DK}$ Gewichtskraft des Druckkopfes; $F_{G, M}$ Gewichtskraft des Mastes; m_{ABP} Masse der Autobetonpumpe; m_{DK} Masse des Druckkopfes; m_M Masse des Mastes; l_{DK} Schwerpunktabstand des Druckkopfes; l_M Schwerpunktabstand des Mastes; l_S Stützenabstand

Abbildung 68: Model zur Standsicherheitsberechnung

Die Autobetonpumpe kippt (stürzt um), wenn die Momentenbilanz, gemäß Gleichung 10, um die Kipplinie nicht mehr erfüllt ist.

$$F_{G, ABP} \cdot l_S \geq F_{G, M} \cdot (l_M - l_S) + F_{G, Dk} \cdot (l_{Dk} - l_S) \quad (10)$$

F_G entspricht den Gewichtskräften der einzelnen Komponenten und l den Abständen der Schwerpunkte bzgl. der Mittelachse des Fahrzeugchassis. Der Abstand l_M des Schwerpunktes des Mastes ist abhängig von der jeweiligen Pose. Für eine vereinfachte konservative Abschätzung wird angenommen, dass sich die gesamte Mastmasse ebenfalls an der Spitze befindet. Mit dieser Annahme $l_M = l_{Dk}$ und $F_G = m \cdot g$ führt Gleichung 10 zur Gleichung 11. Mit dieser kann die maximale Bruttoreichweite $l_{Dk, max}$ berechnet werden.

$$l_{Dk, max} = \left(1 + \frac{m_{ABP}}{m_M + m_{Dk}} \right) \cdot l_S \quad (11)$$

Für die in Abbildung 66 gezeigte Autobetonpumpe werden die in Tabelle 13 gelisteten Werte angenommen, damit ergibt sich nach Gleichung 11 eine maximale Bruttoreichweite von 29,3 m. Zur Bestimmung der Nettoreichweite wird der Stützenabstand l_S subtrahiert. Die Nettoreichweite beträgt 25,5 m. Im Vergleich mit der Nettoreichweite der Standardversion von 35 m reduziert sich die Reichweite um 27 %.

Tabelle 13: Modelannahmen für Standsicherheitsberechnung

Bezeichnung		Wert	
l_S	Stützenabstand	3,75	kg
m_{ABP}	Masse der Autobetonpumpe (Chassis ohne Zuladung und Betriebsmitteln)	25.000	kg
m_{Dk}	Masse des Druckkopfes (Leermasse)	160	kg
m_M	Masse des Mastes (Leermasse)	3.500	kg

Das Model aus Abbildung 68 vernachlässigt dynamische Effekte aus der Bewegung des Mastes sowie dessen Verformungen infolge der Druckkopfmasse an der Mastspitze. Ebenfalls wird die Verkippung der Fahrzeugmittelachse in Folge der Verschiebung des Mastschwerpunktes vernachlässigt. Zudem wird davon ausgegangen, dass der Standardmast den Druckkopf trägt.

Die neue Technologie stellt einen komplexen Eingriff in die Standsicherheit dar und Bedarf weiterer detaillierter Untersuchungen. Weiterhin wird der Druckkopf den bisherigen Reinigungsablauf der Betonpumpe und Förderleitungen beeinflussen. Allerdings kann nicht abgeschätzt werden in wie fern.

2.5.2 Einbauvolumenstrom

Der theoretisch berechnete Volumenstrom entsprechend Gleichung 9 entspricht einem theoretischen Wert, da hier der Druckprozess einer realen Struktur mit Ecken, T-Verbindungen etc. vernachlässigt. Abbildung 69 zeigt einen einfachen Gebäudegrundriss mit einigen Annahmen für den Druckvorgang.

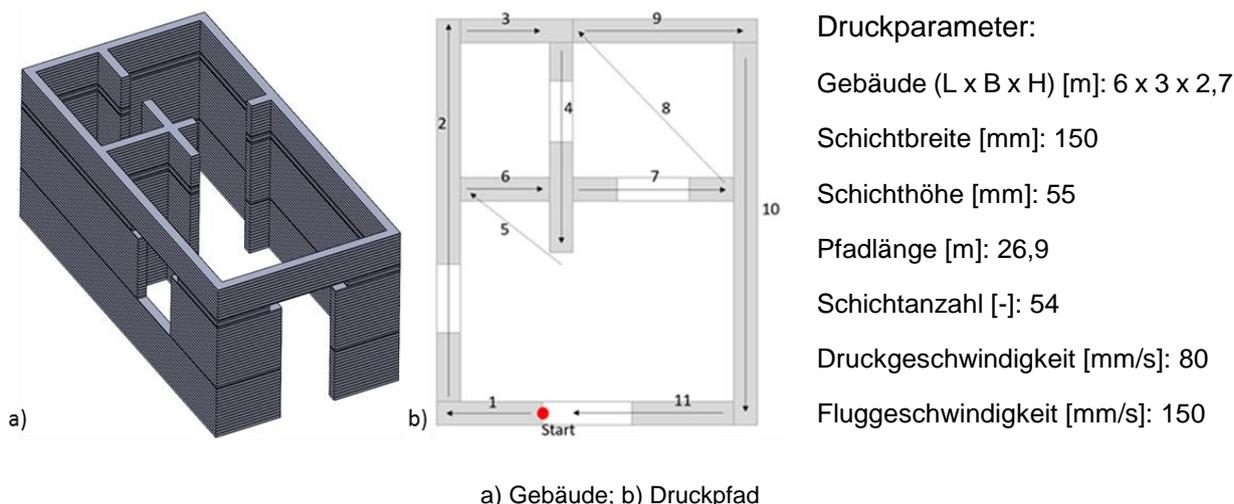


Abbildung 69: Gebäudegrundriss [29]

Der geplante Druckpfad, Abbildung 69 b basiert auf der Dissertation „Baubetriebliche Optimierung des vollwandigen Beton-3D-Drucks“ (Krause) [29]. Die Geschwindigkeiten entsprechen typischen Werten aus Versuchen am Prüfstand der TU Dresden.

Für die Bestimmung der Leistungsdaten des Bauprozesses in Tabelle 14 sind weitere Randbedingungen festgelegt worden. Zunächst wird ein ideales Druckmaterial angenommen, d. h. der Beton kann den vertikalen Baufortschritt gewährleisten. Alle Betonstränge haben die gleiche Schichtgeometrie. Bei Fenstersimsen oder Stürzen wird keine Schicht mit „gebrochener“ Schichthöhe eingefügt, sondern nur dieser Bereich. Der Rest der Schicht wird mit der maximalen Höhe gedruckt, was der Druckkopf aus Abbildung 45 erlaubt. Das Beschleunigungsverhalten der Druckkopfbewegungen wird vernachlässigt. Mit diesen Annahmen und den Druckparametern aus Abbildung 69 die Bauprozessgröße der Tabelle 14 berechnet werden.

Tabelle 14: Leistungsdaten Bauprozess

Bauprozessgröße	Wert
3D-gedrucktes Betonvolumen [m ³]	9,0
Herstellungszeit [h:min]	6:42
Druckzeit [h:min]	3:49
Druckzeitanteil [-]	0,57
Fördervolumenstrom [m ³ /h]	2,28
Einbauvolumenstrom [m ³ /h]	1,35

Während der Druckzeit wird Beton ausgetragen. Das Verhältnis zwischen Druckzeit und Herstellungszeit ist der Druckzeitanteil. Ein Grund für den Verlust an Druckzeit sind Flugphasen auf Grund der Pfadplanung oder der Herstellung von Türen und Fenstern. Die Hauptursache sind die sog. Störstellen, wie Ecken, T-Verbindungen oder Kreuzungen, da dort der Druckprozess unterbrochen werden muss und der Druckkopf einen neuen Betonstrang beginnt. Dieser Vorgang dauert je nach Art der Störstelle ca. 10 bis 40 Sekunden. Der Druckzeitanteil kann gesteigert werden, wenn alle Vorgänge schneller ablaufen. Durch Parallelisierung von Zustellbewegungen während der Ausformung von Gebäudeelementen sind effizientere Bewegungsabläufe möglich, die weniger Zeit in Anspruch nehmen. Trotzdem wird durch den Vollwanddruck Prinzip bedingt der Druckzeitanteil nicht eins, sodass der Förderprozess zur Beschickung des Druckkopfes mit Beton diskontinuierlicher wird als konventionelle Förderprozesse. Dies stellt eine weitere Herausforderung beim Pumpprozess 3D-druckfähiger Betone für den Vollwanddruck dar.

Der Fördervolumenstrom, in Tabelle 14, kann mit Gleichung 9 berechnet werden. Hierbei handelt es sich um einen Leistungsparameter der Maschine, da zu einem bestimmten Zeitpunkt (Baubschnitt) dieser Volumenstrom notwendig ist. Die Multiplikation mit dem Druckzeitanteil ergibt den Einbauvolumenstrom, d. h. die tatsächlich eingebaute Betonmenge pro Zeiteinheit. Auf der Grundlage dieser Prozessgröße können die logistischen Abläufe, wie bspw. Größe oder Ankunftszeitpunkt von Fahrmischern, geplant werden.

2.6 Zusammenfassung und Ausblick

Ausgangslage des Forschungsprojektes ist die labortaugliche Version des Druckkopfes der TU Dresden aus dem Jahr 2019 bzw. 2020. Zielstellung der Entwicklung ist die Steigerung der Prozesssicherheit und die Verbesserung der Tauglichkeit des Druckkopfes für den Baustelleneinsatz.

Zunächst ist eine Anforderungsliste erstellt worden, welche die Themenfelder Baustoff und Baumaschine umfasst. Die Maschinentchnik untergliedert sich in die Teilbereiche Druckkopf und Kompensationseinheit. Die Anforderungsliste dient als transparentes Mittel zur Festlegung der Leistungsparameter der Komponenten und dient als Kontrollmechanismus während der Entwicklung durch die fortwährende Prüfung des Erfüllungsgrades.

Im Zuge der Druckkopfentwicklung ist die Materialkombination des Schnecke/Stator-Systems des Extruders überarbeitet worden. Aus verschiedenen Varianten hat sich eine Stahl/Gummi-Paarung durchgesetzt. Hauptgrund für die Auswahl dieser Vorzugsvariante ist die problemlose Verarbeitung von Betonen mit einem Korn von maximal 16 mm gebrochener Form und die Reduktion des Verschleißes am Stator auf 0,06 % der Ausgangsmasse nach 7 Betriebsstunden.

Die Fördercharakteristik des Extrusionsmoduls kann durch Vibrationseintrag beeinflusst werden. Die Integration von handelsüblicher Niederfrequenzrütteltechnik ermöglicht, das Fließverhalten positiv zu beeinflussen, sodass auch schwer extrudierbare, hochthixotrope Betone verarbeitbar sind. Die Extrusion mit Rüttlern erlaubt eine Steigerung des Förderwirkungsgrades von bis zu 22 %, wenn der Vibrationseintrag ausreichend ist, um das Material in einen fließfähigeren Zustand anzuregen. Dieses Verhalten ist unabhängig vom Größtkorn der Betonrezeptur.

Das Formgebungsmodul arbeitet als gleitende Schalung. Es kann komplexe Gebäudeelemente, wie Ecken, T-Verbindungen oder Kreuzungen je nach Art der Verzahnung in 10 bis 40 Sekunden herstellen. Die Schichtbreite ist stufenlos von 80 bis 150 mm einstellbar. Dies erlaubt den Druck unterschiedlicher Wandstärken für Außen- und Innenwände.

Neben dem Zeitintervall zwischen der Schichtablage spielt die Einbaurichtung des Materials im Bezug zur aktuellen Schicht eine wesentliche Rolle. Das Material kann entweder horizontal in der aktuellen Schicht abgelegt oder vertikal von oben eingebracht werden. Der vertikale Einbau ist vom Prozesshandling für den Vollwanddruck etwas komplexer, erzielt aber einen besseren Verbund zwischen den Schichten als die horizontale Ablage.

Der Einsatz der Vibrationstechnik an der Düse homogenisiert das Material nicht und die Streubreiten 3D-gedruckter Probenelemente bleibt weiterhin höher als bei geschalteten Probekörpern. Das überarbeitete Montagekonzept reduziert die Rüstzeit des gesamten Druckkopfes auf ca. 15 Minuten.

Mit dem weiterentwickelten Druckkopf wurde zur Validierung der Forschungsergebnisse ein Demonstrator aus Beton mit 16 mm Größtkorn gedruckt. Als Validierungsobjekt wurde eine rechtwinkelige Ecke mit Abmessungen [LxBxH] 700x700x200 mm und orthogonaler Übergreifung der Schichten definiert. Im Vergleich zu früheren Druckobjekten mit ähnlicher Geometrie ist die mangelnde Oberflächenqualität auffällig. Diese ist auf die gröbere Körnung des Materials und die mangelnde Steifigkeit in der Halterung der Formgebungsbleche bzw. fehlender Rundungen an der Austrittsöffnung zurückzuführen. Bei Druckexperimenten mit einem vereinfachten Nachbau

des Formgebungsmoduls, das mit besseren Rundungen der Austrittsöffnungen ausgestattet war, konnte eine deutliche Verbesserung der Form- und Maßhaltigkeit des Betonstranges erreicht werden. Die poröse Oberfläche blieb aber unverändert erhalten. Die vertikale Druckrichtung sorgt für einen besseren Verschluss von Spalten zwischen den Betonsträngen. Die Befüllung des Druckkopfes während des Herstellungsprozesses war manuell.

Zur Dokumentation und Automatisierung des Druckprozesses sind entsprechende Messsysteme und darauf aufbauende Regelkreise notwendig. Für die Beschickung des Druckkopfes mit Beton wird dessen Masse als Füllstand mit einer Wägezelle erfasst. Der Füllstand des Druckkopfes wird mit einem Zwei-Punkt-Regler geregelt. Der relative Messfehler der Wägezelle beträgt bei verschiedenen Störeinflüssen maximal $\pm 0,46$ %.

Zur Dokumentation der Schichtabmessungen wird ein Laserprofilscanner genutzt. Diese Technik erlaubt auch die Regelung der Betonaustragsrate. Dazu wird der aktuell notwendige Fördervolumenstrom aus den Planungsdaten berechnet. Bei einer Abweichung zwischen gemessenen Ist-Querschnitt und gewünschtem Soll-Querschnitt wird eine entsprechende Drehzahlkorrektur ermittelt und dem Motor des Extrusionsmoduls aufgeprägt. Die Messabweichung der geregelten Schichtbreite ist $\pm 3,5$ % und der Schichthöhe $\pm 2,7$ %.

Die Ergebnisse zur Ultraschallmessung zeigen, dass der Einsatz während des Beton-3D-Drucks grundsätzlich möglich ist. Weiterhin bietet diese Technik die Möglichkeit einer zerstörungsfreien Messung von Materialeigenschaften während der Ablage des Betons, um so weitere Regelkreise zur Prozessautomatisierung aufzubauen bzw. den Zustand des eingebauten Materials zu dokumentieren.

Ein Konzept zur Steigerung der Positioniergenauigkeit der Autobetonpumpe ist das Gegensteuern mit Bewegungen einer Kompensationseinheit. Im Laufe der kinematischen Analyse hat sich eine parallelkinematische Delta-Robotik als Vorzugsvariante herausgebildet, da diese präzise und schnelle Bewegungen ausführen kann, ein großes Leichtbaupotenzial besitzt und den Bau- raumanforderungen genügt.

Die kinetische Analyse wird mit einem starren MKS-Model durchgeführt und die entsprechenden Antriebsmomente bzw. Schnittreaktionen ermittelt. In einem iterativen Prozess wird mit einer quasi-statischen FEM die mechanische Festigkeit bestimmt.

Unter Beachtung der ermittelten Belastungen ist eine konstruktive Lösung im CAD umgesetzt worden. Dabei ist ein dezentrales Konzept verfolgt worden, in dem die Kompensationseinheit nur das Formgebungsmodul bewegt. Die Betonförderung zwischen Extrusions- und Formgebungsmodul wird mit einem flexiblen Schlauch realisiert. Die Gesamtmasse der Kinematik beträgt ca. 30 kg.

Eine Autobetonpumpe als Beton-3D-Drucker einzusetzen hat einen großen Einfluss auf die Standsicherheit, da an der Mastspitze eine große Masse hinzukommt. Eine vereinfachte theoretische Untersuchung des Kippverhaltens zeigt, dass sich die Nettoreichweite für einen 5-gliedrigen Mast um etwa 27 % reduziert.

Weiterhin ziehen die geringeren Volumenströme beim Beton-3D-Druck eine Anpassung der Pump- und Fördertechnik nach sich, da die notwendigen Förderdrücke absinken. Auf der Grundlage typischer Prozessparameter beim monolithischen Beton-3D-Druck ergibt sich ein Volumenstrom von max. 24 m³/h und ein Förderdruck von 33 bar.

Das Prinzip bedingt durch die Ausformung von Geometrieelementen, sog. Störstellen in der Pfadplanung, sinkt der Druckzeitanteil beim Vollwanddruck. Dies hat zur Folge, dass der Pumpprozess ggf. diskontinuierlicher abläuft als beim herkömmlichen Drucken.

Basierend auf den erreichten Ergebnissen können weitere Entwicklungstätigkeiten abgeleitet werden. Im Rahmen eines Beton-3D-Druckprozesses basierend auf einer Autobetonpumpe ist die Masse des Druckkopfes ein zentraler Punkt bzgl. einer exakten Positionierung bzw. der

Standesicherheit. Deshalb müssen weitere Leichtbaupotenziale ausgenutzt werden, bspw. die Größe des Betonreservoirs, die Rahmenkonstruktion des Extruders, die Wandungsstärke des Extruderstators oder des Förderkanals des Formgebungsmoduls.

Die Behebung der genannten Defizite führen zu einer Verbesserung des Druckbildes. Eine Erweiterung der Funktionalität zur Glättung und Gestaltung der Strangoberfläche ist der 3D-Druck von Sichtbetonoberflächen. Nach dem eigentlichen Druckprozess kommt die Nachbearbeitung. Für die Maschinenteknik umfasst dies die Reinigung der betonführenden Anlagen. Aktuell liegt für den Druckkopf kein CIP-Verfahren (Cleaning in Place) vor, sodass eine aufwendige Reinigung von Hand nach dem 3D-Druck nötig ist.

Für die Einbettung des gesamten Bauprozesses in eine digitale Prozesskette, zur Steigerung des Automatisierungsgrades oder der Verbesserung der ausgeführten Qualität bzw. der Dokumentation des Druckprozesses sind Inline-Messsysteme und entsprechende Regelkreise notwendig. Ein Fokus liegt darin bereits bestehende Messtechnik zu erweitern. Zum Beispiel kann die Erfassung des Schichtquerschnitts auf die gesamte Kontur des Betonstranges erweitert werden, um auch Konturverformungen, wie Balligkeiten an den Seitenflächen zu erkennen und die Genauigkeit der Austragsratenregelung zu verbessern. Ein wesentlicher Punkt bleibt die Erfassung von Materialparametern während des Druckprozesses. Im Rahmen des Projektes wurde eine Methode vorgestellt, um auf Basis des aktuellen Erhärtungszustandes des abgelegten Materials einen Sollwert für die Druckgeschwindigkeit abzuleiten. Diese bedarf weiterer Entwicklungsarbeit, um als funktionierende Sollwertvorgabe zu dienen.

Die theoretische Entwicklung hat gezeigt, dass eine Kompensationseinheit zur Steigerung der Positionsgenauigkeit umsetzbar ist. Ein nächster Schritt wäre die Validierung dieses Systems durch den Bau eines Prototyps. Ebenso ist die Systemgrenze des MKS-Modells zu erweitern, d.h. die Rückwirkungen von Kompensationsbewegungen auf den Mast der Autobetonpumpe zu untersuchen.

Durch den Beton-3D-Druckprozess ändern sich die Anforderungen an den Pumpprozess. Dies erfordert die Anpassung der Pumpsysteme oder bietet die Möglichkeit die Pumpsysteme so anzupassen, dass sowohl ein konventioneller Betrieb als auch Beton-3D-Druck mit der gleichen Maschine möglich ist.

3 Verwendung der Zuwendung

- wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans):
In dem vorliegenden Berichtszeitraum ist wissenschaftliches Personal über 22 (IfB) und 22 (PBM) Personenmonate finanziert worden.
- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans):
Es sind keine Geräte beschafft worden.
- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans):
Es sind keine Leistungen Dritter in Anspruch genommen worden.

4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

4.1 Forschungseinrichtung 1

Der aus dem Projekt finanzierte wissenschaftliche Mitarbeiter war der fachliche Bearbeiter für die baustofflichen Fragestellungen. In Zusammenarbeit mit dem fachlichen Bearbeiter an der Forschungseinrichtung 2 wurde zunächst eine umfassende Analyse zu den Anforderungen an den Beton sowie den angestrebten Bauprozess vorgenommen. Schwerpunkt der Analysen war der Baustoff Beton mit Blick auf dessen Zusammensetzung und Verhalten im frischen und erhärteten Zustand.

Ein wesentlicher Bestandteil der Arbeiten war die Entwicklung eines Transportbetons, der bei Einhaltung geltender Normen dennoch für den angestrebten Druckprozess (Einsatz einer Autobetonpumpe als Fördereinrichtung sowie als Großraummanipulator für den Druckkopf) geeignet ist. Daraus ergaben sich Anforderungen an die Pumpbarkeit, die Extrudierbarkeit und die Verbaubarkeit der Betons, die durch z.T. diametrale Vektoren beschrieben wurden.

Die Berücksichtigung weiterer Randbedingungen, wie z.B. der Einsatz von Kompositzementen mit günstiger Umweltbilanz, weitmöglich Einsatz von Betonausgangsstoffen, die an den Transportbetonwerken latent vorhanden sind, etc., führte zu einer wissenschaftlich hochanspruchsvollen Entwurfsherausforderung.

Diese Herausforderung(en) wurde grundlegend mit Ansätzen zur Optimierung der Packungsdichte im Haufwerk des Betons angesprochen. Durch eine hohe Packungsdichte kann der Wasserbedarf des Haufwerks (Auffüllen der Zwickel zwischen den Partikeln) reduziert und damit (bei gegebenem Wasser-Bindemittelwert) der Bindemittelbedarf reduziert werden. Mit zunehmendem Feinanteil im Partikelhaufwerk steigt aber auch die Kornoberfläche überproportional an, so dass nach dem Durchlaufen eines Minimums an Wasserbedarf dieser wieder ansteigt. Als Grundlage für die Lösung dieses Optimierungsproblems wurde ein numerischer Iterationszyklus formuliert, der mit Ansatz der Korngrößenverteilungsfunktion nach Andreasen & Andersen ein Optimum bei der Zusammensetzung des Haufwerkes ermittelt. Eingangsgrößen sind u.a. die Korngrößenverteilungen aller Haufwerkskomponenten. Der erfolgreich entwickelte numerische Ansatz wurde auf EXCEL implementiert, um eine Niederschwellige Nutzung durch Dritte zu ermöglichen.

Mit Hilfe dieses sog. Digitalen Betonentwurfswerkzeuges wurden verschiedene Betonzusammensetzungen formuliert und experimentell beprobt. Die Beprobung umfasste die rheologischen Eigenschaften im frischen Zustand (einschließlich Abschätzungen zur Pumpbarkeit), die Verbaubarkeit (3D-Druck-Experimente im Labormaßstab) sowie die Eigenschaften des erhärteten additiv gefertigten Baukörpers (richtungsabhängige Druck-, Zug-, Biegezug- und Spaltzugfestigkeit

sowie E-Modul). Insgesamt konnten im Vergleich zu konventionell in einer Schalung gefertigten homogenen Betonen vergleichbar gute Eigenschaften nachgewiesen werden.

Ein weiteres Arbeitsfeld waren Forschungsarbeiten zur Etablierung von Messverfahren am frischen Beton vor und nach der Extrusion, mit denen auf möglichst einfache und robuste Weise belastbare Kennwerte zu wesentlichen Betoneigenschaften erhalten werden können. Dies kann rheologisch- mechanische Eigenschaften des noch ungeformten frischen Betons als auch geometrische Ausprägungen am abgelegten Stang betreffen. Verschiedene direkte und indirekte Messverfahren wurden untersucht und deren Aussagekraft sowie Robustheit bewertet.

Die vom wissenschaftlichen Mitarbeiter der Forschungseinrichtung 1 geleistete Arbeit entspricht damit dem Umfang der F&E-Arbeiten, die im bewilligten Antrag formuliert sind. Die Arbeit ist für die erfolgreiche Durchführung des Vorhabens notwendig und war mit Blick auf Umfang und Intensität angemessen.

4.2 Forschungseinrichtung 2

Der beschäftigte wissenschaftliche Mitarbeiter (TV-L 13) war fachlicher Bearbeiter des Projektes. Im ersten Schritt ist eine umfassende Anforderungsliste erstellt worden, welche das zu entwickelnde Projektziel definiert. Diese umfasst die Schwerpunkte Druckkopf und Kompensationseinheit. Die Recherche aktuell genutzter und prinzipiell möglicher Lösungsansätze bildet im Zusammenhang mit einer Defizitanalyse des bestehenden Druckkopfes die Grundlage für die Weiterentwicklung des Druckkopfes und die Neuentwicklung der Kompensationseinheit.

Der Druckkopf wurde unter Gesichtspunkten der Baustellentauglichkeit konstruktiv angepasst, hinsichtlich Minderung des Verschleißes und Blockierneigung, Steigerung der Antriebsleistung von Motoren, Vereinfachung der Handhabung und Reduktion der Rüstzeit. Es wurden Masseneinsparpotenziale umgesetzt und weitere benannt. Zur aktiven Beeinflussung der Fließfähigkeit des Materials innerhalb des Extruders wurden verschiedene Rüttlerkonfigurationen getestet. Es wurde die grundlegende Wirkungsweise analysiert und die Leistungsfähigkeit der Technik nachgewiesen. Darauf aufbauend sind entsprechende Handlungsempfehlungen für die Nutzung abgeleitet worden.

Mit dem überarbeiteten Druckkopf und neuem Material wurde ein Demonstrationsobjekt gedruckt. Dieses wurde hinsichtlich der Ausführungsqualität mit früher hergestellten Proben verglichen. Der Vergleich zeigt, dass die Qualität der Schichtverzahnung verbessert wurde, allerdings eine mangelnde Oberflächenqualität entstand. Letztere ist auf die gröbere Gesteinskörnung in der Rezeptur und konstruktiver Mängel des Formgebungsmoduls zurückzuführen. In einem vereinfachten Nachbau des Formgebungsmoduls wurden die identifizierten Mängel überarbeitet und die Qualität der Schichtoberflächen verbesserte sich deutlich.

Auf Seiten der Messtechnik sind entsprechende Inline-Messsysteme entworfen worden. Zunächst wurden zu regelnde Teilprozesse identifiziert und grundlegende Regelkreisstrukturen erstellt. Die Messapplikationen wurden schrittweise umgesetzt und auf ihre Funktionsweise und Leistungsfähigkeit untersucht. Anschließend sind diese in das Gesamtkonzept des Druckkopfes integriert worden, wobei die entsprechenden Regelkreise geschlossen wurden. Abschließende Tests untersuchten das Regelverhalten. Es konnten nicht für alle identifizierten Teilprozesse Regelkreise aufgebaut werden. Für diese wurden potenzielle Messsysteme auf ihre Eignung während des Beton-3D-Drucks getestet.

Die Kompensationseinheit stellt eine Neuentwicklung dar. Ausgehend von der kinematischen Analyse und den gegebenen Randbedingungen ist eine Vorzugsvariante ausgewählt. Die mechanische Auslegung der Kinematik erfolgte in einer Optimierungsschleife aus MKS und FEM mit

dem Ziel minimaler Antriebsmomente und bewegter Massen bei maximaler Steifigkeit. Abschließend wurde der Druckkopf mit Kompensationseinheit und einer entsprechenden Betonförderleitung im CAD umgesetzt.

Ein wesentlicher Punkt ist die Bewertung der technischen Realisierbarkeit eines Beton-3D-Druckprozesses mit Transportbeton. Auf der Annahme typischer und perspektivischer Prozessparameter des Beton-3D-Drucks sind für eine Autobetonpumpe entsprechende Leistungsparameter ermittelt worden. Berechnungen und theoretische Überlegungen legen nahe, dass modifizierte konventionelle Pump- und Fördertechnik denkbar ist. Die präzise Bewegung des Mastes wird allerdings auch Unterverwendung der Kompensationseinheit eine Herausforderung bleiben.

Die geleistete Arbeit seitens der Forschungseinrichtung entspricht dem begutachteten und bewilligten Antrag. Sie ist für die Durchführung des Vorhabens notwendig und angemessen gewesen.

5 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen für KMU

Der wissenschaftlich-technische Nutzen aus den Projektergebnissen für KMU besteht in folgenden Themenbereichen:

- 1) Erstmals wissenschaftliche Erarbeitung einer Methode, mit der Transportbetone für großformatigen Beton-3D-Druck unter Einhaltung aller aktuellen normativen Regelungen zusammengesetzt werden können. Die frischen Betonzusammensetzungen werden in üblichen Mischanlagen mit überwiegendem Einsatz vorhandener Betonkomponenten hergestellt und auf die Baustelle transportiert. Dort können sie mit konventioneller Pumptechologie bis zum 3D-Druck-Extruder gefördert, ausgeformt und abgelegt werden.
- 2) Entwicklung eines digitalen Betonentwurfswerkzeuges Formulierung von Betonzusammensetzungen mit optimierter Packungsdichte. Die niederschwellige Bereitstellung des digitalen Werkzeuges auf der Basis von Excel-Routinen ermöglicht die einfache Anwendung durch Jedermann. Die u.a. als Eingangsparameter für das Werkzeug benötigten Kennwerte und Kennwertkurven liegen in gut geführten Transportbetonanlagen vor und können in das Werkzeug übertragen werden. Für Fein- und Feinststoffe ist ggf. die Ermittlung der Partikelgrößenverteilung erforderlich.
- 3) Entwicklung und Erprobung von robusten Messverfahren, die eine kontinuierliche Überwachung der Frischbetoneigenschaften während der Teilprozesse beim 3D-Druck „Fördern in Pumpleitungen“ sowie „Ausformung und Ablage mit Hilfe eines Extruders“ zulassen. Die Messgrößen stehen potentiell als Rückführungssignale aus dem 3D-Druck-Prozess zu Verfügung und können zur Etablierung geschlossener Regelkreise genutzt werden.
- 4) Entwicklung und Erprobung eines Druckkopfes mit folgenden Funktionen: Aufnahme und Vorhaltung kleiner Volumen an Frischbeton mit Überwachung und Regelung der Vorrathaltung, Förderung des Frischbetons zur Extruderdüse mit Überwachung und Regelung des Volumenstromes, Um- und Ausformung sowie Ablage des Betons mit Überwachung der Eigenschaften der untenliegenden Betonschicht. Der Prototyp des Druckkopfes bildet den Ausgangspunkt für eigene Weiterentwicklungen durch potentielle Anwender.
- 5) Erforschung und Nachweis grundlegender Zusammenhänge zwischen Konfiguration und Parametrierung der Maschine (Druckkopf) sowie Verhalten des frischen Betons im Druckkopf und bei der Ablage. Materialverhalten (z.B. Vibrationswirkung während der Extrusion,

Orientierung des Betonvolumenstromes bei der Ablage). Zwar weisen die Zusammenhänge eine ausgeprägte Spezifik mit Blick auf die Maschine auf; dennoch können grundlegende Handlungsempfehlungen für den Maschinenentwickler und Maschinenbetreiber abgeleitet werden.

- 6) Formulierung von Konzepten sowie numerisch gestützter Nachweis der Konzepte für eine Autobetonpumpe, die integriert als Fördermaschine und Großraummanipulator Beton-3D-Druck mit Transportbeton auf der Baustelle umsetzen kann. Ausstehende weitere Entwicklungsschritte werden benannt und die Ausrichtung der ausstehenden weiteren Arbeiten aufgezeigt.

Der wirtschaftliche Nutzen für KMU ergibt sich aus folgenden Aspekten:

- 1) Möglichkeit zur Herstellung von Transportbetonen für den 3D-Druck in Übereinstimmung mit den aktuell gültigen Normen. Aufwendungen und Arbeiten zu bauaufsichtlichen Zulassung dieser Betone im Hoch-, Tief- oder Ingenieurbau durch den Betonhersteller oder Betonanwender sind nicht notwendig.
- 2) Die Anwendung des digitalen Betonentwurfswerkzeuges erlaubt die einfache und unkomplizierte Formulierung von packungsdichtenoptimierten Betonzusammensetzungen. Im Transportbetonwerk latent vorhandene Gesteinskörnungen und weitere mineralische Fein- und Feinststoffe kommen weiterhin zum Einsatz. Neubeschaffungen sind ggf. nur in geringem Umfang mit Blick auf die Feinststoffe mit Partikelgrößen im Bereich von Zement notwendig. Transport- und Beschaffungskosten fallen nicht oder nur in geringem Umfang an.
- 3) Der Bedarf der 3D-Druckbetone an Zement und anderen hydraulisch reaktiven Fein- und Feinststoffen kann deutlich reduziert werden. Die Kosten für die Beschaffung dieser Stoffe sinken. Die Umweltbilanz der Betone fällt deutlich günstiger aus. Kostenstruktur sowie Umweltwirkung liegen nur noch geringfügig über denjenigen konventioneller Transportbetone. Der Markteintritt mit diesen Betonen wird deutlich einfacher.
- 4) Grundsätzlicher Nachweis zur Pumpbarkeit der Betone für Rohrdurchmesser der Förderleitung von 150 mm und 125 mm sowie Leitungslängen bis 36 m. Damit ist der Einsatz konventioneller Pumptechnik (z.B. Autobetonpumpe mit 36-m-Mast) für die Förderung des Betons möglich. Bei Umsetzung der Konzepte aus Punkt 6) kann eine umgerüstete Maschine für die Betonförderung und die Druckkopfformierung zum Einsatz kommen. Die Kosten für den Maschineneinsatz sinken.
- 5) Inline-Messverfahren zur Überwachung der Betoneigenschaften sowie Rückkopplung auf den Förder- und Ablageprozess ermöglichen eine robuste, (teil)automatisierte Prozessgestaltung beim 3D-Druck mit Transportbeton. Aufkommende Störungen im kontinuierlichen Druckprozess können rechtzeitig erkannt und den Ursachen für die Störung entgegengewirkt werden. Ein möglichst stetiger, störungsfreier und robuster Bauprozess ist eine notwendige Voraussetzung für die erfolgreiche Implementierung von 3D-Druckprozessen mit Beton.
- 6) Bereitstellung des Prototyps eines Druckkopfes für die Anwendung im großformatigen 3D-Druck mit Transportbeton. Die Konstruktionsdaten sowie Erfahrungen aus dem Einrichtungs- und Probetrieb stehen jedermann zur Verfügung und erlauben die zügige, effiziente (Weiter)Entwicklung eigener Druckkopflösungen. Der Entwicklungsaufwand auf Seite der Maschinenhersteller kann deutlich reduziert werden.

6 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

- Durchgeführte Transfermaßnahmen (von Projektbeginn bis heute)

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Zeitraum
Information der Unternehmen des PA	Unmittelbarer und kontinuierlicher Ergebnistransfer in die Wirtschaft; Klärung von Fragen und weiterem Vorgehen	Sitzung des PA: „Kick-Off-Meeting“ Sitzungen des Projektbegleitenden Ausschusses	22. April 2021 19. Juli 2021, 23. November 2021, 23. März 2022, 04. Oktober 2022, 02. März 2023, 12. Juli 2023
Wissenschaftliche Publikationen	Information Fachpublikum Verbreiten der Ergebnisse an interessierte Unternehmen und Fachleute national und International Beitrag zum Stand des Wissens Information für (potenzielle) Anwender aus der Industrie	M. Taubert, V. Mechtcherine: Mix Design for a 3D-Printable Concrete with Coarse Aggregates and Consideration of Standardisation [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-06116-5_9] Fachtagung Praxis Transportbeton, 14./15. September 2022, Berlin Fachtagung Baumaschinentechnik, 29./30. September 2022, Dresden RILEM TC “Assessment of Additively Manufactured Concrete Materials and Structures”, Mitgestaltung und Mitwirkung an der Interlaboratory Study. Industrieseminar Beton-3D-Druck, Eintägiges Seminar, Dresden	2022 14./15. September 2022 29./30. September 2022 2022 jährlich

BTB/FTB Mitgliederinformation	Information an die Mitglieder der Transportbetonindustrie über das Projekt	TB-iNFO Ausgabe 86	03/2022
Beleg- bzw. Diplomthemenvergabe; Promotionsstudium	Vermitteln von wissenschaftlichen Kenntnissen	Graduiertenarbeiten	Fortlaufend

- Geplante Transfermaßnahmen (während der Projektlaufzeit)

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Zeitraum
Information der Unternehmen des PA	Unmittelbarer und kontinuierlicher Ergebnistransfer in die Wirtschaft; Klärung von Fragen und weiterem Vorgehen	Sitzungen des PA	Fortlaufend (im Turnus von 3 bis 4 Monaten)
Formulierung und Verbreitung von Arbeitshilfen (Tabellen, Nomogramme, einfache Software)	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	Verbreitung mit Hilfe der FTB bzw. Partnerorganisationen auf Konferenzen, Messen (z.B. BAUMA 2022)	Oktober 2022, nach Projektabschluss
Veröffentlichung in Fachzeitschriften	Verbreitung der Ergebnisse an interessierte Unternehmen und Fachleute national und international	beton (Verlag Bau+Technik), Bautechnik (Verlag Ernst und Sohn), CPI/BWI (ad-media Verlag) versch. Internationale Medien	Ab März 2022
Schulung von Mitarbeitern der projektassoziierten Firmen	Unmittelbarer und kontinuierlicher Ergebnistransfer in die Wirtschaft	Druckversuche	Ab Januar 2023
Beleg- bzw. Diplomthemenvergabe; Promotionsstudium	Vermitteln von wissenschaftlichen Kenntnissen	Graduiertenarbeiten	Fortlaufend

- Geplante Transfermaßnahmen (nach Projektende)

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Zeitraum
Publikationen	Verbreitung der Ergebnisse an Unternehmen und Fachleute national und international	Fachzeitschriften (z.B. Construction and Building Materials, Cement and Concrete Research), Vorträge auf Konferenzen (z.B. Industrieseminar- Beton-3D-Druck) Buchkapitel in „Art of Extrusion“, Springer Verlag	Nach Projektende November 2023

	<p>Ergebnistransfer in die Wirtschaft</p> <p>Ergebnistransfer in die Wissenschaft</p>	<p>Beitrag in der Fachzeitschrift „Bautechnik“, Ernst & Sohn Verlag</p> <p>Deutschsprachige Fachzeitschriften, Projektbegleitender Ausschuss</p> <p>Diplomarbeiten, Dissertationen, Ergebnistransfer in Folgeprojekten oder anderen Forschungsprojekten</p>	<p>November 2023</p> <p>Nach Projektende, fortlaufend</p> <p>Fortlaufend</p>
Aktualisierung des Forschungsstandes durch die Forschungseinrichtungen	Abschlussbericht	Übertragung in das Forschungsinformationssystem der TU Dresden	Nach Projektende
Transfer der Ergebnisse in die Industrie durch den Verband	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	Darstellung im Forschungsreport und Verbreitung durch die FTB und BTB	Nach Projektabschluss und Erstellung des Abschlussberichtes
Beratung von Unternehmen	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	Bilaterale Gespräche	Nach Projektabschluss

Literaturverzeichnis

- [1] ANDREASEN, A. H. M. ; ANDERSEN, J.: Über die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten). In: *Kolloid-Zeitschrift* Bd. 50 (1930), Nr. 3, S. 217–228
- [2] BAŁCHANOWSKI, JACEK: Positioning accuracy analysis of the parallel mechanism near singular positions. In: *International Journal of Applied Mechanics and Engineering* Bd. 20 (2015), Nr. 1, S. 5–18
- [3] BEITZ, WOLFGANG ; PAHL, GERHARD ; BEYER, CHRISTIANE ; BRONNHUBER, THOMAS ; DILGER, KLAUS ; ERK, PATRICK ; FELDHUSEN, JÖRG ; GAUB, HEINZ ; U. A. ; FELDHUSEN, J. ; GROTE, K.-H. (Hrsg.): *Pahl/Beitz Konstruktionslehre - Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. 8. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer, 2013 — ISBN 978-3-642-29568-3
- [4] BUSWELL, R.A. ; DA SILVA, W.R. LEAL ; BOS, FREEK P. ; SCHIPPER, H.R. ; LOWKE, D. ; HACK, N. ; KLOFT, H. ; MECHTCHERINE, VIKTOR ; U. A.: A process classification framework for defining and describing Digital Fabrication with Concrete. In: *Cement and Concrete Research* Bd. 134 (2020), Nr. 1, S. 1–12
- [5] CARETTE, JÉRÔME ; STAQUET, STÉPHANIE: Monitoring the setting process of eco-binders by ultrasonic P-wave and S-wave transmission velocity measurement: Mortar vs concrete. In: *Construction and Building Materials* Bd. 110 (2016), Nr. 1, S. 32–41
- [6] CHUNG, JIHOON ; LEE, GHANG ; KIM, JUNG-HOON: A Systematic Review of the Geographic and Chronological Distributions of 3D Concrete Printers from 1997 to 2020. In: *2020 Proceedings of the 37th ISARC*. Kitakyushu, 2020 — ISBN 978-952-94-3634-7, S. 362–368
- [7] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN 15019-2 Krane - Standsicherheit für gleislose Fahrzeugkrane - Prüfbelastung und Berechnung* : Beuth Verlag, 1979
- [8] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN 69901-5 Projektmanagement- Projektmanagementsysteme - Teil 5: Begriffe* : Beuth Verlag, 2006
- [9] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN EN 1015-3 Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil 3: Bestimmung der Konsistenz von Frischmörtel (mit Ausbreittisch)* : Beuth Verlag, 2007
- [10] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN EN 12001 Förder-, Spritz- und Verteilmaschinen für Beton und Mörtel - Sicherheitsanforderungen* : Beuth Verlag, 2012
- [11] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN 18202 Toleranzen im Hochbau - Bauwerke* : Beuth Verlag, 2013
- [12] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN EN 12350-10 Prüfung von Frischbeton - Teil 10: Selbstverdichtender Beton - L-Kasten-Versuch* : Beuth Verlag, 2019
- [13] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN EN 12390-6 Prüfung von Festbeton - Teil 6: Spaltzugfestigkeit von Probekörpern* : Beuth Verlag, 2022
- [14] ERFURT, WOLFGANG: *Erfassung von Gefügeveränderungen in Beton durch Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren zur Einschätzung der Dauerhaftigkeit*. Weimar, Bauhaus-Universität Weimar, Dissertation, 2002
- [15] FULLER, WILLIAM B. ; THOMPSON, SANFORD E.: The Laws of Proportioning Concrete. In: *Transactions of the American Society of Civil Engineers* Bd. 59 (1907), Nr. 2
- [16] GRAESSLER, IRIS ; HENTZE, JULIAN ; BRUCKMANN, TOBIAS: V-Models for interdisciplinary systems engineering. In: *Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference*. Dubrovnik, 2018 — ISBN 978-953-7738-59-4, S. 747–756
- [17] GROBE, CHRISTIAN U.: Entwicklung und Anwendung der Ultraschalltechnik zur Qualitätssicherung von Beton: unter besonderer Berücksichtigung der Beiträge von Prof. Hans-Wolf Reinhardt. In: *Beton- und Stahlbetonbau* Bd. 114 (2019), Nr. 12, S. 938–946
- [18] GROBKOPF, HOLGER ; DRIELING, UWE: *Schläuche*. URL <https://www.schlauch-profi.de/schlaeuche/>. - abgerufen am 2023-07-10. — Schlauch-Profi
- [19] HELSEL, MICHELLE ANNETTE: *NDT to characterize 3D printed concrete interlayer bonds*. Urbana-Champaign, University of Illinois, Masterarbeit, 2019
- [20] HENIKL, JOHANNES: *Regelungsstrategien für den Ausleger einer Autobetonpumpe*. Wien, Technische Universität Wien, Dissertation, 2016

- [21] HERB, ALEXANDER T.: *Indirekte Beobachtung des Erstarrens und Erhärtens von Zementleim, Mörtel und Beton mittels Schallwellenausbreitung*. Stuttgart, Universität Stuttgart, Dissertation, 2003
- [22] HESSE, STEFAN ; MALISA, VIKTORIO ; ALMANSA, ANA ; AMBROSCH, ROLAND ; GRAF, BIRGIT ; HIEGER, CHRISTOF ; TRENKER, MARKUS ; KUBINGER, WILFRIED ; U. A. ; HESSE, S. ; MALISA, V. (Hrsg.): *Taschenbuch Robotik-Montage-Handhabung*. 1. Aufl. München : Carl Hanser, 2010 — ISBN 978-3-446-41969-8
- [23] HU, BO ; YAO, YUNFENG ; WU, PEILIANG ; LU, YI: A Comparison Study of Two 3-UPU Translational Parallel Manipulators. In: *International Journal of Advanced Robotic Systems* Bd. 10 (2013), Nr. 4, S. 1–9
- [24] IVANOVA, IRINA ; IVANIUK, EGOR ; BISETTI, SAMEERCHARAN ; NERELLA, VENKATESH NAIDU ; MECHTCHERINE, VIKTOR: Comparison between methods for indirect assessment of buildability in fresh 3D printed mortar and concrete. In: *Cement and Concrete Research* Bd. 156 (2022), Nr. 2, S. 1–17
- [25] JURADIN, S. ; KRSTULOVIC, P.: The vibration rheometer: the effect of vibration on fresh concrete and similar materials. In: *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* Bd. 43 (2012), Nr. 8, S. 733–742
- [26] KASTEN, KNUT: *Betontechnologie für Betonpumpen* : Putzmeister Concrete Pumps GmbH, 2011
- [27] *Kenndaten Elastomere*. URL <https://www.dt-bremen.de/UserFiles/file/pdf/Wissen/WiS02-06.pdf>. - abgerufen am 2023-07-10. — DT Dichtungstechnik
- [28] KIRCHNER, J.: *Mehrkriterielle Optimierung von Parallelkinematiken*. Chemnitz, Technische Universität Chemnitz, Dissertation, 2001
- [29] KRAUSE, MARTIN: *Baubetriebliche Optimierung des vollwandigen Beton-3D-Drucks*. Dresden, Technische Universität Dresden, Dissertation, 2020
- [30] KRAUSE, MARTIN ; NERELLA, VENKATESH NAIDU ; NÄTHER, MATHIAS ; KUNZE, GÜNTER ; MECHTCHERINE, VIKTOR ; SCHACH, RAINER: *Machbarkeitsuntersuchungen zu kontinuierlichen und schalungsfreien Bauverfahren durch 3D-Formung von Frischbeton* (Abschlussbericht). Dresden : Technische Universität Dresden, 2017
- [31] LOOTENS, D. ; JOUSSET, P. ; MARTINIE, L. ; ROUSSEL, N. ; FLATT, R. J.: Yield stress during setting of cement pastes from penetration tests. In: *Cement and Concrete Research* Bd. 39 (2009), Nr. 5, S. 401–408
- [32] 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), S. 1–14
- [33] MECHTCHERINE, VIKTOR ; DREßLER, INKA ; EMPELMANN, MARTIN ; GEHLEN, CHRISTOPH ; GLOCK, CHRISTIAN ; KUHN, ALEXANDER ; LANWER, JAN PAUL ; LOWKE, DIRK ; U. A.: Digitaler Betonbau durch additive Verfahren – Sachstand und Forschungsbedarf. In: *Beton- und Stahlbetonbau* Bd. 116 (2021), Nr. 11, S. 881–900
- [34] MECHTCHERINE, VIKTOR ; MIKHALEV, DANIIL ; HAIST, MICHAEL ; COTARDO, DARIO: *Sichere Betonförderung - Pumpbarkeit und Pumpstabilität* (Abschlussbericht Nr. IGF-Vorhaben Nr. 20947 BG). Dresden : Technische Universität Dresden, 2023
- [35] MECHTCHERINE, VIKTOR ; NERELLA, VENKATESH NAIDU: 3-D-Druck mit Beton: Sachstand, Entwicklungstendenzen, Herausforderungen. In: *Bautechnik* Bd. 95 (2018), Nr. 4, S. 275–287
- [36] MECHTCHERINE, VIKTOR ; NERELLA, VENKATESH NAIDU ; KASTEN, KNUT: Testing pumpability of concrete using Sliding Pipe Rheometer. In: *Construction and Building Materials* Bd. 53 (2014), Nr. 1, S. 312–323
- [37] MECHTCHERINE, VIKTOR ; NERELLA, VENKATESH NAIDU ; WILL, FRANK ; NÄTHER, MATHIAS ; OTTO, JENS ; KRAUSE, MARTIN: Large-scale digital concrete construction – CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D-printing. In: *Automation in Construction* Bd. 107 (2019), Nr. 1, S. 1–16

- [38] 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
- [39] MECHTCHERINE, VIKTOR ; VAN TITTELBOOM, KIM ; KAZEMIAN, ALI ; KREIGER, ERIC ; NEMATOLLAHI, BEHZAD ; NERELLA, VENKATESH NAIDU ; SANTHANAM, MANU ; DE SCHUTTER, GEERT ; U. A.: A roadmap for quality control of hardening and hardened printed concrete. In: *Cement and Concrete Research* Bd. 157 (2022), Nr. 1, S. 1–20
- [40] MERESSI, T.: Modeling and control of a three dimensional gantry robot. In: *Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control (Cat. No.98CH36171)*. Bd. 2. Tampa : IEEE, 1998 — ISBN 978-0-7803-4394-8, S. 1514–1515
- [41] MY, CHU ANH ; NGUYEN, CONG DINH ; VU, MINH HOAN ; DUONG, XUAN BIEN ; NGUYEN, TIEN ANH ; LE, CHI HIEU: Kinematic and Dynamic Modelling for a Class of Hybrid Robots Composed of m Local Closed-Loop Linkages Appended to an n-Link Serial Manipulator. In: *Applied Sciences* Bd. 10 (2020), Nr. 7, S. 1–19
- [42] NERELLA, VENKATESH NAIDU: *Development and characterisation of cement-based materials for extrusion-based 3D-printing*. Dresden, Technische Universität Dresden, Dissertation, 2019
- [43] NERELLA, VENKATESH NAIDU: First mobile on-site large-scale concrete 3D-printer KARLOS. In: *Tagungsband 4. Deutsches Industrieseminar Beton-3D-Druck*. Dresden, 2023
- [44] NEUGEBAUER, REIMUND ; DROSSEL, WELF-GUNTRAM ; HOCHMUTH, CARSTEN ; IHLENFELDT, STEFFEN ; KRABBES, MARKUS ; NESTLER, RAINER ; SCHÖNITZ, JÜRGEN ; WEIDERMANN, FRANK ; NEUGEBAUER, R. (Hrsg.): *Parallelkinematische Maschinen: Entwurf, Konstruktion, Anwendung*. 1. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer, 2006 — ISBN 103-540-20991-3
- [45] PATAJAJE SOORYANARAYANA, K. ; STYNOSKI, P. ; LANGE, D.: Effect of Vibration on the Rheology of Concrete for 3D Printing. In: *Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*. Eindhoven : Springer International Publishing, 2020 — ISBN 978-3-030-49915-0, S. 353–359
- [46] PERROT, ARNAUD ; MÉLINGE, YANNICK ; ESTELLÉ, PATRICE ; LANOS, CHRISTOPHE: Vibroextrusion: a new forming process for cement-based materials. In: *Advances in Cement Research* Bd. 21 (2009), Nr. 3, S. 125–133
- [47] SALET, THEO A. M. ; AHMED, ZEESHAN Y. ; BOS, FREEK P. ; LAAGLAND, HANS L. M.: Design of a 3D printed concrete bridge by testing. In: *Virtual and Physical Prototyping* Bd. 13 (2018), Nr. 3, S. 222–236
- [48] SECRIERU, EGOR ; BUTLER, MARKO ; MECHTCHERINE, VIKTOR: Prüfen der Pumpbarkeit von Beton - Vom Labor in die Praxis. In: *Bautechnik* Bd. 91 (2014), Nr. 11, S. 797–811
- [49] SECRIERU, EGOR ; MOHAMED, WESAM ; FATAEI, SHIRIN ; MECHTCHERINE, VIKTOR: Assessment and prediction of concrete flow and pumping pressure in pipeline. In: *Cement and Concrete Composites* Bd. 107 (2020), S. 103495
- [50] STAICU, ST. ; CARP-CIOCARDIA, D.C.: Dynamic analysis of Clavel's Delta parallel robot. In: *2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Bd. 3. Taipei : IEEE, 2003 — ISBN 978-0-7803-7736-3, S. 4116–4121
- [51] STANDARDS COORDINATING COMMITTEE OF THE COMPUTER SOCIETY OF THE IEEE: *IEEE Std 610.12-1990, IEEE Standard Glossary of Software Engineering Terminology* : IEEE Standards Board, 1990
- [52] STORCH, FLORIAN: Beton-3D-Druck - Neues Anwendungsfeld für Autobetonpumpen. In: *Tagungsband Praxis Transportbeton 2022*. Berlin, 2022
- [53] STORCH, FLORIAN ; NERELLA, VENKATESH NAIDU ; WILL, FRANK ; MECHTCHERINE, VIKTOR ; KRENZER, KNUT ; SIMON, MARTIN: Printhead for large-scale, extrusion-based additive manufacturing with coarse aggregate concrete. In: *CPT worldwide* Bd. 2 (2020), Nr. 4, S. 16–21
- [54] STORCH, FLORIAN ; PLASCHNICK, PAUL ; WILL, FRANK: CONPrint3D-Aktuelle Entwicklungsschwerpunkte beim Beton-3D-Druck. In: *Tagungsband 9. Fachtagung Baumaschinentechnik 2022*. Dresden, 2022

- [55] *Swivel Joints*. URL <https://www.saferack.com/product/loading-arm-systems/swivel-joints/>. - abgerufen am 2023-07-10. — SafeRack
- [56] TAUBERT, MARKUS ; MECHTCHERINE, VIKTOR: 3D-druckbarer Normalbeton mit grober Gesteinskörnung. In: *Beiträge zum 61. Forschungskolloquium mit 9. Jahrestagung des DAfStb*. Dresden : TU Dresden, 2022, S. 145–150
- [57] TAUBERT, MARKUS ; MECHTCHERINE, VIKTOR: Mix Design for a 3D-Printable Concrete with Coarse Aggregates and Consideration of Standardisation. In: *Third RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*. Loughborough : Springer International Publishing, 2022. — DOI: 10.1007/978-3-031-06116-5 — ISBN 978-3-031-06115-8, S. 59–64
- [58] TEUBERT, OLIVER ; GREIM, MARKUS: *Sliper bestimmt die Pumpfähigkeit von Beton*. URL http://www.schleibinger.com/cmsimple/?Rheologie:Sliper_bestimmt_die_Pumpfaehigkeit_von_Beton. - abgerufen am 2023-06-11
- [59] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V. ; VERBAND DER ELEKTROTECHNIK, ELEKTRONIK UND INFORMATIONSTECHNIK E.V.: *VDI/VDE 2206: Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme* : Beuth Verlag, 2021
- [60] 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
- [61] WEBER, FELIX: *Beitrag zur Entwicklung von Konstantflusspumpen für Frischbeton unter genauerer Betrachtung der Dickstoffventile*. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Dissertation, 2020
- [62] WOERNLE, CHRISTOPH ; WOERNLE, C. (Hrsg.): *Mehrkörpersysteme*. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer, 2016 — ISBN 978-3-662-46686-5
- [63] ZHANG, CHAO ; NERELLA, VENKATESH NAIDU ; KRISHNA, ANURAG ; WANG, SHEN ; ZHANG, YAMEI ; MECHTCHERINE, VIKTOR ; BANTHIA, NEMKUMAR: Mix design concepts for 3D printable concrete: A review. In: *Cement and Concrete Composites* Bd. 122 (2021), Nr. 1, S. 1–15
- [64] ZORN, SOPHIE: *Modellbasierte aktive Schwingungstilgung eines Multilink-Großraummanipulators*. Dresden, Technische Universität Dresden, Dissertation, 2017

Anhang

Anforderungsliste

ID	Priorität	Beschreibung
1. Geometrie		
1.1 Gebäudeelemente und Wandeigenschaften		
1101	WA	Es ist der Druck von geraden Wänden möglich.
1102	WA	Es ist der Druck von Ecken möglich.
1103	WC	Ecken sollen ohne Absetzen druckbar sein.
1104	WA	Es ist der Druck von T-Verbindungen möglich.
1105	WC	T-Verbindungen sollen ohne Absetzen druckbar sein.
1106	WA	Es ist der Druck von Kreuzungen möglich.
1107	WC	Kreuzungen sollen ohne Absetzen druckbar sein.
1106	FF	Die Grenzabweichung der gedruckten Wand für das Längenmaß beträgt ± 10 mm bis ± 20 mm.
1108	FF	Die Grenzabweichung der gedruckten Wand für die Winkeligkeit beträgt 6 mm bis 16 mm.
1109	FF	Die Grenzabweichung der gedruckten Wand für die Ebenheit beträgt 5 bis 15 mm.
1110	WA	Die Wände sind unbewehrt.
1.2 Betonschicht		
1201	WA	Die Betonschicht ist als Vollprofil (Profildruck) auszuführen.
1202	WA	Der Endzustand des Schichtquerschnittes soll rechteckig sein.
1203	MF	Die maximale Schichtbreite beträgt 150 mm.
1204	MF	Die maximale Schichthöhe beträgt 50 mm.
1205	WA	Die Oberflächengüte der gedruckten Wand soll Sichtbetonklasse SB2 entsprechen.
1206	WA	Es sind scharfkantige, rechtwinkelige Schichtabschlüsse (An-fang / Ende) herzustellen mit einer Wand-Oberflächengüte entsprechend Sichtbetonklasse SB2.
1207	WA	Es ist während des Druckens die Verzahnung von Gebäudeelementen möglich.
2. Baustoff		
2.1 Beton		
2101	WB	Der Beton kann für alle Expositionsclassen eingesetzt werden.
2102	RF	Eine mit etablierten Betonbauweisen vergleichbare Dauerhaftigkeit wird durch die Minimierung der Rissbildung sichergestellt.
2104	WA	Der Verbundwerkstoff zeichnet sich durch überdurchschnittliche Nachhaltigkeit aus.
2105	WA	Die Baustoffkomposition berücksichtigt alle relevanten Normen und Regelwerke.
2106	WA	Die Ausgangsstoffe enthalten keine Bestandteile, die Bewehrungskorrosion verursachen.
2107	WA	Die Ausgangsstoffe enthalten keine Bestandteile, die die Betondauerhaftigkeit beeinflussen.
2.1.1 Gesteinskörnung		
21101	FF	Die Kornform ist rund oder gebrochen.
21102	MF	Das Größtkorn beträgt mindestens 8 mm.
21103	RF	Es wird eine hohe Packungsdichte angestrebt.

ID	Priorität	Beschreibung
21104	WB	Die Sieblinie ist möglichst kontinuierlich.
21106	MF	Die Maximalmehlkorngehalte nach DIN 1045-2 werden eingehalten.
2.1.2 Bindemittel		
21202	MF	Die Mindestzementgehalte nach DIN 1045-2 werden eingehalten.
21203	MF	Die Mindestzementgehaltanforderungen aus Expositionsklassen werden berücksichtigt.
21204	RF	Der Zementgehalt ist aus ökologischen Gründen minimiert.
21205	RF	Der Klinkergehalt im Zement ist aus ökologischen Gründen minimiert.
21206	WC	Wegen fraglicher Verfügbarkeit wird auf Flugasche verzichtet.
21208	FF	Die expositionsklassenabhängigen W/Z-Werte werden eingehalten.
2.1.3 Zusatzstoffe und -mittel		
21301	FF	Wassermengen in Zusatzmitteln über 3 l/m ³ sind auf den W/Z-Wert anzurechnen.
21302	MF	Zusatzmittel werden nur bis zu 50 g/kg _{Zement} zugegeben.
2.1.4 Rheologie/Frischbetoneigenschaften		
21401	RF	Der Frischbeton ist störungsfrei und mit geringem Energieaufwand pumpbar.
21402	RF	Der Frischbeton ist störungsfrei und mit geringem Energieaufwand extrudierbar.
21403	FF	Der Beton ist nach der Ablage formkonform.
21404	RF	Der Frischbeton weist eine hohe Entmischungsstabilität auf.
21405	MF	Das Ausbreitmaß ist größer als 340 mm.
21406	MF	Das Setzmaß ist größer 10 mm.
21407	RF	Der Beton verfügt über eine möglichst hohe statische Fließgrenze.
21408	RF	Die dynamische Fließgrenze ist möglichst niedrig.
21409	RF	Der Beton besitzt eine hohe Strukturaufbaurate.
21410	MF	Der Beton hat eine Verarbeitungszeit von mindestens zwei Stunden.
2.1.5 Verbundeigenschaften		
21501	RF	Die Scherfestigkeit der Schichtverbundfugen ist möglichst groß.
2.1.6 Kosten		
21601	MF	Der maximale Preis des Betons sollte nicht mehr als 125 €/m ³ betragen.
2.2 Messsysteme		
2.2.1 Frischbeton		
22101	WA	Das vorgeschlagene Verfahren zum Messen der Pumpbarkeit ist baustellentauglich.
22102	WA	Das vorgeschlagene Verfahren zum Messen der Extrudierbarkeit ist baustellentauglich.
22103	WA	Das vorgeschlagene Verfahren zum Messen der Baubarkeit ist baustellentauglich.
22104	WA	Die Ergebnisse der vorgeschlagenen Messverfahren erlauben zuverlässige Vorhersagen des Materialverhaltens.
22105	WA	Die baustellentauglichen Messgeräte sind transportabel und einfach zu handhaben.
22106	RF	Die baustellentauglichen Messgeräte sind robust und leicht zu reinigen.
22107	MF	Die baustellentauglichen Messverfahren liefern in unter 15 Minuten Ergebnisse.
22108	WA	Die Ergebnisse baustellentauglicher Messverfahren korrelieren mit denen exakter Labormessungen.
22109	FF	Die Ergebnisse baustellentauglicher Messverfahren des selben Betons streuen max. ± 10 % um den Mittelwert.
2.2.2 Festbeton		
22201	FF	Es werden validierte Laborverfahren zur Quantifizierung des Betonschichtverbunds und der Anisotropie vorgeschlagen.

ID	Priorität	Beschreibung
22202	FF	Es werden Ansätze zur In situ-Bewertung des Schichtverbunds, insbesondere von Cold Joints, vorgeschlagen.
3. Teilsysteme der Maschine		
3.1 Manipulator		
3.1.1 Kinematik		
31101	MF	Die Fahrgeschwindigkeit beträgt maximal 5 m/min.
31102	FF	Die Beschleunigung beträgt zwischen 0,05 m/s ² und 0,2 m/s ² .
3.1.2 Kinetik		
31201	MF	Die maximale Traglast des Manipulators (Portal) beträgt 1500 kg.
3.2 Feinpositionierungssystem		
3.2.1 Geometrie		
32101	MF	Die maximalen Abmessungen des Feinpositionierungssystem sind 1000 x 2000 x 1000 mm (Länge x Breite x Höhe).
32102	RF	Das Feinpositionierungssystem soll kompakt gebaut sein.
32103	FF	Der Arbeitsraum des Feinpositionierungssystems beträgt $\pm 240 \times \pm 270 \times \pm 100$ mm (Länge x Breite x Höhe).
3.2.2 Kinematik		
32201	WA	Die Kinematik muss translatorische Ausgleichsbewegungen in alle drei Raumrichtungen vollbringen können.
32202	WA	Die Kinematik muss rotatorische Ausgleichsbewegungen um alle drei Raumachsen vollbringen können.
32204	FF	Der Verstellbereich der Orientierung sollte um alle Achsen $\pm 10^\circ$ betragen.
32204	MF	Die minimale Bewegungsgeschwindigkeit des Feinpositionierungssystems beträgt 0,2 m/s.
32205	MF	Die minimale Beschleunigung des Feinpositionierungssystems beträgt 0,6 m/s ² .
3.2.3 Kinetik		
32301	MF	Die maximale Eigenmasse des Feinpositionierungssystems beträgt 150 kg.
32302	MF	Die minimale Traglast des Feinpositionierungssystems beträgt 300kg.
32303	RF	Das Systemsteifigkeit des Feinpositionierungssystems soll hoch sein.
3.2.4 Energie		
32401	WB	Es sind elektrische Antriebe zu bevorzugen.
3.2.5 Signale		
32501	FF	Der Messbereich beträgt ± 300 mm.
32502	MF	Die Messgenauigkeit muss mindestens ± 5 mm betragen.
32503	MF	Die Messrate muss mindestens 1 Hz betragen.
3.2.6 Sicherheit		
32601	MF	Die Schutzklasse des Feinpositioniersystems ist IP65 oder höher.
32602	WA	Es ist ein Eingriffsschutz in bewegte Teile vorzusehen.
3.2.7 Montage		
32701	WB	Das Feinpositionierungssystem muss einfach montierbar sein.
32702	WB	Die Anbindungen zu weiteren Maschinenstrukturen sind mit Schnellwechslern auszuführen.
32703	WC	Werkzeuglose Montage und Demontage im täglichen Betrieb.
34504	WB	Die elektrische Verbindung erfolgt mit Industriesteckern der Firma "Harting".

ID	Priorität	Beschreibung
3.3 Betonschlauch des Feinpositioniersystems		
3.3.1 Geometrie		
33101	MF	Der Mindestdurchmesser von Förderelementen im Inneren ist 5-mal Korngröße.
3.3.2 Kinematik		
33201	MF	Der minimale Biegeradius des Schlauches ist der 10-fache Schlauchdurchmesser.
33202	WB	Der Schlauch zur Betonförderung soll im inneren der Kinematik geführt sein.
3.3.3 Kräfte		
33301	FF	Die Druckfestigkeit soll 2 bar Überdruck betragen.
3.3.4 Konstruktionsmaterial		
33401	WA	Das Betonschlauchmaterial ist abrasionsfest.
3.3.5 Montage		
33501	WA	Der Schlauch zur Betonförderung ist mit einem Schnellwechselsystem am Manipulator und am Druckkopf befestigt.
33502	WB	Werkzeuglose Montage und Demontage im täglichen Betrieb.
3.4 Druckkopf (allgemein)		
3.4.1 Kräfte		
34101	FF	Der Druckkopf muss gegen den 2-fachen geodätischen Druck dicht sein.
34102	FF	Die Druckfestigkeit soll 2 bar Überdruck betragen.
3.4.2 Energie		
34201	WA	Der Druckkopf wird passiv durch den Raum geschleppt bei der Bewegung.
34202	WB	Es sind elektrische Antriebe zu bevorzugen.
3.4.3 Konstruktionsmaterialien		
34301	WB	Bauteile die mit Beton in Kontakt sind, sind aus dem Material X5Cr-Ni18-10 zu fertigen.
3.4.4 Sicherheit		
34401	MF	Die Schutzklasse des Druckkopfes ist IP65 oder höher.
34402	WA	Es ist ein Eingriffsschutz in bewegte Teile vorzusehen.
3.4.5. Montage		
34501	WB	Der Druckkopf muss einfach montierbar sein.
34502	WB	Werkzeuglose Montage und Demontage im täglichen Betrieb.
34503	MF	Die Montage und Demontage ist von maximal 2 Personen durchführbar.
34504	WB	Die elektrische Verbindung erfolgt mit Industriesteckern der Firma "Harting".
3.5 Extrusionseinheit		
3.5.1 Geometrie		
35101	WA	Die Extrusionseinheit ist über dem Formungssystem angeordnet.
35102	RF	Die Extrusionseinheit soll kompakt sein.
3.5.2 Kinematik		
35201	WA	Das Förderprinzip entspricht einem Schneckenextruder.
35202	FF	Die Extruderdrehzahl beträgt 0 bis 240 U/min.
35203	WA	Die Vorzugsrichtung der Betonförderung aus dem Extruder ist vertikal.
3.5.3 Kräfte		
35301	MF	Die maximale Masse der Extrusionseinheit beträgt 120 kg.
35302	MF	Das maximale Volumen des Betonreservoirs beträgt 60 l.

ID	Priorität	Beschreibung
3.5.4 Konstruktionsmaterialien		
35401	WB	Die Materialien müssen abrasionsfest sein.
3.5.5 Gebrauch		
35501	RF	Der Extruder soll geräuscharm arbeiten.
3.5.6 Instandhaltung		
35601	MF	Die minimale Lebensdauer von Austauschteilen beträgt einen Arbeitstag, d.h. 8 Stunden.
3.6 Düse / Leitungssystem		
3.6.1 Geometrie		
36101	RF	Die Förderstrecke innerhalb des Druckkopfes soll so kurz wie möglich sein.
36102	FF	Die Betonfördermenge beträgt 0 bis 5 m ³ /h.
36103	MF	Der Mindestdurchmesser/-breite von Förderelementen im Inneren ist 5-mal Korngröße.
36104	WA	Es sind Toträume zu vermeiden.
36105	RF	Innerhalb der Förderleitung sind sanfte/weiche Geometrieübergänge anzustreben.
36106	MF	Die minimale Anzahl an Austrittsöffnungen ist 1.
36107	WB	Der Austrittsquerschnitt der Düse ist rechteckig.
3.6.2 Kräfte		
36201	RF	Die Strömungskräfte sollen gering sein.
3.6.3 Energie		
36301	WA	An der Austrittsdüse (Formgeber) wird ein kontinuierlicher Betonvolumenstrom bereitgestellt.
3.7 Verschlussystem		
3.7.1 Geometrie		
37101	RF	Im geöffneten Zustand ist der Platzbedarf gering.
3.7.2 Kinematik		
37201	RF	Die Verschlusszeit ist gering.
3.7.3 Kräfte		
37301	RF	Die bewegte Masse des Verschlusselementes ist gering.
3.8 Formungssystem		
3.8.1 Geometrie		
38101	MF	Die maximalen Abmessungen des Feinpositionierungssystem sind 700 x 700 x 1000 mm (Länge x Breite x Höhe).
38102	RF	Das Formungssystem soll kompakt gebaut sein.
3.8.2 Kinematik		
38201	WB	Die Schichtbreite soll automatisch verstellbar sein.
38202	WB	Die Schichthöhe soll automatisch verstellbar sein.
38203	RF	Die Bewegungsgeschwindigkeiten sollen hoch sein.
3.8.3 Kräfte		
38301	MF	Die maximale Eigenmasse des Formungssystems beträgt 40 kg.
38302	RF	Die Kräfte zur Betonformung sollen so gering wie möglich sein.
38303	WB	Die Formgebungskraft wirkt drückend auf den Beton.
38304	WB	Die Formgebungskraft wirkt kontinuierlich auf den Beton.
ID	Priorität	Beschreibung

38305	RF	Das Systemsteifigkeit des Formungssystems soll hoch sein.
3.8.4 Energie		
38401	RF	Die Reibkräfte zwischen Beton und Schalung sollen gering sein.
38402	WB	Die eingestellten Schichtabmessungen sollen energielos gehalten werden.
3.8.5 Instandhaltung		
38501	MF	Die minimale Lebensdauer von Austauschteilen beträgt einen Arbeitstag, d.h. 8 Stunden.
3.9 Rüttler		
3.9.1 Geometrie		
39101	RF	Der Rüttler soll kompakt sein.
3.9.2 Kinematik		
39201	WA	Das Verdichtungsverfahren ist rütteln (Vibrationsverdichtung).
39202	WB	Das Erregerprinzip ist eine Unwuchterregung.
39203	WB	Die Bewegungsart der Unwucht ist rotatorisch
39204	MF	Die minimale Beschleunigung an der Kontaktfläche beträgt 30 m/s ² .
3.9.3 Kräfte		
39301	RF	Der Rüttler soll leicht sein.
39302	MF	Die minimale Betriebsfrequenz ist 50 Hz.
39303	MF	Die minimale Schwingungsbreite (doppelte Amplitude) ist 1 mm.
39304	RF	Die Kraftamplitude soll hoch sein.
3.9.4 Energie		
39401	WB	Die abzugebende Rüttelenergie ist verstellbar.
3.9.5 Montage		
39501	WA	Der Rüttler ist lösbar mit dem Druckkopf verbunden.
3.9.6 Gebrauch		
39601	RF	Der Rüttler soll geräuscharm arbeiten.

Ergebnisübersicht Zementleim-Messungen

Zementpasten mit w/z = 0,4	CEM III A LL Ref		Dyck II	Dyck III 42,5N	Dyck III 52,5R	Hol II		Hol III		Schw II	Schw III	Celitement
	AF	LL				X	AB	T	P			
Spalte in Rohdaten												
HFT _{pen}	[mm]	188	197	208	200	207	184	218	187	156		
HFT _{rheo}	[mm]	191	195	214	199	210	180	217	173	0		
Mittelwert HFT	[mm]	190	196	211	200	209	182	218	180			
HFT Variationskoeffizient	[%]	0,8	0,5	1,4	0,3	0,7	1,1	0,2	3,9	100,0		
F _{max,ending}	[Pa]	322,9	282,2	183,7	374,9	169,6	343,1	130,0	775,3	906,7		
Elastischer Anteil (Relaxation auf	[%]	25,3	17,0	13,5	10,7	13,1	15,0	21,7	28,8	40,5		
statische Fließgrenze	[Pa]			60,1	97,0	71,0		56,3				
dynamische Fließgrenze	[Pa]	157,3	140,6	86,8	111,5	91,5	177,5	77,0	169,5			
plastische Viskosität	[Pas]	8,7	11,9	7,7	9,5	7,9	17,4	6,5	25,5			
A _{thix15-30min}	[Pa/min]	35,7	18,6	7,6	19,5	6,2	40,0	1,9	24,8	234,1		
A _{thix30-60min}	[Pa/min]	36,6	14,9	6,0	18,0	5,7	35,1	1,2	16,3	304,6		
SYS _{rech} aus Rheo _{stat}	[Pa]	194,1	166,3	113,3	145,4	111,0	193,4	90,6	239,2			
A _{thix,rheo}	[Pa/min]	12,0	11,7	5,5	11,2	6,2	19,0	3,2	18,0			
Scherverdünnung bei 50 1/s	[%]	17,5	17,4	12,3	12,1	12,7	20,7	11,5	16,1			
Scherverdünnung bei 5 1/s	[%]	14,1	12,2	9,1	15,7	10,4	12,0	5,5	17,1			
Scherverdünnung bei 0 1/s	[%]	19,0	15,4	23,4	23,3	17,5	8,2	15,1	29,2			
Initial Setting Point (3,5 kPa)	[min]	86	128	163	126	153	78	192	142	24,0		
DYS/Athix	[min]	16,1	12,0	15,8	9,9	14,9	9,3	23,9	9,4			

Ergebnisübersicht Messungen an Beton, Größtkorn 16 mm, w/z=0,4

Beton mit KG=16mm und w/z=0,4	CEM III A LL Ref	Dyck II	Dyck III 42,5N	Dyck III 52,5R	Hol II	Hol III	Schw II	Schw III	Celitement
SYS aus Penetration	[Pa]				1179,0	-227,0			
Athix aus Penetration	[Pa/min]				10,6	22,5			
Initial Setting Point (3,5 kPa)	[min]				192,0	109,0	242,0		
Verlängerung	[min]				39,0	31,0	50,0		
Verlängerung	[%]				25,5	39,7	26,0		
Biegezugfestigkeit 24 h	[MPa]				3,2	4,6	2,5	2,7	
Variationskoeffizient	[%]				3,9	3,6	0,5	4,3	
Biegezugfestigkeit 28 d	[MPa]				7,3	7,4	8,3	6,9	
Variationskoeffizient	[%]				3,9	4,6	4,1	3,0	
Druckfestigkeit 24 h	[MPa]				13,0	21,8	9,0	11,3	
Variationskoeffizient	[%]				1,5	2,4	3,1	3,1	
Druckfestigkeit 28 d	[MPa]				47,1	58,0	47,9	55,6	
Variationskoeffizient	[%]				1,7	1,9	6,6	1,7	

Entwurfswerkzeug Beton

Im digitalen Anhang befindet sich ein Softwaretool auf der Basis von Microsoft Excel zum Entwurf von 3D-druckfähigen Betonen entsprechend dem Sieblinienmodell von Andreasen und Andersen [1].