

---

# ENTWICKLUNG EINER ROBOTERGESTÜTZTEN SPRITZBETONTECHNOLOGIE ZUR SCHALUNGSLOSEN GENERATIVEN FERTIGUNG KOMPLEXER BETONBAUTEILE AM DBFL (DIGITAL BUILDING FABRICATION LABORATORY)

---

## *DEVELOPMENT OF A ROBOTIC SPRAYED CONCRETE TECHNOLOGY FOR GENERATIVE MANUFACTURING OF COMPLEX CONCRETE STRUCTURES WITHOUT FORMWORK*

Eric **Herrmann**, ITE, TU Braunschweig, Deutschland  
Hendrik **Lindemann**, ITE, TU Braunschweig, Deutschland  
Harald **Kloft**, ITE, TU Braunschweig, Deutschland

Das Baugewerbe befindet sich im Umschwung. Die Einführung von Building Information Modeling (BIM) führt die Bauindustrie zwar planerisch ins digitale Zeitalter, doch wird die digitale Prozesskette auf der Baustelle noch nicht fortgeführt. Insbesondere die architektonische Freiheit und Präzision, die das digitale Entwerfen ermöglicht, kann mit den derzeitigen Bautechniken nicht umgesetzt werden. Die logische Konsequenz ist die Entwicklung neuer digitaler Fertigungsprozesse für das Bauwesen. In der Forschung am Institut für Tragwerksentwurf (ITE) der TU Braunschweig wird die Digitalisierung der Fertigung im Bauwesen seit Jahren vorangetrieben. Im Zentrum der Forschungen steht das sogenannte „Digital Building Fabrication Laboratory“ (DBFL), ein digital gesteuertes Fertigungszentrum für großformatige Bauteile, welches mit einem Schwerlastroboterarm und einer CNC-Fräse ausgestattet ist. Die nachfolgenden Ausführungen beschreiben Untersuchungen zur automatisierten Herstellung schalungsloser, komplexer Betonbauteile im Betonspritzverfahren. Die Untersuchungen sind Teil eines geförderten Verbundvorhabens des Landes Niedersachsen, an dem sechs Institute der Universitäten Braunschweig, Clausthal und Hannover beteiligt sind.

*The construction industry is in the process of change. The introduction of “Building Information Modeling” is leading the construction industry into the digital era, though the digital process chain gets cut off at the construction site. Architectural freedom and precision, which are enabled by digital design, can hardly be achieved on construction site. The automation of the building process and the uncoupling of conventional formwork is the logical consequence. For this purpose, the Digital Building Fabrication Laboratory, which is equipped with a robot arm and a CNC-milling machine, was developed at the Institute for Structural Design. This paper describes the investigations made on the development of an automated manufacturing of complex concrete structures without formwork.*

## 1. Einleitung

Das digitale Zeitalter hat im Bauwesen in der 1980er Jahren mit der Einführung von CAD (Computer Aided Design) in der Planung begonnen. Heute steht die Planung vor dem Umbruch, die zeichenbasierte Dokumentenübergabe durch die modellbasierte Übergabe digitaler Daten zu ersetzen. Auf der Baustelle werden die in der digitalen Planungsumgebung erzeugten Bauteile jedoch immer noch mit den seit Jahrzehnten bewährten Techniken und mit großem Einsatz von manueller Arbeit zusammengebaut. Dieses Ungleichgewicht, der

planerischen Möglichkeiten und der tatsächlichen Umsetzbarkeit auf der Baustelle ist in den letzten Jahren ständig gewachsen.

Im Forschungsprojekt „Entwicklung einer robotergestützten Spritztechnologie zur schalungslosen generativen Fertigung komplexer Betonbauteile“ arbeiten die Universitäten Braunschweig, Clausthal und Hannover seit 2016 intensiv zusammen mit dem Ziel, die bereits seit langem genutzte Spritzbetontechnologie zu automatisieren und in einen robotergesteuerten 3D-Spritz-Druckprozess einzubinden.

Das Projekt basiert auf dem von der DFG-geförderten Forschungsgrößgerät DBFL (Digital Building Fabrication Laboratory), welches Ende 2016 am Institut für Tragwerksentwurf der TU Braunschweig errichtet wurde.

## 2. State of the Art

2009 wurde der Begriff „3D Drucken“ von der „American Society for Testing and Materials“ (ASTM) definiert als „die Herstellung von Objekten durch das Auftragen von Material mit Hilfe eines Druckkopfes, einer Düse oder einer anderen Drucktechnologie“. Als Oberbegriff ist hier die „additive Fertigung“ zu nennen, welche von der ASTM definiert wird als „Prozess zum Verbinden von Materialien, meist schichtweise, um aus digitalen 3D-Modellen Objekte zu erzeugen“. Seit 2009 sind die Publikationen zum Thema „additive Fertigung“ um ein Vielfaches gestiegen [1]. Sie lassen sich nach Labonnote, et al [1] in 4 verschiedene Applikationsmethoden unterteilen:

- Additives Fertigen basierend auf dem Verbinden von festen Materialien (pick&place)
- Additives Fertigen basierend auf viskosen Materialien (extrudieren)
- Additives Fertigen basierend auf puder-ähnlichen Materialien (selektives Binden)
- Additives Fertigen basierend auf flüssigkeits-ähnlichen Materialien

Die am weitesten entwickelte Methode ist das additive Fertigen von Bauteilen mit Hilfe von viskosen Materialien. Hierzu gehört auch das Extrudieren von Beton, wie es bereits von Khoshnevis [2] 2004 beschrieben wurde. Mit dieser Methode lassen sich heute schon ganze Betonhäuser drucken, wie es die chinesische Firma WinSun gezeigt hat (Bild 2). Hierbei wird das Material Schicht für Schicht mit einer Düse aufeinander aufgebaut (Bild 1).

Das Verfahren hat allerdings Schwierigkeiten mit dem Herstellen von Aussparungen oder der Fertigung von Überhängen, wie man sie beispielsweise für konische Formen braucht. So ist eine definierte Neigung auf Z-Achse nicht möglich. Diese Einschränkungen sind charakteristisch für alle Extrusionsverfahren und können auch in anderen Projekten beobachtet werden [2] [3].

Wie Le et al. [4] zeigten, erzeugt zu dem der anisotrope Auftrag des Materials auch ein anisotropes Tragverhalten. Dies zeigt sich im schlechten Verbund der Schichten untereinander. Obwohl die Druckfestigkeiten hinreichend untersucht wurden, gibt es kaum Aussagen über weitere wichtige Eigenschaften der verwendeten Materialien. So wurden für den Druckprozess nicht nur neuartige Betonrezepturen entwickelt, auch der Auftragsprozess spielt eine entscheidende Rolle für die mechanischen Eigenschaften des Betons.



*Bild 1: Extrudieren einer Wand durch die chinesische Firma WinSun  
(Bild: WinSun [5])*



*Bild 2: Gedrucktes Haus der chinesischen Firma WinSun (Bild: WinSun [5])*

Wie Labonnote et al. in [1] berichten, wurden die Eigenschaften des gedruckten Materials, wie Dauerhaftigkeit, Wasserdampfdiffusionswiderstand, thermische Eigenschaften oder Feuerwiderstandsfähigkeit bisher kaum untersucht.

## 2.1 Verwendete Technologien

Wie sich die verwendeten Materialien unterscheiden, so unterscheiden sich auch die für den Auftrag verwendete Technologien. Nach Labonnote et al. [1] können die Extrusionsverfahren in fünf verschiedene Prozesskategorien eingeteilt werden:

- Kranportale,
- Portale an Kabeln hängend,
- Schwarmlösungen,
- Mehrzweck-Roboter,
- Falten und Selbstmontage.

Kranportale sind, einfach gesagt, vergrößerte 3D Drucker. Hier fährt die Düse auf definierten Achsen hin und her. Oft werden hier vorgefertigte CNC Portale umgerüstet, um eine Düse statt einer Fräse zu führen (Bild 3a).

An Kabeln hängende Portale sind von den Dimensionen mit Kranportalen zu vergleichen. Hier ist die Düse über Kabel mit einem externen Rahmen verbunden. Durch Auf- und Abrollen der Kabel kann die Düse im Rahmen frei bewegt werden (Bild 3b).

Als Schwarmlösung wird der Einsatz von mehreren kleinen, mobilen Robotern bezeichnet. Die Roboter arbeiten kooperativ zusammen und können vielfältige Aufbaustrategien verfolgen. Wichtigste Eigenschaft der Roboter ist die Fähigkeit an Bauteilen oder Strukturen hinauf zu klettern. Nur so kann das Bauteil auch in Richtung der Z-Achse aufgebaut werden (Bild 3c).

Die Methode der Mehrzweck-Roboter setzt meist auf den Einsatz mehrerer Roboterarme. Diese können, ausgestattet mit dem richtigen Werkzeug, eine Fülle von Aufgaben bewältigen. Angefangen beim Extrudieren von Beton, über das Setzen von Bausteinen, bis hin zum subtraktiven Bearbeiten von Bauteilen (Bild 3d).

Das Falten und spätere Entfalten von gedruckten Bauteilen durch einen Aktivator wird momentan nur mit mittelgroßen Objekten und meist nur mit dünnen Hüllen praktiziert. Diese Methode verspricht aber erhebliche Vorteile. So kann die Herstellungsgeschwindigkeit bzw. Aufbauzeit erheblich verkürzt werden. Als Aktivator kann zum Beispiel Wasser, Luft oder auch Elektrizität dienen (Bild 3e).

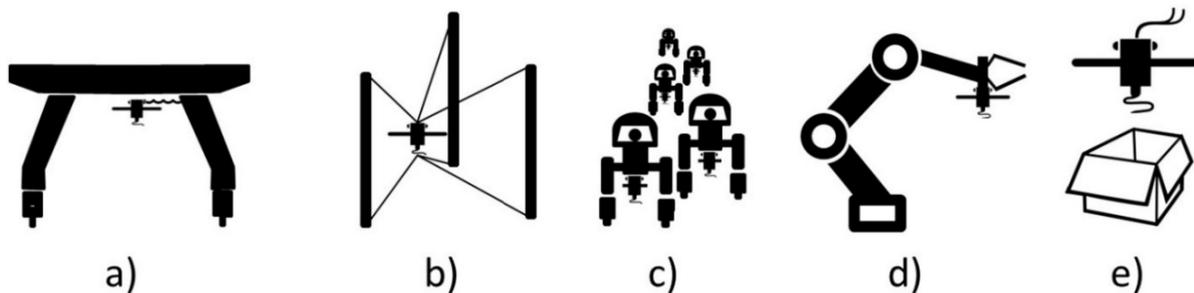


Bild 3: a) Kranportal, b) an Kabeln hängendes Portal, c) Schwarmlösung, d) Mehrzweck-Roboter, e) Drucken kombiniert mit Falten nach Labonnote et al. [1]

## 2.2 Ziele

Das am häufigsten propagierte Ziel der additiven Fertigung ist die Herstellung von frei-geformten Bauteilen. Durch die maschinelle Fertigung können einfache wie auch komplexe Strukturen, zu identischen Baukosten, hergestellt werden. Damit verbunden ist eine Abkehr von Systemschalungen und deren Limitierungen in der Formgebung. Zum Beispiel kann ohne weiteres eine Stütze konisch verjüngt werden, was nicht nur zu Materialeinsparungen führen kann sondern auch ein enormes Potenzial für Kosten Reduzierung birgt. Tragwerke müssen nicht mehr aus biegebeanspruchten, massigen Bauteilen bestehen. Die Form kann, ganz nach dem Prinzip „form follows force“, dem Krafffluss folgen und ermöglicht ein schlankes Bauteil ohne überflüssiges Material. So wird der Gestaltungs- und Planungsprozess von Tragwerken reformiert und erweitert für neuartige Lösungen und Ansätze [6].

## 3. Digital Building Fabrication Laboratory

Das Digital Building Fabrication Laboratory, kurz DBFL, ist in seiner Ausführung und seinen Möglichkeiten einzigartig. Es wird am Institut für Tragwerksentwurf (ITE) primär in der Grundlagenforschung eingesetzt. Das übergeordnete Ziel ist, durch eine gesteigerte Komplexität in der Fertigung und einem Transfer von hochoptimierten Fertigungsverfahren aus anderen Produktionsbereichen wie der Automobil- und Luftfahrtindustrie einen effizienteren Einsatz von Ressourcen in Form von Material und Energie zu erreichen.

Bei der Konzeption und Planung des DBFL wurden zwei Fertigungstechnologien kombiniert: eine CNC-gesteuerte 5-Achs-Portalfräse und ein integrierter Schwerlastroboter mit 6 Freiheitsgraden. Durch diese Kombination sind subtraktive Bearbeitungsprozesse durch Fräsen oder Schneiden möglich, außerdem additive Fertigungsprozesse sowie kombinierte Prozesse aus beiden.

Da beide Fertigungsgeräte an verfahrbaren Portalen befestigt sind, werden die Freiheitsgrade der Geräte um die drei Achsen der Kranportale erweitert. Der Roboterarm besitzt insgesamt 9 Freiheitsgrade und kann sich im gesamten Arbeitsraum frei bewegen. Die 5-Achs-Fräse wird überwiegend für hochpräzise Arbeiten im Niedrig-Toleranzbereich eingesetzt. Mit ihr lassen sich sehr dichte Materialien, wie Granit oder Hochfesterbeton (UHPC) bearbeiten. Beide Fertigungseinheiten können im Arbeitsraum, welcher eine Länge von 15 m, eine Höhe von 3 m und eine Breite von 7 m hat (Bild 4), sowohl getrennt als auch synchronisiert operieren. Dies ermöglicht das additive und subtraktive Fertigen von Bauteilen und erschließt somit neue Wege, komplexe Bauteile automatisch und effizient aufzubauen (Bild 5).



*Bild 4: Digital Building Fabrication Laboratory, DBFL (Bild: ITE)*



*Bild 5: Fräse und Mehrzweckroboter, DBFL (Bild: ITE)*

Durch den Roboterarm, der durch unterschiedliche Endeffektoren modifiziert werden kann, können eine Vielzahl von Auftragsprozessen erforscht werden. Hierzu gehört neben dem „Pick-and-Place“-Verfahren oder dem Extrudieren von Beton, auch das Spritzen von Beton. In ersten Versuchen wurde zunächst das Extrudieren von Beton, wie es bereits vielfach Anwendung findet, im DBFL getestet (Bild 6 und Bild 7). Die Ergebnisse zeigen, dass die Kombination eines Mehrzweckroboters mit einem Kranportal universell einsetzbar ist und eine Vielzahl an Prozessen und Formen ermöglicht.

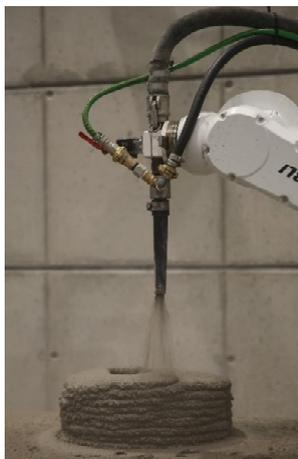


*Bild 6: Vorversuch Beton Extrudieren, Detail, DBFL (Bild: ITE)*



*Bild 7: Vorversuch Beton Extrudieren, Draufsicht, DBFL (Bild: ITE)*

Das robotische Spritzen von Beton ist im Vergleich zum Extrudieren um einiges komplexer. Hierzu wird der Roboterarm mit einer Düse ausgestattet, welche über eine Exzenter-schneckenpumpe beschickt wird. Bis zur Düse wird der Beton im Dichtstromverfahren gefördert, wo er dann mittels Druckluft versprüht wird. Zur kontrollierten Steuerung des Abbindens wird Beschleuniger mit der Druckluft in den Betonstrahl gemischt (Bild 8).



*Bild 8: Vertikales Spritzen einer runden Stütze, Detail, DBFL (Bild: ITE)*



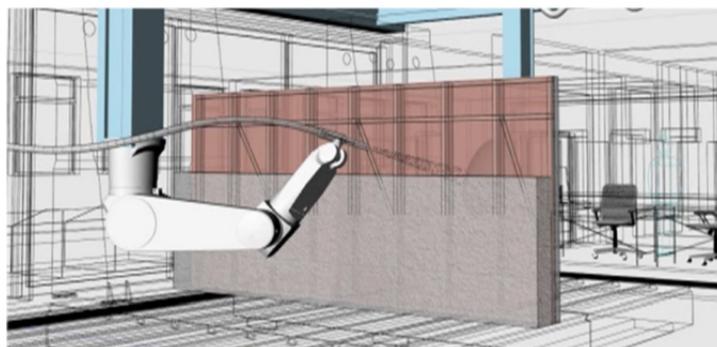
*Bild 9: Vertikaler Spritzprozess, Roboter an Kranportal, DBFL (Bild: ITE)*

#### 4. Fertigung schalungsloser, komplexer Betonbauteile im Spritzverfahren

Das DBFL wird erstmals bei einem größeren Verbundforschungsvorhaben der Universitäten Braunschweig, Hannover und Clausthal eingesetzt. Unter der Federführung des ITE entwickeln Forscher aus den Bereichen der Baustofftechnologie, der Robotersteuerung, der Fertigungstechnik und der Informatik eine „Robotergestützte Spritztechnologie zur schalungslosen generativen Fertigung komplexer Betonbauteile“. Ziel ist es, die bereits seit langem genutzte Spritzbetontechnologie zu automatisieren und in einen robotergesteuerten „3D-Spritzdruckprozess“ zu überführen. Neben der Entwicklung der gesamten Prozesstechnik ist es auch notwendig, einen geeigneten Spritzbeton zu entwickeln, dessen Eigenschaft auf die jeweiligen Bauteile und den Fertigungsprozess eingestellt werden können.

Der Einsatz des Betonspritzverfahrens in der additiven Bauteilfertigung ermöglicht es, im Gegensatz zum Extrusionsverfahren, den Auftragswinkel zu variieren. Dies führt zu neuen Möglichkeiten in Hinblick auf die erzeugbaren geometrischen Formen. Das Material muss nicht mehr einfach nur „abgelegt“ werden, sondern es kann von verschiedensten Seiten auf eine bereits gespritzte Schicht aufgetragen werden. Zusätzlich zu einem besseren Flächenverbund können die so gewonnen Freiheitsgrade zu einer neuen Oberflächenqualität führen und Ansätze zur Integration von Bewehrung im 3D-Druck mit Beton bieten. Während die Verbundzone nach Le T.T, et al. [4] bei extrudierten Betonbauteilen, aus mechanischer Sicht, als Schwachstelle anzusehen ist, stellt dieses Verbundproblem mit einer heterogenen Porenverteilung im Spritzdruckverfahren kein Problem dar.

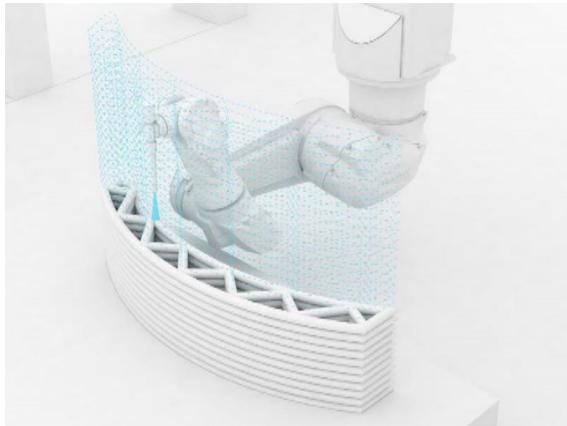
Es zeigt sich, dass derartige Verbundprojekte nur in einer transdisziplinär besetzten Forschergruppe bearbeitet werden können. So sind neben Bauingenieuren auch Materialwissenschaftler, Informatiker und Maschinenbauer Teil des Forschungsteams. Für die Umsetzung aller Ziele müssen in vielen Bereichen wie Anlagentechnik, Auftragsprozess, Materialentwicklung und Regeltechnik neue Entwicklungen konzipiert werden. Das Arbeitsprogramm des Forschungsvorhabens nimmt mit zunehmender Dauer entsprechend an Komplexität zu. Der erste Meilenstein sieht die Herstellung einer ebenen Wand unter Verwendung einer einhäutigen Schalung vor (Bild 10). Danach wird die einhäutige Schalung entfernt und in einem kooperativen Verfahren soll das CNC-Portal ein Gegenschild – sozusagen als „aktive Schalung“ - synchron zum robotischen Spritzprozess führen.



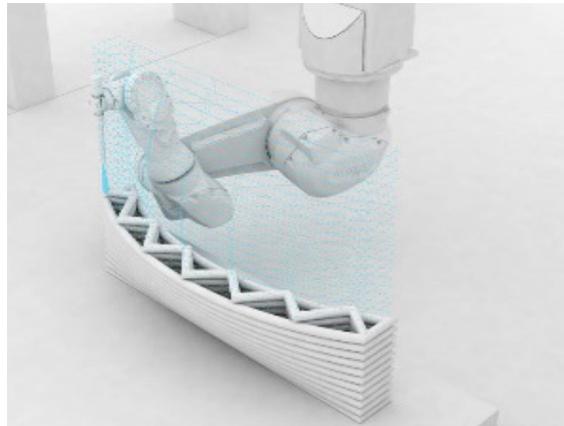
*Bild 10: Spritzen einer ebenen Wand mit einhäutiger Schalung (Bild: ITE)*

Um die Möglichkeiten der robotischen, generativen Fertigung zu zeigen, ist die Fertigung einer einfach gekrümmten und einer doppelt gekrümmten Wand zum Ende des Projektes geplant. Insbesondere eine Krümmung in zwei Achsen ist mit aktuellen Systemschalungen nicht realisierbar. Um derartige Formen herzustellen, werden heutzutage meist Zimmerleute mit dem Bau einer maßgefertigten Holzschalung beauftragt oder es wird subtraktiv eine Art Inlay aus Styropor oder anderen Kunststoffen gefräst und anschließend in System-

schalungen integriert. Mit Hilfe des robotischen Spritzdruckverfahrens sollen die gekrümmten Wandelemente schalungslos aufgebaut werden (Bilder 10 und 11). Inwieweit zum Aufbau ein aktives Gegenschild erforderlich ist, wird Gegenstand weiterer Forschungen sein.



*Bild 11: Einfach gekrümmte Wand  
(Bild: ITE)*



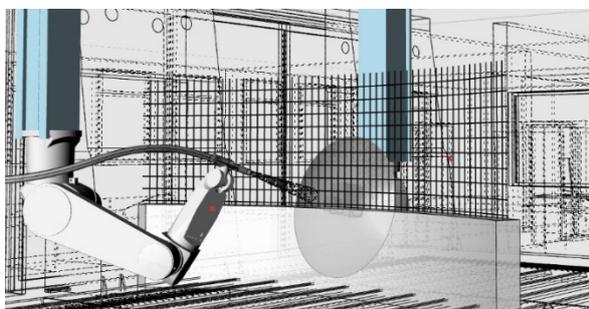
*Bild 12: Doppelt gekrümmte Wand  
(Bild: ITE)*

#### 4.1 Material und Fördertechnik

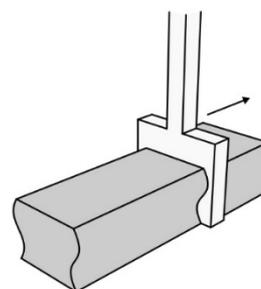
Für die bisher durchgeführten Versuche am DBFL wird ein kunststoffvergüteter und faserverstärkter, hochfester Grobspachtel (Größtkorn 2 mm) der Firma MC Bauchemie (Emcefix Spachtel G extra) verwendet. Dieser liegt als Sackware vor und wird in einem Zwangsmischer vorgemischt. Das Mischungsverhältnis beträgt 4 l Wasser auf 25 kg Mörtel. Zur Förderung wird eine Exzentrerschneckenpumpe (Variojet FU) der Firma Werner Mader GmbH verwendet. Gefördert wird durch 2 Schläuche mit jeweils 10 m Länge und einem Innendurchmesser von 35 mm.

#### 4.2 Auftragsstrategien

Für die Herstellung wurden drei Auftragsstrategien entwickelt und getestet. Dabei handelt es sich zum einem um einen i) reinen additiven Auftrag von Beton durch Spritzen, zum anderen um ii) das Einspritzen von vorab positionierten textilen Gewirken oder netzartigen Trägerstrukturen und außerdem wurde die Möglichkeit untersucht auf iii) eine bewegliche Schalwand zu spritzen, welche sich synchron mit der Düse bewegt (Bild 12). Auch das Nutzen von Slipforming-Werkzeugen bzw. einer simplen Gleitschalung wird als Möglichkeit angesehen, eine freie Bauteilgeometrie im robotischen Spritzdruckverfahren zu erzeugen. Dabei handelt es sich um eine mitgeführte, an der Spritzdüse integrierte Vorrichtung, die den noch frischen Spritzbeton im Spritzprozess in Form bringt (Bild 14).



*Bild 13: Bewegliche Schalwand (Bild: ITE)*



*Bild 14: Prinzipskizze Slipforming (Bild: ITE)*

In den bisherigen Versuchen hat sich gezeigt, dass der Aufbau einer unbewehrten Wand mit einer beweglichen Schalung viele Anforderungen an die Auftragsstrategie und die Schalung stellt. Als größtes Problem stellte sich das Haften des Betons an der Schalung heraus. Die Schalung verlor infolgedessen ihre Oberflächenbeschaffenheit und störte durch die weitere Bewegung das Betongefüge. Dies hatte ungleich mehr Anhaftungen von Beton zur Folge. Weitere Probleme waren die Adaption der Schalengeometrie an die jeweilige Bauteilgeometrie und die komplexeren Auftragsalgorithmen zum Aufbau einer Wand in nahezu horizontaler Richtung. Hierbei musste der Auftrag in drei Richtungen erfolgen unter der Voraussetzung des zu jeder Zeit sicheren Standes des Bauteils und unter Beachtung der Offenzeiten des Betons.

Das Einspritzen von netzartigen Trägerstrukturen stellte sich als besonders schwierig heraus. Hier hatte der Impuls des Betonstrahls Auswirkungen auf die Standfestigkeit der Struktur. Dies führt dazu, dass die Struktur fest verankert werden musste, was die freie Formgebung extrem einschränkt. Auch die Gefahr des Schwingens der Trägerstruktur während des Auftrags und das damit unter Umständen verbundene Freirütteln der Struktur im Beton ist hier ein limitierender Faktor.

Der rein additive Auftrag durch vertikales Spritzen erzielte in ersten Versuchen die besten Ergebnisse (Bild 9). Der Bahnauftrag war gut steuerbar und blieb nach dem Auftragen weiterer Bahnen in Form. Bohrkerne zeigten, dass das Betongefüge homogen und die Festigkeiten ohne Auffälligkeiten waren. Diese Daten waren ausschlaggebend für die Wahl des vertikalen Auftragsverfahrens. Obwohl alle weiteren Untersuchungen aktuell mit vertikalem Auftrag durchgeführt werden, ist ein zusätzliches, horizontales Spritzen nicht ausgeschlossen. Die ersten Versuche und Ergebnisse zu diesem Verfahren werden im Kapitel 5 näher beschrieben.

## 5. Aktueller Stand des Forschungsvorhabens

Die ersten Versuche zum additiven Auftragen des Betons mit senkrecht ausgerichteter Düse konzentrierten sich auf Parameterversuche zur Bahngeometrie des Auftrags. Die Bahngeometrie hängt neben den Betoneigenschaften maßgeblich vom Auftragsprozess ab. Der Auftragsprozess wird durch den Luftdruck - der Abstand von der Düse zur Auftragsfläche - der Robotergeschwindigkeit, der Düsengeometrie und dem Betonvolumenstrom bestimmt. Für die im Folgenden beschriebenen Versuche wurde immer eine Düse mit einem Öffnungsdurchmesser von 15 mm verwendet.

### 5.1 Abstand und Luftdruck

Die ersten Untersuchungen galten dem Düsenabstand und dem Luftdruck, welche nacheinander variiert wurden (Bild 15). Die Parameter sind in Tabelle 1 dargestellt. Dabei wurden Robotergeschwindigkeit und Volumenstrom konstant gehalten. Es wurden 1-lagige und 3-lagige Bahnen gespritzt, um den Einfluss des Eigengewichts der folgenden Bahnen und des Auftrags von weiteren Bahnen auf bestehende Bahnen zu prüfen. In Bild 16 ist beispielhaft der Querschnitt einer 1-lagigen und in Bild 17 der Querschnitt einer 3-lagigen Spritzbahn zusehen. Beide wurden mit einem Luftdruck von 2 Bar und einem Abstand von 15 cm hergestellt.

Wie erwartet wurde, zeigten die ersten Ergebnisse, dass die unteren Bahnen von den folgenden Bahnen hinsichtlich der Höhe und Breite beeinflusst werden. Nachdem nur 2 Bahnen über die erste gespritzt wurden, erhöhte sich die Breite der untersten Lage im Schnitt um etwa 1,1 cm. Die gemittelte Ausgangsbreite variiert je nach Abstand und Luftdruck von etwa 13 cm bis 19 cm. Die Änderung der Höhe konnte, auf Grund des Verschmelzens der 3 Lagen, nicht untersucht werden. Unter Annahme eines konstanten

Volumenstroms ist aber davon auszugehen, dass die Höhe infolge der Verbreiterung der Bahn abnimmt, damit sich die gleiche Querschnittsfläche ergibt. Es zeigte sich auch ein klarer Zusammenhang zwischen Abstand und Bahnbreite, siehe Tabelle 1. Diese lässt sich geometrisch über den Austrittswinkel und den Düsenabstand berechnen. Durch das vertikale, nach unten gerichtete Spritzen kann der Einfluss der Schwerkraft hier vernachlässigt werden.



Bild 15: Spritzen der Parameterversuche (Bild: ITE)



Bild 16: 1-lagige Bahn, 2 Bar, 15 cm, Querschnitt (Bild: ITE)



Bild 17: 3-lagige Bahn, 2 Bar, 15 cm, Querschnitt (Bild: ITE)

Tab. 1: Gemittelte Breite der Spritzbahn in Abhängigkeit von Luftdruck und Abstand der Düse in cm

Luftdruck [Bar]	Abstand der Düse [cm]			
	15	20	25	30
1	12,5	13,3	13,8	14,8
2	13,2	15,1	14,5	17,56
3	15,0	16,2	16,0	17,7
4	14,8	17,4	18,0	18,6

Weiter zeigte sich bei zu hohem Luftdruck eine Veränderung der Bahngeometrie. Bei einem Luftdruck von 1 Bar ist die Bahn noch konvex. Wird der Luftimpuls auf die Betonbahn zu groß, kann es passieren, dass der Beton nach Außen gedrückt wird und die Oberfläche flach oder gar konkav wird, wie in 18 zu sehen ist. Das Einstellen aller Parameter für einen optimalen Spritzprozess wird die kommenden Versuche weiter begleiten.



*Bild 18: Bahngeometrie in Abhängigkeit vom Luftdruck. Düsenabstand konstant bei 20 cm. (Bild: ITE)*

## 5.2 Auftragsgeschwindigkeit

Die Geschwindigkeit, mit welcher der Roboter die Düse über die Auftragsfläche bewegt, wurde mit Hinblick auf die Bahngeometrie ebenfalls untersucht. Dazu wurden wieder 1-lagige und 3-lagige Bahnen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten gespritzt. Volumenstrom, Abstand und Druckluft wurden hierbei konstant gehalten. In Bild 19 und Bild 20 sind beispielhaft zwei Bahnen für zwei unterschiedliche Geschwindigkeiten dargestellt. Wie zu erwarten war, ließen alle Bahnen eine indirekte Proportionalität zwischen Bahnhöhe und Robotergeschwindigkeit erkennen. So lag die Höhe der Bahn in Bild 19 bei etwa 20 mm und die Höhe der Bahn in Bild 20, bei doppelter Geschwindigkeit, bei etwa 10 mm. Auch eine andere Verteilung des Betons über die Breite war deutlich zu erkennen. Obwohl Druckluft, Abstand und Volumenstrom konstant waren, wurde mit zunehmender Geschwindigkeit vermehrt Beton an den Rändern der Bahn abgelagert (vgl. Bild 19 und Bild 20).



*Bild 19: 1-lagige Bahn, 2 Bar, 20 cm, 5868 mm/min, Querschnitt (Bild: ITE)*



*Bild 20: 1-lagige Bahn, 2 Bar, 20 cm, 11736 mm/min, Querschnitt (Bild: ITE)*

## 5.3 Verbundzone

Die Untersuchung der Verbundzone wurde vom iBMB der TU Braunschweig durchgeführt. In Haftzugprüfungen konnte gezeigt werden, dass die Verbundzone keine Schwachstelle darstellt. Die Bruchstellen lagen nie in den Verbundschichten. Für detailliertere Informationen sei auf den Beitrag von Herrn Nolte und Frau Dr. Heidmann-Ruhz [7] hingewiesen.

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Das additive Fertigen von Betonbauteilen im „Spritzdruckverfahren“ mit vertikal ausgerichtetem Düsenkopf hat sich als sehr erfolgversprechend herauskristallisiert. Die durchgeführten Parameterversuche zeigten einen klaren Zusammenhang zwischen Luftdruck, Abstand, Auftragsgeschwindigkeit und Bahngeometrie.

Die Versuche zur Geschwindigkeit, mit der die Düse über die Applikationsfläche bewegt wird, zeigten einen klaren, indirekt proportionalen Zusammenhang zwischen Bahnhöhe und Geschwindigkeit. Wie anzunehmen war, halbiert sich das Auftragsvolumen bei Verdopplung der Auftragsgeschwindigkeit. Bei konstantem Volumenstrom, Abstand und Luftdruck bleibt die Bahnbreite ebenfalls konstant. Die logische Konsequenz, bei doppelter Auftragsgeschwindigkeit, ist eine Halbierung der Bahnhöhe. Dies konnte in den Versuchen auch beobachtet werden.

Während der Parameterstudien zur Bahngeometrie wurden auch größere Bauteile hergestellt. Diese Bauteile zeigten, dass das Spritzen von Ecken einen ungleichmäßigen

Materialauftrag zur Folge hat. Ebenfalls konnte gezeigt werden, dass das Spritzen eines Überhangs ohne unterstützende Struktur möglich ist (Bild 21).



Bild 21: Über die Z-Achse verdrehte Stütze mit Überhang (Bild: ITE)

Im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens sind ergänzende Versuche zum Spritzen von Überhängen, sowie der Einsatz von Beschleuniger, um höhere Bauteile herstellen zu können, vorgesehen.

## 7. Danksagung

Besonders möchten wir hier nochmal der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) danken, welche den Bau des „Digital Building Fabrication Laboratory“ ermöglicht hat und außerdem dem Land Niedersachsen, ohne dessen Förderung das Forschungsprojekt nicht möglich gewesen wäre. Weiterer Dank gehört der TU Clausthal und der LU Hannover, welche das Forschungsprojekt mit uns tragen.

## 8. Literatur

- [1] Labonnote, N., Rønnquist, A., Manum, B., & Rüther, P.: Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities. *Automation in Construction*, 72, (2016) 347-366.
- [2] Khoshnevis, B.: Automated construction by contour crafting-related robotics and information technologies. *Automation in construction*. 2004, 13.1, S. 5-19.
- [3] Lim, S., Buswell, R. A., Le, T. T., Wackrow, R., Austin, S. A., Gibb, A. G., & Thorpe, T.: Development of a viable concrete printing process. In: Proceedings of the 28<sup>th</sup> International Symposium on Automation and Robotics in Construction, (ISARC2011), Seoul, South Korea, 29<sup>th</sup> June-2<sup>nd</sup> July 2011, pp. 665 - 670.
- [4] Le T.T., et al.: Hardened properties of high-performance printing concrete. *Cement and Concrete Research*. 2011, 42.
- [5] Yingchuang, WinSun: [Online] [Zitat vom: 27. 07 2017.] <http://www.yhbm.com>.
- [6] Kloft, H.; Ledderose, L.; Mainka, J.; Neudecker, S.; Petri, J.: Bauen mit Beton im Zeitalter digitaler Planung und Fertigung. *Deutsche Bauzeitschrift*. 2016, 2.
- [7] Nolte, N.; Heidmann-Ruhz, M.; Krauss, H.; Budelmann, H.; Wolter, A.: Entwicklung von Spritzbetonrezepturen mit steuerbaren Eigenschaften für die robotergestützte additive Fertigung von Betonbauteilen. In: Kusterle, W. (Hrsg.): *Spritzbeton-Tagung 2018*. Tagungsband der 12. Fachtagung in Alpbach, 11.-12.1.2018, Eigenverlag, 2018.

## **Zu den Autoren**

M. Sc. Eric Herrmann

Studium des Bauingenieurwesens an der TU Braunschweig, seit 2017 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Tragwerksentwurf der Technischen Universität Braunschweig.

*e.herrmann@tu-braunschweig.de*

M. Sc. Hendrik Lindemann

Studium der Architektur an der TU Braunschweig und an der TU Delft, seit 2016 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Tragwerksentwurf der Technischen Universität Braunschweig und wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Design by technology der Folkwang Universität in Essen.

*h.lindemann@tu-braunschweig.de*

Prof. Dr.-Ing. Harald Kloft

Studium des Bauingenieurwesens und Promotion an der TU Darmstadt, von 2002 bis 2011 Professor für Tragwerksentwurf und Konstruktionen an der TU Kaiserslautern, von 2007 bis 2009 Professor für Tragwerksentwurf an der TU Graz und seit 2011 Professor für Tragwerksentwurf und Leiter des ITE – Instituts für Tragwerksentwurf an der TU Braunschweig.

*h.kloft@tu-braunschweig.de*