

BBSR-
Online-Publikation
05/2021

Leichtbeton-3D-Druck

Autorinnen und Autoren

Carla Matthäus
Dr. Klaudius Henke
Daniel Talke
Dr. Thomas Kränkel

Leichtbeton-3D-Druck

Additive Fertigung von multifunktionalen, monolithischen Wandelementen
durch Extrusion von Leichtbeton

Gefördert durch:



Bundesministerium
des Innern, für Bau
und Heimat

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Auftrag des Bundesministeriums des Innern, für Bau und Heimat aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-17.14

Projektlaufzeit: 07.2017–11.2019

Impressum

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Fachbetreuer

Steffen Kisseler, Brüggemann Kisseler Ingenieure
im Auftrag des BBSR, Referat WB 3 „Forschung im Bauwesen“
zb@bbr.bund.de

Autorinnen und Autoren

Technische Universität München
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter

Dr.-Ing. Klaudius Henke
henke@tum.de
Daniel Talke, M.Sc.
talke@tum.de

Technische Universität München
Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen

Dr.-Ing. Thomas Kränkel
thomas.kraenkel@tum.de
Carla Matthäus, M.Sc.
c.matthaeus@tum.de

Industriepartner

HeidelbergCement AG
Ed. Züblin AG
Knauf PFT GmbH & Co. KG
Dennert Poraver GmbH

Stand

Mai 2021

Bildnachweis

Titelbild: Carla Matthäus

Die Quellen zu den Abbildungen sind jeweils in den Bildunterschriften aufgeführt bzw. ab Seite 82 gelistet.

Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitierweise

Matthäus, Carla; Henke, Klaudius; Talke, Daniel; Kränkel, Thomas: Leichtbeton-3D-Druck – Additive Fertigung von multifunktionalen, monolithischen Wandelementen durch Extrusion von Leichtbeton. BBSR-Online-Publikation 05/2021, Bonn, Mai 2021.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	6
2	Grundlagen Leichtbetonextrusion.....	8
2.1	Grundlagen Leichtbeton.....	8
2.2	Anforderungsprofil in der Leichtbetonextrusion.....	9
2.3	Eingesetzte Materialien und Mischungszusammensetzung.....	13
2.4	Methodik im Rahmen der Materialuntersuchungen.....	17
3	Misch- und Fördertechnik.....	22
3.1	Allgemeines.....	22
3.2	Schneckenextruder.....	22
3.3	Exzentrerschneckenpumpe.....	23
4	Materialuntersuchungen.....	25
4.1	Entwicklung eines geeigneten Leichtbetons.....	25
4.2	Pumpbarkeit.....	28
4.3	Baubarkeit.....	32
4.4	Formtreue.....	37
4.5	Schichtenverbund.....	39
4.6	Festbetoneigenschaften.....	41
4.7	Überblick über die Materialeigenschaften für die Extrusion der Demonstratoren.....	44
5	Raupengeometrie und Düsendesign.....	45
5.1	Prozessvarianten.....	45
5.2	Raupengeometrie.....	46
5.2.1	Raupenabmessungen (Breite, Höhe).....	46
5.2.2	Raupenprofile.....	47
5.2.3	Zusammenhang von Raupengeometrie und Fördersystem.....	50
5.3	Bauarten von Düsen.....	51
6	Manipulatoren und Steuerung.....	54
6.1	Allgemeines.....	54
6.2	Deltadrucker.....	54
6.3	Industrieroboter.....	56
7	Bauteilfunktionalisierung und Schichtenlayout.....	59

7.1	Bauteilfunktionalisierung	59
7.2	Schichtenlayout	59
7.2.1	Funktionalisierung der Schichten	59
7.2.2	Formtreue und Stabilität während des Bauprozesses	61
7.2.3	Unterbrechungsloser Extrusionprozess	63
8	Testobjekte und Demonstratoren	64
8.1	Allgemeines zu Entwurf und Fertigung	64
8.2	Testobjekte für Überhangversuche	66
8.3	Testobjekte mit geschlossenen Zellen	67
8.4	Verschraubter Pfeiler	69
8.5	Wandelement mit sinusförmigen Extrusionspfaden	70
9	Wirtschaftlichkeit.....	72
10	Fazit, Ausblick	76
11	Literaturverzeichnis	78
12	Abbildungsverzeichnis.....	82
13	Tabellenverzeichnis.....	87

1 Einleitung

Leichtbeton ist ein Material, das tragende und wärmedämmende Eigenschaften in sich vereint und damit den Bau von monolithischen Wandelementen ohne zusätzliche Wärmedämmung ermöglicht. Durch den Einsatz von additiver Fertigung bei der Herstellung von Leichtbetonelementen kann die Dämmfähigkeit durch die Schaffung von inneren Hohlraumstrukturen weiter verbessert werden. Die kontrollierte Formgebung dieser Strukturen ermöglicht die Bildung von Zonen unterschiedlicher Dichte, und damit unterschiedlicher Eigenschaften, innerhalb der Elemente. Darüber hinaus können interne Kammern und Kanäle geschaffen werden, um dadurch weitere Funktionen, wie etwa der Gebäudetechnik, zu integrieren. Auf diese Weise können durch die Kombination von Leichtbeton und additiver Fertigung Bauelemente geschaffen werden, die in vielerlei Hinsicht multifunktional sind.

Die additive Fertigung von Leichtbetonstrukturen kann grundsätzlich mittels zweier verschiedener Verfahren realisiert werden: Einerseits durch selektives Binden, bei dem trockenes Material in einem Partikelbett lokal durch einen Binder verfestigt wird, und andererseits durch Extrusion, bei der Frischbeton in Strängen („Raupen“) abgelegt wird (Henke et al. 2017). Zwar zeigt sich das selektive Binden überlegen in Bezug auf Auflösung und geometrische Freiheit, die Schaffung von Bauteilen mit geschlossenen, ungefüllten Hohlräumen ist jedoch nur mit dem Extrusionsverfahren möglich, welches deshalb bei der Gestaltung von thermisch optimierten Hohlraumstrukturen Vorteile aufweist. Zudem lassen sich bei der Extrusion die Materialeigenschaften wesentlich leichter kontrollieren und die zunächst geringere geometrische Freiheit der Extrusion wird durch das geringe Gewicht des Leichtbetons im Vergleich zu Normalbeton positiv beeinflusst.

Bereits in dem vorangegangenen Forschungsvorhaben ‚Additive Fertigung frei geformter Bauelemente durch numerisch gesteuerte Extrusion von Holzleichtbeton‘ (Zukunft Bau SWD-10.08.18.7-14.10, Laufzeit 15.10.2014 - 30.4.2016) konnte die Machbarkeit der Extrusion von Leichtbeton, exemplarisch anhand des speziellen Werkstoffs Holzleichtbeton, nachgewiesen werden (Winter et al. 2016). Die Materialentwicklung spielte in diesem Vorhaben eine untergeordnete Rolle und erfolgte experimentell. Der Extruder wurde in kleinen Chargen von Hand befüllt; die Entwicklung eines kontinuierlichen Misch- und Förderprozesses war nicht Gegenstand des Projektes.

An diesem Punkt setzt das hier vorgestellte Forschungsvorhabens ‚Additive Fertigung von multifunktionalen, monolithischen Wandelementen durch Extrusion von Leichtbeton (LC3D)‘ (Laufzeit 1.7.2017 - 30.11.2019) an. Das Projektteam wurde durch Werkstoffwissenschaftler ergänzt, um eine wissenschaftlich fundierte Rezeptentwicklung durchführen zu können. Das komplexe Reaktionen mit dem Zement eingehende Holz sollte durch den mineralischen Leichtzuschlag Blähglasgranulat ersetzt werden. Und das händische Befüllen des Extruders sollte einem kontinuierlich arbeitendem Misch- und Fördersystem weichen.

Im Projekt waren somit anwendungsreife Leichtbetonrezepturen zu finden, die sowohl in Hinblick auf die Frischbetoneigenschaften, als auch auf die Festbetoneigenschaften optimiert sind. Dabei muss die Rheologie des Frischbetons so eingestellt sein, dass er zur Förderung und zur

Ausbringung ausreichend fließfähig ist. Zugleich ist es wichtig, dass er direkt nach der Ausbringung an der Düse eine ausreichende Grünstandfestigkeit aufweist und schnell Struktur aufbaut, um die Formtreue der Raupe, das Abtragen des Eigengewichts und weiterer Schichten sowie möglicherweise Überhänge zu gewährleisten. Zuletzt ist zu berücksichtigen, dass zwischen nebeneinander liegenden Strängen und übereinander liegenden Schichten ein guter Verbund erreicht wird.

Für den Fertigungsprozess war eine auf den Werkstoff abgestimmte, kontinuierlich arbeitende Misch- und Fördertechnik für den Frischbeton zu finden. Das Schichtenlayout war zu optimieren und entsprechende Düsen zu entwickeln. Für die Steuerung des als Manipulator dienenden Industrieroboters waren verfügbare Modellier- und Steuerungstools so anzupassen, dass eine durchgängige digitale Prozesskette entsteht.

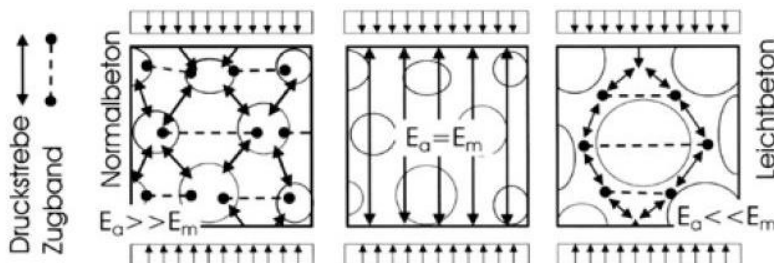
Derartig mit Materialien und Geräten ausgestattet, konnten im Projekt diverse Testobjekte und Demonstratoren hergestellt werden. Diese Objekte weisen frei geformte Bauteiloberflächen und im Inneren filigrane Hohlraumstrukturen auf, welche für die Funktionalisierung des Bauteilquerschnitts genutzt werden können. Sie illustrieren das Potential der additiven Fertigung durch Extrusion von Leichtbeton zur Herstellung von strukturell und bauphysikalisch optimierten, multifunktionalen, monolithischen Außenwandelemente.

2 Grundlagen Leichtbetonextrusion

2.1 Grundlagen Leichtbeton

Leichtbeton unterscheidet sich von Normalbeton in seiner Rohdichte. Diese liegt nach DIN EN 206:2017-01 bei Leichtbeton im darrtrockenen Zustand zwischen 800 kg/m^3 und 2000 kg/m^3 während Normalbeton eine Rohdichte von 2000 kg/m^3 bis 2600 kg/m^3 hat. Durch die geringe Rohdichte des Leichtbetons hat dieser eine deutlich geringere Wärmeleitfähigkeit als Normalbeton.

Für die Extrusion wird ein gefügedichter Leichtbeton gewählt, bei dem die dichten Zuschläge des Normalbetons durch porige Leichtzuschläge ersetzt werden (Thienel 2018). Dadurch erhält man, im Gegensatz zum haufwerksporigen Leichtbeton, einen Beton mit dichtem Gefüge, der in der Mischungszusammensetzung einem Normalbeton gleicht (Faust 2003; Leufgens et al. 2009). Die Hauptbestandteile des Leichtbetons sind Wasser, Zement und Leichtzuschläge sowie u.U. Zusatzmittel und Zusatzstoffe. Die Festigkeit und Dichtigkeit des Betons wird dabei stark durch das Verhältnis des Wasser-Zement-Werts (w/z -Wert) beeinflusst. Zusätzlich können auch Zusatzmittel einen Einfluss auf die Festigkeit haben. Beim Leichtbeton haben zudem die Leichtzuschläge einen signifikanten Einfluss auf die Festigkeit. Durch die geringe Rohdichte der Leichtzuschläge, verändert sich der Mechanismus der Lastabtragung beim Leichtbeton im Vergleich zum Normalbeton, wie in Abbildung 1 dargestellt ist.



E_a : Steifigkeit Leichtzuschlag
 E_m : Steifigkeit Mörtelmatrix

Abbildung 1: Strukturmodell des Lastabtrags von Normalbeton, Beton mit gleichverteilten Steifigkeiten und Leichtbeton (Faust 2003)

Das Tragverhalten richtet sich nach dem Festigkeits- und Steifigkeitsverhältnis von Zuschlag und Matrix. Bei Normalbetonen ist der E-Modul der Zuschläge in der Regel höher als der E-Modul der Mörtelmatrix, beim Leichtzuschlag ist das Verhältnis umgekehrt. Damit ergeben sich unterschiedliche Kraftflüsse bei den Betonen: Beim Normalbeton laufen die Druckspannungstrajektorien von Zuschlagskorn zu Zuschlagskorn. Dementsprechend sind die Querkzugbeanspruchungen maßgebend für die Druckfestigkeit und die Kontaktzone zwischen Zementstein und Zuschlag von großer Bedeutung für das Materialversagen. Beim Leichtbeton ist die Steifigkeit der Leichtzuschläge selbst deutlich geringer als die der Mörtelmatrix. Die Druckspannungstrajektorien laufen damit um die Zuschlagskörner herum. In Bezug auf die Kontaktzone wirkt sich beim Leichtbeton die Saugfähigkeit und Oberflächenporosität der

Leichtzuschläge unabhängig von der Festigkeit des Leichtbetons positiv aus, da die Bildung von Wasserfilmen verhindert wird und zusätzlich teilweise eine mechanische Verzahnung durch das Eindringen von Leim in die Körner entsteht. Geringfügig kann die Ausbildung der Kontaktzone außerdem durch puzzolanische Reaktivität durch einen über die Leichtzuschläge erhöhten Anteil von SiO_2 positiv beeinflusst werden. In der Regel ist daher die Festigkeit der Zuschläge ausschlaggebend für das Druckversagen (Faust 2003).

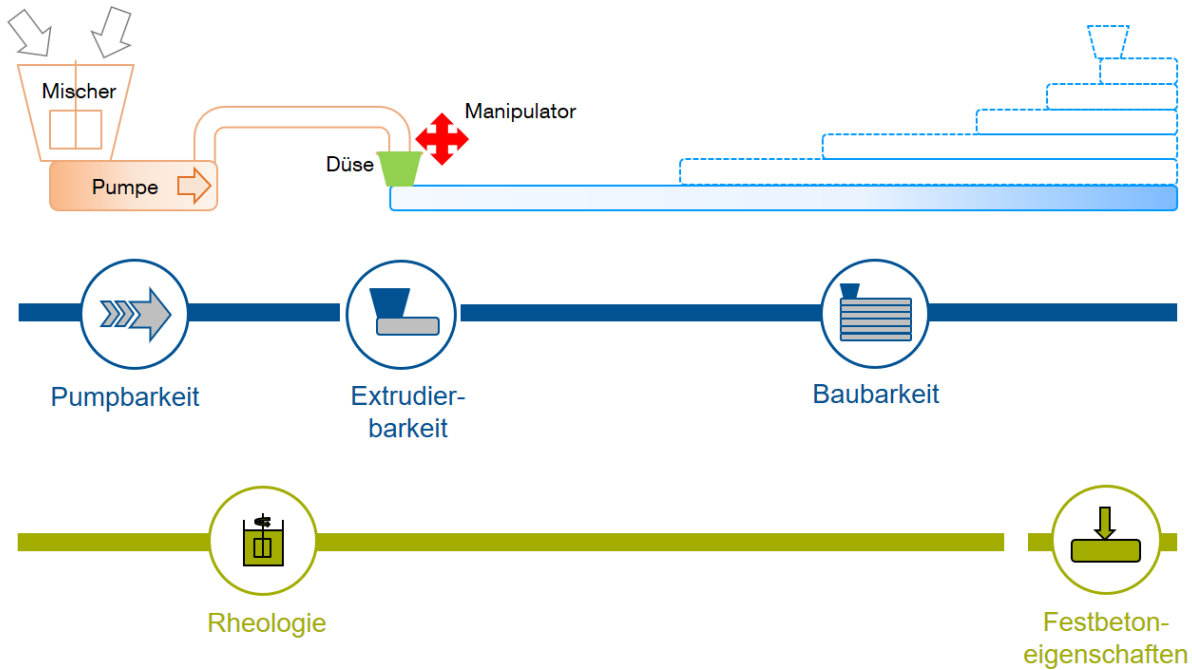
Als Leichtzuschlag wird bei der Materialentwicklung in diesem Forschungsvorhaben das Blähglasgranulat von Dennert Poraver verwendet (siehe Kapitel 2.3).

Ausgehend von den bisher am Markt erhältlichen Leichtbetonen und unter Einbezug der Erkenntnisse aus der Normalbetonextrusion, wird im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ein Leichtbeton entwickelt, der sich für die Extrusion eignet.

2.2 Anforderungsprofil in der Leichtbetonextrusion

Um das Material für die Extrusion optimieren zu können, ist es nötig, zunächst die Anforderungen zu analysieren, die sich aus dem Prozess ergeben. In Abbildung 2 werden die Phasen des Extrusionsprozesses schematisch dargestellt. Die Anforderungen an den Leichtbeton während und nach dem Pumpprozess unterscheiden sich diametral.

Die Rheologie des Frischbetons muss so eingestellt sein, dass er zur Förderung und zur Ausbringung ausreichend fließfähig ist. Zugleich ist es wichtig, dass er direkt nach der Ausbringung an der Düse eine ausreichende Grünstandfestigkeit aufweist sowie schnell Struktur aufbaut, um die Formtreue der Raupe, das Abtragen des Eigengewichts und des Gewichts weiterer Schichten sowie die Möglichkeit der Bildung von Überhängen zu gewährleisten. Bevor die nächste Schicht abgelegt werden kann, muss das Material eine ausreichend statische Fließgrenze (als Maß für die Grünstandfestigkeit) haben, damit es nicht zum Versagen oder Verformen der untersten Schicht kommt (vgl. Kapitel 4.3 und 4.4). Je länger die Wartezeit zwischen zwei Schichten ist, desto höher ist die Festigkeit der Schicht darunter und desto geringer sind die auftretenden Verformungen dieser Schicht. Dies führt zu einer gesteigerten Formtreue des Objektes, geht allerdings mit einer geringen Druckgeschwindigkeit einher. Für einen guten Schichtenverbund wird angestrebt, die Schichten „frisch in frisch“ aufzubringen, welches durch eine geringe Wartezeit zwischen den Schichten sichergestellt werden kann (vgl. Kapitel 4.5). Damit sind die Anforderungen an den Schichtenverbund und die Druckgeschwindigkeit konträr zu den Anforderungen an den Lastabtrag während der Fertigung. Durch eine hohe Strukturaufbaurrate kann die Wartezeit zwischen den einzelnen Schichten reduziert und in der Folge eine hohe Druckgeschwindigkeit sowie ein guter Schichtenverbund erzielt werden (vgl. Kapitel 4.3). Es muss zudem jeweils beachtet werden, dass die Anforderungen an das Material vom Prozess abhängen. So führt z.B. eine Erhöhung der Druckgeschwindigkeit oder eine Verjüngung des Querschnitts zu einer Erhöhung des im Prozess auftretenden Drucks und damit zu erhöhten Materialanforderungen. Die Anforderungen an das Material werden in Abbildung 2 zusammenfassend dargestellt.



Phase	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4
Zustand	Fördern	Ausbringen und Strukturaufbau	Lastabtrag während Produktion	Erstarren und Erhärten
Anforderung an Material	<ul style="list-style-type: none"> - Verarbeitbarkeit - Mischungsstabilität - Robustheit 	<ul style="list-style-type: none"> - Grünstandfestigkeit - Formtreue 	<ul style="list-style-type: none"> - Grünstandfestigkeit - Formtreue - Schichtenverbund 	<ul style="list-style-type: none"> - Festigkeit - Dauerhaftigkeit - Wärmeleitfähigkeit

Abbildung 2: Phasen der Leichtbetonextrusion (Bild C. Matthäus)

In Bezug auf den erhärteten Leichtbeton muss eine ausreichende Festigkeit, eine geringe Anisotropie (beeinflusst durch den Schichtenverbund), eine geringe Wärmeleitfähigkeit und eine gute Dauerhaftigkeit sichergestellt werden. Da die Wärmeleitfähigkeit und die Festigkeit jeweils von der Rohdichte abhängen (vgl. Kapitel 4.6), muss ein Kompromiss für die jeweilige Anwendung zwischen erreichbarer Festigkeit und Wärmeleitfähigkeit gefunden werden. Die Anforderungen werden in Abbildung 2 zusammenfassend dargestellt.

Für Phase 1 sind die rheologischen Eigenschaften des Frischbetons zum Erreichen von Verarbeitbarkeit, Mischungsstabilität und Robustheit maßgebend. Die Anforderungen an die rheologischen Eigenschaften hängen dabei stark vom Prozess (z.B. Art der Förderung des Materials) ab. Dies wird weitergehend in Kapitel 4.2 untersucht. Um sicherzustellen, dass das Material förderbar ist und es nicht zum Verstopfen des Druckkopfes kommt, muss das Druckbarkeitszeitfenster definiert werden (Kazemian et al. 2017). Dies entspricht der Zeit, die nötig ist, um das Material (bzw. eine Charge) zu mischen, zu fördern und auszubringen (Phasen 1 und 2). Die Offenzeit des Betons, also die Zeit zwischen dem Anmischen und dem Erstarren, muss

mindestens dem Druckbarkeitszeitfenster plus den Phasen 3 und 4 (zur Sicherstellung des Schichtenverbundes) entsprechen.

Phase 2 umfasst das Ausbringen des Materials. Sie trennt die Phasen 1 und 3 voneinander, deren Anforderungen sich, wie eingangs beschrieben, diametral unterscheiden. In dieser Phase ist der Prozess ein maßgebender Parameter. Je nach Düsenform, Ausbringgeschwindigkeit und Druck muss das Material unterschiedlich eingestellt werden. Direkt nach dem Ausbringen muss das Material bereits sein Eigengewicht abtragen können und seine Form beibehalten (vgl. Kapitel 4.3 und 4.4). Direkt nach dem Ausbringen beginnt ebenfalls der innere Strukturaufbau im Material (Phase 3), der bis zur Erstarrung (Phase 4) fortschreitet. Sobald das Material in Ruhe ist, kann sich im Inneren eine Struktur aufbauen, die das Abtragen des Eigengewichts einer Schicht sowie das Abtragen weiterer Schichten ermöglicht. Die Geschwindigkeit und Höhe dieses zeitabhängigen Strukturaufbaus beschränkt die erreichbare Bauteilhöhe (vgl. Kapitel 4.3). Um den Zielkonflikt zwischen möglichst fließfähigen Materialeigenschaften in Phase 1 und möglichst steifem Materialverhalten in Phase 3 zu lösen, ist es vorteilhaft, ein thixotropes Material zu verwenden, das sich bei Scherung scherverdünnend verhält und in Ruhe abhängig von der Zeit wieder eine Struktur aufbaut (Roussel 2006) (vgl. Abbildung 3).

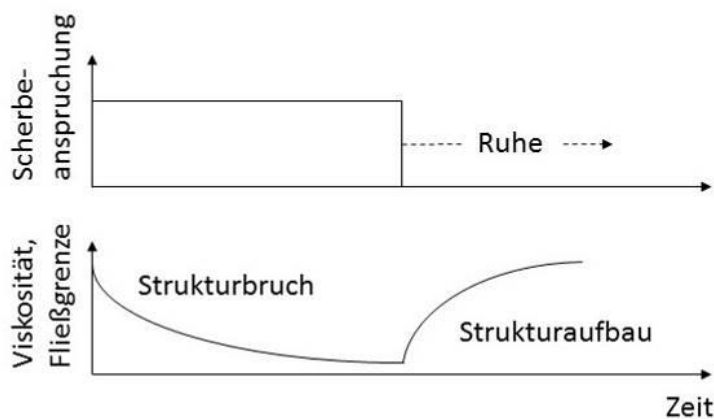


Abbildung 3: Thixotropes Verhalten (Bild C. Matthäus)

In Phase 3 ist neben der Grünstandfestigkeit und dem Strukturaufbau auch die Formtreue essentiell, die letztendlich die erreichbare Formfreiheit und Präzision des Bauteils stark beeinflusst. Bei einer optimalen Formtreue würden weder durch das Eigengewicht noch durch aufgebrachte Lasten Verformungen auftreten und das Material die beim Ausbringen erhaltene Form beibehalten. Dies ist stark von der Grünstandfestigkeit des Materials abhängig. In den Phasen 2 bis 4 muss zudem darauf geachtet werden, dass das Austrocknen des Materials vermieden wird, um Risse und Einbußen in der Materialqualität zu vermeiden (vgl. Kapitel 4.4).

Um einen guten Schichtverbund zu gewährleisten, darf das Material noch nicht erstarrt sein, muss aber bereits eine ausreichende Grünstandfestigkeit aufweisen. In der Literatur wird in diesem Zusammenhang von einem „Operation Window“ gesprochen (Wangler et al. 2016), das den Zeitraum definiert, in dem die nächste Schicht gedruckt werden kann. Der Schichtenverbund ist maßgeblich von der Zeitspanne, die zwischen der Ablage der einzelnen Schichten vergeht,

abhängig (vgl. Kapitel 4.5). Umso schneller die nachfolgende Schicht abgelegt wird, desto besser verbinden sich die Schichten miteinander, da die Hydratationseffekte schichtenübergreifend erfolgen. Eine Ablage „frisch in frisch“ wird daher angestrebt. Weitere Informationen dazu finden sich z.B. in (Roussel 2018; Panda et al. 2018; Panda et al. 2019). Die erreichte Grünstandfestigkeit einer Schicht und die daraus resultierende Möglichkeit nachfolgende Schichten abzutragen ist jedoch umso höher, je länger die Zeit zwischen der Erstellung zweier Schichten ist. Das Operation Window muss dementsprechend so gewählt werden, dass beide Aspekte erfüllt sind und eine möglichst gute Endfestigkeit und Formtreue des Bauteils erreicht werden kann. Phase 3 bestimmt damit deutlich die mit dem Verfahren erreichbare Formfreiheit.

In Phase 4 erstarrt der Beton zunächst und erhärtet anschließend. Während des Erstarrens steigt die Fließgrenze und während des Erhärtens die Festigkeit rapide an. In dieser Phase ist das Erreichen der geforderten Festbetoneigenschaften essentiell. Für den Leichtbeton werden im Rahmen dieses Projektes in erster Linie die Festigkeiten und die Wärmeleitfähigkeit des Festbetons berücksichtigt (vgl. Kapitel 4.6). Die Dauerhaftigkeit des extrudierten Leichtbetons stellt ein weites Themenfeld dar, das Fokus zukünftiger Forschung sein kann. Zudem muss in dieser Phase darauf geachtet werden, dass die Reaktionen kontrolliert ablaufen und die Formtreue, inklusive der Oberflächenqualität, weiterhin gewährleistet werden.

2.3 Eingesetzte Materialien und Mischungszusammensetzung

Die Zusammensetzung der Bestandteile des Leichtbetons wurden auf Basis der Anforderungen an das Material im Extrusionsprozess (vgl. Kapitel 2.2) gewählt. In Kapitel 4 wird genauer auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften und damit einhergehende Eignung der Mischung für die Extrusion eingegangen.

Für die Untersuchungen wurden drei Arten von Zement eingesetzt. Diese weisen eine vergleichbare chemische Zusammensetzung auf und stammen aus demselben Werk, unterscheiden sich allerdings in ihrer Feinheit. CEM A ist ein CEM I 32,5 R mit einem Blaine-Wert von $A_{\text{Blaine,A}} = 2700 \text{ cm}^2/\text{g}$, CEM B ein CEM I 42,5 R mit einem Blaine-Wert von $A_{\text{Blaine,B}} = 3500 \text{ cm}^2/\text{g}$ und CEM C ein CEM I 52,5 R mit einem Blaine-Wert von $A_{\text{Blaine,C}} = 5600 \text{ cm}^2/\text{g}$. Die Korngrößenverteilung der Zemente ist in Abbildung 4 (links) dargestellt. Die Rohdichte der Zemente lag jeweils bei circa $3,1 \text{ kg}/\text{dm}^3$.

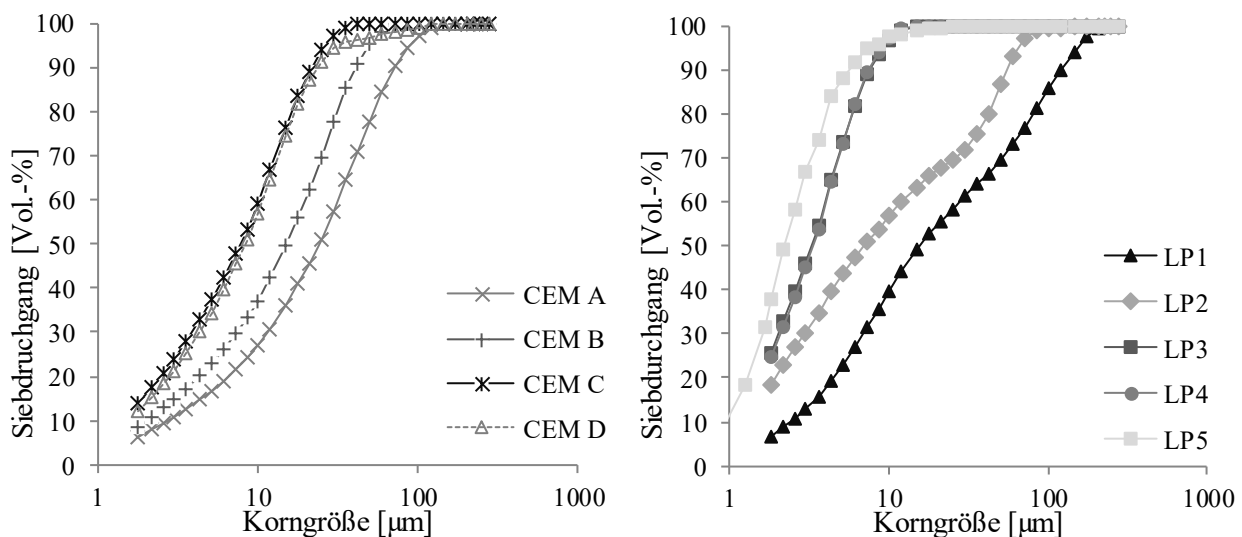


Abbildung 4: Sieblinienverteilungen der unterschiedlichen verwendeten Zemente und Kalksteinmehle (Bild C. Matthäus)

Wie in Kapitel 4.2 dargestellt wird, fördert Kalksteinmehl die Pumpbarkeit von Beton. Der Zement wurde daher teilweise (bis zu 40 Vol.-%) volumengleich durch Kalksteinmehl ersetzt. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden unterschiedliche Kalksteinmehle verglichen. Diese unterscheiden sich einerseits in ihrer Korngrößenverteilung (siehe Abbildung 4 und Tabelle 1) und andererseits in ihrer chemischen Zusammensetzung, z.B. ihrem Tonanteil. Die Rohdichte der Kalksteinmehle war mit $2,7 \text{ kg}/\text{dm}^3$ untereinander vergleichbar.

Tabelle 1: Mittlere Korngröße und spezifische Oberfläche der eingesetzten Kalksteinmehle

	LP1	LP2	LP3	LP4	LP5
d_{50} [μm]	15,7	7,1	3,3	3,3	2,2
A_{Blaine} [cm^2/g]	3.700	6.700	9.200	8.200	11.400

Auf Basis der dargestellten Versuche sowie Betrachtungen zur Pumpbarkeit (Kapitel 4.2) und Baubarkeit (Kapitel 4.3), wurde in Zusammenarbeit mit HeidelbergCement ein Spezialzement (CEM D) entwickelt, der zur Fertigung der Demonstratoren in Kapitel 8 eingesetzt wurde. Die Korngrößenverteilung ist in Abbildung 4 dargestellt, die Rohdichte beträgt $3,0 \text{ kg}/\text{dm}^3$.

Zur Erhöhung der Packungsdichte wurde zudem ein Silikastaub mit einer mittleren Korngröße von $d_{50} = 0,15 \mu\text{m}$ und einer Rohdichte von $2,3 \text{ kg}/\text{dm}^3$ eingesetzt. Aufgrund der höheren Feinheit gegenüber dem Zement und der damit möglichen Reduktion von Hohlräumen steigt die relative Packungsdichte der Mischung beim teilweisen Ersatz des Zements durch Silikastaub an. Dies führt zu höheren Steifigkeiten und damit zu einem Anstieg der Druckfestigkeit des Frischbetons.

Zur Einstellung der Fließeigenschaften (Verarbeitbarkeit) wurde ein auf Polycarboxylatether (PCE) basierendes Fließmittel eingesetzt. Dieses hat einen Feststoffanteil von 40 %. Bei der für die Demonstratoren eingesetzten Mischung wurde das PCE mit 0,45 M-% vom Bindemittelgehalt eingesetzt und der Wasseranteil auf das Zugabewasser angerechnet. Zudem wurde als Additiv ein polymerbasierter Luftporenstabilisierer mit 1 M-% vom Bindemittelgehalt zur Reduktion der auftretenden Risse in den Strängen eingesetzt (vgl. Kapitel 4.4). Zudem wurde ein synthetisches Copolymer-basiertes Thixotropiermittel mit 0,5 g/l Zugabewasser zur Steigerung der Verarbeitbarkeit während des Pumpens bei gleichzeitiger Steigerung des schnellen Strukturaufbaus nach dem Ausbringen der Stränge und damit zur Lösung des Konflikts zwischen Pumpbarkeit und Baubarkeit eingesetzt (vgl. Kapitel 4.3).

Als Leichtzuschlag wurde das Blähglasgranulat der Dennert Poraver GmbH eingesetzt. Die maximale Korngröße betrug 4 mm, für die meisten Mischungen 2 mm. Die minimal eingesetzte Korngröße lag bei 0,1-0,3 mm. Das Blähglasgranulat besitzt eine geringe Kornrohichte bei relativ hoher Kornfestigkeit (siehe Tabelle 2) und beeinträchtigt als mineralischer Leichtzuschlag nicht die Reaktion des Betons (Faust 2003; Neunast und Lange 2001; Dennert Poraver GmbH 2018).

Tabelle 2: Korngröße, Rohdichte, Festigkeit und Wasseraufnahme des Blähglasgranulats nach (Dennert Poraver GmbH 2018)

Korngröße	0,1-0,3 mm	0,25-0,5 mm	0,5-1 mm	1-2 mm	2-4 mm
Kornohdichte [kg/m ³]	950	700	500	400	320
Mittlere Kornfestigkeit [N/mm ²]	4,5	2,6	2,0	1,6	1,4
Wasseraufnahme [M.-%]	35	21	18	19	14

Um das Sedimentieren, das Ansammeln und das Zermahlen der groben Körnung in der Pumpe zu vermeiden, wurde die Sieblinie in Tests durch die Anpassung der einzelnen Fraktionen möglichst stetig eingestellt. Die resultierende Sieblinie ist in Abbildung 5 abgebildet. Die Wasseraufnahme der Leichtzuschläge wurde auf Basis von Untersuchungen des Industriepartners Dennert Poraver GmbH (in Anlehnung an DIN 13055:2016-11 und DIN 1097-6:2013-09) für eine Beanspruchung von 5 Minuten unter 4,5 bar Druck eingestellt (vgl. Tabelle 2) und in der Rezeptur sowie im Mischregime berücksichtigt (vgl. Kapitel 2.4).

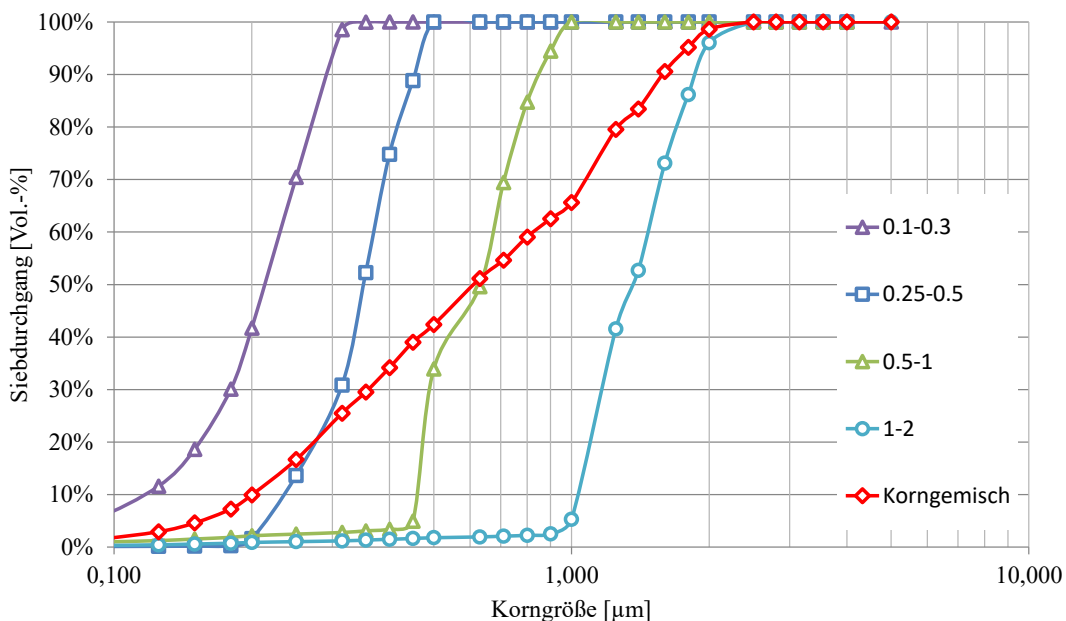


Abbildung 5: Optimierte Sieblinie der Leichtzuschläge und Einzelsieblinien der Kornfraktionen (Bild C. Matthäus)

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde mit den beschriebenen Materialien eine Leichtbetonrezeptur entwickelt, die sich zur Extrusion eignet. Sie wird im Folgenden als Referenzmischung bezeichnet und in Tabelle 3 dargestellt. Der Gesamtwasser-Bindemittel-Wert beträgt $w_t/b = 0,51$ inklusive Vorsättigungswasser. Setzt man die Werte des Herstellers für die Wasseraufnahme der Leichtzuschläge an, so resultiert für die verwendete Rezeptur ein Wasser-

Bindemittel-Wert von $w/b = 0,38$. Das Verhältnis aus Leim und Leichtzuschlägen liegt bei 47 Vol.-% Leim und 53 Vol.-% Leichtzuschläge. Die rechnerische Frischbetonrohddichte liegt damit bei circa 1270 kg/m^3 . In den nachfolgenden Kapiteln wird auf die zur Entwicklung relevanten Parameter eingegangen. Des Weiteren werden in Kapitel 8 aus diesem Material gefertigte Demonstratoren vorgestellt.

Tabelle 3: Referenzmischung

Material	Rohddichte [kg/dm^3]	Menge [kg/m^3 Beton]	Volumen [Vol.-%]
Spezialzement (CEM D)	3,0	558,0	17,5
Silicastaub	2,3	62,0	2,5
Wasser incl. Vorsättigungswasser	1,0	317,6	30,0
Leichtzuschläge 0,1-0,3	1,0	110,2	10,9
Leichtzuschläge 0,25-0,5	0,7	77,5	10,4
Leichtzuschläge 0,5-1,0	0,5	58,0	10,9
Leichtzuschläge 1,0-2,0	0,4	73,8	17,4
Fließmittel		2,8	
Luftporenstabilisierer		6,2	
Thixotropiermittel		0,1	

2.4 Methodik im Rahmen der Materialuntersuchungen

Mischregime

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde ein einheitliches Mischregime festgelegt, um den Einfluss aus variierenden Mischzeiten zu vermeiden. Das Mischregime ist in Tabelle 4 dargestellt:

Tabelle 4: Mischregime

Zeitpunkt [min:s]	Dauer [min:s]	Vorgehen
vorher	-	Einwaage, Wasser ggf. temperiert, Vorsättigungswasser separat zu Anmachwasser und flüssige Zusatzmittel
-6:15	1:00	Leichtzuschläge 1 min mit Vorsättigungswassers mischen
-5:15	4:00	Leichtzuschläge 4 min im Mischtopf ruhen lassen (Sättigungsphase)
-1:15	1:00	Zement, Betonzusatzstoffe und pulverförmige Zusatzmittel zu den vorgesättigten Leichtzuschlägen geben und 1 min mischen
-0:15	0:15	Verbleibendes 1/3 Wasser mit flüssigen Zusatzmittel zugeben und Mischvorgang fortfahren
0:00	0:45	Gesamte Rezeptur für 45 s mischen
0:45	1:00	Mischer stoppen und Anhaftungen an Mischtopf und Rührgerät entfernen
1:45	0:45	Mischen für 45 s fortfahren
2:30	-	Ende des Mischvorgangs

Entsprechend der zu mischenden Betonmengen wurden drei unterschiedliche Mischer verwendet. Für die Grundlagenuntersuchungen an 1l-Mischungen wurde ein Mörtelmischer nach DIN 196-1 verwendet. Größere Materialmengen wurden in einem Zwangsmischer gemischt. Dabei kam ein 40 Liter Betonmischer sowie ein mobiler Chargenmischer PFT Multimix 140 Plus zum Einsatz. Es wurde dabei jeweils das in Tabelle 4 dargestellte Mischregime eingehalten.

Rheologie

Zur Charakterisierung der Materialeigenschaften wurden rheologische Untersuchungen mit dem Rheometer Viskomat NT der Firma Schleibinger und einem Vane-in-cup-Messsystem durchgeführt (vgl. Abbildung 6). Dabei wurden folgende Systemeinstellungen vorgenommen:

- Abtastrate 10 Werte/s → 0,1s

- Mittelungsdauer → 0,1s
- Filterfrequenz → 20 Hz
- Abschalt-Moment → 4.000 Nm
- Topf-Eintauschgeschw. → 0.1 Upm
- Schubspannungs-Faktor → 2 schnell / flüssig
- Messbereich → 0.250 Nmm (V_NT).

Einerseits wurden dynamische Messungen durchgeführt, um Rückschlüsse auf das Material in Bewegung zu ziehen. Diese wurden insbesondere für die Einschätzung der Pumpbarkeit herangezogen. Auf der anderen Seite wurden statische Messungen durchgeführt, um die Schubspannung in ruhenden Proben charakterisieren zu können sowie den Strukturaufbau im Material über die Zeit und damit Rückschlüsse auf die Baubarkeit des Materials zu ziehen.

Für die dynamischen Messungen wurde folgendes Vorgehen festgelegt: Das Material wurde bei Minute 11 nach Wasserzugabe erneut für 1 Minute aufgemischt und zu Beginn des Messprogramms mit 80 Umdrehungen pro Minute (rpm) vorgeschert, um einen potentiell erfolgten Strukturaufbau im Material zu brechen. Bei Minute 15 nach Wasserzugabe startete das Messprogramm mit stufenweise abnehmenden Rotationsgeschwindigkeiten von 80 rpm bis 0,08 rpm. Jede Stufe war 8 Sekunden lang. Um die scheinbare Viskosität und die dynamische Fließgrenze zu bestimmen, wurden der Mittelwert der Momente der Stufen 50 rpm, 40 rpm, 30 rpm, 20 rpm, 15 rpm, 12,5 rpm, 10 rpm und 7,5 rpm gebildet. Die Scherraten wurden auf Basis der Second Krieger Solution und anschließend die scheinbare Viskosität mithilfe des Herschel-Bulkley-Ansatzes bei einer Scherrate von 25 1/min berechnet. Es kann davon ausgegangen werden, dass dies im Bereich der während des Pumpens auftretenden Scherrate liegt (Kaplan 2001; Roussel 2006).

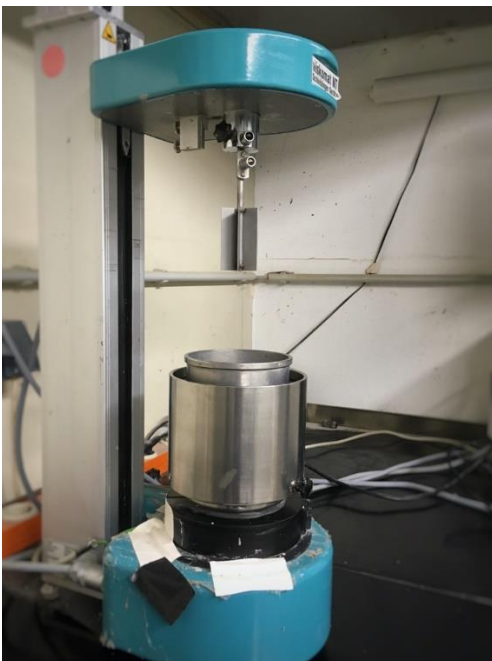


Abbildung 6: Vane-in-cup Rheometer Viskomat NT (Foto C. Matthäus)

Für die statischen Messungen wurden folgendes Vorgehen festgelegt: Das Material wurde wie bei den dynamischen Messungen bei Minute 11 aufgemischt. Nach einer Vorscherzeit von 85 Sekunden (beginnend bei Minute 14:33) zum Brechen der Struktur wechselten sich für die tatsächliche statische Messung Ruhephasen (30 s, 60 s, 120 s, etc.) und kurze Scherphasen von 6 s ab. Die maximalen Momente während der Scherphase wurde erfasst und über die Zeit aufgetragen. Daraus wurde die Schubspannung $\tau(t)$ berechnet (Koehler und Fowler 2007) und mithilfe einer linearen Regression $\tau(t) = \tau_0 + A_{thix}t$ die statische Fließgrenze τ_0 als Schubspannung zum Zeitpunkt Null sowie die Strukturaufbaurrate A_{thix} als Steigung der Geraden berechnet.

Pumpversuch

Die Pumpversuche wurden mit der im Extrusionsprozess eingesetzten Exzentrerschneckenpumpe (vgl. Kapitel 3.3) durchgeführt. Die Geschwindigkeit der Pumpe wurde frequenzgesteuert eingestellt. Des Weiteren wurde der Schlauch vor jedem Pumpvorgang vorgegärt bzw. mit einem Schmiermittel durchgespült, um eine gleichmäßige Einstellung eines Schmierfilms von Anfang an zu gewährleisten und anfängliches Verstopfen des Schlauches zu vermeiden. Der Druck wurde automatisch jede Sekunde erfasst und die Förderrate jeweils dreimal pro Rezeptur und Geschwindigkeit für genau 1 Minute bestimmt. Durch ein digitales Druckmanometer konnte der reale Förderdruck aufgezeichnet werden und damit ein qualitativer Vergleich der Materialmischungen erfolgen.

Zusätzlich zum Druck und der Förderrate, wurden zur Beurteilung der Pumpbarkeit der Leichtbetone die im nachfolgenden aufgeführten Untersuchungen durchgeführt:

- Bestimmung von Rohdichte und Förderrate bei unterschiedlichen Pumpgeschwindigkeiten
- Durchgehende Aufzeichnung des Drucks
- Erfassung der Temperatur vor und nach dem Pumpen
- Herstellung von Prismen für Festbetonuntersuchungen (siehe Kapitel 4.6)

Die Frischbetonrohichte wurde nach DIN EN 1015-6 bestimmt. Die Lagerung von Proben bis zur Prüfung erfolgte jeweils klimatisiert bei 20 ± 1 °C und 65 ± 5 % relativer Luftfeuchte. Auf eine Wasserlagerung wurde verzichtet, um möglichst nah an dem realen Verhalten des Materials nach der Extrusion zu bleiben. Die Druckfestigkeit und Biegezugfestigkeit der Proben wurde - abgesehen von der Lagerung - nach DIN EN 12390-3 nach 7 bzw. 28 Tagen bestimmt. Die Bestimmung der Festbetonrohichte erfolgte nach DIN EN 12390-7.

Formtreue-Versuch

Zur Beurteilung der Formtreue wurde im Rahmen des Forschungsprojektes ein Prüfverfahren entwickelt, mit dem das Potential der Lastaufnahme von Frischbeton quantifiziert sowie, in Abhängigkeit der maximal zulässigen Verformung die maximal mögliche Produktionsgeschwindigkeit und Raupenhöhe festgelegt werden kann. Das Verfahren basiert auf zylindrischen Probekörpern mit einem Durchmesser von 50 mm und einer Höhe von 60 mm (vgl. Abbildung 22). Es kann davon ausgegangen werden, dass der Durchmesser groß genug ist, so dass

die Korngröße von max. 4 mm und die Korngrößenverteilung der Zuschläge keinen signifikanten Einfluss haben.

Im Prüfverfahren wird die Verformung des Materials bei Belastung beurteilt. Dazu werden gleichzeitig sechs Probekörper mit Schalungen hergestellt (vgl. Abbildung 7 links) und diese gegen Austrocknen mit einer Folie abgedeckt. Die Probekörper werden nach der Herstellung und in den Zeitabständen 15, 30, 45, 60 und 90 Minuten jeweils in die Prüfvorrichtung eingebracht und flächig mit Normalkraft belastet. Hierzu wurde das Rheometer MCR 502 von Anton Paar mit Platte-Platte-System (Durchmesser 50 mm) verwendet, das kraftgesteuert sowie weggesteuert verfahren kann und gleichzeitig die Verformung aufzeichnet. Die Zeitspanne von 90 Minuten liegt innerhalb der Ruhephase des Materials, wenn von einem Erstarrungsbeginn nach circa zwei Stunden ausgegangen wird. Der Erstarrungsbeginn des Leichtbetons wird über Vicat-Messungen nach DIN EN 196-3 und DIN EN 480-2 bestimmt.

Bei den kraftgesteuerten Versuchen wird jeweils die aufgebrachte Normalkraft und die resultierende Verformung der Probekörper über die Zeit aufgezeichnet. Aus der Normalkraft und der Querschnittsfläche der Probekörper kann die aufnehmbare Normalspannung berechnet werden. Diese kann mit der über nachfolgend aufgebrachte Stränge induzierten Spannung verglichen und darüber berechnet werden, wie viele Stränge von dem Probekörper bei einer definierten Verformung aufgenommen werden können (vgl. Abbildung 7 rechts).

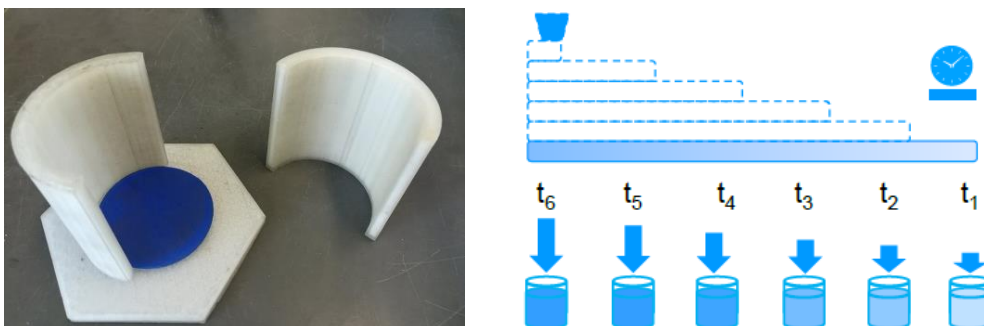


Abbildung 7: Schalung für die Probekörper des Auflastversuchs (links) und schematische Darstellung des Auflastversuchs mit Gegenüberstellung der druckbaren Schichten (rechts) (Bilder C. Matthäus)

Schichtenverbund-Versuch

Um die Qualität des Schichtenverbundes zu beurteilen, werden Prismen aus 3D-gedruckten Elementen sowohl horizontal als auch vertikal herausgesägt (vgl. Abbildung 8) und nach DIN EN 12390-3 nach 7 bzw. 28 Tagen auf Biegezug- und Druckfestigkeit geprüft (vgl. Abbildung 9). Um abschätzen zu können, ab welcher Zeit zwischen dem Ausbringen von zwei Schichten der Schichtenverbund abnimmt, wurden zudem die Zeitabstände zwischen den Schichten variiert. Dazu wurde eine rechteckige Geometrie aus 20 Schichten mit einer Höhe von 200 mm, einer Breite von 300 mm und einer Länge von 300 mm mit unterschiedlichen Zeitabständen (2 min, 5 min und 10 min) zwischen den Schichten gefertigt und nach 2 Tagen aus den Probekörpern jeweils horizontal und vertikal Prismen zur Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit herausgesägt (vgl.

Abbildung 8). Bis zur Prüfung nach 7 Tagen lagerten die Probekörper bei 20 ± 1 °C und $65\pm 5\%$ relativer Luftfeuchte.

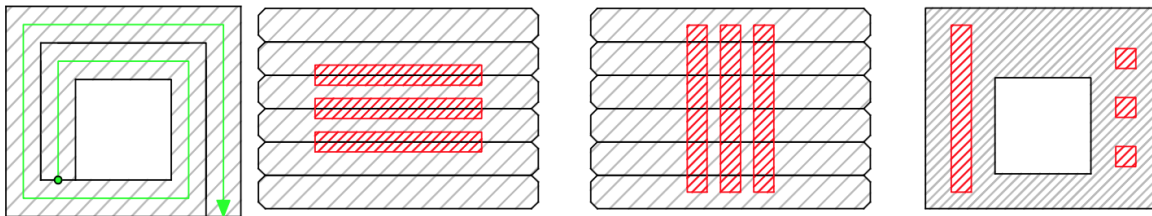


Abbildung 8: Schematische Darstellung des Probekörpers und der Position der herausgesägten Prismen für die Beurteilung des Schichtenverbundes (Bilder N. Kofler)

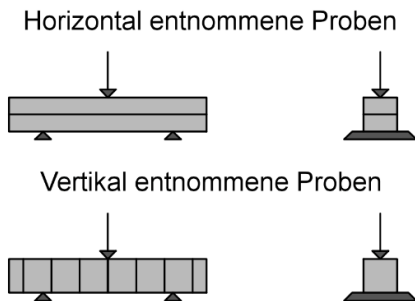


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Prüfung von Biegezug- und Druckfestigkeit an horizontal (oben) und vertikal entnommenen Proben (unten) (Bilder N. Kofler)

Zusätzlich wird das Schwinden nach DIN EN 12617-4 an Prismen mit den Abmessungen 40 mm x 40 mm x 160 mm untersucht. Dazu werden die Probekörper nach einem Tag ausgeschalt und bei 20 ± 1 °C und $65\pm 5\%$ relativer Luftfeuchte gelagert. Nach der Bestimmung der Ausgangslänge wird die Länge nach 1, 4, 7, 14 und 28 Tagen mit einem Dehnungsmessgerät bestimmt. Über die Längenänderung bezogen auf die Ausgangslänge wird die Dehnung in ‰ berechnet und der Zeit gegenübergestellt. Zu Kontrollzwecken wurde auch die Massenänderung erfasst.

Wärmeleitfähigkeitsbestimmung

Zudem wird die Wärmeleitfähigkeit mithilfe eines Hot Disk TPS 1500 Messgerätes bestimmt und als wesentlicher Aspekt bei der Materialoptimierung berücksichtigt. Dabei handelt es sich um ein dynamisches Messsystem. Für die Prüfung wird ein Sensor mit einem Radius von 6,4 mm (Kapton 5501) zwischen zwei Probekörper desselben Materials gelegt und Wärme mit 50 mW über 80 s in die Probekörper eingebracht sowie der Abfluss der Wärme gemessen und daraus die Wärmeleitfähigkeit berechnet. Außerdem kann die Wärmespeicherkapazität des Materials bei der Messung bestimmt werden.

3 Misch- und Fördertechnik

3.1 Allgemeines

Für die durchzuführenden Versuche standen zwei Förderpumpen zur Verfügung: ein Schneckenextruder, der im Forschungsvorhaben ‚Additive Fertigung frei geformter Bauelemente durch numerisch gesteuerte Extrusion von Holzleichtbeton‘ (Zukunft Bau) entwickelt wurde (Winter et al. 2016), und eine in Absprache mit dem Industriepartner Knauf PFT gewählte Exzentrerschneckenpumpe (siehe Abbildung 10).



Abbildung 10: Förderpumpen: Schneckenextruder (links), PFT Swing L FC-400V Förderpumpe (hier mit aufgesetztem PFT Multimix 140 Plus Mischer) (rechts) (Fotos C. Matthäus)

Für den Einsatz der Exzentrerschneckenpumpe werden verhältnismäßig hohe Materialmengen (ca. 30 Liter) benötigt, um Versuche mit konstantem Materialfluss durchführen zu können. Mit dem Schneckenextruder können hingegen Versuche an deutlich geringeren Materialmengen (ca. 2,5 Liter) durchgeführt werden. Vergleichsuntersuchungen zwischen den beiden Pumpen zeigten ähnliche Ergebnisse bei der Förderung desselben Materials, sowohl hinsichtlich der Entwicklung von Blockaden, als auch hinsichtlich der Eigenschaften der ausgebrachten Raupen. Daher wurde für die anfängliche Materialentwicklung auf den Schneckenextruder zurückgegriffen und anschließend vielversprechende Leichtbetonrezepturen jeweils mit der Exzentrerschneckenpumpe getestet. Abschließende großformatige Versuche wurden unter Einsatz der Exzentrerschneckenpumpe durchgeführt. Zur Herstellung des Materials kam der mobile Chargenmischer PFT Multimix 140 Plus zum Einsatz (siehe Abbildung 10, rechts).

3.2 Schneckenextruder

Der für die Extrusion von Holzleichtbeton entwickelte Extruder besteht aus einer von einem Schrittmotor angetriebenen Förderschnecke (D = 54 mm) aus Stahl in einem Acrylglasgehäuse.

Über einen seitlich angebrachten Trichter wird das Druckmaterial eingefüllt und von der Schnecke nach unten zur Düse befördert. Das System ist modular aufgebaut, um verschiedene Konfigurationen zu testen. Mehrere Förderschnecken mit unterschiedlichen Steigungen und Progression stehen zur Verfügung sowie mehrere Düsen mit kreisförmiger Öffnung und verschiedenen Durchmessern von 17,5 mm – 25 mm. (Winter et al. 2016)

Durch den vergleichsweise kleinen Einfülltrichter lassen sich auch kleinere Chargen einer Mörtelmischung auf ihre Förderbarkeit untersuchen und die modulare Bauweise erlaubt eine schnelle Reinigung des Geräts auch bei starker Blockierung. Für aussagekräftige Versuche mit ausreichenden Materialmengen muss der Extruder jedoch ständig per Hand befüllt werden.

3.3 Exzentrerschneckenpumpe

Bei der Förderpumpe PFT Swing L FC-400V des Industriepartners Knauf PFT handelt es sich um eine universelle Förderpumpe für verschiedene Mörtelarten, Oberputze und Fließestriche. Das vorgemischte Material wird über eine im Einfüllbehälter befindlichen Förderschnecke zu der in Reihe geschalteten Exzentrerschneckenpumpe befördert. Diese pumpt die Mörtelmischung weiter durch einen Förderschlauch mit einem Innendurchmesser von 25 mm. Über ein integriertes Druckmanometer, sowie eine Digitalanzeige für die elektrische Leistungsaufnahme kann der Pumpprozess überwacht werden. Mit der eingesetzten Rotor-Stator Kombination der Exzentrerschneckenpumpe (Bezeichnung: Twister D 8-1,5) können laut Hersteller Materialmischungen mit einer maximalen Korngröße von 4 mm mit ca. 35 l/min gefördert werden. Angetrieben wird das Gerät über einen stufenlos einstellbaren 400 V Dreiphasenmotor. (Knauf PFT GmbH & Co. KG 2018a, 2018b)

Im Gegensatz zum Schneckenextruder, bei dem die Materialförderung unmittelbar vor der Extrusionsdüse stattfindet, sind bei der Exzentrerschneckenpumpe die Fördermaschine und die Düse voneinander getrennt. Von der stationären Pumpe wird das Material über einen Schlauch zur Düse befördert, welche durch den Manipulator über den Bauraum bewegt wird um den Beton abzulegen. Abbildung 11 zeigt das Düsensystem der Exzentrerschneckenpumpe montiert an den Arm eines Industrieroboters. Über den Schlauch (rechts oben im Bild) wird das Material zur Düse gepumpt. Ein pneumatisches Quetschventil (weißer Zylinder) erlaubt es, den Materialfluss gezielt zu stoppen und zu starten. Über ein gewinkeltes Rohrstück ist das Ventil mit der drehbaren Düsenkupplung verbunden, welche sich in exakter Verlängerung der sechsten Achse des Industrieroboters befindet (vgl. Kapitel 6). Die Drehkupplung ist über einen Zahnriemen mit der Roboterachse verbunden. So kann bei Bedarf die Orientierung der Düse direkt über die Robotersteuerung ausgerichtet werden, was vor allem bei profilierten Düsengeometrien wichtig ist. Um eine möglichst ungestörte Materialförderung zu gewährleisten haben alle Komponenten vom Schlauch bis zur Düse einen inneren Durchmesser von 25 mm.



Abbildung 11: Drehbares Düsensystem der Exzentrerschneckenpumpe, an Industrieroboter montiert (Foto D. Talke)

Bei der Förderung des Materials kann es aufgrund der Reibungskräfte innerhalb des Stators zu einer Aufheizung des Gerätes und damit zu einer Erwärmung des Betons kommen. Zu hohe Temperaturen wirken sich negativ auf die Materialeigenschaften aus und führen zu Fehlstellen im Druckbild. Wie in Kapitel 4.2 beschrieben wird, beeinflusst die Temperatur des Materials dessen Erstarrungsverhalten. Bei dem eingesetzten Material kann es insbesondere bei hohen Temperaturen aufgrund der veränderten Löslichkeit des Sulfatträgers damit zu Rissen in den Strängen kommen. Neben der Oberflächen- und Strangqualität (Entstehen von Fehlstellen, vgl. Kapitel 4.4) verschlechtert sich mit erhöhter Temperatur aufgrund von stärkeren Trocknungsprozessen auch der Schichtenverbund des Materials (vgl. Kapitel 4.5) und in der Folge das Risiko für Stabilitätsversagen (vgl. Kapitel 4.3).

Um dies zu verhindern wurde ein Pumpsystem installiert, welches den Stator kontinuierlich mit kaltem Wasser kühlt. Zur Überwachung wurde die Frischbetontemperatur der abgelegten Raupen während des Druckprozesses in regelmäßigen Abständen überprüft. Durch das installierte Kühlsystem konnte die Temperatur des extrudierten Betons auf 33 °C beschränkt werden.

4 Materialuntersuchungen

4.1 Entwicklung eines geeigneten Leichtbetons

In Zusammenarbeit mit dem Industriepartner HeidelbergCement wurde eine Versuchsmatrix zur Untersuchung der Eignung von unterschiedlichen Zementen für die Extrusion sowie der Zusammensetzung des Zements und weiterer Zusatzstoffe entwickelt. In einem ersten Schritt wurden Versuche an Zementleim mit den in Kapitel 2.3 aufgeführten Zementen und einem w/z-Wert von 0,30 durchgeführt. In einem zweiten Schritt wurde der feinste Zement (CEM C feiner als CEM B feiner als CEM A) mit 22 Vol.-% durch die unterschiedlichen Kalksteinmehle ersetzt (C+LP). Für beide Schritte wurde die Druckfestigkeit (DF) von geschalteten Prismen (vgl. Abbildung 12), das Erstarrungsverhalten sowie der Wasseranspruch der Mischungen gemäß DIN EN 196-1 und DIN EN 196-3 bestimmt (vgl. Tabelle 5).

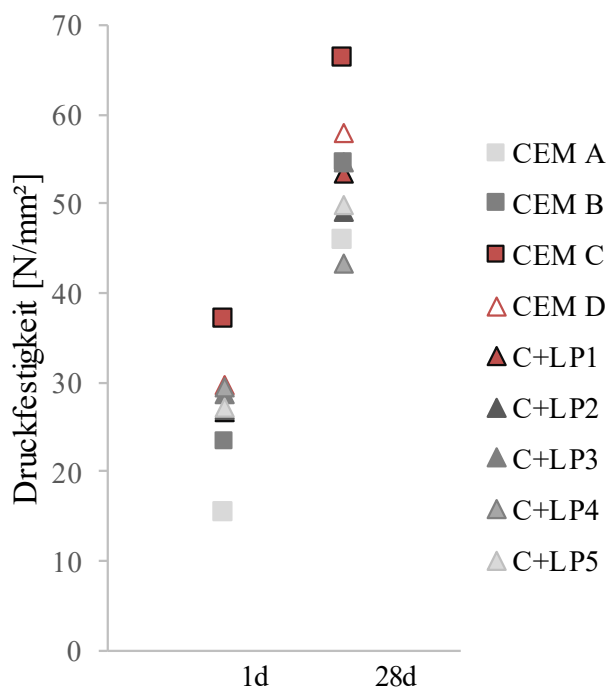


Abbildung 12: Druckfestigkeiten nach 1 und 28 Tagen für unterschiedliche Zement- und Kalksteinmehlkombinationen (Bild C. Matthäus)

Anhand der Ergebnisse aus Tabelle 5 ist ersichtlich, dass mit steigender Feinheit der Zemente der Wasseranspruch steigt und der Erstarrungsbeginn sich verringert. Mit steigender Feinheit der Zemente steigen auch die Frühfestigkeiten sowie die Druckfestigkeit im Alter von 28 Tagen, da die Reaktionsoberfläche größer ist. Die Festigkeitsprüfungen wurden dabei am Mörtel mit Normsand gemäß DIN EN 196-3 bestimmt.

Tabelle 5: Physikalische Eigenschaften gemäß DIN EN 196-1 und DIN EN 196-3

Mischung	Wasseranspruch [%]	Erstarrungsbeginn [min]	DF 1d [N/mm ²]	DF 28d [N/mm ²]
CEM A	27,0	150	15,3	45,8
CEM B	29,0	125	23,4	54,7
CEM C	33,5	95	36,9	66,2
C+LP1	31,0	125	26,7	53,4
C+LP2	34,5	105	26,9	49,2
C+LP3	35,5	95	28,6	54,7
C+LP4	35,5	90	29,4	43,2
C+LP5	28,5	85	27,2	49,9

Die Versuche mit dem feinen Zement CEM C und den verschiedenen Kalksteinmehlen zeigten deutlich den Einfluss der Kalksteinmehlqualität.

Des Weiteren wurden rheologische Untersuchungen (vgl. Kapitel 2.4) durchgeführt. Detailliertere Informationen dazu finden sich in (Matthäus et al. 2020a). Das Vorgehen und die Auswertung erfolgte wie in Kapitel 2.4 beschrieben auf Basis von Messungen an einem Rheometer mit Vane-in-cup Messeinsatz. Die Optimierung des Materials gestaltete sich als ein iterativer Prozess der Anpassung des Zementleims und der Untersuchungen am Mörtel. Die benötigten rheologischen Eigenschaften wurden dabei in realen Pumpversuchen verifiziert (vgl. Kapitel 4.2) und die Ergebnisse für die Anpassung des Leims herangezogen. Für die Extrusion eignen sich Materialien mit einer möglichst geringen scheinbaren Viskosität und hohen Druckfestigkeit, um sowohl die Pumpbarkeit als auch die Baubarkeit des Materials gewährleisten zu können. Die scheinbare Viskosität beeinflusst dabei deutlich die Pumpbarkeit (vgl. Kapitel 4.2) während die Fließgrenze und die Druckfestigkeit die Baubarkeit beeinflussen (vgl. Kapitel 4.3) (Matthäus et al. 2020a). Abbildung 13 stellt die scheinbare Viskosität der betrachteten Leime sowie deren Druckfestigkeit im Alter von 28 Tagen dar. Die Zielsetzung war Leime zu wählen, die eine möglichst geringe scheinbare Viskosität bei hoher Druckfestigkeit aufweisen. In einem ersten Schritt wurden dabei die reinen Zemente (CEM A, CEM B und CEM C) verglichen wobei der feinste Zement CEM C die besten Ergebnisse erzielte. Anschließend wurde dieser Zement anteilig durch verschiedene Kalksteinmehle ersetzt, wobei das relativ grobe Kalksteinmehl LP1 die besten Ergebnisse lieferte (vgl. Abbildung 13). Die in Abbildung 13 markierten Mischungen eignen sich daher am besten von den untersuchten Materialien für die Extrusion.

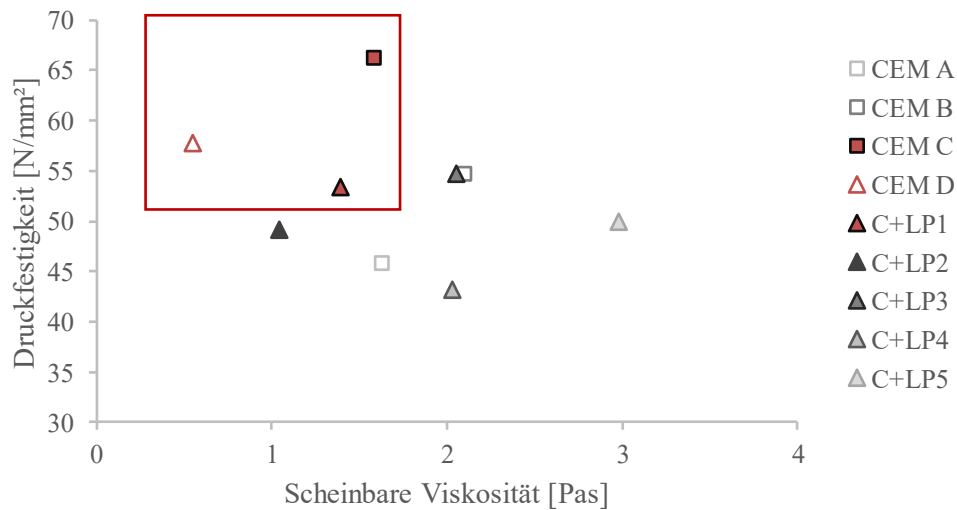


Abbildung 13: Gegenüberstellung von Druckfestigkeit und scheinbarer Viskosität der betrachteten Materialien (Matthäus et al. 2020a)

Auf Basis der Versuche wurde ein Spezialzement (hier als CEM D bezeichnet) entwickelt und werkseitig hergestellt. Bei der Entwicklung des Spezialzements wurden die Prüfungen der Zementkennwerte, der Kompositionen aus Zement und Kalksteinmehlen sowie die rheologischen Untersuchungen bewertet. Ziel war es, den Zement den rheologischen Eigenschaften für den 3D-Extrusionsdruck und deren Rahmenbedingungen optimal einzustellen. Maßgebend waren neben den Festigkeitswerten nach einem Tag und 28 Tagen, dem Erstarrungsbeginn und dem Wasseranspruch vor allem die rheologischen Parameter der Fließgrenze und der plastischen Viskosität.

Die Untersuchungen zeigten, dass die Kombination aus einem sehr feinen und reaktiven Zement mit einem verhältnismäßig groben Kalksteinmehr sich sehr gut eignet. Dies ist zum einen auf die gute Partikelgrößenverteilung zurückzuführen, die den Hohlraum zwischen den Partikeln minimiert, den Anspruch an Leimgehalt somit reduziert und ein dichteres Zementsteingefüge einstellt.

Zu berücksichtigen ist auch der Temperaturbereich des Leichtmörtels während dem 3D-Druckprozess. Aufgrund der hohen Reibung im Pump- und Förderprozess und der erhöhten Wärmedämmeigenschaften der Leichtzuschläge, stellte sich bei längeren Druckzeiten eine erhöhte Frischmörteltemperatur von 30 °C bis 40 °C ein (vgl. Kapitel 4.2 und 3.3). Hier ist zu beachten, dass die Löslichkeit der Sulfatphasen im Zement stark von der Temperatur anhängig ist. Mit steigenden Temperaturen nimmt die Löslichkeit der Sulfatphasen ab. Da der Sulfatgehalt im Zement die Hydratation und die Erstarrung des Zementleims reguliert, kommt es zu einer früheren Erstarrung des Leichtmörtels bei hohen Temperaturen.

Der Spezialzement CEM D wurde für die Fertigung der Demonstratoren in Kapitel 8 verwendet. Er zeigte insgesamt die niedrigste scheinbare Viskosität bei relativ hoher Druckfestigkeit (vgl. Abbildung 13).

4.2 Pumpbarkeit

Einer der zwei wesentlichen Faktoren für die Extrudierbarkeit ist die Pumpbarkeit des Materials. In Bezug auf die Pumpbarkeit des Betons (vgl. Phase 1 in Kapitel 2.2) sind die rheologischen Eigenschaften des Frischbetons maßgebend. Ziel der Untersuchungen ist es, die Pumpbarkeit und damit die Extrudierbarkeit des Leichtbetons beurteilen zu können.

Der gewählte Prozess (Art der Förderung) bestimmt maßgeblich die benötigten Materialeigenschaften. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wird der Fokus auf das Pumpen des Leichtbetons mit den in den Kapiteln 2.4 und 3.3 vorgestellten Geräten gelegt. Die Pumpbarkeit des Materials stellt keinen physikalisch klar definierten und messbaren Parameter dar, sondern besteht aus einer Vielzahl verschiedener rheologischer Komponenten (Abebe 2017; Secieru 2018). Die Pumpbarkeit mehrerer Materialien kann in erster Linie über den im Prozess auftretenden Druck und die damit einhergehende Förderrate (Volumen des geförderten Materials pro Zeit) verglichen werden.

In (Matthäus et al. 2020a; Matthäus et al. 2019) konnte gezeigt werden, dass die scheinbare Viskosität des Materials einen großen Einfluss auf dessen Pumpbarkeit hat. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei einer geringen Viskosität eine Partikelmigration im Schlauch stattfinden kann. Die größeren Partikel wandern in Richtung Schlauchmitte, wodurch sich am Rand eine Schmierschicht (Lubricating layer) ausbilden kann. Dadurch wird die Reibung an der Wand des Schlauches reduziert. Weitere Informationen dazu finden sich z.B. in (Secieru 2018; Abebe 2017; Jacobsen et al. 2008; Schutter und Feys 2016). In Abbildung 14 wird das Verhalten des Betons im Schlauch schematisch dargestellt. An der Wand des Schlauches bildet sich eine Scherzone (Shear flow) aus, während der Beton in der Mitte über Pfropfenförderung (Plug flow) bewegt wird.

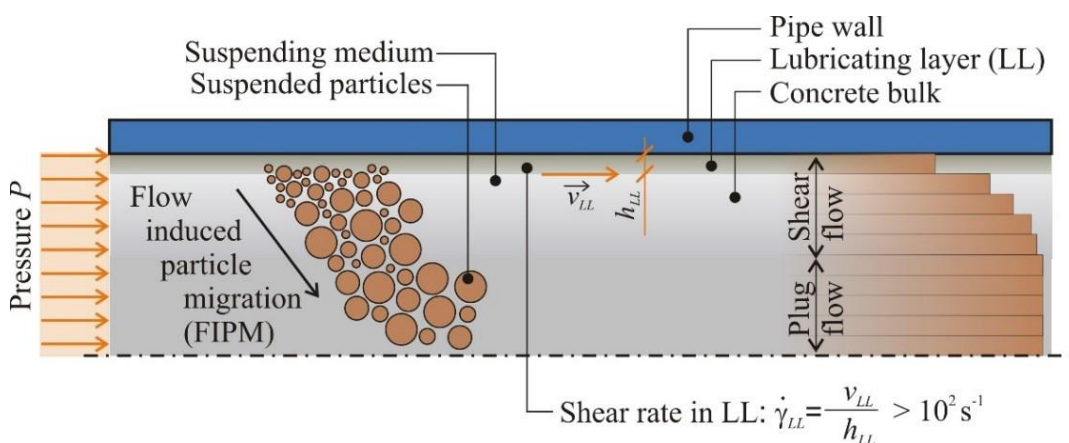


Abbildung 14: Verhalten von Beton in einem Schlauch während des Pumpvorgangs (Secieru 2017)

Umso höher der Wasser-Bindemittel-Wert ist, desto geringer ist die scheinbare Viskosität und desto leichter lässt sich das Material fördern (Matthäus et al. 2019). Ebenso nimmt die Pumpbarkeit mit dem Kalksteinmehlgehalt zu (Matthäus et al. 2020a; Matthäus et al. 2019).

Beim Pumpen von Leichtbeton spielen die Eigenschaften der Leichtzuschläge eine maßgebliche Rolle. Umso geringer die Rohdichte der Leichtzuschläge, desto höher ist ihre Porosität und desto höher ist in der Regel deren Wasseraufnahme (Bauer und Poppy 1974). Zudem nimmt die Wasseraufnahme von Leichtzuschlägen mit erhöhtem Druck und Beanspruchung zu (Bauer und Poppy 1974). Um die Veränderung des Leichtbetons während des Pumpens zu reduzieren, wurden die Leichtzuschläge vor dem Mischprozess fünf Minuten vorgesättigt.

Das Verhältnis von Leim und Zuschlägen beeinflusste sowohl die Pumpbarkeit, als auch die Wärmeleitfähigkeit des Materials. Mit einer höheren Leimmenge war das Material leichter pumpbar, da sich leichter eine Schmierschicht ausbilden kann. Allerdings stieg die Wärmeleitfähigkeit, da die Rohdichte des Leims deutlich höher als die der Leichtzuschläge ist (vgl. Kapitel 4.6). Mit hohem Leimgehalt nimmt auch die Menge an Zement zu, was aus ökologischen Gesichtspunkten nicht angestrebt wurde.

Durch ein digitales Druckmanometer kann durchgehend der reale Förderdruck an der Pumpe abgelesen werden und damit ein qualitativer Vergleich der Materialmischungen erfolgen. Somit kann beurteilt werden, welche Mischungen mehr Pumpenergie benötigen und sich damit schwerer fördern lassen. In den in Abbildung 11 dargestellten Leichtbetonrezepturen wurde der Wassergehalt und das Leimvolumen konstant gelassen und nur der Gehalt an Kalksteinmehl variiert. Der Gesamtwasser-Bindemittel-Wert beträgt $w_t/b = 0,50$ inklusive Sättigungswasser. Setzt man die Werte des Herstellers für die Wasseraufnahme der Leichtzuschläge an, so resultiert für die verwendeten Rezepturen ein Wasser-Bindemittelwert von $w/b = 0,38$. Das Verhältnis aus Leim und Leichtzuschläge lag bei 47 Vol.-% Leim und 53 Vol.-% Leichtzuschläge.

In Abbildung 15 ist zu sehen, dass der Druck und die Förderrate mit zunehmender Pumpgeschwindigkeit zunehmen. Zudem nimmt der Druck mit höherem Kalksteinmehlgehalt ab während die Förderrate konstant bleibt. Es ist anzumerken, dass sich beim Pumpversuch mit der Mischung ohne Kalksteinmehl (CEM C) auf der ersten Geschwindigkeitsstufe noch kein konstanter Druck eingestellt hatte bevor auf die nächsthöhere Pumpgeschwindigkeit hochgeschaltet wurde. Es ist daher davon auszugehen, dass der Druck beim Pumpen von CEM C mit 7,3 Hz höher ist als in Abbildung 15 dargestellt.

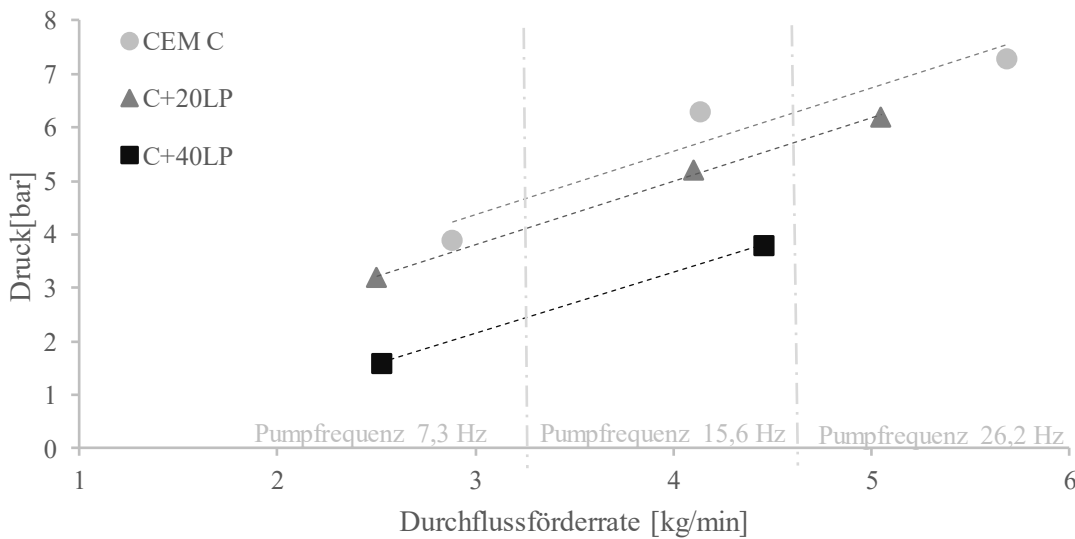


Abbildung 15: Druck und Durchflussrate beim Pumpen von Materialien ohne (CEM C) und bei Ersatz des Zements mit 20 Vol.-% (C+20LP) bzw. 40 Vol.-% (C+40LP) Kalksteinmehl (Matthäus et al. 2020a)

Durch die Erhöhung des Kalksteinmehlgehaltes kann der Druck beim Pumpen von Leichtbeton reduziert werden. Dies ist auf die oben beschriebene Einstellung einer Schmierschicht zurückzuführen. Der Zusammenhang zwischen Druck und Kalksteinmehlgehalt ist in Abbildung 16 (links) für eine Pumpfrequenz von 15,6 Hz dargestellt.

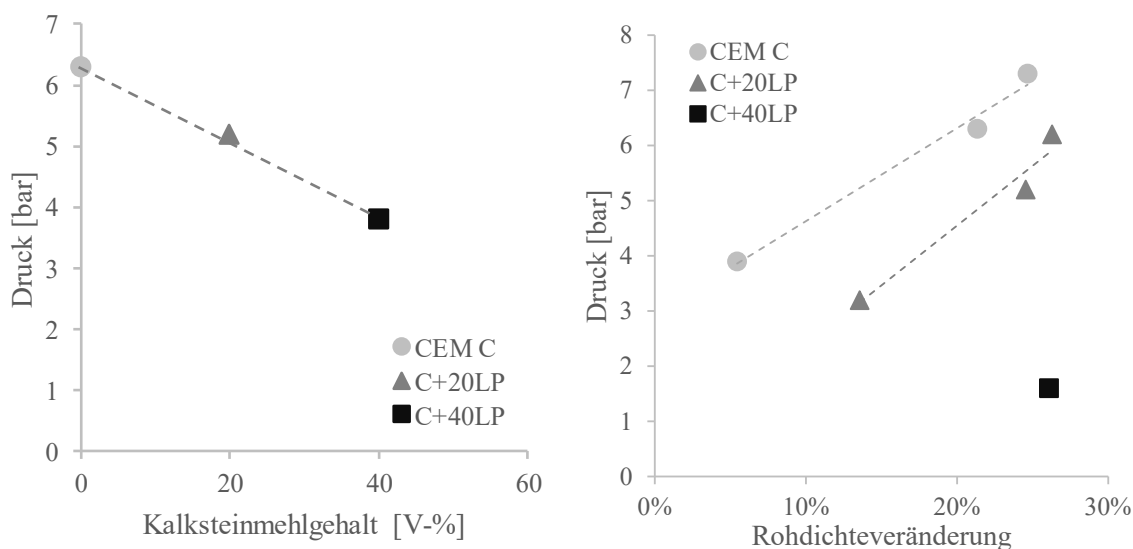


Abbildung 16: Verhältnis von Druck und Kalksteinmehlgehalt (links) sowie zwischen Druck und Rohdichteerhöhung während des Pumpens (rechts) nach (Matthäus et al. 2020a)

Mit steigendem Druck (zunehmender Pumpgeschwindigkeit) erhöht sich zudem die Rohdichte (vgl. Abbildung 16, rechts). Pro Rezeptur nimmt dabei der Druck mit steigenden Frequenzen (7,3 Hz, 15,6 Hz und 26,2 Hz) zu, was mit einer steigenden Rohdichteveränderung einhergeht. Die

Rohdichteveränderung ist dabei umso stärker, desto höher der Anteil an Kalksteinmehl ist (vgl. Abbildung 16, rechts). Die Auswirkungen der Rohdichteerhöhung werden in Kapitel 4.6 diskutiert.

Für die Extrusion der Demonstratoren (Referenzmischung) wurde ein Gehalt von 20 Vol.-% Kalksteinmehl gewählt, um das Entstehen von Blockaden während des Pumpens zu vermeiden und gleichzeitig die Rohdichteveränderung zu beschränken. Der Druck korreliert auch bei längeren Pumpzeiten mit der gefahrenen Pumpfrequenz. Gleichzeitig wurde eine Erhöhung der Temperatur mit zunehmendem Druck festgestellt (siehe Abbildung 17 am Beispiel der Referenzmischung). Dies kann mit der beschriebenen Rohdichteveränderung und darauf basierend mit der höheren Reibung im Prozess einhergehen. Bei längeren Pumpzeiten, z.B. während der Fertigung der Demonstratoren in Kapitel 8, wurde ein starker Temperaturanstieg aufgrund von Reibung im Rotor-Stator-System der Pumpe (Details dazu in Kapitel 3.3) festgestellt, der sich auf die Temperatur des Materials auswirkte. Sobald die Temperaturen des Frischbetons über 35 °C anstiegen, ging dies mit einer verstärkten Rissigkeit der Stränge nach dem Ausbringen sowie einem höheren Risiko für Verstopfungen im Schlauch einher. Dies ist auf die veränderte Löslichkeit des Sulfatträgers über 35 °C zurückzuführen. Sulfat fungiert als Erstarrungsregler im Beton und wird für den kontrollierten Hydratationsverlauf eingesetzt. Bei veränderter Löslichkeit kann es daher zu vorzeitigem Erstarren kommen und die Verarbeitbarkeit des Materials beeinträchtigen.

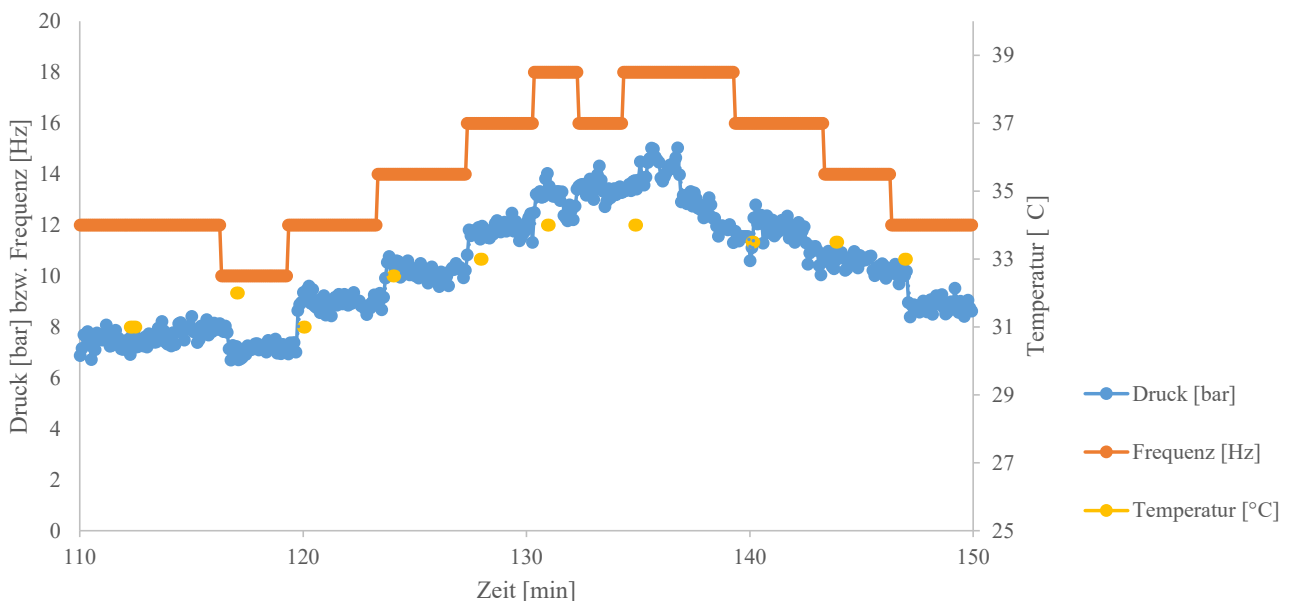


Abbildung 17: Veränderung des Drucks und der Temperatur mit variierender Pumpfrequenz (Bild C. Matthäus)

Abschließend kann man sagen, dass sich die Pumpgeschwindigkeit deutlich auf den im System entstehenden Druck und damit auf das Materialverhalten auswirkt. Bei der Festlegung der Druckparameter muss dies berücksichtigt werden.

4.3 Baubarkeit

Für die Tragfähigkeit des Bauteils sind folgende vier Parameter relevant:

- Festigkeitsentwicklung des Frischbetons für Lastabtrag während des Fertigungsprozesses
- Formtreue (Verformungsbegrenzung)
- Schichtenverbund (Vermeidung von Sollbruchstellen)
- Festbetoneigenschaften für Lastabtrag im ausgehärteten Zustand.

Die sogenannte Baubarkeit beschreibt dabei das Vermögen einer Schicht sein Eigengewicht sowie die Last aus nachfolgenden Schichten ohne Versagen während des Fertigungsprozesses abzutragen. Sie ist neben der Pumpbarkeit der wichtigste Faktor zur Sicherstellung von Extrudierbarkeit. Nach der Extrusion des Materials durch die Düse und vor dem Erstarren (Phasen 3 und 4, vgl. Kapitel 2.2) sind die unmittelbare Belastbarkeit einer ausgebrachten Schicht und die Erhöhung der Grünstandfestigkeit über die Zeit von wesentlicher Bedeutung.

Wie schnell ein Bauteil gedruckt werden kann, hängt stark von den rheologischen Eigenschaften des Materials ab. Direkt beim Ausbringen ist die Höhe der Fließgrenze entscheidend. Ist sie zu hoch, so kommt es zum sogenannten „Layering“, da sich die Schichten nicht ausreichend verbinden (vgl. Schichtenverbund in Kapitel 4.5). Ist die Fließgrenze zu niedrig, so führt dies dazu, dass das Material sich direkt beim Ausbringen verformt und nicht die gewünschten Stränge entstehen bzw. die Stränge sich durch die Auflast der nachfolgenden Schichten verformen (vgl. Formtreue in Kapitel 4.4) oder sogar versagen.

In Bezug auf das Versagen werden zwei wesentliche Mechanismen unterschieden (vgl. Abbildung 18): plastisches Versagen der untersten Schicht und Stabilitätsversagen durch Beulen („Buckling“). Das Beulen ist stark von der Geometrie des Bauteils abhängig. Für weitere Informationen wird auf die Arbeiten von (Suiker 2018; Wolfs und Suiker 2019) verwiesen. Beim plastischen Versagen muss zur Bewertung gegenübergestellt werden, welche Schubspannung die unterste Schicht über die Zeit aufnehmen kann und welche Schubspannungen aus den darüber liegenden Schichten über die Zeit induziert werden.

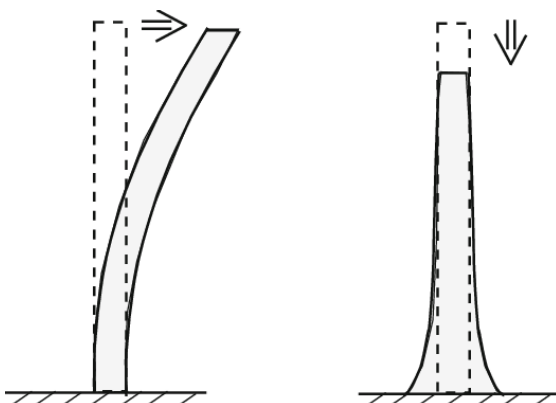


Abbildung 18: Stabilitätsversagen (links) und Plastisches Versagen (rechts) (Wolfs und Suiker 2019)

Die erreichbare Druckgeschwindigkeit wird dabei maßgeblich davon beeinflusst, wie schnell sich im Material eine Struktur aufbaut, so dass das Gewicht weiterer Schichten abgetragen werden kann. Umso höher die Druckgeschwindigkeit ist und umso schneller (abhängig von der Geometrie) die nächsten Schichten abgelegt werden, desto früher versagt das Bauteil. Gleichzeitig verbessert sich der Schichtverbund zwischen den einzelnen Schichten, desto kürzer das Fenster zwischen dem Ausbringen einzelner Schichten ist (vergleiche Kapitel 4.5). Für die optimale Druckgeschwindigkeit müssen daher Berechnungen durchgeführt werden, in welche die aufnehmbaren gegenüber den aufgetragenen Schubspannungen eingehen (Roussel 2018; Perrot et al. 2016; Reiter et al. 2018; Wolfs et al. 2018). Nach (Roussel 2018) muss die unterste Schicht eine ausreichende Fließgrenze τ_0 aufweisen, um ihr Eigengewicht und in Kombination mit dem Strukturaufbau über die Zeit A_{thix} die Last aus nachfolgenden Schichten abtragen zu können. Die induzierte Spannung aus den nachfolgenden Schichten setzt sich aus der Rohdichte ρ , der Erdanziehung g , der Höhe in Abhängigkeit der Zeit $h(t)$ sowie einem Geometriefaktor für die Stranggeometrie α_{geom} zusammen. Die aufnehmbare Schubspannung muss dementsprechend größer als die eingebrachte Schubspannung sein

$$\tau_0 + A_{thix}t \geq \rho gh(t)/\alpha_{geom},$$

um ein plastisches Versagen der untersten Schicht zu verhindern.

Beim Leichtbeton reduziert sich die eingebrachte Schubspannung aus den nachfolgenden Schichten gegenüber Normalbeton, da die Rohdichte deutlich geringer ist als bei Normalbeton. Der geringere Lasteintrag verringert damit die Anforderungen an die unterste Schicht und erleichtert die Baubarkeit. Um die gleiche Druckgeschwindigkeit zu erreichen, muss das Material deutlich weniger innere Struktur pro Zeit aufbauen als ein Normalbeton.

Durch die Ablage der Schichten nacheinander, entsteht eine stufenweise Erhöhung der Belastung des bereits extrudierten Materials. In Abbildung 19 wird die stufenweise Erhöhung der real eingebrachten Schubspannung $\sigma_{v,real}$ in blau dargestellt. Diese kann auf der sicheren Seite liegend linear über die oben dargestellte Formel vereinfacht werden ($\sigma_{v,berechnet}$). Dem gegenüber steht die aufnehmbare Schubspannung σ_c , die über die gemessene Fließgrenze des Materials sowie die Veränderung der statischen Fließgrenze über die Zeit nach obiger Formel berechnet wird und den Widerstand des Materials beschreibt.

Um ein Versagen des Materials zu verhindern, muss die Zeit zwischen dem Ausbringen der einzelnen Schichten möglichst lang sein. Dies ist allerdings konträr zu den Anforderungen an einen guten Schichtenverbund (vgl. Kapitel 4.5) sowie eine wirtschaftliche Fertigung mit hoher Druckgeschwindigkeit.

In Abbildung 19 ist einerseits die Kurve für einen Lasteintrag von einer Schicht pro Minute (Lasteintrag 60s) sowie andererseits die Kurve für den Lasteintrag dargestellt, wenn alle 30s eine neue Schicht aufgebracht wird (Lasteintrag 30s). Letztere schneidet die Kurve der aufnehmbaren Schubspannung. Damit kommt es zum Versagen der Geometrie, da die unterste Schicht noch nicht in der Lage die Lasten aus den nachfolgenden Schichten aufzunehmen. Der Moment des

entsprechenden plastischen Versagens ist in Abbildung 20 zu erkennen. Durch die Verformung der untersten Schicht versagt die Geometrie zur berechneten Höhe.

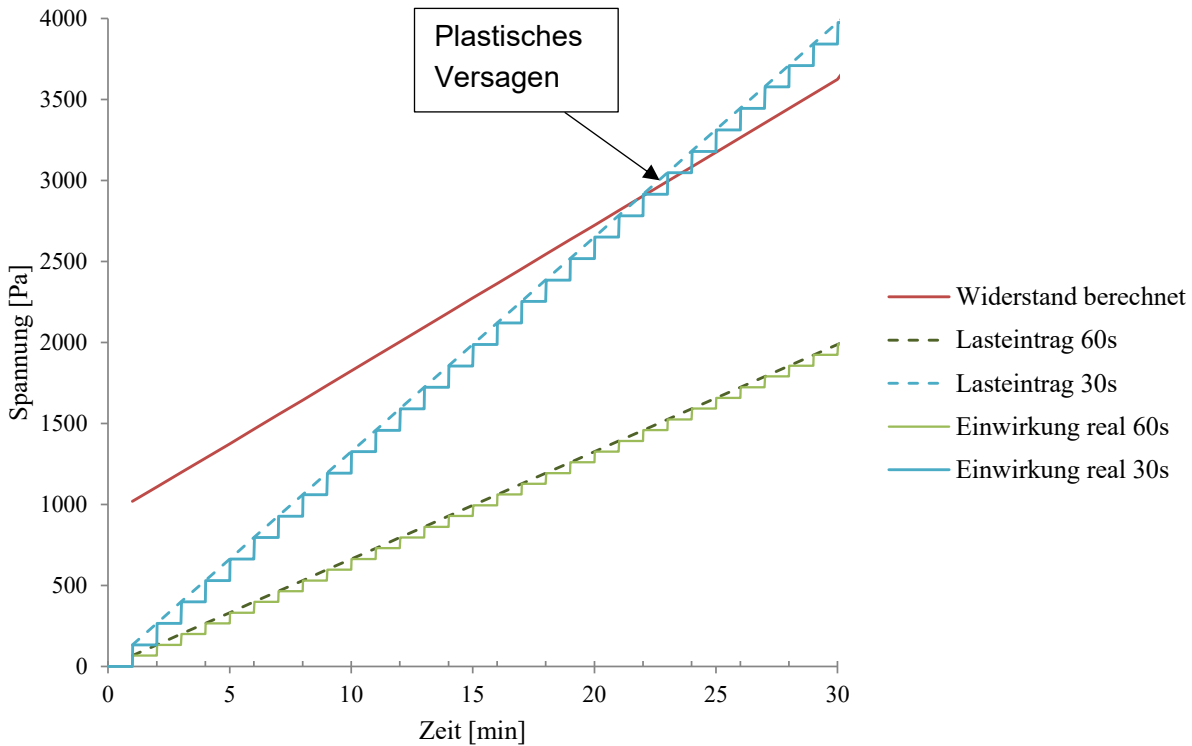


Abbildung 19: Aufnehmbare Schubspannung der untersten Schicht sowie einwirkende Schubspannung aus nachfolgenden Schichten über die Zeit für eine Druckgeschwindigkeit von 30s/Schicht und 60s/Schicht (Bild C. Matthäus)



Abbildung 20: Plastisches Versagen der untersten Schicht (links im Bild) bei einer Druckgeschwindigkeit von 30s/Schicht (Foto C. Matthäus)

Umso schlanker eine Geometrie ist, desto eher beult sie aus. Das Stabilitätsversagen tritt bei einer Höhe $H_B \approx \left(\frac{2E\delta^2}{3\rho g}\right)^{\frac{1}{3}}$ ein (Roussel 2018; Wolfs et al. 2018), wobei δ die wirkende Breite der Geometrie bestimmt und E das Elastizitätsmodul. Die Stranggeometrie selbst, die Verbindung der einzelnen Stränge sowie die Geometrie als Ganzes (vgl. Kapitel 5.2 und 7.2) haben damit einen großen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit des Stabilitätsversagens. Steht jeder Strang für sich selbst, so tendiert die resultierende schlanke Geometrie deutlich früher zum Versagen als wenn mehrere Schichten zusammenwirken oder die gesamte Bauteilbreite angesetzt werden kann. Das Stabilitätsversagen kann in jeder Schicht auftreten. Ein Beispiel ist in Abbildung 21 dargestellt, wo eine längliche Geometrie ohne Verbindung zwischen den Strängen ausgeführt wurde und es daher zum Stabilitätsversagen kam.

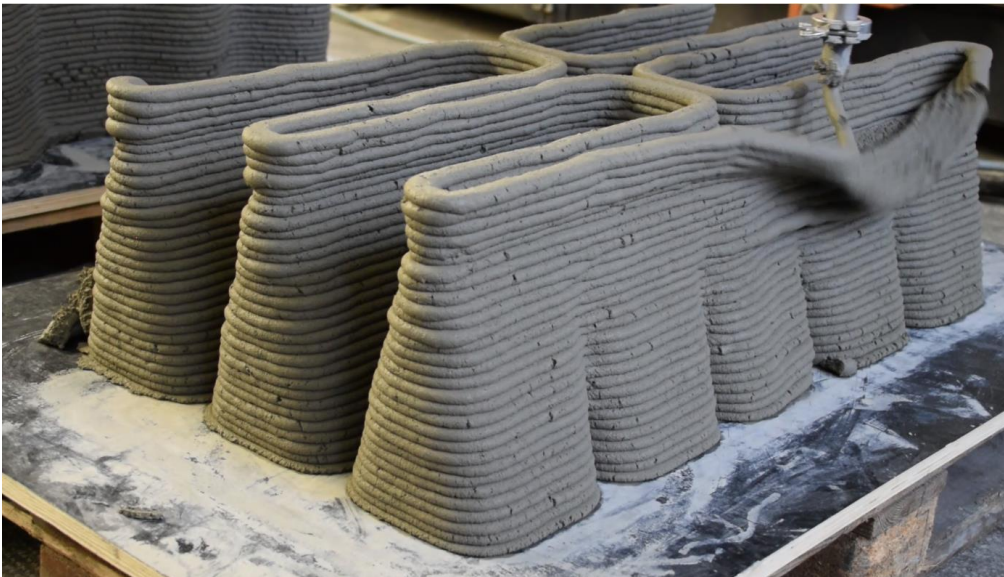


Abbildung 21: Stabilitätsversagen einer einzeln stehenden Schicht (Foto C. Matthäus)

In Übereinstimmung mit der Literatur, u.a. (Cyr et al. 2000; Chandra und Björnström 2002; Ramachandran 2010), wurde festgestellt, dass die Erhöhung des w/z-Wertes sowie die Erhöhung des Fließmittelgehalts jeweils zur Verringerung der Fließgrenze führen und damit zu geringeren aufnehmbaren Lasten. Dies bestätigt die konträren Anforderungen zur Pumpbarkeit, bei der Mischungen mit hohem w/z-Wert aufgrund der geringen Viskosität leichter förderbar sind.

Die aufnehmbare Schubspannung und damit ebenso die Druckgeschwindigkeit kann durch Erhöhung des inneren Strukturaufbaus über die Zeit deutlich angehoben werden, ohne das Risiko eines Versagens zu erhöhen. Bei konstanter Druckgeschwindigkeit ist die Wahrscheinlichkeit für ein Versagen umso geringer, desto schneller der Strukturaufbau stattfindet. Wie in (Matthäus et al. 2020b) beschrieben, kann dies durch den Einsatz eines Thixotropiermittels gewährleistet werden. Dieses erhöht den Anstieg der statischen Fließgrenze über die Zeit – die Strukturaufbaurrate. Durch Einsatz eines Thixotropiermittels konnte der Strukturaufbau in den ersten 15 Minuten verdoppelt werden (Matthäus et al. 2020b). Bei der Referenzmischung wurden Strukturaufbauraten von 1,4-2,0 Pa/s innerhalb der ersten 15 Minuten gemessen. Beim Einsatz von Thixotropiermitteln muss

beachtet werden, dass es unter Scherung zu einer Verflüssigung des Materials kommt und somit die Fließgrenze beim Ausbringen an der Düse niedriger sein kann als beim Material ohne Thixotropiermittel. Zudem beeinflusst das Thixotropiermittel die Pumpbarkeit – indem es unter Scherung die Viskosität reduziert, kann das Material tendenziell leichter gepumpt werden. Allerdings kann es zum Strukturaufbau im Pumpbehälter und damit zu unzureichender Förderung des Materials kommen (vgl. Kapitel 3.3).

Ein weiterer Faktor ist die Temperatur des Materials. Sie beeinflusst die Hydratationsgeschwindigkeit des Leichtbetons und damit auch den Strukturaufbau. Bei einer deutlichen Erhöhung der Temperatur, steigt damit die Gefahr des „Layering“ sowie der Rissigkeit, während bei sehr geringen Temperaturen der Strukturaufbau nicht ausreichend für den Lastabtrag der darüber liegenden Schichten sein kann und es damit früher zum plastischen Versagen oder Stabilitätsversagen kommt. Die Temperatur, die durch den Prozess der Förderung entsteht, sollte durch die Kühlung des Materials selbst ausgeglichen werden, sodass eine möglichst konstante Temperatur (in dem hier betrachteten Fall zwischen 28 °C und 33°C) des Materials nach der Extrusion besteht.

4.4 Formtreue

Die Beurteilung der Baubarkeit geht in die Beurteilung der Formtreue über, da die Formtreue maßgeblich von den auftretenden Verformungen durch die während des Fertigungsprozesses auftretenden Lasten abhängig ist. Um eine möglichst gute Formtreue zu erhalten, müssen unerwünschte Verformungen vermieden werden und dementsprechend die Grünstandfestigkeit zur Aufnahme der abzutragenden Lasten möglichst hoch sein bzw. direkt nach der Fertigung stark ansteigen.

Zur Beurteilung der Formtreue wird neben den in Kapitel 4.3 zur Baubarkeit dargestellten Betrachtungen die Verformung des Materials über die Zeit betrachtet. Zudem kann bei den extrudierten Geometrien die Übereinstimmung mit der Soll-Geometrie kontrolliert werden.

Die Formtreue kann mithilfe des in Kapitel 2.4 beschriebenen Verfahren beurteilt werden. Dazu werden die zylindrischen Probekörper mit Normalkraft belastet (siehe Abbildung 22). Der Erstarrungsbeginn nach Vicat liegt bei der Referenzmischung bei circa 140 Minuten. Vor dem Pumpen verformt sich das Material 2 Minuten nach Herstellung der Probekörper bei einer Last von 0,6 N (entspricht circa 2,7 Schichten) um 1 mm. Nach 10 Minuten verformt sich der Zylinder bei 2 N (entspricht 9 Schichten) um 1 mm. Nach dem Pumpen ist die Fließgrenze höher (Matthäus et al. 2020a). Eine Verformung von 1 mm wird hier nach 10 Minuten bei einer Auflast von 3,7 N erreicht – dies entspricht circa 17 Schichten. Die aufnehmbare Auflast steigt mit dem Alter der Versuchskörper allerdings nur geringfügig an. Nach 30 Minuten können 3,9 N aufgenommen werden bis es zu einer Verformung von 1 mm kommt. Dies entspricht einer Schichtanzahl von 18 Schichten. Der geringe Anstieg könnte darauf zurückzuführen sein, dass das Material beim Ausschalen geschert wird und damit ein Teil der innerlich aufgebauten Struktur zerstört wird. Dies führt zu einer Überschätzung der Verformung auf Basis der Auflastmessungen. Die Werte können allerdings als Maximalverformung angesehen werden.

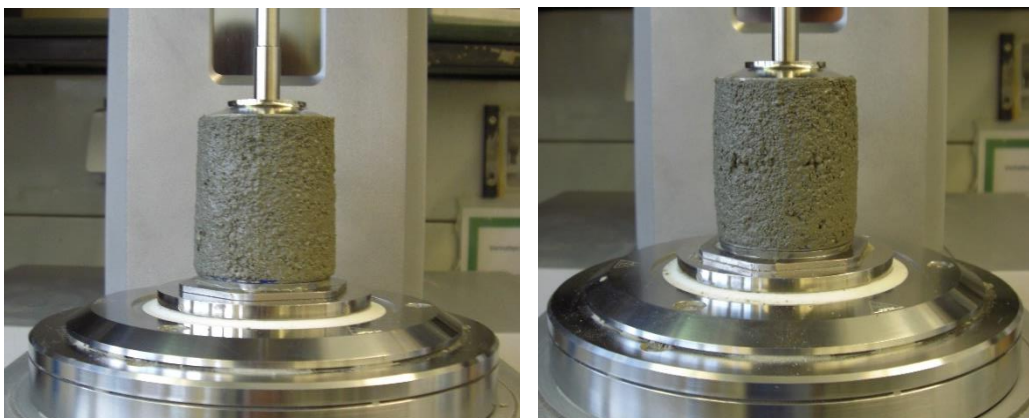


Abbildung 22: Leichtbetonzylinder während der Belastung (Fotos C. Matthäus)

Des Weiteren wurde die Formtreue direkt an den 3D-gedruckten Elementen untersucht. Bei Wahl des abstreifenden Schichtauftrages (vgl. Kapitel 5.2), werden mögliche Verformungen durch die nächsten Schichten direkt ausgeglichen, da die Höhe des Manipulators immer exakt ist und je nach

Abstand der Düse von der vorherigen Schicht entsprechend viel Material ausgebracht wird. Misst man die Höhe der Schichten im unteren Bereich und im oberen Bereich bei den Demonstratoren, so sind keine Höhenunterschiede zwischen den Schichten in einer Größenordnung von ± 1 mm zu erkennen. Die Auflastversuche überschätzen daher die reale Verformung. Dies ist neben der angesprochenen Zerstörung des inneren Strukturaufbaus während des Ausschalens beim Auflastversuch voraussichtlich auch auf die im Prozess entstehenden Temperaturen und den damit einhergehenden schnelleren Strukturaufbau (vgl. Kapitel 4.3) sowie die Querdehnungs-behinderung in den 3D-gedruckten Schichten zurückzuführen. Für den Vergleich verschiedener Rezepturen untereinander und damit für die Optimierung des Materials für eine gute Formtreue sind die Auflastversuche allerdings gut geeignet, da die maximale Verformung deutlich dargestellt werden kann. Die Höhe der Probekörper zeigte einen deutlichen Einfluss bei den Auflastversuchen und wäre interessant in zukünftigen Forschungen näher zu betrachten, um die Verformung der Schichten exakter vorherzusagen.

Die Formfreiheit und Präzision des Bauteils hängt zudem auch von weiteren Kriterien wie der Oberflächenqualität ab. Es werden daher u.a. auch qualitative Kriterien für den Vergleich zwischen verschiedenen Leichtbetonrezepturen herangezogen, wie z.B. eine visuelle Beurteilung der Oberflächenqualität und der Eckenausbildung (vgl. Abbildung 23 und Abbildung 24). Insbesondere soll die Entstehung von Rissen sowie das Abreißen der Stränge vermieden werden (vgl. Abbildung 23 Mitte). Durch den Einsatz eines Luftporenstabilisierers konnten z.B. die auftretenden Risse beziehungsweise das Abreißen der Stränge beim Ausbringen deutlich reduziert werden (vgl. Abbildung 24). Gleichzeitig darf die Rezeptur allerdings auch nicht so fließfähig sein, dass es bereits beim Ablegen zur Verformung der Stränge kommt (vgl. Abbildung 23 rechts).



Abbildung 23: Oberflächenqualität beim Fertigungsprozess, links: oberflächliche Risse, Mitte: Abreißen der Stränge, rechts: Verformung von zu fließfähigem Material (Fotos C. Matthäus)



Abbildung 24: Zylinder auf Basis der selben Mischung ohne (links) und mit Luftporenstabilisierer (rechts). Durch den Einsatz des Luftporenstabilisierers konnten Risse in den Strängen signifikant reduziert werden (Fotos C. Matthäus)

4.5 Schichtenverbund

Für einen guten Schichtenverbund ist es maßgeblich, dass sich das Material der aufeinanderliegenden Schichten physikalisch-chemisch gut miteinander verbindet. Um ein möglichst homogenes Material und damit einheitliche Eigenschaften über das gesamte Bauteil zu erhalten, wäre es am besten, wenn das Material möglichst gleichzeitig abgelegt wird und die Hydratationsprozesse überall gleichmäßig ablaufen. Da dies aufgrund der in Kapitel 4.3 erläuterten Anforderungen an die Baubarkeit nicht möglich ist, muss untersucht werden, ab welcher Zeit zwischen dem Ausbringen von zwei Schichten der Schichtenverbund abnimmt. Dazu wurde eine rechteckige Geometrie aus 20 Schichten (vgl. Kapitel 2.4) mit unterschiedlichen Zeitabständen (2 min, 5 min und 10 min) zwischen den Schichten aus der Referenzmischung gefertigt. Aus den Probekörpern wurden jeweils horizontal und vertikal Prismen zur Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeit herausgesägt (vgl. Kapitel 2.4). Bis zur Prüfung nach 7 Tagen lagerten die Probekörper bei 20 ± 1 °C und $65\pm 5\%$ relativer Luftfeuchte.

Die Biegezugfestigkeit der horizontal herausgesägten Prismen bei den Versuchen mit 2 Minuten zwischen den Schichten und einem abstreifenden Schichtauftrag war mit $3,4\pm 0,1$ N/mm² deutlich höher als die Biegezugfestigkeit der geschalteten und verdichteten Prismen aus demselben Material mit $2,2\pm 0,5$ N/mm². Die Biegezugfestigkeit der vertikal herausgesägten Prismen lag mit $2,9\pm 0,5$ N/mm² nur geringfügig unter den horizontal entnommenen Proben. Die Druckfestigkeit lag

mehr oder weniger unabhängig von der Herstellung und Ausrichtung bei $24 \pm 4 \text{ N/mm}^2$. Bei einem Zeitabstand von 5 bzw. 10 Minuten zwischen den Schichten war die Biegezugfestigkeit der horizontalen Prismen weiterhin vergleichbar, während die Biegezugfestigkeit der vertikalen Prismen mit $1,6 \pm 0,1 \text{ N/mm}^2$ bzw. $1,7 \pm 0,5 \text{ N/mm}^2$ deutlich abnahm. Dies ist auf die Verschlechterung des Schichtenverbundes und die daraus resultierenden Sollbruchstellen im Prisma zurückzuführen. Um das Layering (schlechter Schichtenverbund) zu vermeiden und ein homogenes Materialgefüge zu erhalten, sollte die Druckgeschwindigkeit und die Länge einer Schicht bei den Demonstratoren (vgl. Kapitel 8) so angepasst werden, dass die Herstellung einer Schicht nur 2 Minuten beträgt.

Neben der Zeit zwischen dem Ablegen der Schichten, ist die Qualität des Schichtenverbundes auch von der Austrocknungswahrscheinlichkeit an der Oberfläche abhängig (Roussel 2018; Keita et al. 2019). Vom Austrocknen geschützte Flächen haben demnach einen deutlich besseren Schichtenverbund (Roussel 2018; Keita et al. 2019). Des Weiteren hat die Geometrie der Stränge einen Einfluss darauf, wie schnell das Material austrocknet – z.B. trocknen runde Stränge aufgrund der geringeren Oberfläche deutlich langsamer aus als rechteckige Stränge. Das Austrocknungsverhalten von Leichtbeton im Vergleich zu Normalbeton stellt dabei einen interessanten Aspekt für weitere Forschung dar, da die Austrocknung durch das in den Leichtzuschlägen enthaltene Wasser verringert werden könnte.

Die Geometrie der Stränge ist zudem auch in Bezug auf die Entstehung von Schwachstellen im Schichtenverbund relevant. So betrug die Biegezugfestigkeit der Referenzmischung von vertikal herausgesägten Prismen bei einem profilierten Strang mit strukturierter Oberfläche (vgl. Abbildung 25 links) und ablegendem Auftrag bereits nach 2 Minuten nur noch $0,6 \pm 0,2 \text{ N/mm}^2$ und damit weniger als ein Drittel der Biegezugfestigkeit des horizontal herausgesägten Prismas. Dies ist auf den Einschluss von Luftporen zwischen den Schichten zurückzuführen (vgl. Abbildung 25).

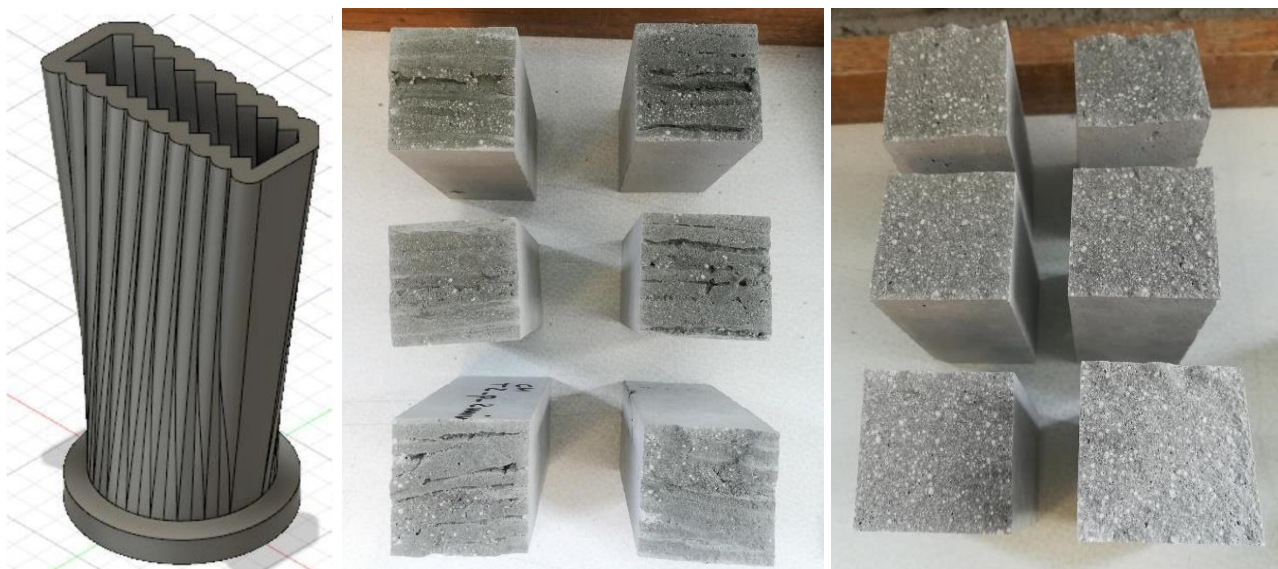


Abbildung 25: Profilierte Düse und daraus erstellte Prismen mit Luftporen zwischen den Schichten sowie mit glatter Düse erstellte Prismen ohne Luftporen (Fotos K. Daporta)

4.6 Festbetoneigenschaften

Zur Untersuchung der Festbetoneigenschaften wurden einerseits geschalte Prismen nach dem Pumpen hergestellt. Das Material wurde dabei für 45 s auf einem Rütteltisch verdichtet. Zudem wurden Prismen aus den additiv gefertigten Geometrien herausgesägt (vgl. Abbildung 26 und Kapitel 2.4), um auch die Effekte des Schichtenverbundes und die auf die Schichtenablage beschränkte Verdichtung mit zu erfassen. Neben den in Kapitel 4.5 beschriebenen Untersuchungen zum Schichtenverbund, wurde die Wärmeleitfähigkeit sowie die Festigkeit der Prismen untersucht.



Abbildung 26: Aus einem 3D-gedruckten Element herausgesägter Probekörper zur Bestimmung der Festbetoneigenschaften und Messung der Wärmeleitfähigkeit (Fotos C. Matthäus)

Die Wärmeleitfähigkeit wird mithilfe eines Hot Disk TPS 1500 Messgerätes bestimmt (vgl. Kapitel 2.4) und als wesentlicher Aspekt bei der Materialoptimierung berücksichtigt. In Abbildung 27 ist die Wärmeleitfähigkeit für die Leichtbetonrezepturen auf Basis von CEM C mit unterschiedlichem Gehalt an LP1 (0-40 Vol.-% Ersatz des Zementes) gegenüber der Rohdichte (Abbildung 27 links) und gegenüber der Druckfestigkeit nach 7 Tagen (Abbildung 27 rechts) dargestellt. Die unterschiedlichen Rohdichten innerhalb eines Materials resultieren aus unterschiedlichen Pumpgeschwindigkeiten (vgl. Kapitel 4.2) bei der Herstellung der Proben.

Wie in Abbildung 27 zu erkennen, nimmt die Wärmeleitfähigkeit mit zunehmender Rohdichte zu. Gleichzeitig nimmt die Druckfestigkeit mit zunehmender Rohdichte zu (nicht dargestellt). In der Folge hat ein Material mit höherer Wärmeleitfähigkeit auch eine höhere Druckfestigkeit als ein stärker isolierendes Material (vgl. Abbildung 27 rechts). Die in Kapitel 2.2 formulierte Zielsetzung einer geringen Wärmeleitfähigkeit steht damit im Konflikt mit der erwünschten hohen Druckfestigkeit, sodass ein Kompromiss zwischen den beiden Anforderungen gefunden werden muss.

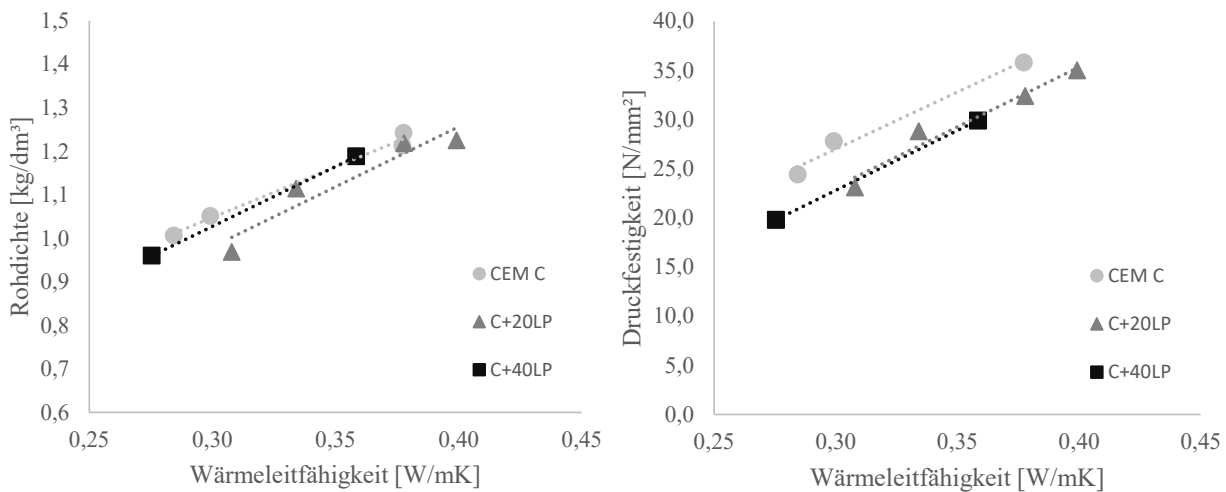


Abbildung 27: Verhältnis zwischen Wärmeleitfähigkeit und Rohdichte sowie Wärmeleitfähigkeit und Druckfestigkeit für Rezepturen mit unterschiedlichen Kalksteinmehlgehalten (Bilder C. Matthäus)

Wie erwähnt nimmt die Wärmeleitfähigkeit des Materials mit zunehmender Pumpgeschwindigkeit aufgrund der in Kapitel 4.2 beschriebenen Rohdichteerhöhung zu. In Abbildung 28 ist der Zusammenhang für die Mischung mit 20 Vol.-% Kalksteinmehl (LP1) deutlicher dargestellt. Dabei werden zunächst die Materialeigenschaften vor dem Pumpen und danach aufsteigend nach dem Pumpen mit einer Pumpfrequenz von 7,3 Hz, 15,6 Hz und 26,2 Hz dargestellt.

Gleichzeitig nimmt auch die Festigkeit mit zunehmender Pumpgeschwindigkeit zu. Dies muss bei der Planung des zu druckenden Objektes berücksichtigt werden. Die für die Demonstratoren verwendeten Einstellungen sowie die dazugehörigen Eigenschaften des Materials werden in Kapitel 4.7 zusammengestellt.

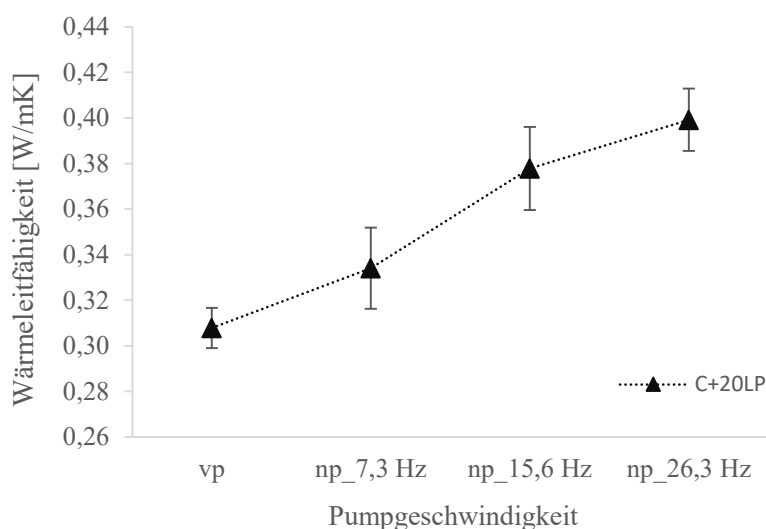


Abbildung 28: Zunahme der Wärmeleitfähigkeit mit der Pumpgeschwindigkeit (vor dem Pumpen, 7,3 Hz, 15,6 Hz und 26,3 Hz) am Beispiel der Rezeptur mit 20 Vol.-% Kalksteinmehl (Bild C. Matthäus)

Die Festigkeiten werden neben der Rohdichte auch von dem Trocknungsschwinden (Bestimmung siehe Kapitel 2.4) beeinflusst. Wie in Tabelle 6 dargestellt, war das Trocknungsschwinden nach 28 Tagen bei Mischungen mit höherem Kalksteinmehlgehalt geringer. Die Festigkeiten waren für die untersuchten Mischungen vergleichbar. Das geringere Trocknungsschwinden bringt Vorteile mit sich, da die additiv gefertigten Bauteile keine vor Feuchtigkeitsverlust schützende Schalung haben und dem Trocknungsschwinden dementsprechend ausgesetzt sind.

Tabelle 6: Festigkeiten sowie Schwindverhalten der Mischungen nach 28 Tagen

Mischung	Biegezugfestigkeit [N/mm ²]	Druckfestigkeit [N/mm ²]	Trocknungsschwinden [‰]
CEM C	3.1±0.3	23.3±1.3	-1.29
C+20LP	3.0±0.2	23.5±0.8	-1.23
C+40LP	3.7±0.1	24.1±0.8	-1.01

4.7 Überblick über die Materialeigenschaften für die Extrusion der Demonstratoren

In Kapitel 2.3 wurden die Bestandteile des Leichtbetons und in Kapitel 4 zusammenfassend die Untersuchungen beschrieben, welche die Grundlage für die Entwicklung der Referenzrezeptur zur Herstellung der Demonstratoren (siehe Kapitel 8) legen. Die Rezeptur basiert auf dem Spezialzement CEM D, Silikastaub, Thixotropiermittel, Luftporenstabilisierer und einer optimierten Zusammenstellung unterschiedlich großen Blähglasgranulats (vgl. Kapitel 2.3).

Die Eigenschaften dieser Leichtbetonreferenzrezeptur werden in Tabelle 7 zusammenfassend dargestellt. Für die Fertigung der Demonstratoren wurde die Pumpe in einem Frequenzbereich von 12-15 Hz gefahren. Die geplante Geschwindigkeit des Manipulators betrug 200 mm/s, wobei die reale Geschwindigkeit in Abhängigkeit der für die Geometrie generierten Punkte bei circa 110-160 mm/s lag (vgl. Kapitel 6.3). Die großen Geometrien wurden mit 9-12 m Stranglänge pro Schicht geplant, was im realen Ablegen von Schichten alle 50 bis 80 Sekunden resultierte. Damit ist der Grenzwert für einen hinreichenden Schichtenverbund nach den Untersuchungen in Kapitel 4.5 eingehalten (< 2 Minuten/Schicht).

Tabelle 7: Eigenschaften der für die Demonstratoren verwendeten Mischung

Eigenschaft	Vor dem Pumpen	Nach dem Pumpen
Frischbetonrohddichte nach DIN EN 1015-6 [kg/m ³]	1160	1390
Festbetonrohddichte nach DIN EN 12390-7 [kg/m ³]	1080	1220
Druckfestigkeit in Anlehnung an DIN EN 12390-3 nach 7d [N/mm ²]	20,2	22,6
Biegezugfestigkeit in Anlehnung an DIN EN 12390-3 nach 7d [N/mm ²]	1,1	3,6
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	0,36	0,41
Spezifische Wärmekapazität [MJ/m ³ K]	1,6	1,9

5 Raupengeometrie und Düsendesign

5.1 Prozessvarianten

Bei der additiven Fertigung durch Frischbetonextrusion ist die Düse das Element am Ende des Misch- und Fördersystems, an dem der Frischbeton austritt, um als Raupe zum Aufbau des Betonbauteils abgelegt zu werden (s. Abbildung 29).

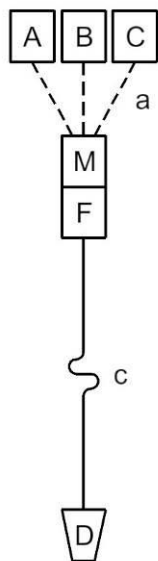


Abbildung 29: Elemente des Misch- und Fördersystems: Behältnisse mit Ausgangsstoffen (A, B, C), Mischer (M), Pumpe (F), Düse (D), Weg der Ausgangsstoffe zum Mischer (a) und Weg des Frischbetons zur Düse (c). (Bild K. Henke)

Die Gestaltung der Düsen muss in Hinblick auf den Prozess bzw. dessen Varianten erfolgen. Diese sollen in dem hier beschriebenen Projekt als Schichtbauprozesse organisiert werden. Dabei können drei Prozessvarianten unterschieden werden:

- Die Schichten des Bauteils werden durch jeweils eine einzige, der Bauteilstärke entsprechende Raupe gebildet.
- Die Schichten des Bauteils werden durch jeweils mehrere, mit oder ohne Zwischenräume, in einer Ebene liegende Raupen gebildet.
- Nur die Kontur des Bauteils wird als dünne Schale mittels Frischbetonextrusion Schicht für Schicht aufgebaut. Das Innere des Bauteils bleibt leer oder wird mit Material verfüllt.

Zu a): Mit der Prozessvariante a können nur Bauteile mit Vollquerschnitt hergestellt werden. Sie verspricht jedoch einen schnellen Baufortschritt und hohe Festigkeiten.

Zu b): Mit der Prozessvariante b können sowohl Bauteile mit Vollquerschnitt als auch Bauteile aufgelöstem Querschnitt hergestellt werden. Über das Schichtenlayout wird die äußere Form und die innere Struktur des Bauteils bestimmt und damit die Funktionalität der jeweiligen Region definiert.

Zu c): Mit der Prozessvariante c werden zunächst Hohlkörper hergestellt, deren Schale durch die Extrusion von einer oder mehreren nebeneinanderliegenden Raupen gebildet wird. Das Schichtenlayout bestimmt die äußere Form des Bauteils. Das Innere des Bauteils bleibt entweder leer oder wird (evtl. nach Einbringen von weiteren Elementen z.B. für die Bewehrung oder die Gebäudetechnik) mit schütt- oder fließfähigem Material verfüllt. Letzteres kann in einem Zug nach Fertigstellung der äußeren Schale erfolgen oder sukzessive z.B. Schicht für Schicht. Einen Sonderfall stellt die Variante dar, bei der das Füllen des Inneren ebenfalls wieder durch Ablegen von Frischbetonraupen realisiert wird; dieser Fall lässt sich - ebenso wie die ungefüllte Kontur - auch der Prozessvariante b zuordnen.

Im Fokus der hier beschriebenen Arbeiten steht die Machbarkeit von Formoptimierung und Multifunktionalität durch den Einsatz von additiver Fertigung durch Extrusion von Frischbeton. Diese Ziele können nur durch die feingliedrige Raupenstruktur der Prozessvariante b erreicht werden. Die folgenden Betrachtungen beziehen sich daher auf solche Prozesse mit Multi-Raupen-Schichtenlayout.

5.2 Raupengeometrie

5.2.1 Raupenabmessungen (Breite, Höhe)

Für die Gestaltung der Düsen ist es erforderlich, den gewünschten Raupenquerschnitt zu kennen. Dies betrifft sowohl die Abmessungen (Höhe, Breite) des Querschnitts, als auch die Ausbildung des Raupenprofils (Flanken gerade, gekrümmt etc.).

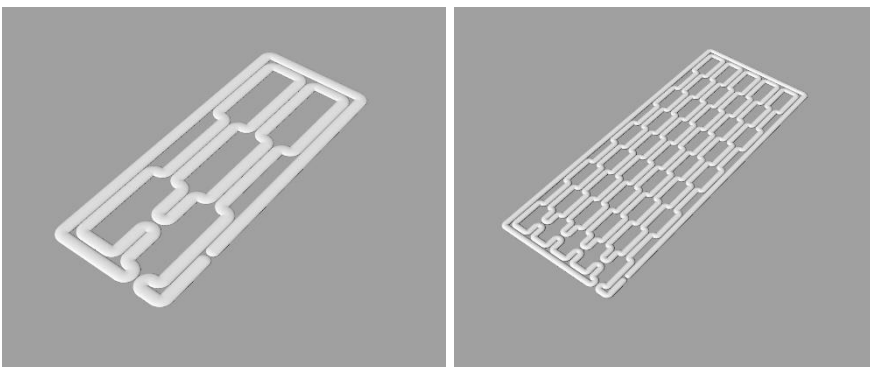


Abbildung 30: Zwei verschiedene Schichtenlayouts mit gleichem Füllungsgrad (Feststoff/Hohlraum) und Raupenbreiten von 50 mm (links) und 25 mm (rechts) (Bilder K. Henke)

Die *Raupenbreite* ist in Hinblick auf das Schichtenlayout zu bestimmen. Je schmaler die Raupen, desto höher die Gestaltungsfreiheit beim Schichtenlayout. Abbildung 30 zeigt ein Beispiel um dies zu verdeutlichen: Beide Bilder zeigen eine Schicht eines Leichtbeton-Außenwandelementes, beide mit den Abmessungen 1.250 mm x 500 mm (B x T). Die Raupenbreite ist unterschiedlich und beträgt 50 mm bei der Variante links und 25 mm bei der rechten Variante. Während beide Varianten den gleichen Füllungsgrad (Feststoff/Hohlraum) von ca. 70% aufweisen, wird dies bei der rechten Variante mit 6 Zellen erreicht, während es bei der linken Variante 45 Zellen sind. Es ist offensichtlich,

dass mit filigranen Strukturen wie sie die rechte Variante zeigt die Gestaltungsfreiheit beim Schichtenlayout deutlich höher ist.

Schmale Raupen führen jedoch zu langsamen Prozessen und beeinträchtigen tendenziell die Stabilität, insbesondere im Bereich von Überhängen.

Im Verlauf des Projektes wurde mit Raupenbreiten im Bereich von 15 – 50 mm gearbeitet. Die Untersuchungen zu Bauteilfunktionalisierung und Schichtenlayout, die in Kapitel 7 dargestellt sind, wurden anhand von 25 mm breiten Raupen durchgeführt. In derselben Größenordnung liegen die Raupenbreiten der Demonstratoren (Kapitel 8).

Die *Raupenhöhe* bestimmt die Schichtstärke. Je geringer die Schichtstärke desto höher sind Auflösung und Oberflächenqualität. Die Untergrenze der Schichtstärke wird durch das Größtkorn bestimmt. Geht man davon aus, dass das Korn noch leicht in die darunter liegende Schicht gedrückt werden kann, so wird bei einem Größtkorn von 4 mm die Untergrenze der Schichtstärke bei ca. 3 mm liegen. Schichten von geringer Höhe führen jedoch auch zu langsamen Prozessen. Auf der anderen Seite kann eine Verringerung der Schichthöhe zu einer guten Baubarkeit und Stabilität beitragen.

Im Verlauf des Projektes wurde mit Schichtstärken im Bereich von 5 – 20 mm gearbeitet. Bei der Fertigung der Demonstratoren (Kapitel 8) wurde eine Schichtstärke von 9 mm gewählt.

5.2.2 Raupenprofile

Der Verbund zwischen benachbarten Raupen und die Oberflächenqualität des Bauteils sind in hohem Maße von der Form des Raupenquerschnitts (Raupenprofil) abhängig.

Grundsätzlich kann bei den Raupenprofilen zwischen Rundraupen und Profilraupen unterschieden werden. Rundraupen, wie sie mit einfachen starren Düsen mit rundem Querschnitt hergestellt werden können, weisen einen ovalen Querschnitt mit den typischen, konvex gekrümmten Raupenflanken auf. Bei Profilraupen kann durch die Wahl entsprechender Düsenquerschnitte das Profil der Raupe in gewissem Umfang gesteuert werden und damit die Flanken z.B. eine gerade, konkav oder beliebig gekrümmte Form annehmen. Allerdings muss die Düse, wenn eine Verschraubung der Raupe in Kurven vermieden werden soll, kontinuierlich auf die Achse der Raupe ausgerichtet werden, was einen zusätzlichen technischen Aufwand bedeutet. Deshalb sollte zunächst untersucht werden, welche Anforderungen an das Raupenprofil zu stellen sind. Die Fugen zwischen zwei übereinander liegenden Raupen (Lagerfugen) werden in einer gewissen Breite stets eine mehr oder weniger ebene Form annehmen. Bei den dazwischen liegenden vertikalen Flanken hingegen muss in Hinblick auf die Anforderungen zwischen drei Situationen unterschieden werden:

- 1) Die Raupenflanke ist Teil der äußeren Oberfläche des Bauteils.
- 2) Die Flanke grenzt an einen im Inneren des Bauteils liegenden Hohlraum.
- 3) Die Flanke grenzt an die Flanke einer anderen Raupe (Stoßfuge).

Zu 1): Die Flanke hat vor allem zur Oberflächenqualität des Bauteils beizutragen. Bei geringen Schichthöhen liefern Rundraupen in dieser Hinsicht tolerierbare Ergebnisse. Bei höheren Schichten ist eine Formung der Flanke gemäß der Sollgeometrie der Bauteiloberfläche wünschenswert. Bei Bauteilen mit senkrecht stehenden ebenen Oberflächen ist dies vergleichsweise leicht mittels entsprechend geformten Düsen oder Formwerkzeugen (Traufeln) realisierbar. Bei Bauteilen mit frei geformten Oberflächen ist hierfür jedoch ein erheblicher technischer Aufwand erforderlich.

Zu 2): Aus dieser Situation sind zunächst keine besonderen Anforderungen an die Flankengeometrie ableitbar.

Zu 3): Am Stoß zwischen zwei Raupen sollte vor allem ein guter mechanischer Verbund zwischen den beiden nebeneinanderliegenden Raupen zustande kommen. Dies wird am ehesten der Fall sein, wenn zwei gerade, senkrecht stehende Flanken dicht an dicht zu liegen kommen. Jedoch ist auch mit Rundraupen ein guter Verbund erzielbar, vorausgesetzt die Fließgrenze des Frischbetons ist ausreichend gering, so dass das Material in die Zwischenräume zwischen den Raupen fließen kann.



Abbildung 31: Mit feststehender, runder Düse im abstreifenden Verfahren hergestellte Rundraupen (Foto K. Henke)

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass bei geringen Schichtstärken und gut eingestellter Rheologie des Frischbetons mit Rundraupen zufriedenstellende Ergebnisse in Hinblick auf geometrische Freiheit, Oberflächenqualität und Festigkeit erzielt werden können. Die Oberflächen zeigen die typische Wulststruktur unabhängig davon, ob sie senkrecht oder geneigt, eben oder gekrümmt sind. Wenn die Raupen nicht nur abgelegt, sondern zusätzlich noch mit der Düse leicht zusammengedrückt und auf der Oberseite abgezogen („Abstreifen“, Abbildung 31) werden, ist die Formtreue in der Vertikalen sehr gut kontrollierbar. Kleine Fehlstellen in den Raupen werden bei diesem Vorgehen auch sehr gut durch die folgenden Schichten ausgeglichen (Abbildung 32).



Abbildung 32: Ausgleich von Fehlstellen in Raupen durch nachfolgende Schichten (Foto K. Henke)

Raupen mit rechteckigen Querschnitten hingegen versprechen, auch bei höheren Werten bei der Fließgrenze des Frischbetons, einen guten Verbund an den Stoßfugen. Die Oberflächenbeschaffenheit unterscheidet sich von der von Rundraupen: Bei Bauteilen mit senkrecht stehenden, ebenen Oberflächen kommt es zu einer Verbesserung der Oberflächenqualität; bei geneigten Oberflächen und Freiformflächen stellt sich ein Treppnmuster ein (Abbildung 33).



Abbildung 33: Stufen effekt bei rechteckigem Raupenprofil (Fotos K. Henke)

Nach Vorversuchen mit einer Vielzahl von Düsen - starren runden ebenso wie drehbaren rechteckigen - und unterschiedlichen Raupenprofilen wurden die finalen Testobjekte und Demonstratoren mit Rundraupen hergestellt (Kapitel 8).

5.2.3 Zusammenhang von Raupengeometrie und Fördersystem

Pumpe und Düse sind bei dem gewählten System durch einen 10 m langen Schlauch verbunden. Aufgrund der Distanz wirken sich Änderungen in der Pumpfrequenz verzögert auf die Geometrie der abgelegten Betonraupe aus. Die Förderrate der Pumpe steht im direkten Zusammenhang mit der Breite der abgelegten Betonraupe. Abbildung 34 zeigt den Zusammenhang zwischen Pumpfrequenz und resultierender Spurbreite für verschiedene Schichthöhen für eine Düse mit Rundprofil ($D = 15$ mm) und einer konstanten Fahrgeschwindigkeit von 200 mm/s.

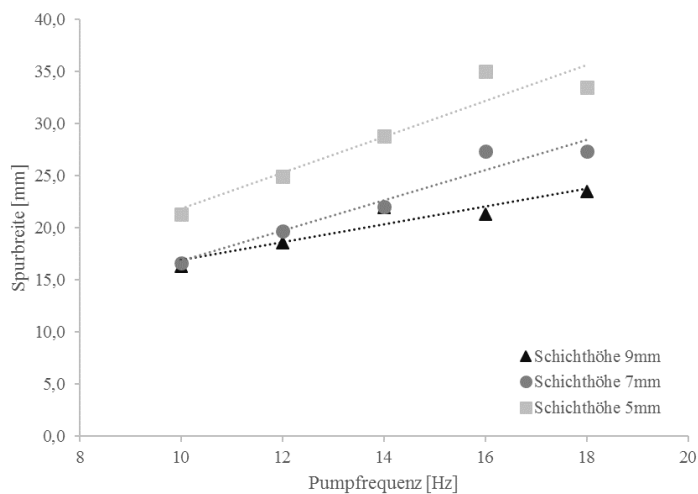


Abbildung 34: Breite einer abgelegten Betonraupe in Abhängigkeit der Pumpenfrequenz für unterschiedliche Schichthöhen bei 200 mm/s Fahrgeschwindigkeit. Verwendete Düse: Rundprofil ($D = 15$ mm) (Bild C. Matthäus)

Die in Abbildung 34 dargestellten Werte dienen jedoch nur als Richtwerte, da es aufgrund von Schwankungen in den Materialeigenschaften und dem Umgebungsklima zu Abweichungen in der finalen Spurbreite kommen kann.

5.3 Bauarten von Düsen

Die Düsen für die Frischbetonextrusion sind gemäß der gewünschten Raupengeometrie (Kapitel 5.2) und der erforderlichen Freiheiten beim Schichtenlayout (Kapitel 7) zu wählen. Sie können nach einer Vielzahl von Kriterien unterschieden werden:

- Größe der Öffnung (z.B. in mm²) (Abbildung 35)
- Form der Öffnung (z.B. rund, dreieckig, rechteckig, eben, räumlich gekrümmt) (Abbildung 35)
- Randausbildung der Öffnung (z.B. glatt, gezahnt)
- Neigung der Flanken (z.B. steil, flach) (Abbildung 35)
- Ausrichtung der Öffnung (z.B. nach unten, nach hinten, schräg)
- Kinematik der Düse (z.B. feststehend, drehbar) (Abbildung 37)
- Ventil (Düsen mit und ohne Ventil) (Abbildung 37)
- Additive (Düsen mit/ohne Vorrichtungen für die Zugabe von Additiven)
- Zahl und Anordnung von Traufeln (z.B. eine Traufel seitlich, dreiseitig mit Austritt nach hinten und unten)
- Form der Traufeln (z.B. eben, gekrümmt)
- Kinematik der Traufeln (z.B. fest, klappbar, frei beweglich)
- Düsenanzahl (Einzeldüse, Druckkopf mit mehreren Düsen)
- Werkstoff (z.B. Polylactid, Polyoxymethylen, Stahl) (Abbildung 36)
- Herstellungsverfahren (z.B. Fräsen, Drehen, Fused Filament Fabrication, Stereolithografie) (Abbildung 36)



Abbildung 35: Unterschiedlich geformte Düsen hergestellt durch Stereolithografie (Foto D. Talke)

Die Aspekte Größe und Form der Öffnung und die eventuelle Notwendigkeit die Düse zu drehen (Kinematik der Düse) wurden bereits in Kapitel 5.2 im Zusammenhang mit der sich daraus ergebenden Raupengeometrie diskutiert.



Abbildung 36: Mit verschiedenen Verfahren aus unterschiedlichen Werkstoffen hergestellte Düsen, Fused Filament Fabrication mit Polycarbonat, schwarz (links) und Stereolithografie mit Kunstharz, grau (rechts) (Foto K. Henke)

Zwei weitere Aspekte sollen an dieser Stelle noch kommentiert werden: In Hinblick auf die angestrebte Multifunktionalität und die dazu dienenden filigranen internen Strukturen sind Lösungen mit feststehenden Traufeln nicht geeignet, da die Traufeln bereits abgelegte Raupen in Kreuzungsbereichen etc. zerstören würden. Falls die Verwendung von Traufeln als vorteilhaft angesehen wird, muss auf Lösungen mit beweglichen Traufeln zurückgegriffen werden. Aus dem gleichen Grund ist der Einsatz von Düsen mit einer nach hinten weisenden Öffnung ungeeignet, da die Düse in die gerade im Bau befindliche Schicht ragt und mit bereits fertiggestellten Partien kollidieren würde. Für die Fertigung der hier interessierenden Funktionsstrukturen (s. Kapitel 7) ist deshalb die Verwendung von Düsen mit nach unten gerichteter Öffnung zu empfehlen.



Abbildung 37: Endeffektor bestehend aus den Elementen (von links nach rechts) Schlauchkupplung, pneumatisches Quetschventil, Zahnrad für Zahnriemen zum Drehen der Düse, Schnellverbinder, Edelstahldüse (Foto D. Talke)

Für die Herstellung der Düsen kamen Kunststoff-3D-Drucker zum Einsatz: Zum einen ein Formlabs Form 1+ und zum anderen ein Ultimaker 2+. Der Formlabs Form 1+ arbeitet nach dem Stereolithografie-Verfahren, bei dem Kunstharze durch UV-Licht selektiv ausgehärtet werden. Hier wurde ein graues, starres Kunstharz verwendet. Bei dem Ultimaker 2+ handelt es sich um ein Fused Filament Fabrication Gerät, mit welchem die Bauteile durch Ablegen von geschmolzenen Thermoplasten aufgebaut werden. Hier wurde ein schwarzes, starres Polycarbonat verwendet. Beide Varianten erwiesen sich als tauglich. Besonders gut geeignet zeigten sich aufgrund der glatten Oberfläche die durch Stereolithografie hergestellten Düsen.

Für das Design der Düsen wurden parametrische CAD-Modelle aufgebaut (eines für Düsen mit runder Öffnung und eines für Düsen mit rechteckiger Öffnung), mithilfe derer Parameter wie Öffnungsgröße, Flankenneigung, Materialstärke etc. variiert werden können. Auf diese Weise lässt sich nicht nur eine große Zahl von Varianten herstellen, sondern es ist auch möglich, schnell auf Erkenntnisse aus den Versuchen zu reagieren.

Da im Projekt eine Vielzahl von Düsen getestet werden sollte, war es erforderlich, die Düsen schnell und ohne großen Aufwand auszuwechseln zu können. Deshalb kam zum Anschluss der Düsen an das Fördersystem in Anlehnung an DIN 28403:1986-09 eine Schnellverbindung mittels Flanschen und Spannring zum Einsatz (Abbildung 37).

Für die finalen Testobjekte und Demonstratoren (Kapitel 8) wurden Düsen mit folgenden Merkmalen verwendet: runder Öffnungsquerschnitt, Durchmesser der Öffnung 15 mm, Randausbildung glatt, mittlere Flankenneigung, Öffnung nach unten, feststehend, mit Ventil, ohne Vorrichtungen für die Zugabe von Additiven, keine Traufeln, Einzeldüsen, aus grauem Kunstharz, hergestellt durch Stereolithografie.

6 Manipulatoren und Steuerung

6.1 Allgemeines

Die Herstellung eines Betonbauteils durch Extrusion von Leichtbeton erfordert ein hohes Maß an Präzision beim Ablegen der einzelnen Frischbetonraupen. Abweichungen in der Positionierung zwei nebeneinanderliegender Raupen können zu einem schlechten Verbund des Betons führen und das Bauteil schwächen. Auch die Geschwindigkeit, mit der sich die Düse bewegt, und die Materialfördertrate haben einen Einfluss auf die Form der abgelegten Betonraupen und das Druckergebnis. Aus diesem Grund sind eine genaue Führung der Düse mittels eines computergesteuerten Manipulators sowie eine auf die Fahrgeschwindigkeit abgestimmte Materialförderung notwendig. In Rahmen dieses Forschungsprojekts stehen zwei verschiedene Manipulatoren zur Verfügung, ein Raumportal der Firma Opiliones, mit dem erste Materialversuche durchgeführt wurden, sowie ein KUKA Industrieroboter für die Herstellung großer Testgeometrien und Demonstratoren. Abbildung 38 zeigt den schematischen Aufbau in der Übersicht und die Position der einzelnen Komponenten im Extrusionsprozess.

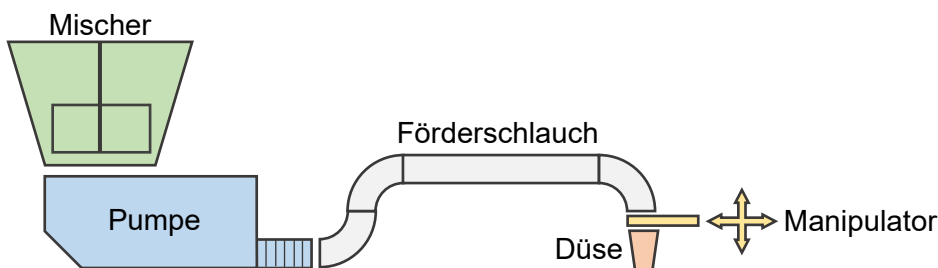


Abbildung 38: Übersicht des Extrusionsprozesses vom Mischer bis zur Düse (Bild D. Talke)

6.2 Deltadrucker

Für das Forschungsprojekt stand ein Deltadrucker der Firma Opiliones BV aus 7104 GA Winterswijk, Niederlande zur Verfügung. Der 2,5 m hohe Drucker wurde für großformatige 3D-Versuchsdrucke mit unterschiedlichen Materialien konzipiert. Anstelle eines klassischen Fused-Filament-Endeffektors kann bei diesem Gerät eine Förderpumpe angeschlossen werden, um mit flüssigen und steifen Materialien zu drucken (Project NEXT 2018). Über drei kugelgelagerte Arme wird die Werkzeugaufnahme für verschiedene Düsen in einem kartesischen Koordinatensystem bewegt. Der Arbeitsbereich des Druckers hat eine Runde Grundfläche mit einem Radius von 500 mm und einer Höhe von 1120 mm. Die Arbeitsplattform des Druckers besteht aus einem Karussell mit vier abnehmbaren Platten. Durch die exzentrische Lagerung des Karussells kann jeweils eine Platte in den Arbeitsraum des Geräts bewegt werden, was besonders für den Einsatz als 3D-Drucker für Beton geeignet ist. Ein fertiger Versuchsdruck kann somit aus dem Arbeitsbereich rotiert werden und ungestört erstarren und erhärten, während ohne Unterbrechung weitere Versuche auf der nächsten Plattform durchgeführt werden können.

Die Steuerung des Druckers erfolgt mit gängiger 3D-Druck-Software. Eine sogenannte Slicer-Software teilt das CAD-Modell des Bauteils in einzelne horizontale Schichten auf und berechnet die

Fahrwege des Druckers und die zugehörige Extrusionsmenge in jeder Schicht. Die Anweisungen werden anschließend über einen Rechner an den Drucker übergeben, der das Bauteil Schicht für Schicht fertigt.



Abbildung 39: Opiliones Deltadrucker (Foto D. Talke)

Für das Forschungsprojekt wurden die Anschlüsse an die Pumpe, die Größe des Schlauchs und die Fassung an der Düse (vgl. Abbildung 40) modifiziert, um Vor- und Rücksprünge im Förderweg zu vermeiden und einen ausreichend großen Förderraum für das verwendete Material zu gewährleisten.



Abbildung 40: Werkzeugaufnahme des Opiliones Druckers mit runder Düse (unten) und Förderschlauchkupplung (oben) (Foto C. Matthäus)

6.3 Industrieroboter

Zur Herstellung größerer Versuchsbauteile und Demonstratoren stand ein KUKA Industrieroboter vom Typ KR 150 L110 zur Verfügung (vgl. Abbildung 41). Der Sechs-Achs Roboter hat eine Reichweite von 3.500 mm und ist auf einer zusätzlichen siebten Linearachse aufgestellt. Die Nenntaglast des Roboters beträgt 110 kg mit zusätzlichen Montagemöglichkeiten für Zusatzlasten bis zu einer Gesamtlast von 510 kg. Der entwickelte Endeffektor für die Extrusion von Leichtbeton kann über eine Montageplatte an der "Hand" des Roboters (Achse 6) befestigt werden. Schläuche für die Materialzufuhr sowie Verkabelungen können entlang des Roboterarms geführt und gesichert werden.

Anders als bei dem Opiliones 3D-Drucker wird der Kuka Industrieroboter nicht über herkömmliche 3D-Druck-Software angesteuert. Aus diesem Grund wurde nach alternativen Softwarelösungen für die nötigen Schritte im Rahmen der digitalen Prozesskette, vom Entwurf eines Bauteils bis zur Generierung der Steuerbefehle für den Industrieroboter, gesucht. Diese Softwarelösungen sollten es ermöglichen, bereits beim Bauteilentwurf die Raupengeometrie und die aus dem Verfahren gegebenen Freiheiten und Einschränkungen beim Schichtenlayout zu berücksichtigen. Aus der so modellierten Schichtgeometrie sollten die Steuerbefehle für den Industrieroboter auf möglichst kurzem Weg abgeleitet werden.



Abbildung 41: Industrieroboter Kuka KR 150 L110 des Lehrstuhls für Baurealisierung und Baurobotik, TUM
(Foto C. Matthäus)

Für die Steuerung des Kuka Industrieroboters wurde das Programm KUKA PRC (parametric robot control) eingesetzt. Die Software erweitert das bestehende Plug-In Grasshopper für das 3D-Modellierungsprogramm Rhinoceros (kurz: Rhino), um eine parametrische Programmierung eines KUKA Roboters zu ermöglichen (Abbildung 42).



Abbildung 42: Übersicht der Beziehung zwischen Rhino, Grasshopper und KUKA PRC (Bild D. Talke)

In Rhino modellierte Bauteile können in Grasshopper analysiert und weiterverarbeitet werden. Somit lassen sich beispielsweise Kontrollpunkte aus einem Volumenmodell eines Bauteils generieren, die wiederum parametrisiert aufbereitet werden können, um daraus Bewegungspfade für den Industrieroboter zu planen. Ebenso ist es möglich, direkt in Grasshopper Bauteile parametrisch zu modellieren und so die Verarbeitung zu erleichtern. Letzterer Ansatz hat sich als am zielführendsten erwiesen, da hierdurch direkt Einfluss auf den Druckpfad genommen und wichtige Parameter wie z.B. Raupenabstand, Schichthöhe und maximaler Überhang vorgegeben und verändert werden können. Abbildung 43 zeigt einen Ausschnitt des modellierten Pfades des in Kapitel 8.4 beschriebenen verschraubten Pfeilers. Die einzelnen Schichten werden zu einer durchgehenden Polylinie mit definiertem Anfangs- und Endpunkt verbunden.

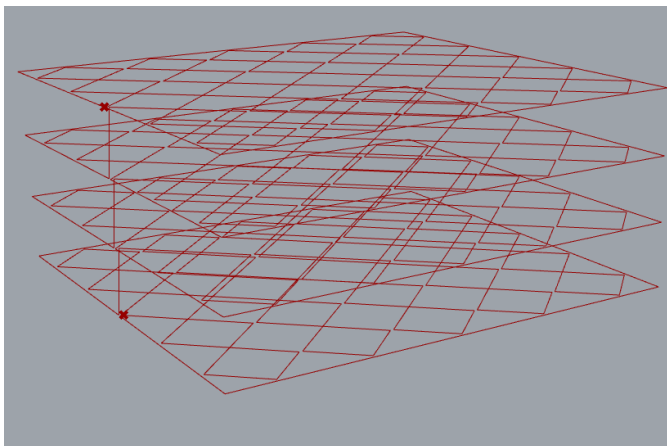


Abbildung 43: In Rhino modellierter Druckpfad als einzelne Polylinie mit definiertem Anfangs- und Endpunkt (Bild D. Talke)

Über-KUKA PRC kann der generierte Pfad in Steuerbefehle für den Roboter übersetzt werden. Der eingelesene Pfad wird zunächst in einzelne Punkte zerteilt und jedem Punkt ein sogenannter Frame zugeordnet. Falls eine rotierende Extrusionsdüse eingesetzt werden soll, gibt der Frame auch die Orientierung der Düse beim jeweiligen Punkt vor. Die einzelnen Frames werden dann in für den Roboter verständliche Fahrbefehle mit vorgegebener Geschwindigkeit übersetzt. Zusätzlich können

die Fahrbefehle weiter optimiert werden, z. B. durch das automatische Löschen von redundanten Punkten, oder zusätzliche Anweisungen, wie das Ein- und Ausschalten von Peripherie, eingebunden werden. Abschließend wird das fertige Programm auf den Steuer-PC des Roboters übertragen von wo aus der Druckprozess gestartet werden kann.

Ein weiterer Vorteil von KUKA PRC ist die integrierte Visualisierung des Roboters und des generierten Programms. Durch die Simulation des Druckprozesses können früh mögliche Probleme wie nicht erreichbare Koordinaten oder Kollisionen schnell ausfindig gemacht werden.

Abbildung 44 zeigt die Bedienoberfläche der Programme: links das CAD Programm Rhino mit einer Visualisierung des Roboters und der Laborumgebung und der generierten Fahrspur (rote Linie); rechts die Grasshopper Bedienoberfläche mit den einzelnen grafischen Elementen zur Erzeugung der Fahrspur und Analyse.

Um einen schnellen Wechsel zwischen Versuchsgeometrien zu ermöglichen, wurden drei Bauplattformen, bestehend aus einer Palette mit aufgeschraubter Schalungsplatte, eingerichtet (vgl. Abbildung 41). Jeder Bauplattform kann ein eigenes Modell zugewiesen werden, um ohne Unterbrechung von einer Testgeometrie zur nächsten wechseln zu können. In Abbildung 44 links sind die verschiedenen Bauplattformen farblich in der simulierten Arbeitsumgebung markiert. Rechts im Bild ist jeder Plattform ein eigener Bereich für die Fahrspurgenerierung zugewiesen. Somit ist es möglich jeder Arbeitsplattform unterschiedliche Fertigungsparameter zuzuweisen.

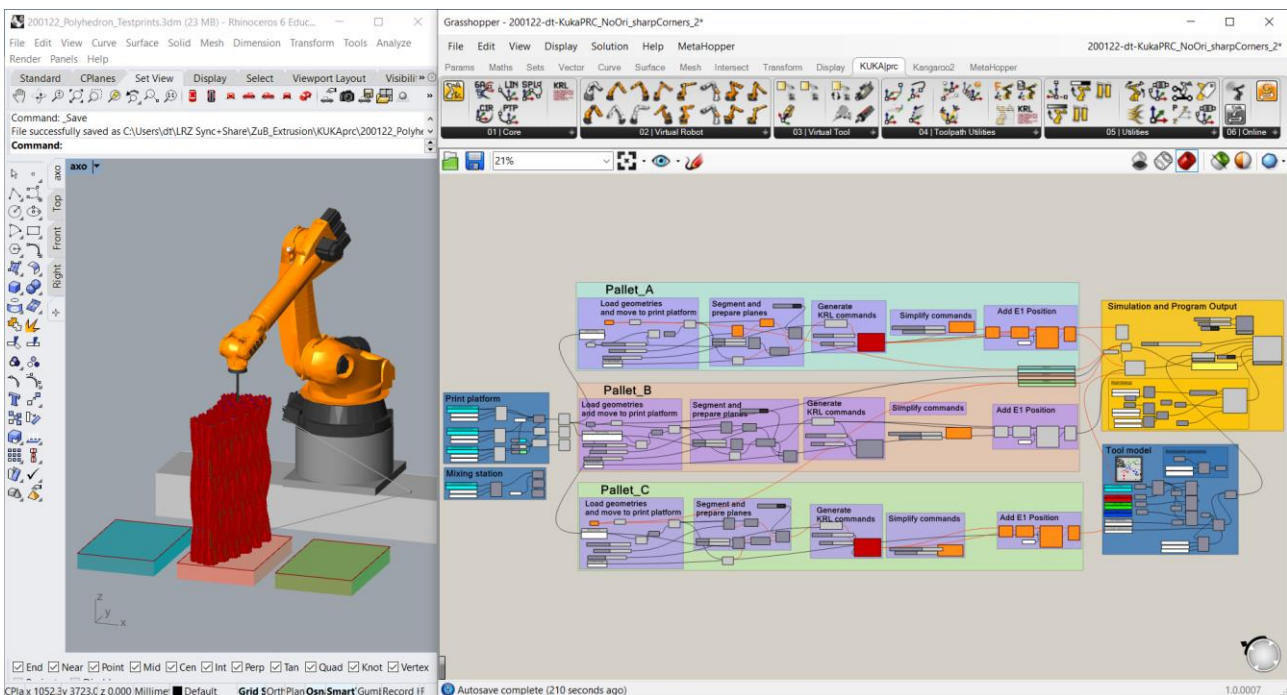


Abbildung 44: Simulation der Fahrwege des Kuka Industrieroboters (links) und parametrische Generierung der Maschinenanweisung in Grasshopper (rechts) (Bild D. Talke)

7 Bauteilfunktionalisierung und Schichtenlayout

7.1 Bauteilfunktionalisierung

Leichtbeton ist ein Material, das die Eigenschaften Tragfähigkeit und Wärmedämmfähigkeit in sich vereint. Es ermöglicht den Bau von monolithischen, tragenden Außenwandelementen ohne die Notwendigkeit einer zusätzlichen Dämmung.

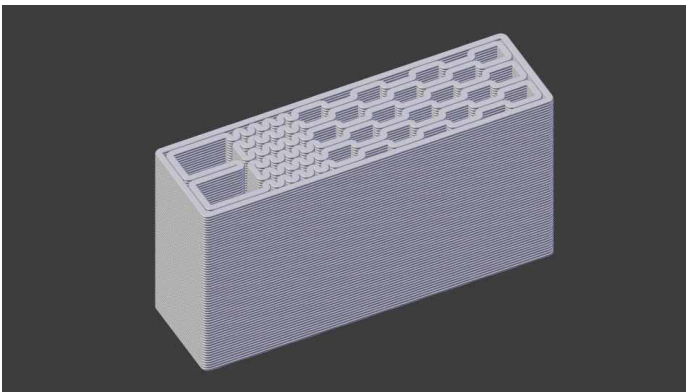


Abbildung 45: Durch Extrusion von Leichtbeton hergestelltes, monolithisches Außenwandelement mit Zonen unterschiedlicher Funktionalität: Zonen unterschiedlicher Dichte und vertikale Schächte zur Aufnahme von technischer Gebäudeausrüstung (Bild K. Henke)

Durch den Einsatz von additiver Fertigung für die Herstellung von Leichtbetonelementen kann über die Schaffung innerer Hohlraumstrukturen die Dämmfähigkeit dieser Elemente weiter verbessert werden. Zudem können über die Gestaltung dieser Hohlraumstrukturen Zonen unterschiedlicher Dichte und damit unterschiedlicher Eigenschaften innerhalb des Elements geschaffen werden. Darüber hinaus ist es mit dieser Technologie möglich, Schächte, Kanäle, Kavitäten etc. im selben Vorgang mit einzubauen, um so Funktionen der Gebäudetechnik in die Bauelemente zu integrieren. So können durch die Kombination von Leichtbeton und additiver Fertigung Bauelemente geschaffen werden, die in vielerlei Hinsicht multifunktional sind (Henke et al. 2017) (Abbildung 45).

Bei der Leichtbetonextrusion werden Objekte durch das Ablegen von Frischbetonraupen aufgebaut. Form und Größe des Raupenquerschnitts (s. Kapitel 5.2) und die Anordnung der abgelegten Raupen sind bestimmende Parameter für die Eigenschaften des resultierenden Bauteils (Henke et al. 2020). In dem hier beschriebenen Herstellungsprozess geschieht dies in Form von horizontalen Schichten. Die Steuerung der Bauteilfunktionen erfolgt damit über die Gestaltung des Schichtenlayouts.

7.2 Schichtenlayout

7.2.1 Funktionalisierung der Schichten

Die Herstellung einer Bauteilschicht erfolgt durch Ablegen von Frischbetonraupen. Zu diesem Zweck bewegt der Manipulator die Düse auf einem bestimmten Pfad. Das Ergebnis ist ein ebenes Muster bestehend aus gefüllten und ungefüllten Bereichen (s. Abbildung 46), entsprechend der

angestrebten Funktionalität. Dieses Muster ist so zu gestalten, dass es die gewünschten Funktionen bedient, die z.B. struktureller, thermischer oder akustischer Natur sein können.

Allen möglichen Schichtmustern ist gemein, dass sie eine Zerlegung der Schichtkontur in Teilflächen darstellen (Parkettierung). Dies können regelmäßige Muster sein, die nur aus einem einzigen Polygontyp (z.B. Dreieck, Rechteck, Sechseck) oder auch einem einzigen gekrümmt begrenzten Flächentyp bestehen. Des Weiteren sind regelmäßige Muster mit zwei oder mehreren sich periodisch abwechselnden Teilflächen möglich.

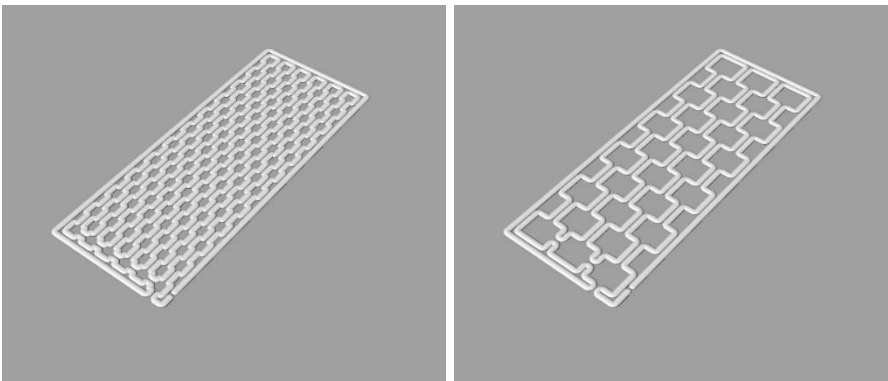


Abbildung 46: Zwei Schichtenlayouts mit unterschiedlicher Dichte (Bilder K. Henke)

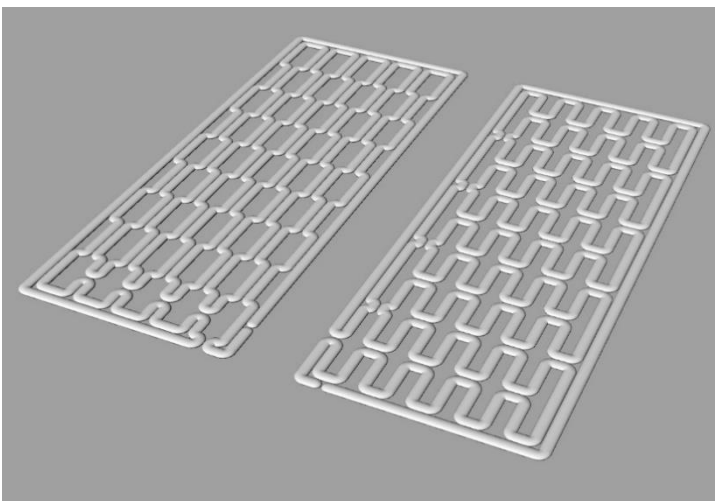


Abbildung 47: Zwei Schichtenlayouts mit gleicher Dichte, aber unterschiedlicher Leistung bezüglich der Wärmedämmung (Bild K. Henke)

Die Geometrie des Musters wirkt sich unmittelbar auf die Funktionalität eines Bauteils aus. So können z.B. Muster gleicher Dichte unterschiedliche Performance bezüglich der Wärmedämmung aufweisen. Die beiden Schichtenlayouts für ein Außenwandbauteil auf Abbildung 47 besitzen zwar die gleiche Dichte, jedoch wird das rechte Muster dem Wärmedurchgang größeren Widerstand bieten als das linke. Während beide Muster interne Hohlräume zur Erhöhung des Wärmewiderstands aufweisen, sind im linken Muster die Stege zwischen den Zellen in einer

durchgehenden Reihe angeordnet und bilden eine Wärmebrücke. Im rechten Muster hingegen wird die Wärmebrücke durch den Versatz der Zellen vermindert.

Bauteile, die durch die Verwendung eines regelmäßigen Musters hergestellt werden, weisen über den gesamten Querschnitt gleichbleibende Eigenschaften auf. Durch eine Änderung der Maschenweite und/oder -geometrie können Zonen unterschiedlicher Funktionalität geschaffen werden (funktionelle Gradierung). Der Wechsel von einer Zone zur anderen kann auch graduell sein.

Der Aufbau von 3-dimensionalen Bauteilen durch das Stapeln von identischen Schichten mit jeweils immer dem gleichen Layout führt zu prismatischen Strukturen, sowohl was das Äußere als auch was das Innere des Bauteils betrifft.



Abbildung 48: Struktur mit Überhängen zur Schaffung von geschlossenen Zellen (Foto C. Matthäus)

Sobald Material und Prozess die Bildung von Überhängen zulassen, ist eine Abweichung des Schichtenlayouts von einer Schicht zur nächsten möglich, was zu einer drastischen Steigerung der geometrischen Freiheit führt. Anwendungsbeispiele hierfür sind z.B. Wandöffnungen oder horizontale Kanäle. Auch geschlossene, luftgefüllte Zellen sind möglich, was bei Strukturen mit optimierter Wärmedämmung von Vorteil sein kann (s. Abbildung 48).

7.2.2 Formtreue und Stabilität während des Bauprozesses

Im Projekt wurden Regeln für die Auslegung des Extrusionspfades erarbeitet, die gewährleisten sollen, dass die Zielgeometrie auch tatsächlich erreicht wird, und dass das Bauteil in allen seinen Details auch während des Bauprozesses eine ausreichende Stabilität aufweist.

Bezüglich Formtreue und Stabilität müssen beim Entwurf von Schichtenlayouts verschiedene Situationen innerhalb des Pfades unterschieden werden: Raupen können freistehend sein (Abbildung 49 A), Raupen können sich berühren, während sie parallel verlaufen (Abbildung 49 B), sie können sich berühren, während sie aufeinander zulaufen (Abbildung 49 C) oder sie können sich kreuzen (Abbildung 49 D).

Große, durch freistehende Frischbetonraupen (Abbildung 49 A) gebildete Teile von Strukturen neigen zum Versagen durch seitliches Wegkippen. Gekrümmte Pfade zeigen hier eine deutlich bessere Performance als gerade.

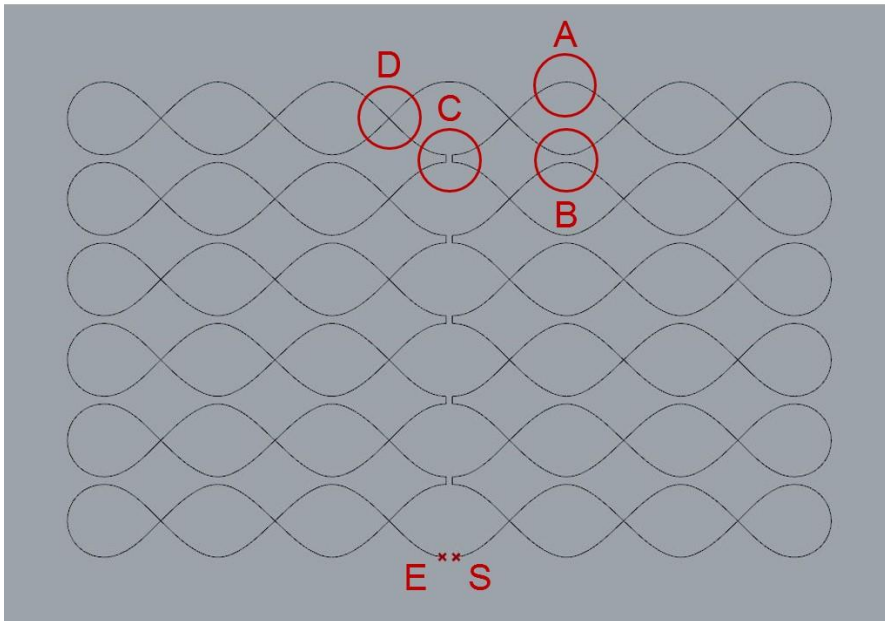


Abbildung 49: Schichtenlayout als Loop mit unterschiedlichen Pfadsituationen (Bild K. Henke)

Das Verbinden von Raupen durch Kreuzungen oder Berührungspunkte (Abbildung 49 B-C) erwies sich als geeignetes Mittel, um die Stabilität der Struktur zu erhöhen. Um eine ausreichende Verbindung zwischen zwei sich berührenden Raupen (Abbildung 49 C und D) zu erreichen, muss der Abstand zwischen ihnen sorgfältig gewählt werden und kann für die beiden unterschiedlichen Situationen verschieden sein.

Zähflüssiges Material wird bei Kurvenfahrten in Richtung des Düsenweges mitgezogen, wodurch die Lage der Raupe von der geplanten Position abweicht. Dies ist besonders kritisch an solchen Stellen, wo sich die Raupen berühren, während sie aufeinander zulaufen (Abbildung 49 C).

Es soll hier noch einmal darauf hingewiesen werden, dass, wie in Kapitel 5.3 diskutiert, die Ausführbarkeit der verschiedenen Pfadsituationen (Abbildung 49 A - D) auch von der Düsenbauart abhängt. Düsen mit Traufeln z.B. sind für die Herstellung von sich kreuzende oder sich berührenden Raupen (Abbildung 49 B - D) nicht geeignet.

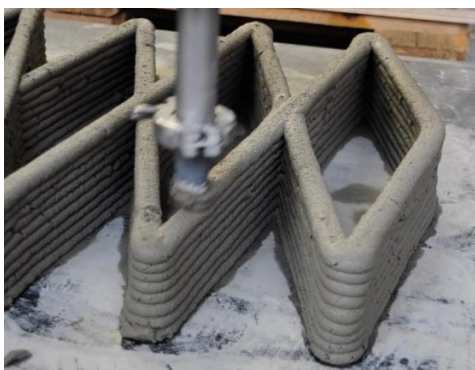


Abbildung 50: Sich kreuzende Rundraupen, im abstreifenden Verfahren (Foto C. Matthäus)

Bei sich kreuzenden Raupen (Abbildung 49 D) muss berücksichtigt werden, dass dies nur zu brauchbaren Ergebnissen führt, wenn die Düse eine nach unten gerichtete Öffnung besitzt, die sich auf der Höhe der Raupenoberkante bewegt (abstreifendes Verfahren, s. Kapitel 5.2.2) (Abbildung 50). Sobald es einen Abstand zwischen Düsenöffnung und Raupenoberkante gibt, führt dies zu einer Anhäufung von Material an den Kreuzungspunkten und damit an diesen Orten zu Abweichungen von der Sollgeometrie in Z-Richtung.

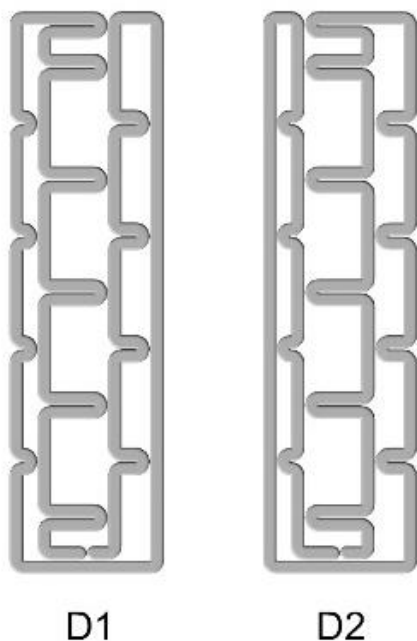


Abbildung 51: Zwei aufeinanderfolgende Schichten eines Objekts mit gleichbleibendem Schichtmuster, aber unterschiedlichen Extrusionspfaden (Bild K. Henke)

Auch bei prismatischen Strukturen ohne Überhänge und mit nur einem Schichtmuster, kann der Pfad, auf dem die Raupe abgelegt wird, von Schicht zu Schicht variieren (s. Abbildung 51). Der damit erreichbare Fugenversatz kann die Stabilität des Bauteils erhöhen.

7.2.3 Unterbrechungsloser Extrusionprozess

Die Herstellung des kompletten 3-dimensionalen Bauteils kann als eine einzige, ununterbrochene Maschinenfahrt realisiert werden, wenn jede einzelne Schicht als Schleife ausgeführt wird, bei der der Endpunkt E unmittelbar neben dem Startpunkt S des Schichtpfades liegt (Loop) (Abbildung 49). Dadurch wird ein unterbrechungsloser Übergang zum Startpunkt der folgenden Schicht ermöglicht und es kann ohne Unterbrechung des Frischbetonflusses extrudiert werden. Dies ist vorteilhaft, da ein Anhalten des Frischbetonflusses (z.B. durch ein Ventil) zu Inkonsistenzen im Material oder gar zu Blockaden im Fördersystem führen kann. Das Risiko von Mängeln im Bauteil durch Fehlstellen oder von vorzeitig erzwungenen Abbrüchen des Fertigungsvorgangs kann so stark verringert werden.

8 Testobjekte und Demonstratoren

8.1 Allgemeines zu Entwurf und Fertigung

Im Laufe der Forschungsarbeiten wurden entsprechend den in den vorangegangenen Kapiteln besprochenen Fragestellungen (z.B. Baubarkeit, Formtreue, Oberflächenqualität, Festigkeit) die verschiedensten Testobjekte gefertigt. Die am Ende des Projektes hergestellten großformatigen Objekte (Abbildung 52) dienen hingegen in erster Linie Demonstrationszwecken (Demonstratoren).



Abbildung 52: Additive Fertigung von Demonstratoren durch Extrusion von Leichtbeton (Foto K. Henke)

Der Entwurf von Testobjekten und Demonstratoren erfolgte direkt über eine geometrische Beschreibung des Extrusionspfades (Abbildung 53).

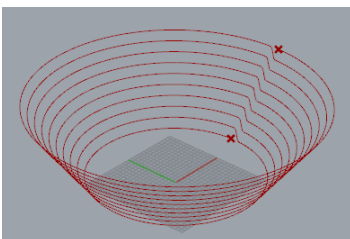


Abbildung 53: Extrusionspfad zur Herstellung eines Kegelstumpfes (Bild K. Henke)

Für die Modellierung der Extrusionspfade kam die Software Grasshopper zum Einsatz. Hierbei handelt es sich um eine Erweiterung für das 3D-Modellierungsprogramm Rhinoceros (kurz: Rhino), mit der über eine visuelle Programmieroberfläche geometrische Objekte (wie z.B. hier Kurven) parametrisch beschrieben werden können. Durch die Änderung von Parameterwerten lassen sich mit geringem Aufwand Varianten erzeugen. Beispiele für Parameter für den in Abbildung 53 dargestellten Kegelstumpf wären etwa Neigung des Kegelmantels, Durchmesser des Basiskreises und die Anzahl der Schichten. Ein weiterer Grund für die Wahl dieser Software war die damit

gegebene Möglichkeit über das Grasshopper Plug-In KUKA PRC Steuerbefehlen für den Roboter zu erzeugen (s. Kapitel 6.3). Mit diesem Setup war es möglich, schnell auf geänderte Vorgaben aus der Material- und Prozessentwicklung zu reagieren und Erkenntnissen aus vorangegangenen Versuchen zu berücksichtigen. Der Einsatz von parametrischer Modellierung mit Grasshopper wird weiter unten beispielhaft an Testobjekten für Überhangversuche illustriert.

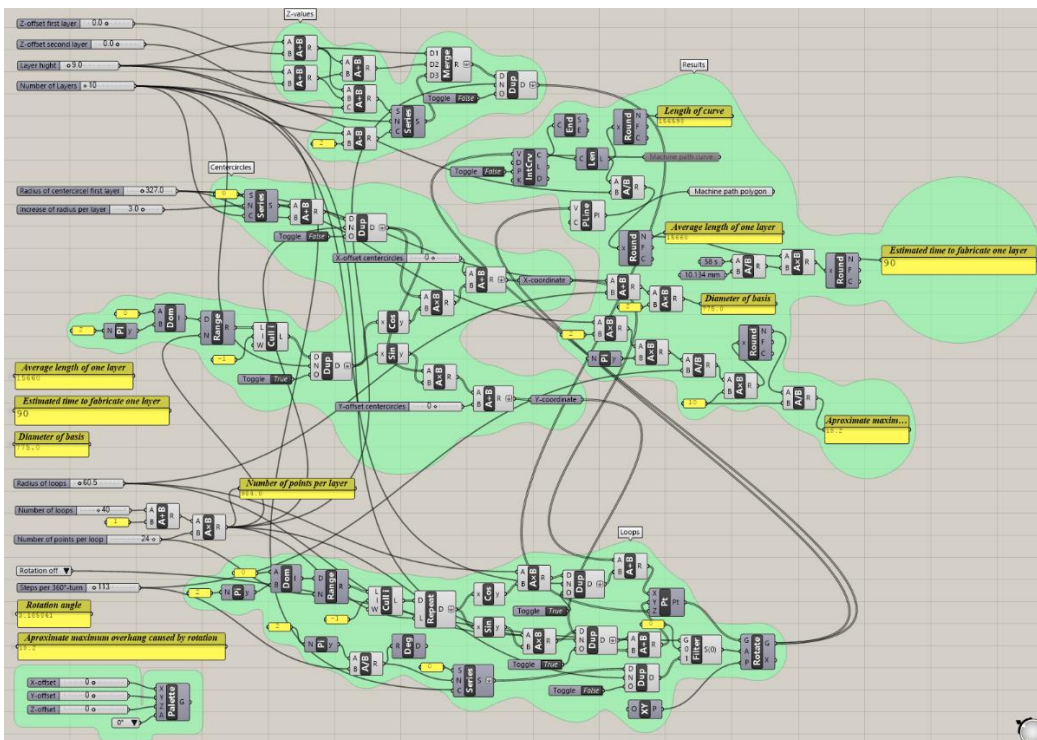


Abbildung 54: Grasshopperdefinition für den Überhangversuch (Bild K. Henke)

Im Folgenden werden einige, ausgewählte Testobjekten und Demonstratoren beschrieben. Das bei der Herstellung verwendete Material ist in Kapitel 2.3 beschrieben, die eingesetzte Mischung kann der Tabelle 3 entnommen werden. Das Mischen des Materials erfolgte im Mischer PFT Multimix 140 Plus (Kapitel 3.3). Als Pumpe kam die PFT Swing L FC-400V Förderpumpe inclusive der oben beschriebenen Kühlung zum Einsatz (Kapitel 3.3). Die Zeit, die nötig war, um eine Charge zu mischen, zu fördern und auszubringen lag bei circa 10 - 40 Minuten. Die Chargengröße wurde entsprechend auf 40 Liter festgelegt und je nach verwendeter Pumpgeschwindigkeit wurde circa alle 15 - 20 Minuten eine neue Charge angesetzt. Die Förderung des Materials erfolgte über einen 10 m langen Förderschlauch mit einem Innendurchmesser von 25 mm (Kapitel 3.3). Als Manipulator diente der KUKA Industrieroboter KR 150 L110 (Kapitel 6.3) mit dem speziell entwickelten Endeffektor (Kapitel 3.3). Bei der Fertigung der Testobjekten und Demonstratoren kamen ausnahmslos starr montierte Düsen mit rundem Querschnitt und einem Öffnungsdurchmesser von 15 mm zur Anwendung (Kapitel 5.3). Die Fahrgeschwindigkeit lag je nach Geometrie zwischen 120 und 200 mm/s. Die Spurlänge einer Schicht und die Fahrgeschwindigkeit wurden so gewählt, dass die Zeit zu Herstellung einer Schicht mindestens 1 Minute beträgt, um der darunter liegenden Schicht Gelegenheit zu geben, ausreichend Struktur aufzubauen, um die folgende Schicht tragen zu können. Konkret lagen die Zeiten pro Schicht zwischen 60 und 80 Sekunden.

8.2 Testobjekte für Überhangversuche

Die geometrische Freiheit von Verfahren der Frischbetonextrusion wird nicht zuletzt dadurch definiert, in welchem Maße es möglich ist, Überhänge zu realisieren. Um das mögliche Maß an Überhängen zu bestimmen, wurden verschiedene Testgeometrien konzipiert. Insbesondere Kegelstümpfe stellen für diesen Zweck geeignete Geometrien dar. Einfache Kegel, wie in Abbildung 53 dargestellt, erwiesen sich jedoch als problematisch, da der Radius sehr groß gewählt werden müsste, um die erforderliche Länge und damit ausreichende Zeitspanne zwischen zwei aufeinanderfolgenden Schichten zu erreichen. Es wurden deshalb Geometrien entwickelt, bei denen der Kegelmantel durch ineinandergreifende Schleifen gebildet wird. Auf diese Weise entsteht auf einer vergleichsweise kleinen Grundfläche ein ausreichend langer Pfad.

Abbildung 54 zeigt die Grasshopperdefinition für diese Testgeometrie. Über die grauen Schieberegler am linken Bildrand lassen sich u.a. folgende Parameter einstellen: Schichthöhe, Anzahl der Schichten, Halbmesser des Objektes an der Basis, Zunahme des Halbmessers (Überhang) pro Schicht, Anzahl der Schleifen pro Schicht und Größe der Schleifen.

Abbildung 55 und Abbildung 56 zeigen zwei Varianten von Extrusionspfaden, die mit dieser Grasshopperdefinition und unterschiedlichen Einstellungen für Anzahl und Größe der Schleifen generiert wurden.

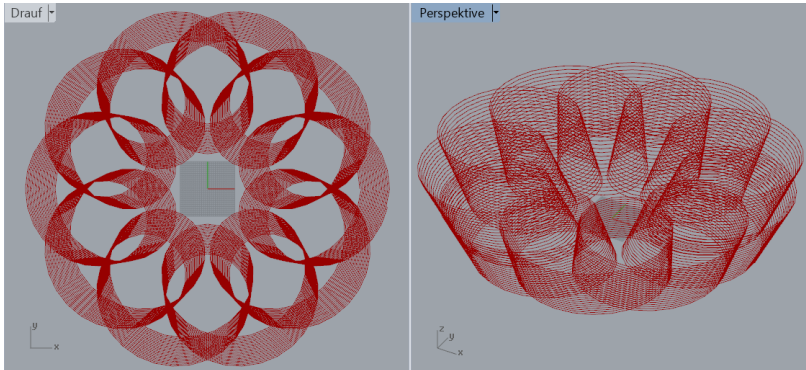


Abbildung 55: Variante für Überhangversuch mit 10 Schleifen (Bild K. Henke)

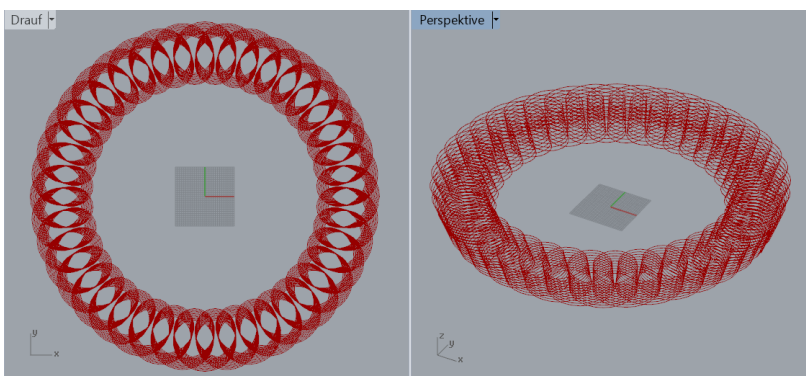


Abbildung 56: Variante für Überhangversuch mit 40 Schleifen (Bild K. Henke)

Abbildung 57 zeigt die Herstellung eines Testobjektes, dessen Extrusionspfad mit dieser Grasshopperdefinition modelliert wurde. Der Halbmesser des Testobjektes wächst von Schicht zu Schicht um 3 mm, was bei der gegebenen Schichthöhe von 9 mm einen Überhang ca. 30% erzeugt. Das Objekt hat an der Basis einen Außendurchmesser von ca. 77,5 cm und misst insgesamt (größter Durchmesser x Höhe) ca. 85 cm x 13,5 cm.

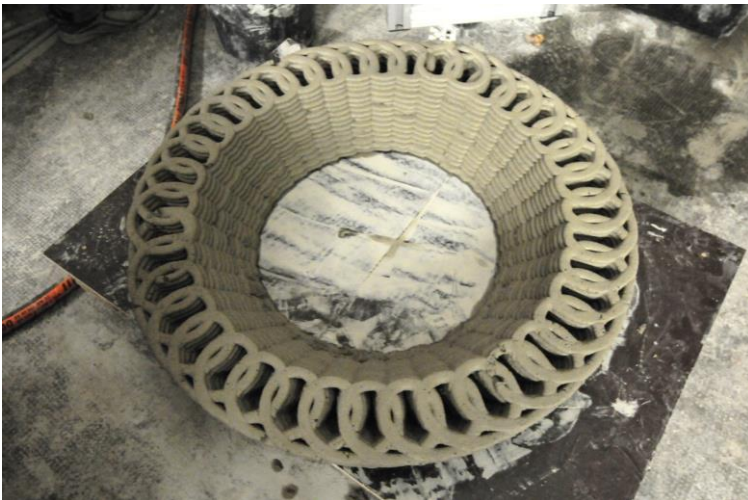


Abbildung 57: Testobjekt Überhangversuch mit ca. 30% Überhang (Foto K. Henke)

8.3 Testobjekte mit geschlossenen Zellen

Die Möglichkeit Überhänge zu realisieren kann unter anderem dazu genutzt werden, Strukturen mit geschlossenen, luftgefüllten Hohlräumen zu schaffen. Im Hinblick auf das Ziel einer optimierten Wärmedämmung sind derartige Strukturen von besonderem Interesse. Aus diesem Grund wurden im Projekt mehrere Versuche mit aus geschlossenen Zellen aufgebauten Strukturen durchgeführt.

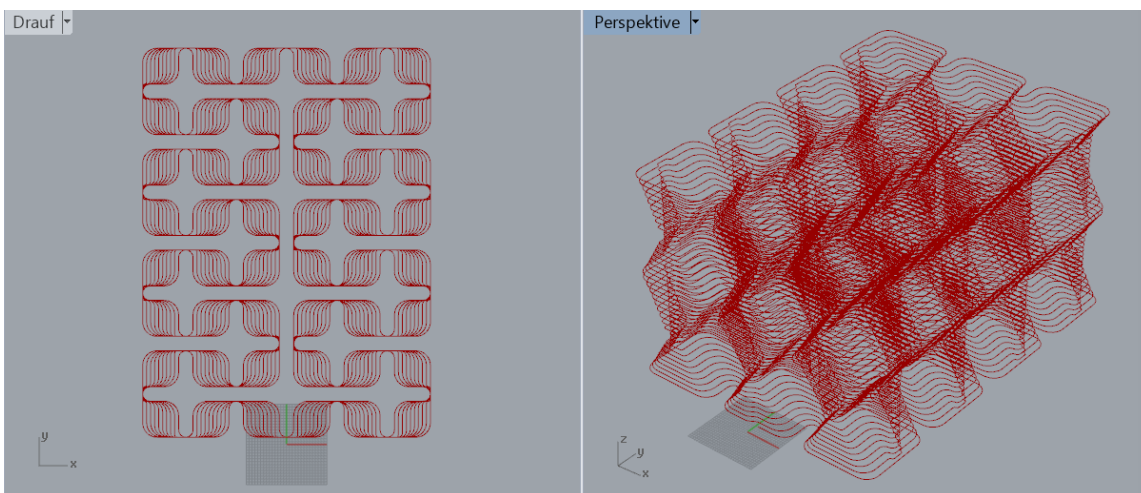


Abbildung 58: Testobjekt mit aus Doppelkeilen aufgebauten Geometrien zur Schaffung von Strukturen mit geschlossenen Hohlräumen, Extrusionspfad (Bild K. Henke)

Beispiele für solche Objekte sind in Abbildung 58 und Abbildung 59 dargestellt. Es handelt sich hier um Geometrien die aus Doppelkeilen aufgebaut sind. Doppelkeile gehören zu den Polyedern, mit denen eine lückenlose Füllung des dreidimensionalen Raumes möglich ist. Sie sind hier besonders gut geeignet, da sie bei richtiger Orientierung ohne horizontale oder flach geneigte Bereiche auskommen, die dazu führen würden, dass die Grenzen der möglichen Überhänge überschritten werden würden. Vielmehr können die dachförmigen Bereiche der Doppelkeile so gestaltet werden, dass ihre Neigung genau dem maximal möglichen Überhang entspricht.



Abbildung 59: Beispiele für Testobjekte mit aus Doppelkeilen aufgebauten Geometrien zur Schaffung von Strukturen mit geschlossenen Hohlräumen (Fotos K. Henke)

Ein weiteres Objekt mit geschlossenen Zellen ging aus einer Masterarbeit hervor (Jaugstetter 2020). Es sollte gezeigt werden, dass mit der additiven Fertigung durch Extrusion von Leichtbeton frei geformte Wandelemente mit inneren Zellstrukturen geschaffen werden können. Zudem sollte die Zellstruktur eine Gradierung durch geometrische Differenzierung erhalten. Als Grundelement für die Struktur wurde der Oktaederstumpf gewählt, ein Körper, mit dem ebenfalls eine lückenlose Füllung des dreidimensionalen Raumes möglich ist. Von all den Polyedern, auf die das zutrifft, ist der Oktaederstumpf dasjenige, welches mit seinen 14 Flächen der idealen Form der Kugel am nächsten kommt. Allerdings musste, um die Grenzen des bei der gegebenen Technologie möglichen Überhangs nicht zu überschreiten, das Polygon entlang seiner vertikalen Achse gestreckt werden. Abbildung 60 zeigt exemplarisch den Extrusionspfad einer Schicht dieses Wandelementes.

Abbildung 61 zeigt das fertige Objekt. Es ist aufgebaut aus 116 Schichten von 9 mm Höhe. Daraus resultiert eine Gesamthöhe von 104 cm. Die Länge beträgt ca. 100 cm. Die Bauteilstärke variiert von 24 bis 45 cm. Die Geometrie erfordert Überhänge von bis zu 4 mm, was sich ohne Probleme praktisch umsetzen ließ. Für den Bau des Objektes waren knapp 2,5 Stunden erforderlich.

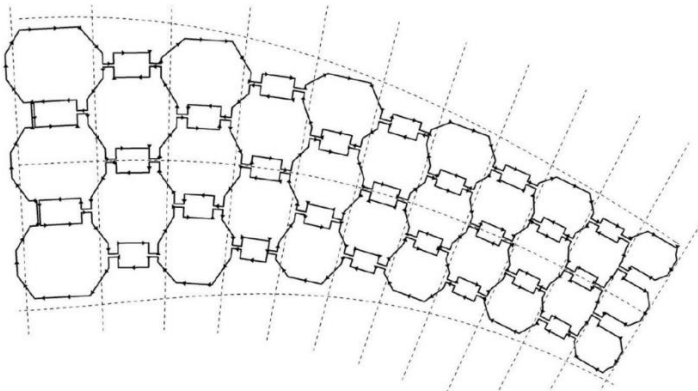


Abbildung 60: Extrusionspfad einer Schicht des Wandelementes mit innerer Zellstruktur aus gestreckten Oktaederstümpfen (Jaugstetter 2020)



Abbildung 61: Wandelement mit inneren Zellstrukturen aus gestreckten Oktaederstümpfen (Foto K. Henke)

8.4 Verschraubter Pfeiler

Bei dem Bauteil handelt es sich um einen Pfeiler, bei dem die 220 ansonsten gleichen quadratischen Schichten jeweils um $0,4^\circ$ gegenüber der darunterliegenden Schicht verdreht sind. Die Einzelschichten haben eine Höhe von 9 mm bei einer Fläche von 69 cm x 69 cm. Das Objekt hat eine Höhe von 198 cm und wurde in einem Zug innerhalb von 5 Stunden gefertigt.

Das Schichtenlayout besteht aus einem Quadrat, das durch diagonal geführte Linien in 61 Felder (41 Rauten, 16 halbe Rauten an den Rändern und 4 viertel Rauten in den Ecken) aufgeteilt wird (Abbildung 62). Der Pfad ist als Schleife (Loop) angelegt, so dass der Endpunkt unmittelbar neben dem Startpunkt des Schichtpfades liegt (vergleiche Kapitel 7.2.3). Er verläuft dabei so, dass zunächst das Innere kreuzschraffiert und anschließend der Rand abgefahren wird. Um die Stabilität der Struktur zu erhöhen, wurde das Layout so gestaltet, dass sich die Raupen an vielen Punkten kreuzen. Außerdem findet jeweils nach dem Abfahren einer halben Zeile des Musters ein

Seitenwechsel statt, so dass eine Verzahnung entsteht (s. Abbildung 62, rechtes Bild). Die Raupen, die den Rand bilden, schneiden die inneren Raupen nicht, sondern werden von letzteren nur berührt. Diese Art der Verbindung (bzw. der gewählte Abstand zwischen den Spuren an dieser Stelle) erwies sich als zu schwach, was nach etwa einem Drittel der Bauzeit zum Einsturz des Randes auf einer Seite des Bauteils führte (s. Abbildung 52 und Abbildung 63, rechtes Bild).

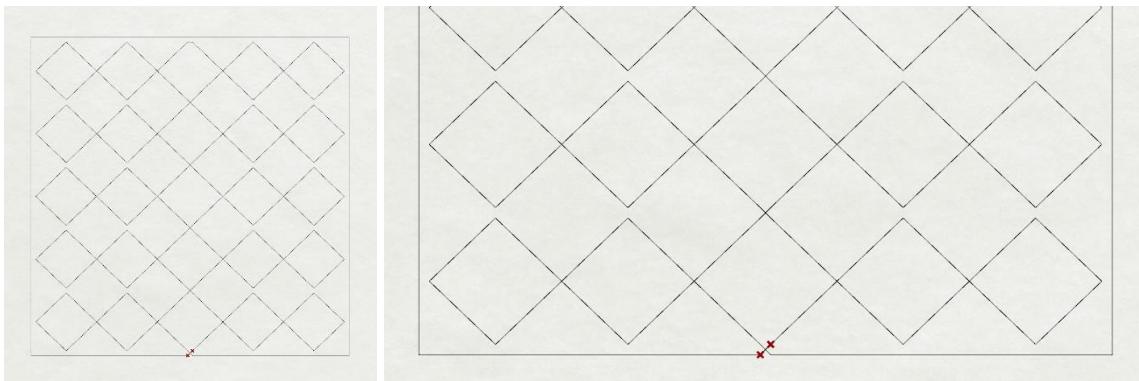


Abbildung 62: Verschraubter Pfeiler, Pfad einer Bauteilschicht, rechts: Ausschnitt (Bilder K. Henke)

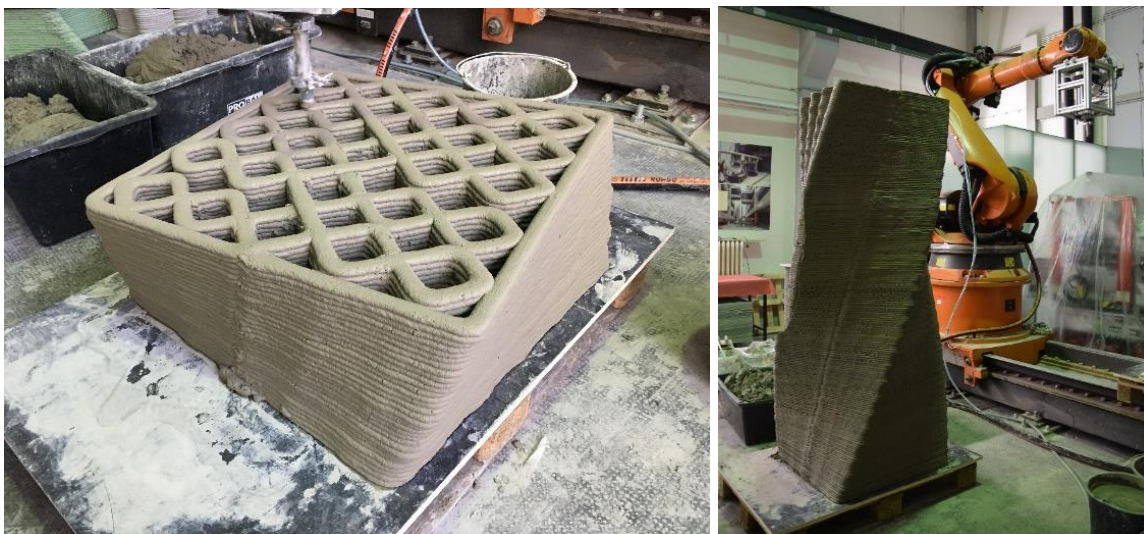


Abbildung 63: Verschraubter Pfeiler während der Herstellung (links) (Foto K. Henke) und nach Fertigstellung (rechts); auf der rechten Seite des Bauteils ist der fehlende Rand zu erkennen (Fotos C. Matthäus)

8.5 Wanelement mit sinusförmigen Extrusionspfaden

Das Objekt ist ein Beispiel für Bauteile, die aus Schichten von identischem Layout aufgebaut sind, wodurch prismatische Strukturen entstehen. Wie in Kapitel 6.2.2 ausgeführt, kann durch den Einsatz von gekrümmten Pfaden die Stabilität solcher Strukturen gefördert werden. Deshalb wurden während des Projektes mehrere Bauteile mit Schichtenlayouts auf der Basis von Sinuskurven gefertigt. Der hier vorgestellte Demonstrator hat ein Layout, das durch sich berührende Sinuskurven gebildet wird. An den Enden sind jeweils zwei Kurven durch Halbkreise miteinander verbunden (Abbildung 64). Dadurch entstehen im Innern 59 senkrecht stehende, über die gesamte Höhe des

Bauteils durchgehende Röhren (Abbildung 65, linkes Bild). Der Extrusionspfad für jede Schicht ist auch hier wieder als Loop ausgebildet, was durch einen durch die Mitte des Objektes führenden Stoß ermöglicht wird (Abbildung 65, rechtes Bild).

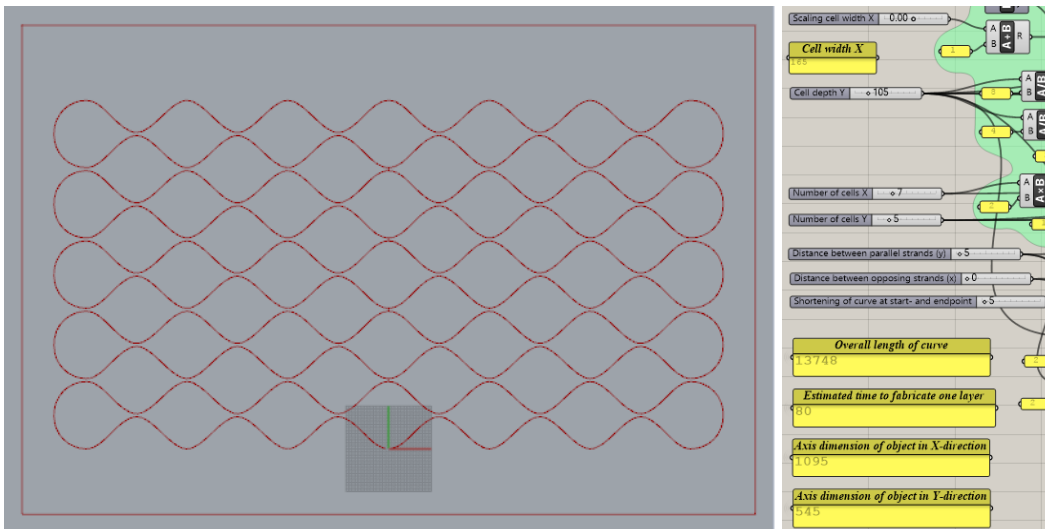


Abbildung 64: Wandelement mit sinusförmigen Extrusionspfaden, Schichtenlayout (links) und Ausschnitt aus der Grasshopperdefinition (rechts) (Bilder K. Henke)

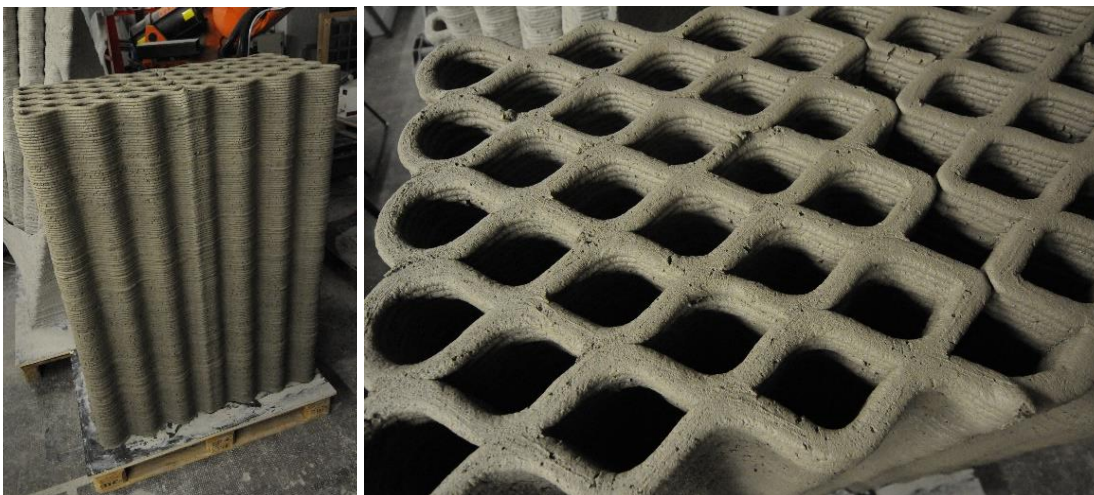


Abbildung 65: Wandelement mit sinusförmigen Extrusionspfaden, rechts: Detail des oberen Abschlusses, deutlich erkennbar der Stoß in der Mitte des Bauteils (Fotos K. Henke)

Das Wandelement ist aus 167 Schichten von 9 mm Höhe aufgebaut und hat folglich eine Höhe von 150 cm. In der Horizontalen misst es 115,5 x 56,5 cm. Es wurde in einem Zug innerhalb von 3,5 Stunden gefertigt.

9 Wirtschaftlichkeit

Die folgende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurde durch den Industriepartner Ed. Züblin AG zusammengestellt. Die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit für additiv gefertigte Bauelemente wurde hier am Beispiel eines multifunktionalen Leichtbetonquerschnitts betrachtet. Zum Vergleich der Wirtschaftlichkeit wurde das Bauteil über die tragenden und wärmedämmenden Eigenschaften bewertet und mit einem äquivalenten Bauteil aus Mauerwerk verglichen. Bei beiden Fertigungsverfahren werden Bauteile ohne Bewehrung und schalungsfrei hergestellt. Damit ist ein Vergleich der Wirtschaftlichkeit zwischen den additiv gefertigten Leichtbetonelementen und den Mauerwerksbauteilen direkt möglich.

Im Zuge der ersten Betrachtung zur Wirtschaftlichkeit sind die reinen Material- und Herstellungskosten gegenübergestellt, die im Mauerwerksbau und der additiven Fertigung anfallen. Es wurden keine Planungsleistungen oder sonstige vorab zu erstellenden Maßnahmen in der preislichen Bewertung erfasst. Wir gehen davon aus, dass diese Vorleistungen entsprechend erbracht und erfüllt sind. Im Referenzbauteil haben wir den klassischen Kalkulationsanteil des Mauerwerksbaus erfasst. D.h. wir haben die konventionelle Bauweise über entsprechende Aufwandswerte und Kosten pro Einheit bewertet. Die additive Fertigung wurde im Sinne eines entsprechenden Industrieproduktes kalkuliert. In der Kostenauswertung wurde sowohl die geometrische Anforderung als auch die bauphysikalische Anforderung betrachtet und bewertet.

Um die unterschiedlichen Bereiche und Formenfreiheitsgrade zu erfassen, wurde die Wirtschaftlichkeit unter diversen Gesichtspunkten und Anwendungsfällen betrachtet. So wurde in einer Betrachtungsart die bauphysikalische Anforderung angepasst und justiert. In einer anderen Untersuchungsreihe wurde die Formfreiheit in den Vordergrund gestellt, um ggf. vorteilhafte oder negative Faktoren zu erfassen und zu berücksichtigen. Die geometrische Varianz beinhaltet in dieser Gegenüberstellung nicht nur eine ggf. angepasste Grundrissform, sondern ebenso Aussparungen, Öffnungen, Fenster und Türen, sowie gekrümmte und geradlinige Wandbereiche.

In Bezug auf die Zuschreibung von Herstellkosten und Herstellungsdauer zur additiven Fertigung der Bauteile kann ggf. eine andere Betrachtung und Zuordnung der Fixkosten erfolgen, da ggf. in kürzerer Zeit eine höhere Stückzahl produziert werden kann. Aussagen zur Wirtschaftlichkeit im Bereich der additiven Herstellung basieren auf einer Analyse der aktuellen Kosten. Es werden folgende Punkte und Inhalte zur additiven Fertigung betrachtet und als Eingangsgrößen für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung bezeichnet:

- Bauzeit/ Herstellkosten je Bauteil
- Bauteile je Herstellungsvorgang
- jährliche Betriebszeit der Maschine
- Abschreibungskosten der Anlage/ Maschine
- Wartungskosten der Maschine
- Stundenlohn/ Lohnkosten
- Materialkosten Druckmaterial
- Materialkosten Supportbereiche (Stützkonstruktion, ggf. Unterrüstungen, etc.)

Hier kann abgelesen werden, dass die Material- und Maschinenkosten bei einer höheren Stückzahl sicherlich reduziert werden können. Ebenso kann festgestellt werden, dass sich die indirekten Kosten negativ auswirken, je geringer die Stückzahlen und Einsatzzeiten ausfallen.

Um eine abschließende, vollumfängliche Aussage bezüglich des kompletten Prozesses in der additiven Fertigung zu erhalten, wurde die Methode nach Krauss, Eschey, Götzfried, Teufelhart, Westhäuser, Zäh und Reinhart (Krauss et al. 2011) gewählt. Hierbei werden monetäre und temporäre Fakten betrachtet und ausgewertet.

In der Bauindustrie befindet sich die additive Fertigung noch ganz am Anfang. Es wurden diverse Projekte über den Globus verteilt umgesetzt und ausgeführt. So unter anderem in China und den USA. Es liegen hierzu jedoch noch keine langfristigen Informationen und Angaben vor, da die Herstellung mit der additiven Methodik noch am Anfang steht. Die gesamte additive Technik in der Bauindustrie befindet sich in einer sehr frühen Entwicklungsphase und kann daher noch nicht als entsprechendes Fertigungsverfahren bezeichnet werden. In einer ersten Zusammenstellung und Ausarbeitung kann eine rudimentäre Betrachtung der Wirtschaftlichkeit unter Ansatz einer Kostenvergleichsrechnung erstellt werden. Sämtliche Betrachtungen müssen auf Basis eines prototypischen Denkens erstellt werden. Die erste wirtschaftliche Betrachtung bezieht sich auf einen einfachen Grundriss eines Gebäudes, der mit konventioneller Methodik erfasst und parallel mit der additiven Methodik betrachtet wird. Dieser Vergleich auf Basis der konventionellen Methodik und der additiven, stellt somit den Bezug zwischen den beiden Verfahren her.

Da es sich um eine neu eingeführte Herstellungsmethode handelt, gehen wir davon aus, dass sich die konventionelle und die neueingeführte Methode nach und nach ausgleichen werden. Die additive Fertigung betrachteten wir mit einem Anteil von 50 % in der ersten Anlaufphase. So müssen weiterhin 50 % der gesamten Leistung durch konventionelle Baumaßnahme hergestellt werden. Eine Zunahme der additiven Fertigung im Laufe der Jahre setzen wir hier voraus. Wir vergleichen als konventionelle Herstellmethode an dieser Stelle den klassischen Mauerwerksbau, da die beiden Verfahren direkt vergleichbar sind. Beide Herstellmethoden sind schalungsfrei und benötigen keine Bewehrung.

Auf Seite der additiven Methode wurden

- Investitionskosten (Anschaffung),
- Reparatur & Wartung,
- Personalkosten,
- Materialkosten inklusive Materialverschnitt und
- Energiekosten

berücksichtigt. Diese Kostenfaktoren variieren je nach Kapazitätsauslastung der Maschine, Bauteilgeometrie, Druckparameter und Gesamtfüllgrad des Bauteils.

Entscheidende Faktoren stellen zum einen die Bauteilgeometrie dar und die Kapazitätsauslastung der Maschinen. Die Bauteilgeometrie geht in die zeitliche Betrachtung und damit in die Lohnkosten ein. Die Auslastung der Maschine geht in die zeitliche Betrachtung ein, da hier ggf. über die acht

Stunden hinausgerechnet werden kann (zwei- oder Mehrschichtbetrieb, um die Maschine entsprechend auszulasten). Um diese Bereiche und Faktoren zu erfassen und auszuwerten, wurde ein einfacher, geradliniger Grundriss und ein gekrümmter Grundriss betrachtet. Hierbei sollten die Unterschiede der Methode erörtert und ausgewertet werden.

In Bezug auf die Wirtschaftlichkeit ist dabei ein optimales Verhältnis zwischen Druckzeit und Gesamtfüllgrad anzustreben. Man kann die Kosten durch Querschnittsoptimierung anpassen und entsprechend steuern.

Auswertung Mustergrundriss MFH in konventioneller Bauweise mit WDVS gegenüber additiver Fertigung

Kapazitätsauslastung		additive Fertigung		konventionell	
		gem. erw. Marktanteil	100%	100%	100%, komplex
Kapitalwert der Kosten additiv	Leichtbetonquerschnitt	14.051.123,64	14.573.298,30	-	-
Kapitalwerte der Kosten konventionell	Mauerarbeiten	-	-	8.478.444,21	8.918.524,38
	WDVS	-	-	8.814.046,71	9.618.152,19
Projekte (rechn. Ansatz über Anteil)		330,4	357,19	357,19	357,19
Stockwerke/ Projekt		3	3	3	3
m² je Stockwerk additiv	Leichtbetonquerschnitt	32,32	-	-	-
m² je Stockwerk konventionell	Mauerarbeiten	-	-	28,57	-
	WDVS	-	-	25,30	-
m² je Stockwerk additiv	Leichtbetonquerschnitt	142,86	-	-	-
m² je Stockwerk konventionell	Mauerarbeiten	-	-	142,86	-
	WDVS	-	-	112,46	-
Kosten je m³ [Euro]		438,55	420,73	602,00	646,03
Kosten je m² [Euro]		99,23	95,20	128,53	138,08

m² = Außenwand, bzw. Baustoff verbaut
 m² = Außenwand, bzw. Baustoff verbaut
 (Vergleichsbetrachtung Außenwand MFH inkl. WDVS mit 3 aufgehenden Geschossen)

Kosteneinsparung je m² [Euro]	29,30	42,88
-------------------------------	-------	-------

Abbildung 66: Kostenbetrachtung Euro/m² (Bild Ed. Züblin AG)

Die Herstellung diverser Bauteile im additiven Fertigungsverfahren stellt eine entsprechende Alternative zur herkömmlichen Methode dar. Im Zuge der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurde die additive Fertigung mit dem konventionellen Mauerwerksbau gegenübergestellt, da beide Verfahren ohne Schalung und Bewehrung auskommen und somit direkt vergleichbar sind. Innerhalb der Betrachtung wurde eine anfängliche Auslastung der neuen Technologie mit 50 % angesetzt. Die restlichen 50 % wurden durch konventionelle Methoden im Mauerwerksbau abgebildet. Die Auslastung wurde in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung stetig nach oben gesetzt, so dass der Anteil der konventionellen Baumethode immer weiter abnehmen wird. Insgesamt wurde ein Zeitraum von 20 Jahren betrachtet. Weiterhin wurde in der wirtschaftlichen Gegenüberstellung ein konventioneller, geradliniger Grundriss und ein im Grundriss gekrümmt verlaufender Wandverlauf betrachtet.

Man muss bei der wirtschaftlichen Betrachtung der Verfahren im konventionellen Bauverfahren und der additiven Fertigung zwei bzw. drei Gesichtspunkte beachten. Die additive Methode ist in der ersten Anschaffungs- und Auslastungsperiode noch mit einem leichten Prozentsatz im Minus

bewertet. Im Laufe der Betrachtungszeit und mit fortschreitendem Marktanteil kann jedoch relativ schnell ein positiver Ansatz ausgewertet werden. Dieser Sachverhalt resultiert aus den sinkenden Personal- und Maschinenkosten.

Noch gravierender lässt sich dieses Ergebnis, zum Vorteil der additiven Fertigung, an komplexen und aufwändigeren Querschnitten und Geometrien ablesen und erkennen. Je komplexer und anspruchsvoller die Geometrie ist, desto höher ist der Material- und Personalkostenanteil bei der Betrachtung der Kosten. Die komplexe und z.B. geschwungene Form stellt für die additive Fertigung, im Vergleich zur konventionellen Baumethode, keine nennenswerte Kostengröße dar.

Eine einfache und deutliche Darstellung der wirtschaftlichen Vorteile der additiven Fertigungsmethode kann über die Betrachtung der m^2 - oder m^3 -Kosten erreicht werden (Abbildung 66). Hier ist zu erkennen, dass rein die Komplexität im Grundriss ausreicht, um eine Kostensteigerung von 7 % zu verursachen. Bei der additiven Fertigung ergibt sich ein wirtschaftlicher Vorteil von 37 % bei einer einfachen, gewöhnlichen Grundrissgeometrie. Ist die Anordnung entsprechend komplex oder gekrümmt lässt sich sogar ein Vorteil von bis zu 48 % ableiten. Unter der Voraussetzung, dass eine konstante Kapazitätsauslastung von 100 % ab dem frühesten Zeitpunkt $T = 1$ gegeben ist, kann man davon ausgehen, dass der Kostenvorteil bei ca. 40 % bis 45 %, im komplexen Lastfall, betragen wird.

Für eine serielle Fertigung, Produktion und Abbildung dieser monetären Vorteile ist jedoch noch weitere Entwicklungsarbeit notwendig. Es gilt in diesem Zusammenhang die Wandstärken, Spurbreiten und die Wärmeleitfähigkeit des Materials zu erörtern und zu verbessern. Es gilt das gesamte Zusammenspiel der gesetzten Faktoren zu erörtern und zu verbessern. Ausschlaggebend in der aktuellen Situation für die Wandstärke ist vor allem die Wärmeleitfähigkeit des Leichtbetons. Somit ist die Wirtschaftlichkeit der additiven Fertigung an die Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit des Leichtbetons gekoppelt. Die Vorteilhaftigkeit der additiven Fertigung gegenüber der herkömmlichen Bauweise ist jedoch so hoch, dass auch bei Ausführung weiterer Randarbeiten zum Erreichen des Wärmeschutzes, die wirtschaftlichen Vorteile der additiven Fertigung und Produktion gegeben bleiben. Der Nutzen und die Vorteile der additiven Fertigung stellen sich insbesondere bei anspruchsvollen und komplexeren Grundrissformen und Gebäuden hervor. Hier entfallen entsprechend Material- und Lohnkosten, da die additive Fertigung keinen großen Unterschied in einer geradlinigen Spurführung oder in einer gekrümmten, oder sogar kreisförmigen, Spur macht.

Bei einer anfänglich hohen Investition, jedoch auf mehrere Jahre betrachtet, stellt die additive Fertigung für uns jedoch eine durchaus umsetzbare und kalkulierbare Methode zur Fertigung gewisser Bauteile dar. Eine exakte und ausführliche wirtschaftliche Betrachtung kann im Laufe der nächsten Jahre erstellt werden, wenn sich die Material- und Maschinenerfahrung in Bezug auf die additive Fertigung weiterentwickelt haben.

10 Fazit, Ausblick

Ziel des Forschungsvorhabens ‚Additive Fertigung von multifunktionalen, monolithischen Wandelementen durch Extrusion von Leichtbeton (LC3D)‘ war es, die Anwendungspotentiale der additiven Fertigung durch Frischbetonextrusion konsequent umzusetzen. Die Wahl fiel deshalb auf den Werkstoff Leichtbeton, der Trag- und Dämmfähigkeit in sich vereint. Durch die Kombination dieses Werkstoffs mit der Frischbetonextrusion ist es möglich, schalungsfrei errichtete, thermisch und strukturell optimierte Bauelemente zu fertigen, die ohne zusätzliche Wärmedämmung in der Gebäudehülle eingesetzt werden können. Die für das Projekt gewählten feinen Raupen gewähren eine hohe Auflösung und ermöglichen die Schaffung von filigranen Hohlraumstrukturen mit variierender Dichte, die die Grundlage für die Funktionalisierung der Bauteile darstellen. Die geringe Rohdichte des Werkstoffs erleichtert die Baubarkeit im Vergleich mit Normalbetonen. Und schließlich zeigt das durch diesen Ansatz ermöglichte monolithische Bauen Vorteile in Hinblick auf die Recyclingfähigkeit.

Im Projekt wurden für alle Komponenten des Fertigungssystems maßgeschneiderte Lösungen erarbeitet und aufeinander abgestimmt: Leichtbetonrezepturen, die sowohl in Hinblick auf die Frischbetoneigenschaften, als auch auf die Festbetoneigenschaften optimiert sind, eine an den Werkstoff angepasste, kontinuierlich arbeitende Misch- und Fördertechnik, optimierte Schichtenlayouts, prozessgerecht gestaltete Düsen und eine durchgängige digitale Prozesskette aus Modellier- und Steuerungstools für die Steuerung des Roboters.

Mit dieser Ausstattung wurden diverse Testobjekte und Demonstratoren hergestellt und damit die Machbarkeit des vorgeschlagenen Verfahrens nachgewiesen.

In der Forschungsarbeit konnten anwendungsreife Leichtbetonrezepturen für den speziellen Extrusionsprozess gefunden werden. Hier wären in zukünftigen Arbeiten noch das Schwind- und Kriechverhalten sowie die Dauerhaftigkeit, vor allem der Frostwiderstand, zu untersuchen.

Gegenstand des Projektes war unbewehrter Beton. Wenn in Zukunft durch weitere Forschungsarbeiten die Integration von Bewehrung machbar wird, wird dies die Einsatzmöglichkeiten der Leichtbetonextrusion noch deutlich erhöhen.

Durch die Verbesserung der Fördertechnik, insbesondere die automatische Zufuhr der Ausgangsmaterialien, das Brechen der Struktur im Pumptrog sowie die Auslegung der Pumpe auf geringere Umdrehungsgeschwindigkeiten, kann die Materialoptimierung noch weiter vereinfacht werden.

Ein anderer vielversprechender Ansatz ist das düsennahe Mischen, bei dem die trockenen und flüssigen Bestandteile des Frischbetons erst kurz vor dem Austritt aus der Düse gemischt werden. Dies würde die Anforderungen an den Frischbeton erheblich reduzieren und gleichzeitig eine funktionale Gradierung durch eine Änderung der Mischungsverhältnisse während des Prozesses erlauben.

Die bisher notwendige Vorsättigung der Leichtzuschläge ist aufwendig und zeitintensiv und sollte zukünftig vermieden werden. Hier wären alternative Vorbehandlungsverfahren für die Leichtzuschläge zu entwickeln.

Es konnte gezeigt werden, dass mit dem Verfahren Objekte mit inneren Hohlraumstrukturen und frei geformter Oberflächengeometrie hergestellt werden können. Dies kann genutzt werden, um thermisch und strukturell optimierte Bauteile herzustellen. Wie solche Strukturen in Form und Größe genau zu gestalten sind, ist allerdings noch zu untersuchen.

11 Literaturverzeichnis

Abebe, Yared Assefa (2017): Flowable and stable concrete. Design, Characterization and Performance Evaluation. Dissertation: Lohaus, Institute für Baustoffe (Berichte aus dem Institut für Baustoffe, Leibniz Universität Hannover, Heft 14).

Bauer, Hermann; Poppy, Wolfgang (1974): Grundlagen für das Pumpen von Leichtbeton: Untersuchungen über den Einfluß des Wasserhaushalts leichter poröser Zuschläge auf die Pumpwilligkeit von Leichtbeton: Hauptverb. d. Dt. Bauindustrie.

Chandra, S.; Björnström, J. (2002): Influence of cement and superplasticizers type and dosage on the fluidity of cement mortars—Part I. In: *Cement and Concrete Research* 32 (10), S. 1605–1611. DOI: 10.1016/S0008-8846(02)00839-6.

Cyr, Martin; Legrand, Claude; Mouret, Michel (2000): Study of the shear thickening effect of superplasticizers on the rheological behaviour of cement pastes containing or not mineral additives. In: *Cement and Concrete Research* 30 (9), S. 1477–1483.

Dennert Poraver GmbH (2018): Poraver - Technische Daten. Online verfügbar unter <https://www.poraver.com/technische-daten-poraver/>, zuletzt geprüft am 03.08.2018.

DIN EN 1097-6:2013-09: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme.

DIN EN 13055:2016-11 Leichte Gesteinskörnungen.

2017-01: DIN EN 206:2017-01: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität.

DIN EN 480-2:2006-11: Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel - Prüfverfahren - Teil 2: Bestimmung der Erstarrungszeit.

Faust, Thorsten (2003): Leichtbeton im Konstruktiven Ingenieurbau. Berlin: Ernst & Sohn (Bauingenieur-Praxis).

Henke, Klaudius; Talke, Daniel; Matthäus, Carla (2020): Additive Manufacturing by Extrusion of Lightweight Concrete - Strand Geometry, Nozzle Design and Layer Layout. In: *Proceedings of the 2nd RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*, S. 906–915.

Henke, Klaudius; Talke, Daniel; Winter, Stefan (2017): Multifunctional Concrete-Additive Manufacturing by the Use of Lightweight Concrete. In: *Proceedings of IASS Annual Symposia*, Bd. 2017. International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), S. 1–9.

Jacobsen, Stefan; Mork, Jon H.; Lee, Siaw F.; Haugan, Lars (2008): Pumping of concrete and mortar - State of the art. In: *COIN Project Report 5*, S. 1–44.

Jaugstetter, Fabian (2020): Design Tool for Extrusion Based Additive Manufacturing of Functionally Enhanced Lightweight Concrete Wall Elements with Internal Cellular Structures. Master's Thesis. Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion & TT Professorship Digital Fabrication, Technische Universität München.

Kazemian, Ali; Yuan, Xiao; Cochran, Evan; Khoshnevis, Behrokh (2017): Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture. In: *Construction and Building Materials* 145, S. 639–647. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.015.

Keita, Emmanuel; Bessaies-Bey, Hela; Zuo, Wenqiang; Belin, Patrick; Roussel, Nicolas (2019): Weak bond strength between successive layers in extrusion-based additive manufacturing: measurement and physical origin. In: *Cement and Concrete Research* 123, S. 105787. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.105787.

Knauf PFT GmbH & Co. KG (2018a): PFT Rotor / Stator Programm – D 8-1,5 wf. Online verfügbar unter http://www.pft.eu/www/de/produkte/rotor_stator_program/rotor_stator_programs_1.php?prod_id=30, zuletzt geprüft am 03.08.2018.

Knauf PFT GmbH & Co. KG (2018b): PFT Swing L FC-400V – DE/02.16/PFT. Online verfügbar unter https://www.pft.eu/www/de/produkte/produktprogramm/foerderpumpen/foerderpumpe.php?stein_id=734&system_id=148&lv_id=8., zuletzt geprüft am 01.08.2018.

Koehler, Eric; Fowler, David (2007): ICAR Mixture Proportioning Procedure for Self-Consolidating Concrete.

Krauss, Harald; Eschey, Christian; Götzfried, Alexander; Teufelhart, Stefan; Westhäuser, Sebastian; Zäh, Michael; Reinhart, Gunther (2011): Modellgestützte und hierarchische Prozesskettenbetrachtung für die additive Fertigung. In: *RTEjournal-Forum für Rapid Technologie*, Bd. 8.

Leufgens, Nadine; Waldmann, Danièle; Zürbes, Arno; Maas, Stefan (2009): Thermische und Mechanische Eigenschaftswerte von haufwerksporigen Leichtbetonen (LAC) zur Optimierung von Wärmedämmsteinen. In: *Ibausil*.

Matthäus, Carla; Back, Daniel; Weger, Daniel; Kränkel, Thomas; Scheydt, Jennifer; Gehlen, Christoph (2020a): Effect of Cement Type and Limestone Powder Content on Extrudability of Lightweight Concrete. In: *Proceedings of the 2nd RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*, S. 312–322. DOI: 10.1007/978-3-030-49916-7_32.

Matthäus, Carla; Weger, Daniel; Kränkel, Thomas; Carvalho, Luis Santos; Gehlen, Christoph (2019): Extrusion of Lightweight Concrete: Rheological Investigations. In: *Rheology and Processing of Construction Materials*: Springer, S. 409–416.

Matthäus, Carla; Weger, Daniel; Kränkel, Thomas; Gehlen, Christoph (2020b): Effect of Thixotropy Enhancing Agents on Extrudability of Lightweight Concrete. In: *Proceedings of HiPerMat 2020, 5th International Symposium on Ultra-High Performance Concrete and High Performance Construction Materials*, S. 62–63.

Neunast, Armin; Lange, Friederike (2001): *Leichtbeton Handbuch*. Düsseldorf: Verl. Bau und Technik.

Panda, Biranchi; Noor Mohamed, Nisar Ahamed; Paul, Suvash Chandra; Bhagath Singh, Gvp; Tan, Ming Jen; Šavija, Branko (2019): The Effect of Material Fresh Properties and Process Parameters

on Buildability and Interlayer Adhesion of 3D Printed Concrete. In: *Materials (Basel, Switzerland)* 12 (13). DOI: 10.3390/ma12132149.

Panda, Biranchi; Paul, Suvash Chandra; Mohamed, Nisar Ahamed Noor; Tay, Yi Wei Daniel; Tan, Ming Jen (2018): Measurement of tensile bond strength of 3D printed geopolymer mortar. In: *Measurement* 113, S. 108–116. DOI: 10.1016/j.measurement.2017.08.051.

Perrot, Arnaud; Rangeard, D.; Pierre, A. (2016): Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. In: *Materials and Structures* 49 (4), S. 1213–1220. DOI: 10.1617/s11527-015-0571-0.

Project NEXT (2018): News. Online verfügbar unter <http://www.projectnext.world>, zuletzt geprüft am 03.08.2018.

Ramachandran, V. S. (2010): Concrete admixtures handbook. Properties, science, and technology. 2nd ed. Park Ridge, N.J., U.S.A: Noyes Publications (Building materials science series).

Reiter, Lex; Wangler, Timothy; Roussel, Nicolas; Flatt, Robert J. (2018): The role of early age structural build-up in digital fabrication with concrete. In: *Cement and Concrete Research* 112, S. 86–95. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.05.011.

Roussel, Nicolas (2006): A thixotropy model for fresh fluid concretes. Theory, validation and applications. In: *Cement and Concrete Research* 36 (10), S. 1797–1806. DOI: 10.1016/j.cemconres.2006.05.025.

Roussel, Nicolas (2018): Rheological requirements for printable concretes. In: *Cement and Concrete Research* 112, S. 76–85. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.04.005.

Schutter, Geert de; Feys, Dimitri (2016): Pumping of Fresh Concrete: Insights and Challenges. In: *RILEM Tech Lett* 1, S. 76. DOI: 10.21809/rilemtechlett.2016.15.

Secrieru, Egor (2017): Pumping behaviour of modern concretes - Characterisation and prediction.

Secrieru, Egor (2018): Pumping behaviour of modern concretes. Characterisation and prediction. In: *Schriftenreihe des Institutes für Baustoffe* ifB Heft 2018 (2).

Suiker, A. S.J. (2018): Mechanical performance of wall structures in 3D printing processes: Theory, design tools and experiments. In: *International Journal of Mechanical Sciences* 137, S. 145–170.

Thienel, Karl-Christian (2018): Gefügedichter und haufwerksporiger Leichtbeton. Universität der Bundeswehr München. Institut für Werkstoffe des Bauwesens.

Wangler, Timothy; Lloret, Ena; Reiter, Lex; Hack, Norman; Gramazio, Fabio; Kohler, Matthias et al. (2016): Digital Concrete. Opportunities and Challenges. In: *RILEM Tech Lett* 1, S. 67. DOI: 10.21809/rilemtechlett.2016.16.

Winter, Stefan; Henke, Klaudius; Talke, Daniel (2016): Additive Fertigung frei geformter Bauelemente durch numerisch gesteuerte Extrusion von Holzleichtbeton. Abschlussbericht. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag (Forschungsinitiative Zukunft Bau, F3002).

Wolfs, R. J. M.; Suiker, A. S. J. (2019): Structural failure during extrusion-based 3D printing processes. In: *Int J Adv Manuf Technol* 104 (1-4), S. 565–584. DOI: 10.1007/s00170-019-03844-6.

Wolfs, Rob; Bos, F. P.; Salet, T.A.M. (2018): Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing. In: *Cement and Concrete Research* 106, S. 103–116. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.02.001.

12 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Strukturmodell des Lastabtrags von Normalbeton, Beton mit gleichverteilten Steifigkeiten und Leichtbeton (Faust 2003)	8
Abbildung 2: Phasen der Leichtbetonextrusion (Bild C. Matthäus).....	10
Abbildung 3: Thixotropes Verhalten (Bild C. Matthäus).....	11
Abbildung 4: Sieblinienverteilungen der unterschiedlichen verwendeten Zemente und Kalksteinmehle (Bild C. Matthäus).....	13
Abbildung 5: Optimierte Sieblinie der Leichtzuschläge und Einzelsieblinien der Kornfraktionen (Bild C. Matthäus).....	15
Abbildung 6: Vane-in-cup Rheometer Viskomat NT (Foto C. Matthäus)	18
Abbildung 7: Schalung für die Probekörper des Auflastversuchs (links) und schematische Darstellung des Auflastversuchs mit Gegenüberstellung der druckbaren Schichten (rechts) (Bilder C. Matthäus).....	20
Abbildung 8: Schematische Darstellung des Probekörpers und der Position der herausgesägten Prismen für die Beurteilung des Schichtenverbundes (Bilder N. Kofler)	21
Abbildung 9: Schematische Darstellung der Prüfung von Biegezug- und Druckfestigkeit an horizontal (oben) und vertikal entnommenen Proben (unten) (Bilder N. Kofler).....	21
Abbildung 10: Förderpumpen: Schneckenextruder (links), PFT Swing L FC-400V Förderpumpe (hier mit aufgesetztem PFT Multimix 140 Plus Mischer) (rechts) (Fotos C. Matthäus).....	22
Abbildung 11: Drehbares Düsensystem der Exzentrerschneckenpumpe, an Industrieroboter montiert (Foto D. Talke).....	24
Abbildung 12: Druckfestigkeiten nach 1 und 28 Tagen für unterschiedliche Zement- und Kalksteinmehlkombinationen (Bild C. Matthäus)	25
Abbildung 13: Gegenüberstellung von Druckfestigkeit und scheinbarer Viskosität der betrachteten Materialien (Matthäus et al. 2020a)	27
Abbildung 14: Verhalten von Beton in einem Schlauch während des Pumpvorgangs (Secieru 2017).....	28
Abbildung 15: Druck und Durchflussrate beim Pumpen von Materialien ohne (CEM C) und bei Ersatz des Zements mit 20 Vol.-% (C+20LP) bzw. 40 Vol.-% (C+40LP) Kalksteinmehl (Matthäus et al. 2020a).....	30

Abbildung 16: Verhältnis von Druck und Kalksteinmehlgehalt (links) sowie zwischen Druck und Rohdichteerhöhung während des Pumpens (rechts) nach (Matthäus et al. 2020a).....	30
Abbildung 17: Veränderung des Drucks und der Temperatur mit variierender Pumpfrequenz (Bild C. Matthäus)	31
Abbildung 18: Stabilitätsversagen (links) und Plastisches Versagen (rechts) (Wolfs und Suiker 2019).....	32
Abbildung 19: Aufnehmbare Schubspannung der untersten Schicht sowie einwirkende Schubspannung aus nachfolgenden Schichten über die Zeit für eine Druckgeschwindigkeit von 30s/Schicht und 60s/Schicht (Bild C. Matthäus)	34
Abbildung 20: Plastisches Versagen der untersten Schicht (links im Bild) bei einer Druckgeschwindigkeit von 30s/Schicht (Foto C. Matthäus).....	34
Abbildung 21: Stabilitätsversagen einer einzeln stehenden Schicht (Foto C. Matthäus).....	35
Abbildung 22: Leichtbetonzylinder während der Belastung (Fotos C. Matthäus)	37
Abbildung 23: Oberflächenqualität beim Fertigungsprozess, links: oberflächliche Risse, Mitte: Abreißen der Stränge, rechts: Verformung von zu fließfähigem Material (Fotos C. Matthäus).....	38
Abbildung 24: Zylinder auf Basis der selben Mischung ohne (links) und mit Luftporenstabilisierer (rechts). Durch den Einsatz des Luftporenstabilisierers konnten Risse in den Strängen signifikant reduziert werden (Fotos C. Matthäus)	39
Abbildung 25: Profilierte Düse und daraus erstellte Prismen mit Luftporen zwischen den Schichten sowie mit glatter Düse erstellte Prismen ohne Luftporen (Fotos K. Daporta)	40
Abbildung 26: Aus einem 3D-gedruckten Element herausgesägter Probekörper zur Bestimmung der Festbetoneigenschaften und Messung der Wärmeleitfähigkeit (Fotos C. Matthäus).....	41
Abbildung 27: Verhältnis zwischen Wärmeleitfähigkeit und Rohdichte sowie Wärmeleitfähigkeit und Druckfestigkeit für Rezepturen mit unterschiedlichen Kalksteinmehlgehalten (Bilder C. Matthäus).....	42
Abbildung 28: Zunahme der Wärmeleitfähigkeit mit der Pumpgeschwindigkeit (vor dem Pumpen, 7,3 Hz, 15,6 Hz und 26,3 Hz) am Beispiel der Rezeptur mit 20 Vol.-% Kalksteinmehl (Bild C. Matthäus).....	42
Abbildung 29: Elemente des Misch- und Fördersystems: Behältnisse mit Ausgangsstoffen (A, B, C), Mischer (M), Pumpe (F), Düse (D), Weg der Ausgangsstoffe zum Mischer (a) und Weg des Frischbetons zur Düse (c). (Bild K. Henke)	45

Abbildung 30: Zwei verschiedene Schichtenlayouts mit gleichem Füllungsgrad (Feststoff/Hohlraum) und Raupenbreiten von 50 mm (links) und 25 mm (rechts) (Bilder K. Henke)	46
Abbildung 31: Mit feststehender, runder Düse im abstreifenden Verfahren hergestellte Rundraupen (Foto K. Henke).....	48
Abbildung 32: Ausgleich von Fehlstellen in Raupen durch nachfolgende Schichten (Foto K. Henke)	49
Abbildung 33: Stufeneffekt bei rechteckigem Raupenprofil (Fotos K. Henke)	49
Abbildung 34: Breite einer abgelegten Betonraupe in Abhängigkeit der Pumpenfrequenz für unterschiedliche Schichthöhen bei 200 mm/s Fahrgeschwindigkeit. Verwendete Düse: Rundprofil (D = 15 mm) (Bild C. Matthäus).....	50
Abbildung 35: Unterschiedlich geformte Düsen hergestellt durch Stereolithografie (Foto D. Talke).....	51
Abbildung 36: Mit verschiedenen Verfahren aus unterschiedlichen Werkstoffen hergestellte Düsen, Fused Filament Fabrication mit Polycarbonat, schwarz (links) und Stereolithografie mit Kunstharz, grau (rechts) (Foto K. Henke)	52
Abbildung 37: Endeffektor bestehend aus den Elementen (von links nach rechts) Schlauchkupplung, pneumatisches Quetschventil, Zahnrad für Zahnriemen zum Drehen der Düse, Schnellverbinder, Edelstahldüse (Foto D. Talke).....	52
Abbildung 38: Übersicht des Extrusionsprozesses vom Mischer bis zur Düse (Bild D. Talke).....	54
Abbildung 39: Opiliones Deltadrucker (Foto D. Talke).....	55
Abbildung 40: Werkzeugaufnahme des Opiliones Druckers mit runder Düse (unten) und Förderschlauchkupplung (oben) (Foto C. Matthäus)	55
Abbildung 41: Industrieroboter Kuka KR 150 L110 des Lehrstuhls für Baurealisierung und Baurobotik, TUM (Foto C. Matthäus).....	56
Abbildung 42: Übersicht der Beziehung zwischen Rhino, Grasshopper und KUKA PRC (Bild D. Talke).....	57
Abbildung 43: In Rhino modellierter Druckpfad als einzelne Polylinie mit definiertem Anfangs- und Endpunkt (Bild D. Talke).....	57
Abbildung 44: Simulation der Fahrwege des Kuka Industrieroboters (links) und parametrische Generierung der Maschinenanweisung in Grasshopper (rechts) (Bild D. Talke).....	58

Abbildung 45: Durch Extrusion von Leichtbeton hergestelltes, monolithisches Außenwandelement mit Zonen unterschiedlicher Funktionalität: Zonen unterschiedlicher Dichte und vertikale Schächte zur Aufnahme von technischer Gebäudeausrüstung (Bild K. Henke)	59
Abbildung 46: Zwei Schichtenlayouts mit unterschiedlicher Dichte (Bilder K. Henke).....	60
Abbildung 47: Zwei Schichtenlayouts mit gleicher Dichte, aber unterschiedlicher Leistung bezüglich der Wärmedämmung (Bild K. Henke).....	60
Abbildung 48: Struktur mit Überhängen zur Schaffung von geschlossenen Zellen (Foto C. Matthäus).....	61
Abbildung 49: Schichtenlayout als Loop mit unterschiedlichen Pfadsituationen (Bild K. Henke) ...	62
Abbildung 50: Sich kreuzende Rundraupen, im abstreifenden Verfahren (Foto C. Matthäus)	62
Abbildung 51: Zwei aufeinanderfolgende Schichten eines Objekts mit gleichbleibendem Schichtmuster, aber unterschiedlichen Extrusionspfaden (Bild K. Henke)	63
Abbildung 52: Additive Fertigung von Demonstratoren durch Extrusion von Leichtbeton (Foto K. Henke).....	64
Abbildung 53: Extrusionspfad zur Herstellung eines Kegelstufes (Bild K. Henke)	64
Abbildung 54: Grasshopperdefinition für den Überhangversuch (Bild K. Henke)	65
Abbildung 55: Variante für Überhangversuch mit 10 Schleifen (Bild K. Henke)	66
Abbildung 56: Variante für Überhangversuch mit 40 Schleifen (Bild K. Henke)	66
Abbildung 57: Testobjekt Überhangversuch mit ca. 30% Überhang (Foto K. Henke)	67
Abbildung 58: Testobjekt mit aus Doppelkeilen aufgebauten Geometrien zur Schaffung von Strukturen mit geschlossenen Hohlräumen, Extrusionspfad (Bild K. Henke).....	67
Abbildung 59: Beispiele für Testobjekte mit aus Doppelkeilen aufgebauten Geometrien zur Schaffung von Strukturen mit geschlossenen Hohlräumen (Fotos K. Henke).....	68
Abbildung 60: Extrusionspfad einer Schicht des Wandelementes mit innerer Zellstruktur aus gestreckten Oktaederstümpfen (Jaugstetter 2020)	69
Abbildung 61: Wandelement mit inneren Zellstrukturen aus gestreckten Oktaederstümpfen (Foto K. Henke)	69
Abbildung 62: Verschraubter Pfeiler, Pfad einer Bauteilschicht, rechts: Ausschnitt (Bilder K. Henke)	70

Abbildung 63: Verschraubter Pfeiler während der Herstellung (links) (Foto K. Henke) und nach Fertigstellung (rechts); auf der rechten Seite des Bauteils ist der fehlende Rand zu erkennen (Fotos C. Matthäus)	70
Abbildung 64: Wandelement mit sinusförmigen Extrusionspfaden, Schichtenlayout (links) und Ausschnitt aus der Grasshopperdefinition (rechts) (Bilder K. Henke)	71
Abbildung 65: Wandelement mit sinusförmigen Extrusionspfaden, rechts: Detail des oberen Abschlusses, deutlich erkennbar der Stoß in der Mitte des Bauteils (Fotos K. Henke).....	71
Abbildung 66: Kostenbetrachtung Euro/m ² (Bild Ed. Züblin AG)	74

13 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Mittlere Korngröße und spezifische Oberfläche der eingesetzten Kalksteinmehle	14
Tabelle 2: Korngröße, Rohdichte, Festigkeit und Wasseraufnahme des Blähglasgranulats nach (Dennert Poraver GmbH 2018).....	15
Tabelle 3: Referenzmischung	16
Tabelle 4: Mischregime	17
Tabelle 5: Physikalische Eigenschaften gemäß DIN EN 196-1 und DIN EN 196-3.....	26
Tabelle 6: Festigkeiten sowie Schwindverhalten der Mischungen nach 28 Tagen.....	43
Tabelle 7: Eigenschaften der für die Demonstratoren verwendeten Mischung	44