

BBSR-  
Online-Publikation  
05/2021

# Leichtbeton-3D-Druck

Autorinnen und Autoren

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

## 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.

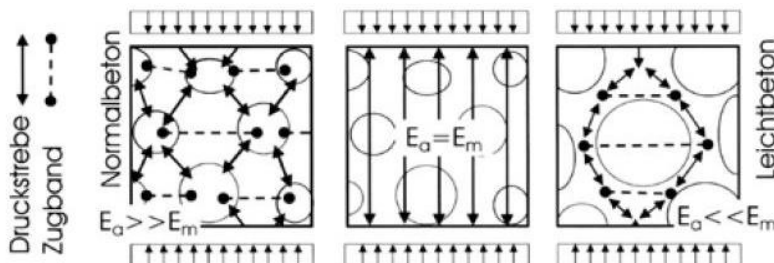
Derartig mit Materialien und Geräten ausgestattet, konnten im Projekt diverse Testobjekte und Demonstratoren hergestellt werden. Diese Objekte weisen frei geformte Bauteiloberflächen und im Inneren filigrane Hohlraumstrukturen auf, welche für die Funktionalisierung des Bauteilquerschnitts genutzt werden 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  $800 \text{ kg/m}^3$  und  $2000 \text{ kg/m}^3$  während Normalbeton eine Rohdichte von  $2000 \text{ kg/m}^3$  bis  $2600 \text{ kg/m}^3$  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  $\text{SiO}_2$  positiv beeinflusst werden. In der Regel ist daher die Festigkeit der Zuschläge ausschlaggebend für das Druckversagen (Faust 2003).

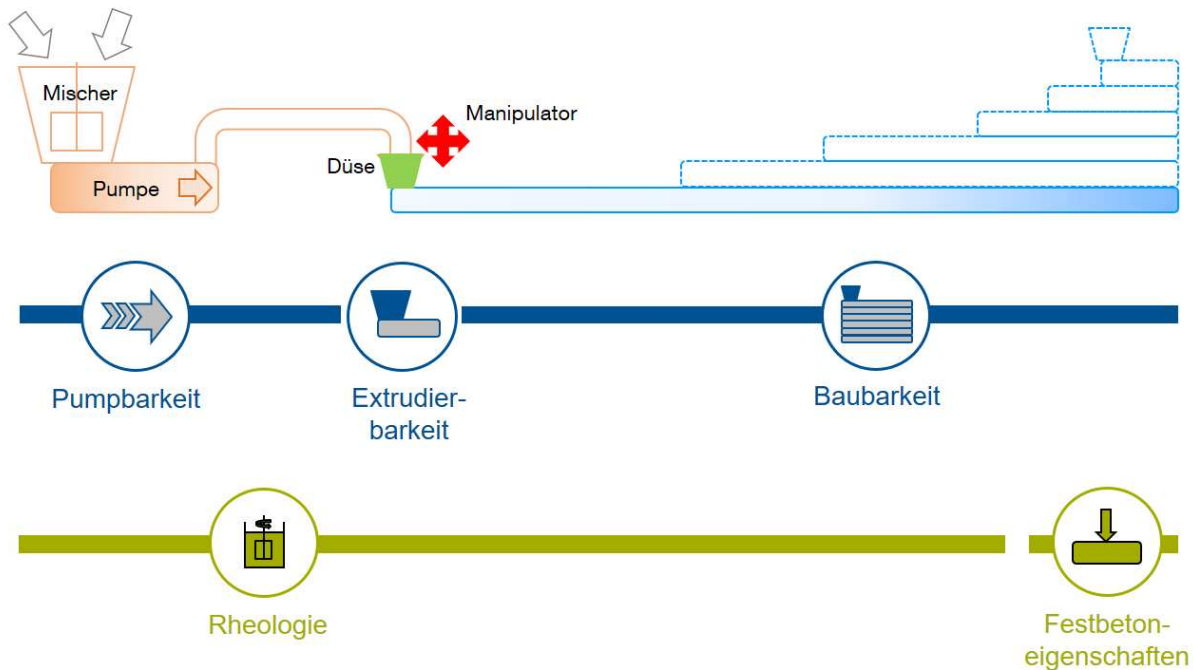
Als Leichtzuschlag wird bei der Materialentwicklung in diesem Forschungsvorhaben das Blähglasgranulat von Dennert Poraver verwendet (siehe Kapitel 2.3).

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"> <li>- Verarbeitbarkeit</li> <li>- Mischungsstabilität</li> <li>- Robustheit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Grünstandfestigkeit</li> <li>- Formtreue</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Grünstandfestigkeit</li> <li>- Formtreue</li> <li>- Schichtenverbund</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Festigkeit</li> <li>- Dauerhaftigkeit</li> <li>- Wärmeleitfähigkeit</li> </ul>

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





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  $20\pm 1$  °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/mm<sup>2</sup> deutlich höher als die Biegezugfestigkeit der geschalteten und verdichteten Prismen aus demselben Material mit  $2,2\pm 0,5$  N/mm<sup>2</sup>. Die Biegezugfestigkeit der vertikal herausgesägten Prismen lag mit  $2,9\pm 0,5$  N/mm<sup>2</sup> 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).

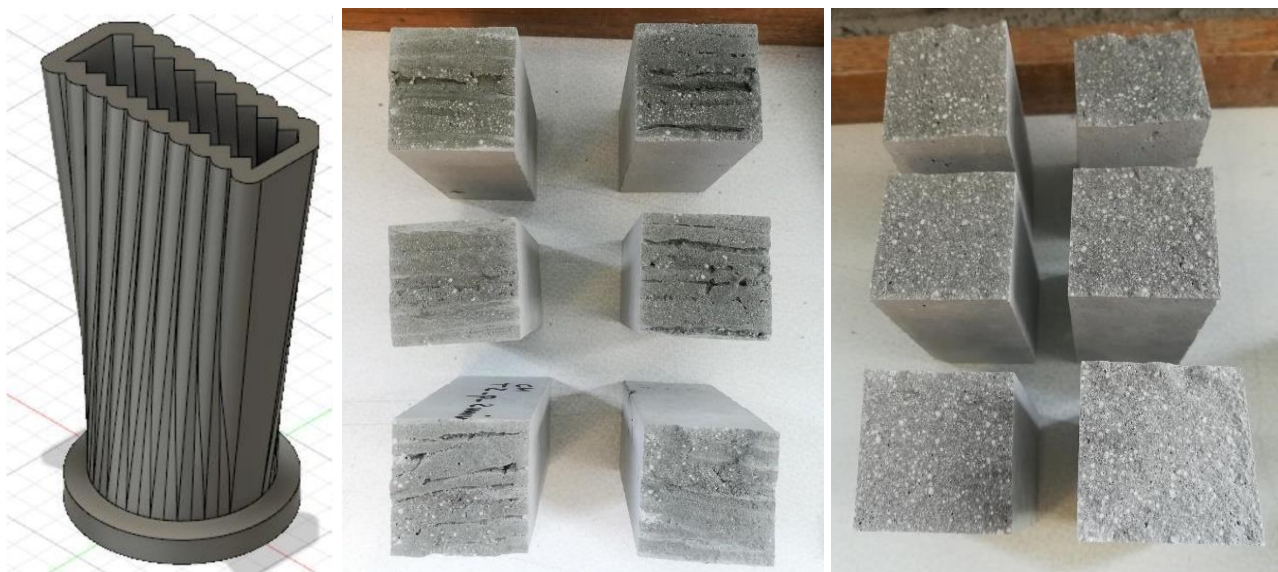


Abbildung 25: Profilierte Düse und daraus erstellte Prismen mit Luftporen zwischen den Schichten sowie mit glatter Düse erstellte Prismen ohne Luftporen (Fotos K. Daporta)

## 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.

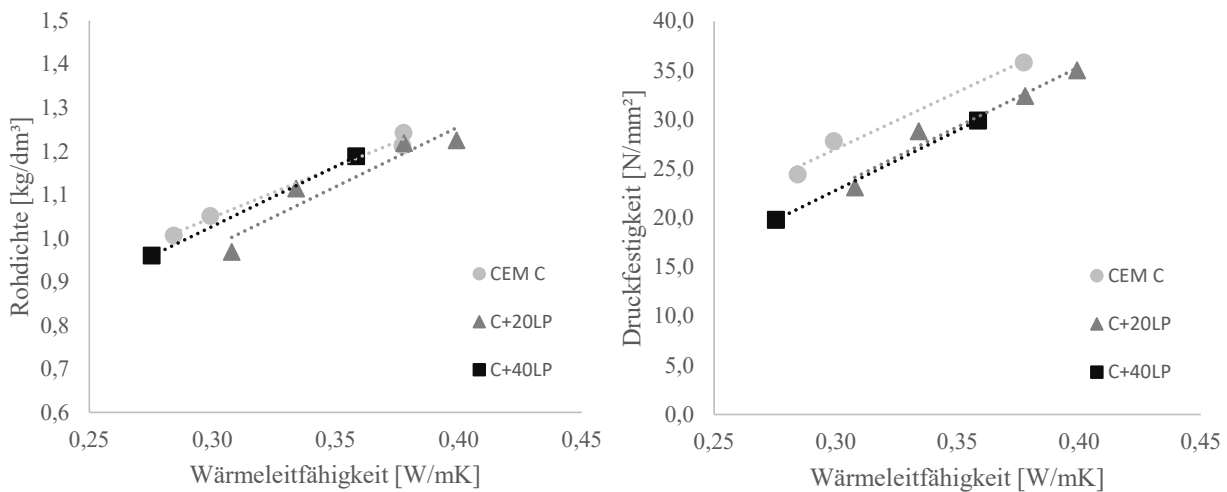


Abbildung 27: Verhältnis zwischen Wärmeleitfähigkeit und Rohdichte sowie Wärmeleitfähigkeit und Druckfestigkeit für Rezepturen mit unterschiedlichen Kalksteinmehlgehalten (Bilder C. Matthäus)

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.

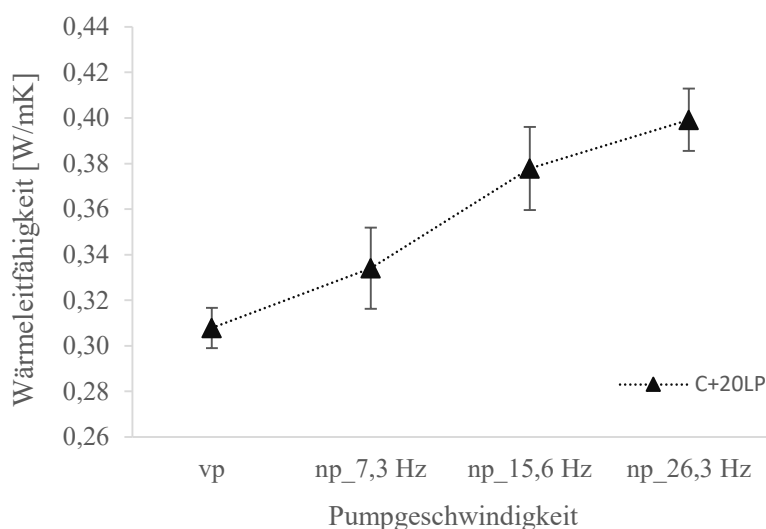


Abbildung 28: Zunahme der Wärmeleitfähigkeit mit der Pumpgeschwindigkeit (vor dem Pumpen, 7,3 Hz, 15,6 Hz und 26,3 Hz) am Beispiel der Rezeptur mit 20 Vol.-% Kalksteinmehl (Bild C. Matthäus)

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 <sup>2</sup> ]	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	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