FORSCHUNGSINITIATIVE Zukunft BAU

F 3002

Stefan Winter, Klaudius Henke, Daniel Talke

Additive Fertigung frei geformter Bauelemente durch numerisch gesteuerte Extrusion von Holzleichtbeton

Bundesinstitut
für Bau-, Stadt- und
Raumforschung
im Bundesamt für Bauwesen
und Raumordnung

Fraunhofer IRB Verlag

F 3002

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2016

ISBN 978-3-8167-9821-7

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00
Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/bauforschung

Abschlussbericht für das Forschungsvorhaben:

Additive Fertigung frei geformter Bauelemente durch numerisch gesteuerte Extrusion von Holzleichtbeton

Forschungsstelle:

Technische Universität München
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter
Arcisstraße 21
D-80333 München

Projektleitung:

Dipl.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Klaudius Henke
Daniel Talke M.Sc.

unterstützt durch:

ViscoTec Pumpen- u. Dosiertechnik GmbH
Amperstraße 13
D-84513 Töging a. Inn

RoboDK
343 Preston Street
Ottawa, Ontario, K1S 1N4, Canada

gefördert von:

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

Das Forschungsvorhaben wurde aus Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau
des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit gefördert.
(Aktenzeichen: F20-13-1-143 - 10.08.18.7-14.10)
Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

München, 15. Juni 2016

Zusammenfassung

In additiven Fertigungsverfahren („3D-Drucken“) werden Werkstücke durch das sukzessive Aneinanderfügen kleiner Volumina von Material auf der Basis eines digitalen Modells automatisch und ohne werkstückspezifische Werkzeuge aufgebaut. Charakteristisch für diese Verfahren ist eine weitgehende Unabhängigkeit der Herstellungskosten von der Stückzahl und von der geometrischen Komplexität des Werkstücks. Je nach Verfahrensvariante können die verschiedensten Materialien verarbeitet werden, von Kunstoffen über Metalle bis hin zu mineralischen Stoffen wie Gips und Keramik. Die additiven Verfahren haben sich über ihren ursprünglichen Anwendungsbereich des Modell- und Prototypenbaus hinaus in vielen Bereichen der Produktion neben konventionellen Herstellungsverfahren durchsetzen können. Beispiele hierfür sind die Medizin- und Dentaltechnik, die Luft- und Raumfahrt oder der Gussformenbau. Auch für Anwendungen im Bauwesen versprechen sie ein großes Potential.

In dem hier vorgestellten Forschungsvorhaben wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem großformatige Bauteile durch Extrusion von Holzleichtbeton additiv hergestellt werden können. Als Extruder dient ein von einem Schrittmotor angetriebener Schneckenförderer, der den Frischbeton durch eine Düse mit einer kreisförmigen Öffnung (typisches Maß: 20 mm Durchmesser) drückt. Der Extruder wird von einem Industrieroboter entsprechend der angestrebten Bauteilgeometrie geführt. Durch Ablegen von Frischbetonraupen (typisches Maß: 25 mm Breite und 10 mm Höhe) wird das Bauteil Schicht für Schicht und schalungsfrei aufgebaut.

Der Ersatz der üblichen mineralischen Gesteinskörnung im Beton durch den nachwachsenden Rohstoff Holz führt zu einem vergleichsweise leichten und gut zu bearbeitenden Werkstoff. Aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit des Holzleichtbetons und der geometrischen Freiheiten des Verfahrens ist ein besonders vielversprechendes Anwendungsgebiet dieser Material-Verfahrens-Kombination in der Herstellung von strukturell und bauphysikalisch optimierten, monolithischen Hüllelementen zu sehen.

Die Forschungsarbeiten umfassten die Entwicklung einer Rezeptur für einen extrusionsfähigen und dennoch schnell härtenden Holzleichtbeton, den Entwurf, Bau und Test eines auf das Material abgestimmten und für das Verfahren optimierten Extruders und die Zusammenstellung und Anpassung von digitalen Werkzeugen für die Modellierung und Maschinensteuerung. Abschließend wurde, aufbauend auf einer Vielzahl von kleinformatigen Versuchen zu unterschiedlichen material- und verfahrenstechnischen Fragestellungen, ein Wandelement mit einer inneren Hochlochstruktur und einer Grundfläche von 50 x 150 cm bei einer Höhe von 93 cm als Testobjekt und Demonstrator gedruckt.

Abstract

In additive manufacturing (“3D printing”) workpieces are automatically constructed on the basis of a digital model through successively combining small amounts of material without the use of workpiece-specific tools. Characteristic for this manufacturing method is that production costs are largely independent of the amount of created objects and their geometric complexity. Additive manufacturing encompasses multiple variants which can utilize many different materials such as plastics, metals but also mineral based materials like gypsum or ceramics. Today, these manufacturing methods which were initially used to create models and prototypes have grown to compete with traditional forms of production. Examples for this can be found in the fields of medical and dental technology, aerospace engineering or foundry molding. Also for applications in the field of construction additive manufacturing shows great potential.

In the research project presented here a method for the additive manufacturing of large scale building elements via extrusion of a wood chip concrete was developed. The extruder consists of a conveyor screw connected to a stepper motor which dispenses the fresh concrete through a nozzle with a round opening (typical diameter: 20 mm). The extruder motion is controlled by an industrial-sized robot. Through depositing strands of fresh concrete (typical measurements: 25 mm width and 10 mm height) the object is constructed layer by layer without the use of formwork.

Instead of the usual sand and stone aggregates of concrete, the use of the renewable resource wood leads to a light and easily workable material. Due to the low thermal conductivity of wood chip concrete and the geometric freedom of the manufacturing method, a promising area of application of this material-method combination lies in the construction of structurally and building-physically optimized monolithic façade elements.

The research project included the development of a recipe for an extrudable yet fast setting wood chip concrete, the design, construction and testing of a specialized extruder as well as the gathering and adapting of digital tools for modelling and machine control. Lastly, based on many smaller scale tests with different materials and adjustments to the manufacturing method, a 93 cm tall wall element with an internal honeycomb structure and a base of 50 x 150 cm was printed as a test object and demonstrator.

Vorwort

Das Bauen im Bestand besitzt am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion der Technischen Universität München in Forschung und Lehre seit jeher einen besonders hohen Stellenwert. Bei verschiedenen Forschungsprojekten, insbesondere denjenigen, die die energetischen Sanierung der Gebäudehülle unter Einsatz von vorgefertigten Bauelementen zum Gegenstand hatten, wurde immer wieder deutlich, welch große Herausforderung darin besteht, passgenau an den Bestand angeformte Ergänzungsbauteile herzustellen. Hier schienen die additiven Fertigungsverfahren ganz neue Lösungsmöglichkeiten bereitzuhalten und versprachen auch für andere Anwendungen beim Neubau und im Gebäudebestand großes Potential. Die Auseinandersetzung mit den Arbeiten anderer Forscher auf dem Gebiet der additiven Baufertigung führte schließlich zu eigenen Projektideen, wie der in vorliegendem Bericht diskutierten Extrusion von Holzleichtbeton.

Dem am 31.10.2013 beim Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung eingereichten Antrag auf Förderung des Vorhabens ‚Additive Fertigung frei geformter Bauelemente durch numerisch gesteuerte Extrusion von Holzleichtbeton' aus Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit wurde mit Bescheid vom 6.10.2014 stattgegeben, so dass am 15.10.2014 mit der Forschungsarbeit begonnen werden konnte.

Für die projektbegleitende Expertengruppe konnten Herr Dr.-Ing. Daniel Günther, voxeljet AG, Friedberg, Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. Detlef Heinz, Fachgebiet Gesteinshüttenkunde, Technische Universität München und Herr Dr.-Ing. Sebastian Treml, Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München (FIW) gewonnen werden. Dr. Günther leitet bei der voxeljet AG, einem weltweit führenden Systemhersteller und Dienstleistungsanbieter im Bereich industrietauglicher 3D-Druck, die Abteilung für Forschung und Entwicklung. Er verfügt über einen hervorragenden Überblick, nicht nur über die aktuellen Entwicklungen in der additiven Fertigung allgemein, sondern insbesondere auch über deren Einsatz im Bauwesen. Prof. Heinz hat sich in seiner eigenen Forschung am Centrum Baustoffe und Materialprüfung der Technischen Universität München intensiv mit dem Werkstoff Holzleichtbeton beschäftigt und ist ein ausgewiesener Experte auf diesem Gebiet. Dr. Treml hat zu seiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Holzforschung München (HFM) den Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion beim Aufbau des Arbeitsbereiches additive Baufertigung unter Einsatz von Holz tatkräftig unterstützt. Ab 2011 entstand vor allem eine Reihe von gemeinsam betreuten Bachelorarbeiten, die den Grundstock zu den aktuellen Forschungsarbeiten zum Thema legten. Jedem von ihnen sei dafür gedankt, dass sie trotz voller Terminkalender Zeit für das Projekt gefunden und an den Arbeitsgruppensitzungen am 11.3.2015 und 28.10.2015 teilgenommen haben.

Frau Carlotta Martius hat als wissenschaftliche Hilfskraft mit großem Erfindungsreichtum und Ausdauer unter anderem wesentliche Teile der Materialentwicklung übernommen. Ihr und den anderen studentischen Helfern, Bruno Knychalla, Christoph Linhart, Michael Hugo Reich, Teona Shugliashvili und Linus Siebert, sowie unserer stets hilfsbereiten Buchhaltungs-Fachfrau Elisabeth Bukowska-Suchy, sei hiermit für ihre engagierte und zuverlässige Zuarbeit gedankt.

Die Firma ViscoTec Pumpen- u. Dosiertechnik GmbH, D-84513 Töging a. Inn, stellte für das Projekt eine Dosierpumpe zu günstigen Konditionen zu Verfügung; unser Dank gilt hier besonders Herrn Andreas Grünfelder. Der Softwareanbieter RoboDK, Ottawa, Ontario, K1S 1N4, Canada, erteilte im Rahmen der Forschungsarbeiten eine kostenfreie Lizenz für das Programm ‚RoboDK offline programming and simulation'. Der Baustoffhersteller Dennert Poraver GmbH, D-96132 Schlüsselfeld, stellte großzügig Blähglasgranulat zur Verfügung und Herr Dipl.-Ing. (FH) David Manjura von der Poraver Anwendungstechnik nahm sich am 28.7.2015 einen ganzen Tag Zeit, um zusammen mit dem Projektteam im Labor in München Versuche mit verschiedenen Rezepturen durchzuführen.

Auch die folgenden Firmen stellten kostenfrei Muster oder Material zur Verfügung: BASF Construction Solutions GmbH, D-39443 Staßfurt, J. RETTENMAIER & SÖHNE GmbH + Co KG, D-73494 Rosenberg (Muster), Liaver GmbH & Co KG, D-98693 Ilmenau (Muster), MC-BAUCHEMIE MÜLLER GmbH & Co. KG, D-46238 Bottrop, Schretter & Cie GmbH & Co KG, A-6682 Vils (Bindemittelmuster), Sika Österreich GmbH, A-6700 Bludenz.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 9
1.1 Ausgangssituation 9
1.1.1 Additive Fertigung 9
1.1.2 Additive Fertigung im Bauwesen 10
1.1.3 Holzleichtbeton 11
1.2 Ziel des Forschungsvorhabens 11
2 Systemübersicht 13
3 Ausgangsmaterialien 15
3.1 Allgemeines 15
3.2 Zement 15
3.2.1 Holcim Weißzement 15
3.2.2 SCHWENK Portlandkalksteinzement 15
3.2.3 WUTZ Spezialzement für Holzbeton 15
3.3 Holzpartikel 16
3.3.1 Allgemeines 16
3.3.2 G 8/20 (Allspan Minispäne, zusätzlich gesiebt) 16
3.3.3 RETTENMAIER Arbocel C320 16
3.3.4 RETTENMAIER Lignocel BK 40-90 17
3.3.5 RETTENMAIER Lignocel 9 17
3.3.6 RETTENMAIER Lignocel HB 500-1000 18
3.3.7 CEMWOOD CW 1000 18
3.3.8 CEMWOOD CW 2000 18
3.4 Zusatzmittel und -stoffe 18
3.4.1 Allgemeines 18
3.4.2 Calciumchlorid ($CaCl_2$) 19
3.4.3 Beschleuniger Sika SikaRapid C-100 19
3.4.4 Spritzbeton-Beschleuniger Sika Sigunit L-5601 AF 19
3.4.5 Zitronensäure 19
3.4.6 Saccharose 19

3.4.7 Luftporenbildner BASF MasterAir 77 19
3.4.8 Stabilisierer MC Centrament Stabi M 15 19
3.4.9 Stabilisierer MC Centrament Stabi M 508 20
3.4.10 Fließmittel BASF MasterGlenium ACE 430 20
3.4.11 Calcit 20
3.5 Lehm 20
3.5.1 Allgemeines 20
3.5.2 CLAYTEC Baulehm 20
3.5.3 CLAYTEC Clayfix Feinputz 20
3.6 Blähglas 21
3.6.1 Allgemeines 21
3.6.2 Liaver Blähglasgranulat 21
3.6.3 Poraver Blähglasgranulat 21
4 Versuchseinrichtungen 22
4.1 Mischer 22
4.2 Extruder 22
4.2.1 Allgemeines 22
4.2.2 Extruder I, Extruder mit Exzenterschneckenpumpe 22
4.2.3 Extruder II, Extruder mit Schneckenförderer (Fleischwolfschnecke) 24
4.2.4 Extruder III, Extruder mit Schneckenförderer (Versuchsextruder) 25
4.3 Manipulatoren 32
4.3.1 Portalsystem 32
4.3.2 Industrieroboter 35
5 Untersuchungen zur Eignung der Extruder 38
5.1 Allgemeines 38
5.2 Extruder I 38
5.3 Extruder II 41
5.4 Extruder III 41
6 Materialentwicklung und -prüfung 44
6.1 Allgemeines 44

6.2 Versuche mit Spezialzement für Holzbeton 44
6.3 Versuche mit mineralisierten Spänen 45
6.4 Versuche mit Blähglas 47
6.5 Versuche mit unbehandelten Fichtenspänen und Portlandkalksteinzement 52
6.6 Festigkeitsprüfungen 53
6.6.1 Allgemeines 53
6.6.2 Prüfung der Druckfestigkeit von Würfeln nach DIN EN 12390-1:2012-12, DIN EN 12390-2:2009-08 und DIN EN 12390-3:2009-07 54
6.6.3 Prüfung der Biegezugfestigkeit von Prismen nach DIN EN 196-1:2005-05 55
6.6.4 Prüfung der Druckfestigkeit von Prismen nach DIN EN 196-1:2005-05 57
6.7 Prüfung der Wärmeleitfähigkeit 57
6.8 Überhangversuche 60
6.8.1 Allgemeines 60
6.8.2 Überhangversuch I: Maß des Überhangs über eine Kante 61
6.8.3 Überhangversuch II: maximales Maß der Länge des maximalen Überhangs über eine Kante 63
6.8.4 Überhangversuch III: Bauteil mit zehn horizontal gegeneinander versetzten Schichten 63
6.9 Versuche zur subtraktiven Nachbearbeitung 64
7 Entwurf und Bau von großformatigen Testobjekten 66
7.1 Allgemeines 66
7.2 Vorversuche 67
7.3 Bau einer Testwand mit Schichtgeometrie C 69
7.4 Bau eines Testobjektes mit Schichtgeometrie D 74
8 Fazit 77
9 Literaturverzeichnis 79
10 Anhang 84
10.1 Anhang 1 84
10.2 Anhang 2 85

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

1.1.1 Additive Fertigung

Computergesteuerte, additive Fertigungsverfahren (oft auch vereinfachend „3D-Drucken“ genannt) wurden 1987 mit der Stereolithographie von 3D Systems am Markt eingeführt (Wohlers & Gornet 2011). Inzwischen wurde eine große Zahl weiterer Verfahren zur Marktreife gebracht. Materialeigenschaften, Bauteilgröße und Baugeschwindigkeit werden ständig verbessert, die Kosten für Geräte und Materialien gesenkt. Heute sind additive Fertigungsverfahren aus vielen Bereichen, wie etwa dem Modell- und Prototypenbau, der Medizin- und Zahntechnik oder der Luft und Raumfahrttechnik nicht mehr wegzudenken.

Das Grundprinzip aller Verfahren der additiven Fertigung besteht darin, dass kleine Volumina eines formbaren Ausgangsmaterials nach und nach verfestigt und miteinander verbunden werden. Auf diese Weise entsteht, in der Regel (aber nicht zwingend) Schicht für Schicht, der zuvor am Computer modellierte Festkörper. Im Unterschied zu anderen Fertigungsverfahren werden keine speziellen Werkzeuge für die Herstellung unterschiedlich geformter Werkstücke benötigt. Dadurch wird die Abhängigkeit der Produktionskosten sowohl von der Stückzahl als auch von der Bauteilkomplexität erheblich reduziert (Zäh 2006). Folglich haben additive Fertigungsverfahren immer dann Vorteile gegenüber herkömmlichen Verfahren, wenn Werkstücke von hoher Komplexität in kleinen Stückzahlen zu fertigen sind.

2015 waren weltweit 40 industrielle Hersteller von Geräten für die additive Fertigung auf dem Markt aktiv (Wohlers 2015). Die angebotenen Geräte arbeiten nach teils sehr unterschiedlichen Verfahren bei denen verschiedene Arten von Ausgangsmaterialien zum Einsatz kommen. Beispiele sind das Verfestigen photopolymerer Flüssigkeiten durch Lichteinwirkung (z.B. ‚Stereolithographie‘ von 3D-Systems), das Extrudieren von Pasten oder geschmolzenen Feststoffen mittels Düsen (‚Extrusionsverfahren‘ z.B. ‚Fused Deposition Modeling‘ von Stratasys), das Verfestigen von Pulvern mit Bindemitteln (‚3D-Drucken‘ im engeren Sinn z.B. ‚3D Printing‘ von Z-Corps/3D-Systems oder ‚3D-Druck‘ von voxeljet) oder das Verfestigen von thermoplastischen Pulvern durch Wärmeeinwirkung (z.B. ‚Laser-Sintern‘ von EOS oder ‚Selektive Laser Melting‘ von SLM/ILT).

Die in additiven Fertigungsverfahren eingesetzten Materialien sind vielfältig (Kunststoffe, Metalle,Gips, Sand etc.); Beispiele für den Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen in sind hingegen rar. Kommerziell zur Anwendung kamen z.B. die aus Maisstärke hergestellten Polylactide (PLA) für Extrusionsverfahren und Zellulose als Bestandteil von Druckmaterialien für das 3D-Drucken (Z Corporation 2009). Daneben gibt es einzelne Forschungsarbeiten etwa zum Einsatz von Wood-Plastic-Composites (WPC) in Extrusionsverfahren (Zhao 2011) oder von Holzmehl beim 3D-Drucken (Open3DP 2011). An der Technischen Universität München werden seit 2011 Versuche mit Holzspänen und verschiedenen Bindemitteln durchgeführt (Henke &

Tremel 2013). 2012 kam LAYWOO-D3, ein Filament mit 40% Holzanteil als Verbrauchsmaterial für Extrusionsdrucker auf dem Markt (3ders 2013). Der österreichische Hersteller FD3D GmbH brachte Anfang 2016 das Filament Extrudr Green-TEC auf den Markt, das nach Herstellerangaben zu 100% aus nachwachsenden Rohstoffen auf der Basis von Lignincompounds hergestellt wird (FD3D 2016).

1.1.2 Additive Fertigung im Bauwesen

Die Stärke der additiven Fertigungsverfahren liegt in der maschinellen Produktion von frei geformten Bauteilen in kleinen Stückzahlen. Sie scheinen daher hervorragend für einen Einsatz im Bauwesen zu prädestiniert zu sein. Statt den Zwängen der Fertigung zu folgen, kann die Form für Nutzung, Bauphysik und Tragwerk optimiert werden. Die Einpassung in Bestandssituationen wird erleichtert. Über eine geometrische Differenzierung im Bauteilinneren können Kanäle für haustechnische Medien im Bauteil integriert und eine funktionale Gradierung realisiert werden. Der Umsetzung von additiver Fertigung im Bauwerksmaßstab steht jedoch zunächst eine Reihe von Hindernissen im Weg. Dies sind neben den Einschränkungen bei den gegenwärtig verfügbaren Werkstoffen und dem großen Zeitaufwand für die Fertigung ausgedehnter Konstruktionen vor allem die Grenzen bei der Größe der herstellbaren Bauteile.

Ein erster Vorschlag zum Einsatz von additiven Verfahren im Bauwesen wurde von Pegna (1997) gemacht. Das Verfahren sieht vor, Sand in einer dünnen Schicht auszubringen, lokal mit Zement zu beaufschlagen und anschließend das Gemisch mit Dampf auszuhärten. Anschließend werden in gleicher Weise weitere Schichten aufgebracht und so ein Festkörper aus Beton von definierter Geometrie geformt.

Das Contour Crafting (Khoshnevis 2010) verwendet ein Extrusionsverfahren, bei dem mittels steuerbarer Düsen ein Strang aus Beton (oder auch Lehm) ausgebracht wird. Aus diesem Strang werden Schicht für Schicht als eine Art verlorene Schalung die Begrenzungsflächen von Wandbauteilen geformt. Der Zwischenraum wird entweder ebenfalls durch Extrusion oder in einem zweiten Schritt durch Vergießen gefüllt.

D-Shape (Dini 2010) ist ein Prozess, bei dem Sand in Schichten von 5 - 10 mm Stärke mit einem mineralischen Bindemittel selektiv zu einem marmorähnlichen Material verfestigt wird. Die Grundfläche des Bauraums beträgt aktuell 6 x 6 m.

Das an der Loughborough University entwickelte Concrete Printing (Loughborough University 2012) ist ebenso wie das Contour Crafting ein Extrusionsverfahren für Beton. Während das Contour Crafting für die schnelle, automatisierte Errichtung von vor allem Wänden entwickelt wurde, zielt das Concrete Printing eher auf eine größere geometrische Freiheit und hohe Auflösungen (Lim et.al. 2012).

Das in Shanghai, China ansässige Unternehmen WinSun machte im Jahr 2014 Schlagzeilen mit dem Bau einer Gruppe von additiv gefertigten Hütten. Wenige Monate später folgten eine Villa

und ein fünfgeschossiges Wohnhaus. Die Gebäude wurden aus im Werk vorgefertigten Elementen zusammengesetzt. Das von WinSun eingesetzte Verfahren basiert auf der Extrusion eines Frischbetons, der u.a. auch Recyclingmaterial enthält (WinSun 2015; 3ders 2015).

Das 2013 von Berry Hendriks gegründete niederländische Unternehmen CyBe (3dprint 2015) veröffentlichte im September 2015 ein Video, auf dem die Fertigung eines Objektes durch die Extrusion eines Leichtbetons gezeigt wird. Das Maß des Überhangs wird mit 20% angegeben (CyBe 2015).

Die hier angeführten Beispiele stellen nur eine Auswahl aus einer inzwischen großen Zahl von Projekten der additiven Baufertigung dar. Sie alle lassen sich, mit nur wenigen Ausnahmen, den beiden miteinander konkurrierenden Gruppen selektives Binden von Gesteinskörnung und Extrusion von Frischbeton zuordnen. Im Vergleich zum selektiven Binden von Gesteinskörnung lassen sich mit der Extrusion von Beton eher hohe Baugeschwindigkeiten realisieren, die Materialeigenschaften der Ergebnisse sind i.d.R. besser und es wird nur das Material benötigt, das auch verbaut wird. Allerdings zeigt sich die Extrusion im Nachteil gegenüber dem selektiven Binden, wenn es um die erreichbare geometrische Freiheit geht.

1.1.3 Holzleichtbeton

Verbundwerkstoffe mit Zement als Bindemittel und mechanisch zerkleinertem Holz als Zuschlag haben sich in verschiedenen Formen z.B. als Holzwolle Leichtbauplatten oder zementgebundene Spanplatten seit vielen Jahrzehnten in der Baupraxis bewährt und sind auch aktuell Gegenstand zahlreicher Forschungs- und Entwicklungsarbeiten (Cziesielski 1975; Heinz & Urbonas 2008; Garrecht & Klatt 2012; Gliniorz & Natterer 2002; Klatt & Garrecht 2012; Krippner 2004; Krippner, Niebler & Issig 2008). Holzleichtbeton entsteht durch Mischen von Holzpartikeln, Zement und Wasser und wird (i.d.R. durch Gießen in Schalungen) ohne Pressdruck zu Bauteilen geformt. Er bietet die Möglichkeit zur stofflichen Verwertung von Holzausschuss und -resten. Seine Leichtigkeit ermöglicht zusätzliche Ressourcenschonung beim Transport und in der Baukonstruktion. Die Wärmeleitfähigkeit ist abhängig von der Dichte und kann Werte bis unter 0,2 W/(m*K) erreichen (vgl. Gliniorz & Natterer 2002). Hinsichtlich des Brandschutzes kann die Baustoffklasse A2 erreicht werden (Krippner 2004). Das Material ist gut mit Werkzeugen zur Holzbearbeitung zu bearbeiten (sägen, fräsen, bohren, schleifen) und kann genagelt und geschraubt werden. Auch aktuelle Veröffentlichungen über Leichtbetone mit mineralischen Leichtzuschlägen (Breit et.al. 2014; Filipaj 2010, Schlaich & Hückler 2012) haben deutlich die Potentiale dieser Werkstoffgruppe, insbesondere für ein einfaches und robustes Bauen aufgezeigt.

1.2 Ziel des Forschungsvorhabens

Bei den oben genannten Forschungs- und Entwicklungsprojekten kamen ausschließlich mineralische Werkstoffe zur Anwendung. Die additive Fertigung von Bauelementen unter Einsatz

von Holz wurde bislang nicht untersucht. Hier setzt das Forschungsvorhaben ‚Additive Fertigung frei geformter Bauelemente durch numerisch gesteuerte Extrusion von Holzleichtbeton' an.

Die Verbindung des additiven Verfahrens Extrusion mit dem Werkstoff Holzleichtbeton resultiert in erheblichen Vorteilen gegenüber Lösungen mit Normalbeton in Bezug auf den Fertigungsprozess als auch auf das fertige Produkt (Henke 2015). Die Kombination ermöglicht den Bau formoptimierter, monolithischer Hüllelemente ohne zusätzliche Wärmedämmung; durch eine geometrische Differenzierung im Bauteilinneren kann eine weitere Optimierung erreicht werden. Überhänge sind in größerem Maß realisierbar, was auch den Bau von Stützkonstruktionen erlaubt. Die gute Bearbeitbarkeit lässt eine subtraktive Nachbearbeitung in Bereichen mit hohen Anforderungen an Präzision und Oberflächenqualität zu, was zu einer Steigerung von geometrischer Freiheit und Auflösung, bei gleichzeitig hoher Baugeschwindigkeit genutzt werden kann. Aus diesen Vorteilen ergeben sich ganz neue Anwendungsmöglichkeiten insbesondere beim Bau von formoptimierten und maßgefertigten Hüllelementen für Neubauten und im Baubestand.

Gegenstand der Forschungsarbeiten war der Nachweis der Machbarkeit der vorgeschlagenen Material-Verfahren-Kombination. Im Zentrum standen dabei Versuche mit einem im Projekt entwickelten, kleinformatigen 3D-Versuchsdrucker, bestehend aus einer Ausbringvorrichtung für den Holzleichtbeton (Extruder) und einem numerisch gesteuerten Raumportal zur Führung des Extruders incl. Modellierungs- und Steuerungssoftware. Zum Abschluss des Projektes wurden, um die Potentiale der Technologie zu illustrieren, unter Einsatz eines Industrieroboters großformatige Testobjekte gefertigt.

2 Systemübersicht

Ein System für die additive Fertigung von Bauteilen durch numerisch gesteuerte Extrusion von Beton besteht aus folgenden Komponenten:

- Stoffe (Ausgangsstoffe, Frischbeton, fertiger Werkstoff)
- materialverarbeitendes und -transportierendes System (Mischer, Extruder)
- Manipulator (Raumportal, Roboter)
- elektronische Steuerung

Die Ausgangsstoffe werden im Mischer zu einem Frischbeton gemischt und dem Extruder zugeführt. Im Extruder wird der Frischbeton zu einer Düse transportiert, wo dieser in einem kontinuierlichen Strang von oben nach unten austritt. Durch Ablegen des Stranges, anfangs auf der Baufläche, anschließend auch auf den bereits ausgebrachten Raupen, wird das Bauteil (in der Regel Schicht für Schicht) aufgebaut. Die zur Formung der Raupen notwendige Bewegung des Extruders über der Baufläche liefert der Manipulator. Die elektronischen Steuerungen von Mischer, Extruder und Manipulator erfüllen jeweils unterschiedliche Aufgaben und sind im Folgenden getrennt dargestellt. In jedem Fall ist jedoch eine gute Abstimmung der Komponenten untereinander erforderlich. Neben den oben aufgeführten Bestandteilen des Extrusionsystems sind für den Betrieb noch weitere untergeordnete Stoffe (Hilfsstoffe: z.B. Reinigungsmittel, Schmiermittel) und Geräte (Hilfsmittel: z.B. Waagen, Transporthilfen) erforderlich.

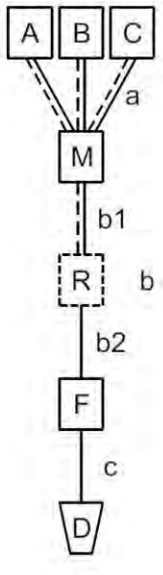

Abbildung 1: Komponenten des materialverarbeitenden und -transportierenden Systems

Das System zur Verarbeitung der Ausgangsstoffe zu einem extrudierten Strang besteht aus den in Abbildung 1 dargestellten Komponenten. Dies sind:

A, B, C: Behältnisse mit Ausgangsstoffen
M: Mischer
R: Frischbetonreservoir (falls erforderlich)
F: Förderer (Exzenterschneckenpumpe, Schneckenförderer)
D: Düse (evtl. mit Ventil)

Die Stoffe legen dabei folgende Wege zurück:

a: Ausgangsstoffe aus ihren Behältnissen zum Mischer
b: Frischbeton vom Mischer zur Pumpe, direkt oder über ein Reservoir (b1, b2)
c: Frischbeton von der Pumpe zur Düse

Hierbei können stetige (z.B. Schläuche, Schneckenförderer: durchgezogene Linien) oder diskrete (z.B. Schaufel, Eimer: gestrichelte Linien) Fördervorgänge zum Einsatz kommen.

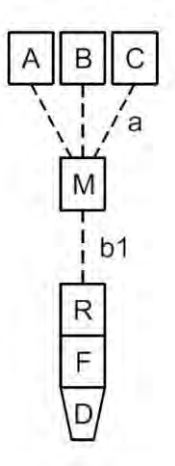

Abbildung 2: Die bei den Versuchen eingesetzte Variante des materialverarbeitenden und -transportierenden Systems

An den Beton werden bei der additiven Fertigung durch Extrusion unterschiedliche Anforderungen gestellt, je nachdem in welcher Phase des Prozesses er sich befindet. Im materialtransportierenden System bis zum Erreichen der Düse muss er gut pumpfähig sein. Nach dem Verlassen der Düse hingegen soll er möglichst schnell Festigkeit entwickeln. Kurze Wege im Prozess erleichtern den Umgang mit diesem Dilemma. Die in dem hier vorgestellten Projekt eingesetzte Variante des materialverarbeitenden und -transportierenden Systems ist in Abbildung 2 dargestellt. Düse (D), Förderer (F) und ein Reservoir (R) bilden eine Einheit („Extruder“). Das Reservoir wird mit dem separat von Hand oder mit einfachen Maschinen gemischten Frischbeton wiederholt in kleinen Chargen befüllt (b1). Mit dieser technisch einfach umzusetzenden Lösung konnte erreicht werden, die Zeit zwischen Mischen und Ausbringen des Betons kurz zu halten.

3 Ausgangsmaterialien

3.1 Allgemeines

Der im Forschungsprojekt eingesetzte Holzleichtbeton besteht mindestens aus den Bestandteilen

- Zement
- Holzpartikel
- Wasser.

Außerdem können Holzleichtbetone noch folgende Inhaltsstoffe enthalten:

- Zusatzmittel (Verzögerer, Beschleuniger, Luftporenbildner, Stabilisierer etc.)
- Zusatzstoffe (Gesteinsmehle o.ä.)
- Luft

Zusätzlich wurden zu Vergleichszwecken in einigen Versuchen einzelne Bestandteile des Holzleichtbetons durch Alternativmaterialien ersetzt:

- Lehm (als alternatives Bindemittel statt Zement)
- Blähglas (als alternativer Zuschlag statt Holzpartikel)

3.2 Zement

3.2.1 Holcim Weißzement

Für die Vorversuche mit Blähglas wurde der Portlandzement Holcim White vom Typ CEM I 52,5 N des Herstellers Holcim, A-1030 Wien, verwendet. Dieser Weißzement besitzt einen hohen Reinheitsgrad von 95-100% Portlandzementklinker, wodurch die Reproduzierbarkeit der Rezepturen begünstigt wird. Nach Herstellerangaben liegt der Erstarrungsbeginn bei ≥ 45 Minuten.

3.2.2 SCHWENK Portlandkalksteinzement

Der Portlandkalksteinzement des Herstellers SCHWENK Zement KG, D- 89077 Ulm ist ein Portlandkompositzement vom Typ CEM II/A-LL 32,5 R mit 6 bis 20 M.-% Kalkstein unter Zugabe von Anhydrit in Form von Calciumsulfat. Dieser Zement hat im Gegensatz zum reinen Portlandzement eine geringere Anfangsfestigkeit und eine größere Streuung der Zusatzstoffe. Allerdings ist die Verarbeitungszeit, welche für Extrusion zur Verfügung steht, wesentlich länger, wodurch Vorteile bei der Verarbeitbarkeit entstehen.

3.2.3 WUTZ Spezialzement für Holzbeton

Der auf Weißzement basierende, sogenannte ‚WUTZ Spezialzement für Holzbeton' der Firma Backstein Engineering GmbH, D-65510 Idstein wurde von dem Künstler und Inhaber der Firma

Dr.-Ing. Sven Backstein für den Einsatz bei der Herstellung von Kunst- und Bastelobjekten aus Holzleichtbeton entwickelt. Auch aufgrund des schnellen Erstarrungsverhaltens eignet sich dieser Zement für die Herstellung von Extrusionsbeton.

3.3 Holzpartikel

3.3.1 Allgemeines

Bei den verwendeten Holzzuschlagsstoffen handelt es sich um Späne aus Nadelholz oder Laubholz. In der Regel handelt es sich hierbei fast ausschließlich um Fichten- und Buchenholz.

Neben unbehandelten Spänen kamen auch mineralisierte Späne zum Einsatz. Die im Holz enthaltenen löslichen Stoffe wie z. B. Saccharose bewirken eine Verzögerung der Hydratation des Zementes. Um diesem Problem entgegenzuwirken, kann dem Beton Beschleuniger zugegeben werden. Ein anderer Ansatz das Problem zu umgehen, ist der Einsatz von mineralisierten Holzspänen. Durch die Ummantelung wird eine Reaktion zwischen Zement und Holz weitgehend unterbunden.

Der Siebdurchgang der unbehandelten Späne ist in Abbildung 3 dargestellt.

3.3.2 G 8/20 (Allspan Minispäne, zusätzlich gesiebt)

Allspan Minispäne sind eine Mischung aus Sägespänen und feinen Hobelspänen. Das Produkt wird von der Allspan Spanverarbeitung GmbH, D-76151 Karlsruhe für den Einsatz bei der Tierhaltung und dem Tiertransport hergestellt.

Hersteller:	Allspan Spanverarbeitung GmbH, D-76151 Karlsruhe
Ausgangsrohstoff:	Weichholz
Schüttgewicht:	ca. 150 g/l (vor dem zusätzlichen Sieben)
Siebanalyse:	> 1,25 mm min. 37 % (vor dem zusätzlichen Sieben)
	> 0,3 mm min. 97 % (vor dem zusätzlichen Sieben)

Die Späne wurden in der Holzforschung München im Rahmen einer Bachelorarbeit (Aumann 2013) im Langsieb zusätzlich gesiebt, um Partikel < 0,8 mm auszuschließen und erhielten dann die interne Bezeichnung ‚G 8/20‘.

3.3.3 RETTENMAIER Arbocel C320

Hersteller:	J. RETTENMAIER & SÖHNE GmbH + Co KG, D-73494 Rosenberg
Ausgangsrohstoff:	Rohcellulose aus Fichtenholz
Schüttgewicht:	160 g/l – 240 g/l
Siebanalyse:	> 0,4 mm max. 1 %
	> 0,25 mm 20 % - 45 %
	> 0,1 mm min. 80 %

3.3.4 RETTENMAIER Lignocel BK 40-90

Hersteller:	J. RETTENMAIER & SÖHNE GmbH + Co KG, D-73494 Rosenberg
Ausgangsrohstoff:	ausgesuchtes Weichholz (fast ausschließlich Fichte)
Schüttgewicht:	170 g/l – 230 g/l
Siebanalyse:	> 0,5 mm max. 5 %
	> 0,3 mm max. 70 %
	> 0,15 mm min. 85 %

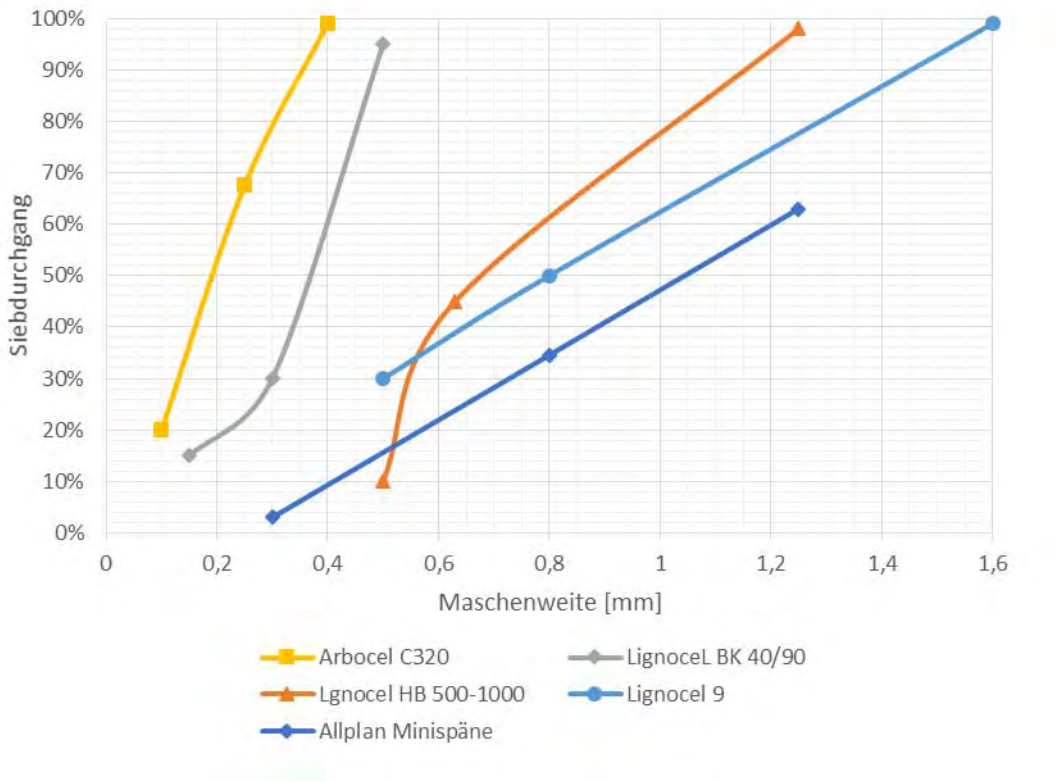

Abbildung 3: Siebdurchgang der eingesetzten Spansorten gemäß Herstellerangaben

3.3.5 RETTENMAIER Lignocel 9

Hersteller:	J. RETTENMAIER & SÖHNE GmbH + Co KG, D-73494 Rosenberg
Ausgangsrohstoff:	ausgesuchtes Nadelholz
Schüttgewicht:	110 g/l – 190 g/l
Siebanalyse:	> 1,6 mm max. 1 %
	> 0,8 mm max. 50 %
	> 0,5 mm min. 70 %

3.3.6 RETTENMAIER Lignocel HB 500-1000

Hersteller:	J. RETTENMAIER & SÖHNE GmbH + Co KG, D-73494 Rosenberg
Ausgangsrohstoff:	ausgesuchtes Laubholz
Schüttgewicht:	205 g/l – 305 g/l
Siebanalyse:	> 1,25 mm max. 2 %
	> 0,63 mm max. 55 %
	> 0,5 mm max. 90 %

3.3.7 CEMWOOD CW 1000

Die Späne CW 1000 des Herstellers CEMWOOD GmbH, D-39126 Magdeburg werden für den Einsatz als Hohlraum- und Ausgleichsschüttung hergestellt. Sie sind mit einer mineralischen Ummantelung versehen.

Ausgangsrohstoff:	k. A.
Schüttgewicht:	ca. 320 g/l
Spangröße:	1 mm – 5 mm

3.3.8 CEMWOOD CW 2000

Die Späne CW 2000 des Herstellers CEMWOOD GmbH, D-39126 Magdeburg werden für den Einsatz als Ausgleichsschüttung hergestellt. Sie sind mit einer mineralischen Ummantelung versehen.

Ausgangsrohstoff:	k. A.
Schüttgewicht:	ca. 360 g/l
Spangröße:	4 mm – 8 mm

3.4 Zusatzmittel und -stoffe

3.4.1 Allgemeines

Das Abbindeverhalten des Holzbetons ist entscheidend für seine Eignung für die Extrusion. Das Material muss lange genug verarbeitbar bleiben, um nicht schon im Extruder zu erhärten. Gleichzeitig muss es aber schon kurz nach dem Ausbringen als Strang eine gewisse Standfestigkeit entwickeln, um seine Form zu halten und weitere Schichten tragen können. Je nach verwendeter Zementart und verwendetem Holzzuschlag stellt sich eine sehr unterschiedliche Konsistenz und Verarbeitungszeit ein. Mithilfe von Zusatzmitteln (Beschleuniger, Verzögerer, Fließmittel) und Zusatzstoffen (Gesteinsmehl) kann dies gesteuert werden.

3.4.2 Calciumchlorid ($CaCl_2$)

Reines Calciumchlorid ($CaCl_2$) kann für die Beschleunigung der Hydratation bei Holzleichtbeton eingesetzt werden und kann in kleinen Mengen in Apotheken bezogen werden.

3.4.3 Beschleuniger Sika SikaRapid C-100

Bei den meisten Versuchen wurde für die Beschleunigung der Hydratation SikaRapid C-100 des Herstellers Sika Österreich GmbH, A-6700 Bludenz, verwendet. Dieser hat als chemische Basis nitrathaltige Calcium-Silikatlösung und wird in flüssiger Form geliefert.

3.4.4 Spritzbeton-Beschleuniger Sika Sigunit L-5601 AF

Zudem wurde bei einigen Versuchen der Sika Spritzbeton-Beschleuniger Sigunit L-5601 AF ebenfalls vom Hersteller Sika Österreich GmbH, A-6700 Bludenz eingesetzt. Auch hierbei handelt es sich um eine Flüssigkeit.

3.4.5 Zitronensäure

Beim Einsatz von Schnellzement reicht die verzögernde Wirkung des Holzes teilweise nicht aus, um eine ausreichend lange Verarbeitungszeit zu gewährleisten. Aus diesem Grund werden Zusatzmittel eingesetzt, die den Hydratationsprozess des Zementes verzögern. Im Projekt kam Zitronensäure in Pulverform zum Einsatz.

3.4.6 Saccharose

Außerdem kam in Vorversuchen Saccharose in Form von Kristallzucker als Verzögerer zum Einsatz.

3.4.7 Luftporenbildner BASF MasterAir 77

Für die Gewährleistung einer ausreichenden Verarbeitbarkeit wurde ein Luftporenbildner verwendet. Zum Einsatz kam MasterAir 77 des Herstellers BASF Construction Solutions GmbH, D-39443 Staßfurt. Dieser besteht aus Naturharzseife und wird in flüssiger Form dem Anmachwasser beigegeben. MasterAir 77 setzt die Oberflächenspannung des Anmachwassers herab und fördert die Bildung von Mikroporen.

3.4.8 Stabilisierer MC Centrament Stabi M 15

Um die Konsistenz des Frischbetons zu verbessern wurde der pulverförmige Stabilisierer Centrament Stabi M 15 des Herstellers MC-BAUCHEMIE MÜLLER GmbH & Co. KG, D-46238 Bottrop eingesetzt.

3.4.9 Stabilisierer MC Centrament Stabi M 508

Außerdem wurde der flüssige Centrament Stabi M 508 des Herstellers MC-BAUCHEMIE MÜLLER GmbH & Co. KG, D-46238 Bottrop eingesetzt. Dieser Stabilisierer auf organischer Basis wird speziell für die Anwendung in Leicht- und Pumpbeton hergestellt.

3.4.10 Fließmittel BASF MasterGlenium ACE 430

Für einige Versuche wurde das Fließmittel MasterGlenium ACE 430 (ACE steht für Admixture Controlled Energy) der Firma BASF Construction Solutions GmbH, D-39443 Staßfurt, gewählt. Dieses flüssige Fließmittel wird auf PCE-Basis (Polycarboxylatether) hergestellt.

3.4.11 Calcit

Für einige Versuche mit Blähglas (s. Punkt 3.6) wurde als Zusatzstoff reines Calciumcarbonatmehl (Calcit) der Firma sh minerals GmbH, D-89520 Heidenheim verwendet. Das Gesteinsmehl bewirkt, dass eine homogene Betonmatrix entsteht, wodurch höhere Festigkeiten erreichbar sind. Es fördert die Bearbeitbarkeit des Frischbetons und führt durch das Ausfüllen der Hohlräume mit Kalksteinmehl zu dichterem Beton.

3.5 Lehm

3.5.1 Allgemeines

Ungeeignete Mischungen (insbesondere zu große, zu viele Späne) von Holzbeton führen schnell zu einer Pfropfenbildung in der Ausbringvorrichtung. Die Folge sind aufwendige Reinigungsarbeiten oder gar die Zerstörung von Teilen. Deshalb wurde in orientierenden Vorversuchen zur Findung von geeigneten Partikeln und Mischungsverhältnissen das Bindemittel Zement durch Lehm ersetzt.

3.5.2 CLAYTEC Baulehm

Bei Versuchen zur Förderbarkeit von Medien mit Holzspänen mittels Exzenterschneckenpumpen wurde CLAYTEC Lehm (Baulehm), trocken, gemahlen (Lehmpulver), mit Korngr. bis 0,5 mm, Artikelnr. 10.101, des Herstellers CLAYTEC e. K., D-41751 Viersen eingesetzt.

3.5.3 CLAYTEC Clayfix Feinputz

Außerdem wurde Clayfix Feinputz Trockenmörtel-Mischung, Körnung bis max. 1 mm, rein-weiß, Artikelnr. 17.050, ebenfalls von CLAYTEC e. K., D-41751 Viersen eingesetzt.

3.6 Blähglas

3.6.1 Allgemeines

Leichtbeton mit mineralischen Zuschlägen wie Blähglas oder Blähton („Dämmbeton“) erfreut sich in der Baupraxis zunehmender Beliebtheit und ist Gegenstand laufender Forschungsprojekte (s. z.B. Zukunft Bau Projekt Nr. F20-12-1-145; 10.08.18.7-13.41 ‚Infraleichtbeton im Geschosswohnungsbau‘). Mit ausreichenden Bauteilstärken lässt sich eine monolithische Sichtbetonbauweise realisieren. Im Rahmen des Projektes wurden vergleichende Experimente angestellt, bei denen die Holzpartikel durch mineralische Leichtzuschläge ersetzt wurden. Dies geschah auch, da die rein mineralische Materialkombination und die Kugelform der Zuschlagspartikel eine leichter zu handhabende Kombination darstellt, als die von Zement und Holzspänen.

3.6.2 Liaver Blähglasgranulat

Für die Versuche wurde Liaver Blähglasgranulat mit der Körnung 1 - 2 mm des Herstellers Liaver GmbH & Co KG, D-98693 Ilmenau eingesetzt.

3.6.3 Poraver Blähglasgranulat

Außerdem wurde Poraver Blähglasgranulat des Herstellers Dennert Poraver GmbH, D-96132 Schlüsselfeld in den fünf Basiskörungen (0,1 - 0,3 mm, 0,25 - 0,5 mm, 0,5 - 1 mm, 1 - 2 mm und 2 - 4 mm) und den beiden Spezialkörungen (0,04 - 0,125 mm und 0,5 - 1,25 mm) eingesetzt.

4 Versuchseinrichtungen

4.1 Mischer

Die Mischungen für die Versuche wurden in Rührschüsseln verschiedener Größe oder in Mörteleimern 10, 20 und 40 l angerührt. Als Rührgeräte kamen diverse Rührstäbe oder Löffel zum Einsatz, eine Bohrmaschine 850 W mit Mischquirl Korb-Ø 65 mm und ein Knauf PFT Mörtelmixer 1.800 W mit Mischquirl Korb-Ø 120 mm. Zudem wurde ein Zwangsmischer vom Typ Iperbet des italienischen Herstellers Raimondi mit einem Fassungsvermögen von 45 l eingesetzt.

4.2 Extruder

4.2.1 Allgemeines

Die in den hier beschriebenen Arbeiten eingesetzte Einheit zum Ausbringen des Betons wird im Folgenden als ‚Extruder' bezeichnet. Er besteht aus Förderer, Düse und Frischbetonreservoir („Einfülltrichter"). Der Extruder („Endeffektor") wird in der Regel vom Manipulator (Raumportal, Roboter) über der Baufläche bewegt. Bei bestimmten Versuchsanordnungen wurde der Extruder aber auch starr montiert und vom Manipulator eine Bauplattform bewegt.

Bei einer Pumpe handelt es sich um ein „Gerät zum Fördern von Flüssigkeiten oder Gasen durch Druck- bzw. Saugwirkung." (Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften 2016). Auch wenn es um die Förderung von Flüssigkeiten mit hohem Feststoffanteil oder von Pasten und Mörteln geht, wird der Begriff ‚Pumpe' verwendet. Insofern handelt es sich bei der im Folgenden beschriebenen Vorrichtung um eine Pumpe. Andererseits besteht die Mechanik des Fördervorgangs hier weniger darin, dass ein Druck oder Unterdruck aufgebaut würde. Vielmehr wird das Medium von der Förderschnecke im Schneckenrohr durch deren Bewegung geschoben, so wie es bei Schneckenförderern der Fall ist. DIN 15201-1:1994-04: ‚Stetigförderer; Benennungen' definiert „Förderer mit Schnecken" so: „Stetigförderer, bei denen ein rotierender, schraubenförmiger, durchgehender oder unterbrochener Körper (Schnecke) das Fördergut waagerecht, geneigt oder senkrecht fördert." Der hier verwendete Begriff ‚Förderer' soll also die verschiedenen, eingesetzten Pumpen und Schneckenförderer gleichermaßen umfassen.

4.2.2 Extruder I, Extruder mit Exzenterschneckenpumpe

Für das Projekt wurde ein Dosiersystem mit Exzenterschneckenpumpe vom Typ ViscoTec Dispenser 3VMP22 des Herstellers ViscoTec Pumpen- u. Dosiertechnik GmbH, D-84513 Töging a. Inn gemietet (Abbildung 4 und Abbildung 5). Die ViscoTec Pumpen- u. Dosiertechnik GmbH beschäftigt sich vorwiegend mit Anlagen zur Förderung, Dosierung, Auftragung, Abfüllung und Entnahme von mittelviskosen bis hochviskosen Medien (ViscoTec 2016). ViscoTec bietet seine Dosiersysteme auch für den Einsatz als Druckkopf in der additiven Fertigung an.

Exzenterschneckenpumpen gehören zu den rotierenden Verdrängerpumpen. Sie bestehen aus einem Stator und einem im Stator bewegten Rotor. Die Innenseite des Stators und die Außenseite

des Rotors haben die Form von Schraubenflächen von korrespondierenden geometrischen Verhältnissen, wobei der Stator eine größere Steigung und eine größere Gangzahl aufweist, als der Rotor (Abbildung 4). Die Bewegung der Rotors im Stator ist drehend oszillierend wodurch das Medium in separaten Förderkammern kontinuierlich von der Saug- zur Druckseite befördert wird (Netzsch 2016).

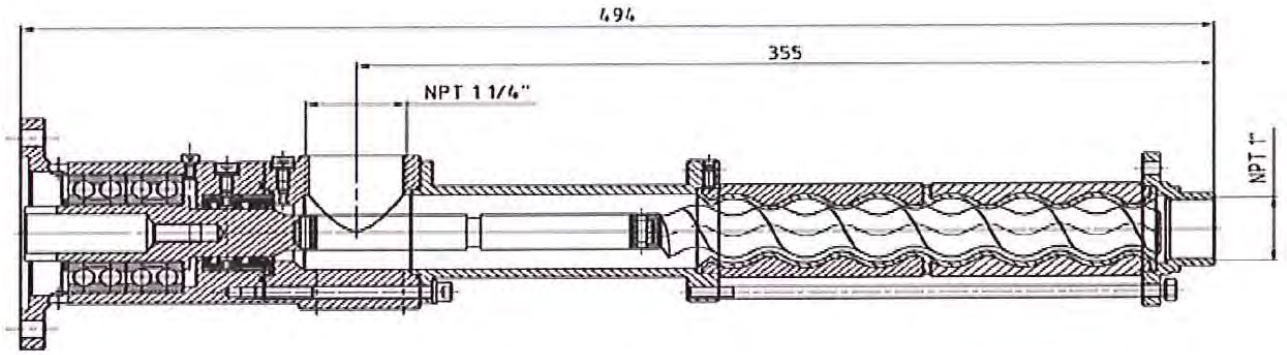

Abbildung 4: Exzenterschneckenpumpe ViscoTec Dispenser 3VMP22 (ViscoTec 2011)

Exzenterschneckenpumpen fördern niedrigviskose bis hochviskose Medien kontinuierlich und pulsationsarm und erlauben eine präzise Dosierung. Durch Ausführung eines Rückzugs lässt sich Nachtropfen verhindern. Sie gelten als besonders geeignet für feststoffbeladene Medien (Bittermann & Kempf 2007) und werden auch für abrasive Medien (z.B. als Mörtelpumpen) eingesetzt.

Abbildung 5: Extruder I mit Exzenterschneckenpumpe ViscoTec Dispenser 3VMP22

Der Dispenser 3VMP22 ist mit einem Servomotor und einer eigenständigen von ViscoTec Pumpen- u. Dosiertechnik GmbH bereitgestellten elektronischen Steuerung ausgestattet. Das Dosiervolumen beträgt 13,5 ml/Umdrehung, die maximale Drehzahl 150 Umdrehungen in der Minute. Ohne Motor beträgt die Länge 494 mm und das Gewicht ca. 8,0 kg.

Eine Stahlplatte erlaubt die Befestigung des Extruders an der Versuchseinrichtung. Am Einfüllstutzen wurde für die Versuche ein Einfülltrichter befestigt. Düsen wurden nicht verwendet.

Im Technikum der Fa. ViscoTec Pumpen- u. Dosiertechnik GmbH in Töging a. Inn wurden zusätzlich vergleichende Versuche mit einer kleineren Exzenterschneckenpumpe vom Typ ViscoTec Dispenser 3RD12 gemacht.

4.2.3 Extruder II, Extruder mit Schneckenförderer (Fleischwolfschnecke)

Für die Versuche im Rahmen des Projektes stand auch ein Extruder zur Verfügung, der im Rahmen einer Masterarbeit (Talke 2014) speziell für die Extrusion von Holzleichtbeton entwickelt worden war (Abbildung 6).

Abbildung 6: Extruder II (links) und im Extruder II eingesetzte Förderschnecke aus einem Fleischwolf (rechts) (Talke 2014)

Das Herzstück dieses Extruders ist eine Förderschnecke, die einem Fleischwolf für den Haushaltsgebrauch entnommen worden war (Abbildung 6, rechts). Die Schnecke hat 3 ¼

Steigungen auf einer Gesamtlänge von 80 mm. Durch eine Abnahme der Ganghöhe zur Druckseite hin und eine gleichzeitige Zunahme des Kerndurchmessers ist die Schnecke stark progressiv. Der Außendurchmesser beträgt im Maximum 42 mm, verjüngt sich aber zur Saugseite hin.

Die Schnecke steht senkrecht, mit der Druckseite am unteren Ende, in einem Schneckenrohr aus transparentem Acrylglas, mit einem Innendurchmesser von 44 mm und einer Wandstärke von 3 mm. Vom Schneckenrohr zweigt, ebenfalls aus Acrylglas und von derselben Größe, seitlich schräg nach oben ein Einfüllstutzen ab. Dieser mündet in einen 45° Rohrbogen aus grauem Kunststoff, auf den ein Einfülltrichter aufgesetzt werden kann.

Am unteren Ende des Schneckenrohrs ist ein kurzes Rohrstück aus weißem Kunststoff mit einem 1 ½ Zoll Außengewinde angebracht, so dass mithilfe einer Überwurfmutter verschiedene aus Kunststofftrichtern gefertigte Düsen angeschraubt werden können. Es stehen Düsen mit Öffnungsdurchmessern von 10 mm, 15 mm und 20 mm zur Verfügung.

Die Welle der Schnecke ist über eine Wellenkupplung mit der Welle eines Schrittmotors verbunden. Bei dem Motor handelt es sich um einen bipolaren Schrittmotor mit 200 Schritten pro Umdrehung, einem Haltemoment von 3 Nm und einem Phasenstrom von 4,2 A. Durch Mikroschrittbetrieb (Microstepping) des Powerlolu Schrittmotortreibers kann die Schrittanzahl des Schrittmotors von 200 auf 400 Schritte pro Umdrehung verdoppelt werden. Bei dem Motor handelt es sich um das gleiche Modell, wie es auch an den drei Achsen des Raumportals verbaut ist. Er wurde, wie das Portal, über BZT Maschinenbau GmbH, D-33818 Leopoldshöhe bezogen und hat dort die Typenbezeichnung Fl.60 4.2A 3N, Art.-Nr.: KTE190. Die Beschreibung der Steuerung des Extruder-Motors erfolgt in Punkt 4.3.1 Portalsystem.

Alle Komponenten sind mithilfe verschiedener Verbindungsmittel an einer Montageplatte aus 15 mm Furnierschichtholz befestigt, welche mit zwei Befestigungsschrauben an der Werkzeugaufnahme des Manipulators angebracht werden kann.

4.2.4 Extruder III, Extruder mit Schneckenförderer (Versuchsextruder)

Aufbauend auf den Erfahrungen mit dem Extruder II wurde ein speziell für den im Projekt eingesetzten Holzleichtbeton ausgelegter, modular aufgebauter Versuchsextruder mit verschiedenen Einfülltrichtern, Schneckenrohren, Förderschnecken und Düsen entwickelt.

Die während des Betriebs senkrecht stehenden Förderschnecken wurden aus Stahl geschweißt. Die Wellen bestehen aus Gewinderohr 1/2" 21,3 x 2,65 mm. Am oberen Ende ist die Welle für den Anschluss an den Motor durch ein eingepasstes Bauteil auf einen Außendurchmesser von 8 mm reduziert. Am unteren Ende ist das Wellenrohr durch ein zylindrisches Passstück verschlossen. An das Rohr wurden die Schneckenflügel angeschweißt. Diese bestehen aus ST 37-2 von 3 mm Stärke und haben einen Außendurchmesser von 54 mm. Bezüglich möglicher Ganghöhen und Progressionen wurde zunächst eine systematische Zusammenstellung von Varianten entworfen

(Abbildung 7), aus denen dann eine Auswahl getroffen wurde. Es kamen Schneckenflügel mit Ganghöhen von 27 mm (1/2 D), 32 mm, 38 mm, 45 mm und 54 mm (1 D) zum Einsatz. Die Zwischengrößen zwischen 1/2 D und 1 D wurden so gewählt, dass die Steigerung von einer Ganghöhe zur nächstgrößeren immer das gleiche Maß von (2^(1/2))^(1/2), also einen Wert von (gerundet) 1,189 hat. Die Schneckenflügel wurden in einem Spezialbetrieb auf Maß gefertigt (Abbildung 8 links). Mit den unterschiedlichen Flügeln wurden vier verschiedene Schnecken mit verschiedener Ganghöhe und Progression gefertigt (Tabelle 1 und Abbildung 8 rechts). Die Schnecken wurden linksgängig ausgelegt, so dass, bei einer Förderung von oben nach unten, die Welle (von oben gesehen) im Uhrzeigersinn gedreht werden muss.

Tabelle 1: Progression und Ganghöhen der vier ausgewählten Schnecken b, c, d und i

Bezeichnung	Progression	Anzahl Schneckenflügel	Ganghöhen (in mm, von unten nach oben)
b	gering	7	27, 32, 32, 38, 38, 38, 38
c	mittel	6	27, 32, 38, 45, 54, 54
d	stark	5	27, 38, 54, 54, 54
i	keine	5	38, 38, 38, 38, 38

Die Querschnitte des Schneckenganges bei den Schneckenflügeln mit unterschiedlichen Ganghöhen sind in Tabelle 2 angegeben.

Tabelle 2: Querschnitte des Schneckenganges bei den Schneckenflügeln mit unterschiedlichen Ganghöhen

Ganghöhe [mm]	27	32	38	45	54
lichte Höhe [mm]	24	29	35	42	51
Querschnitt [mm²]	384	464	560	672	816

Um die Vorgänge im Innern beobachten zu können, wurden die Schneckenrohre des Schneckenförderers aus transparentem Acrylglas gefertigt. Die Rohre haben einen Innendurchmesser von 54 mm und eine Wandstärke von 3 mm. Es wurden zwei Varianten gebaut, eine zur seitlichen Einfüllung des Betons (Abbildung 9) und eine für die Einfüllung des Betons von oben (Abbildung 10 links). Erstere hat einen seitlich schräg nach oben, im Winkel von 45° abzweigenden Einfüllstutzen, ebenfalls aus Acrylglasrohr und von derselben Größe wie das Schneckenrohr. Alle Rohrenden haben Flansche mit je vier Bohrungen zur Anbringung weiterer Komponenten. Der obere und der untere Flansch sind jeweils mit einer Acrylglasplatte miteinander verbunden, die der Befestigung des Schneckenrohres dient. Um die Länge der Schneckenrohre verändern zu können, wurden zusätzlich Verlängerungsstücke gefertigt (Abbildung 10 rechts).

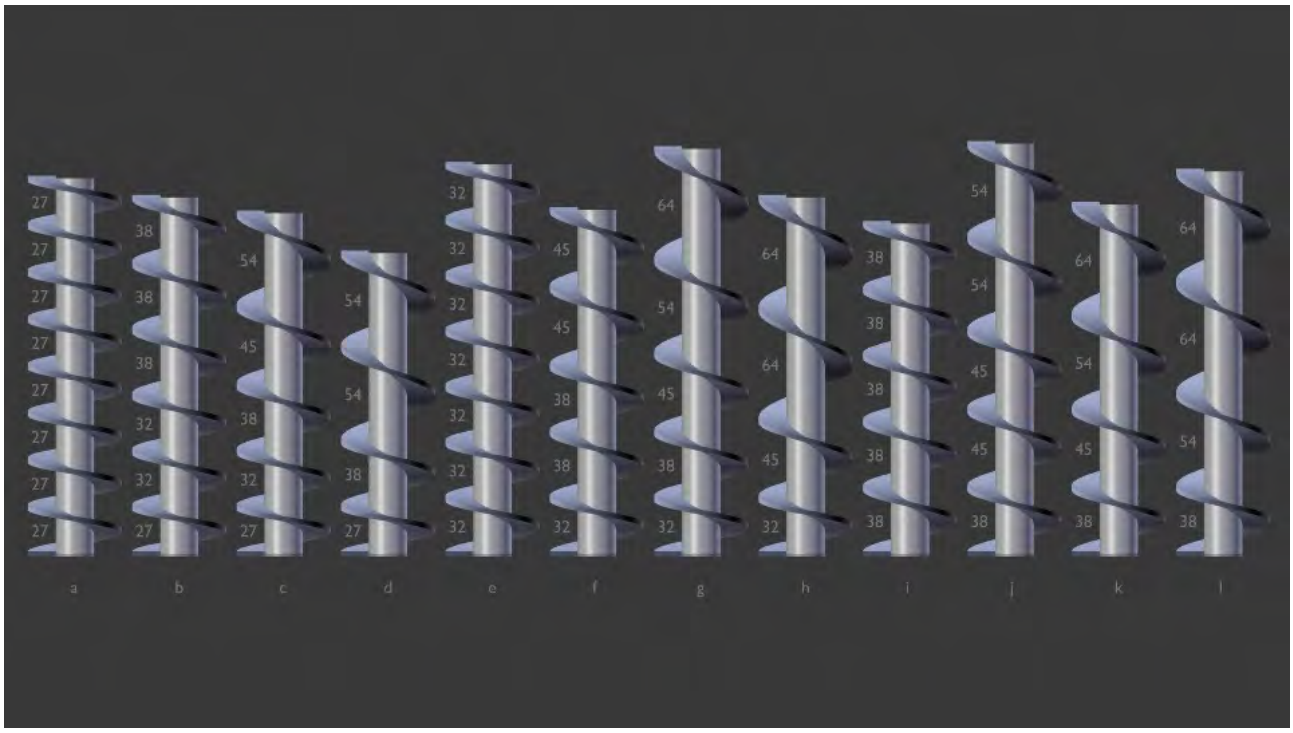

Abbildung 7: Entwurf von geschweißten Förderschnecken, Schnecken mit Ganghöhen von 27 mm (a - d), 32 mm (e - h) und 38 mm (i - l) am unteren Ende und jeweils unterschiedlich starker Progression. Die Schnecken b, c, d und i wurden für die Versuche ausgewählt.

Abbildung 8: Auf Maß gefertigte Schneckenflügel (links) und fertig geschweißte Förderschnecken (von links nach rechts) b (mit Motor), c, d und i (rechts)

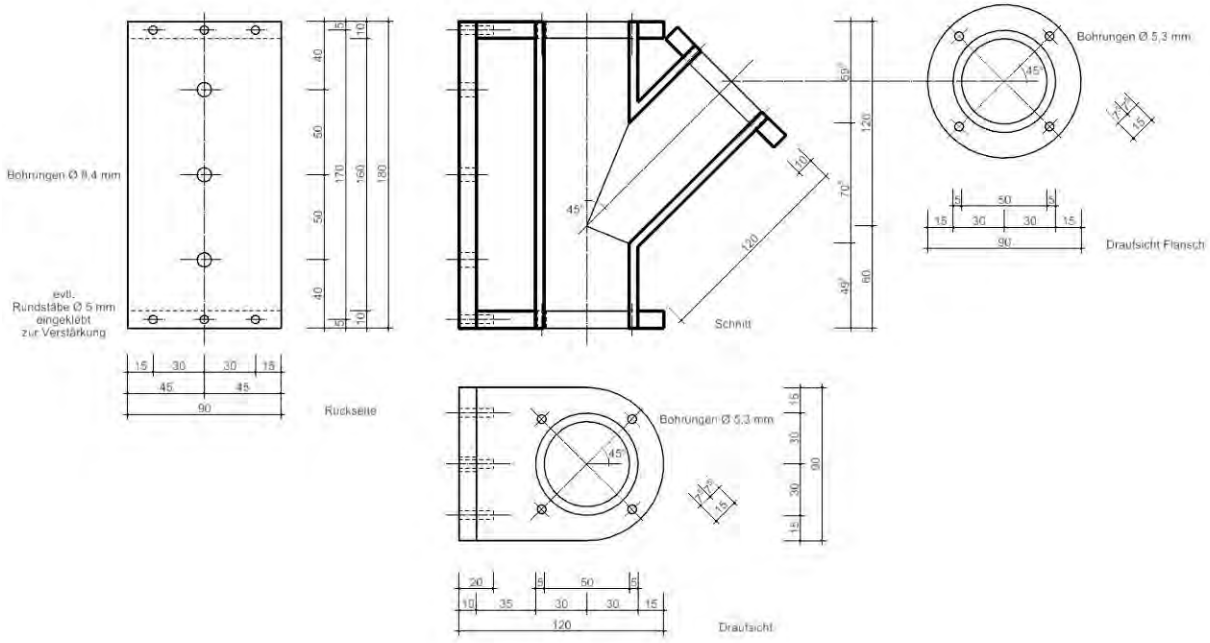

Abbildung 9: Schneckenrohr zur seitlichen Befüllung, Werkzeichnung, Vertikalschnitt und Ansichten

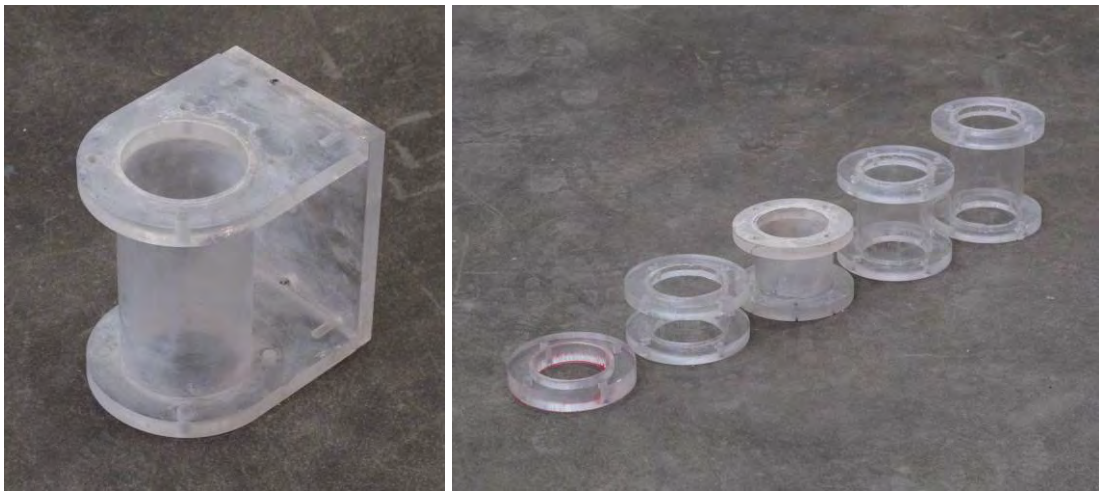

Abbildung 10: Schneckenrohr zur Befüllung von oben (links) und Verlängerungsstücke mit den Längen 15, 45, 60, 75 und 90 mm (rechts)

Die Düsen wurden aus Polyoxymethylen (POM) gedreht. Das Innere hat die Form eines auf dem Kopf stehenden Kegelstumpfes (gerader Kreiskegel) (Abbildung 11). Die Basis des Kegelstumpfes entspricht dem Durchmesser des Schneckenrohres von 54 mm. Die Deckfläche des Kegelstumpfes bildet die (kreisrunde) Düsenöffnung. Die Wandungen der Düse verschlanken von der Basis zur Düse und haben an der Öffnung 2 mm Wandstärke. An der Basis besitzen die Düsen für die Befestigung am Schneckenrohr einen Flansch mit vier Bohrungen. Im Flansch ist eine ringförmige Nut zur Aufnahme eines Dichtungsgummis eingearbeitet. Es wurden Düsen mit

den Öffnungsdurchmessern 17,5 mm, 20 mm, 22,5 mm und 25 mm (Abbildung 12 links und Tabelle 3) und Flankenneigungen von 20° und 15° (Abbildung 12 rechts) gefertigt.

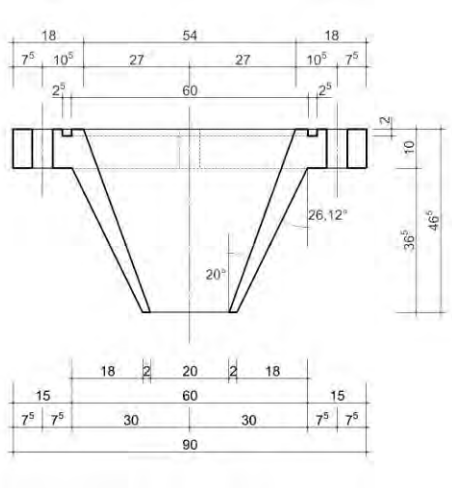

Abbildung 11: Düse mit 20 mm Öffnungsdurchmesser und 20° Flankenneigung, Werkzeichnung, Vertikalschnitt

Abbildung 12: Düsen mit gleicher Flankenneigung (20°) und unterschiedlichem Öffnungsdurchmesser (17,5 mm, 20 mm, 22,5 mm und 25 mm) (links) und Düsen mit gleichem Öffnungsdurchmesser (22,5 mm) und unterschiedlicher Flankenneigung (15° und 20°) (rechts)

Tabelle 3: Öffnungsdurchmesser und Öffnungsquerschnitte (auf ganze mm gerundet) der Düsen

Durchmesser [mm]	17,5	20	22,5	25
Querschnitt [mm²]	240	314	398	490

Die Einfülltrichter bestehen aus Polylactid (polylactic acid, PLA). Sie wurden auf der Basis eines digitalen Modells mit einem RepRap Mendel Fused Filament Fabrication (FFF) 3D-Drucker aus PLA-Filament von 3 mm Durchmesser gefertigt (Abbildung 13). Die Wandungen der Trichter sind ca. 10 mm stark. Das Innere der Wandungen besteht material- und gewichtssparend aus einer Gitterstruktur. Aufgrund der Beschränkungen durch die Größe des Bauraums des RepRap wurden die Trichter in bis zu fünf Einzelteilen zerlegt gefertigt, welche anschließend mit

Zweikomponenten-Klebstoff verklebt wurden. Um eine glatte Oberfläche für einen guten Materialfluss zu erhalten, wurde das Innere der Trichter mit Kunstharzspachtel verspachtelt. Auch die Einfülltrichter besitzen für die Befestigung am Schneckenrohr jeweils einen Flansch mit vier Bohrungen. Es kamen zwei Trichter zur Anwendung, einer für eine Befüllung des Schneckenrohres von der Seite (Abbildung 14 links) und einer für die Befüllung des Schneckenrohres von oben (Abbildung 14 rechts).

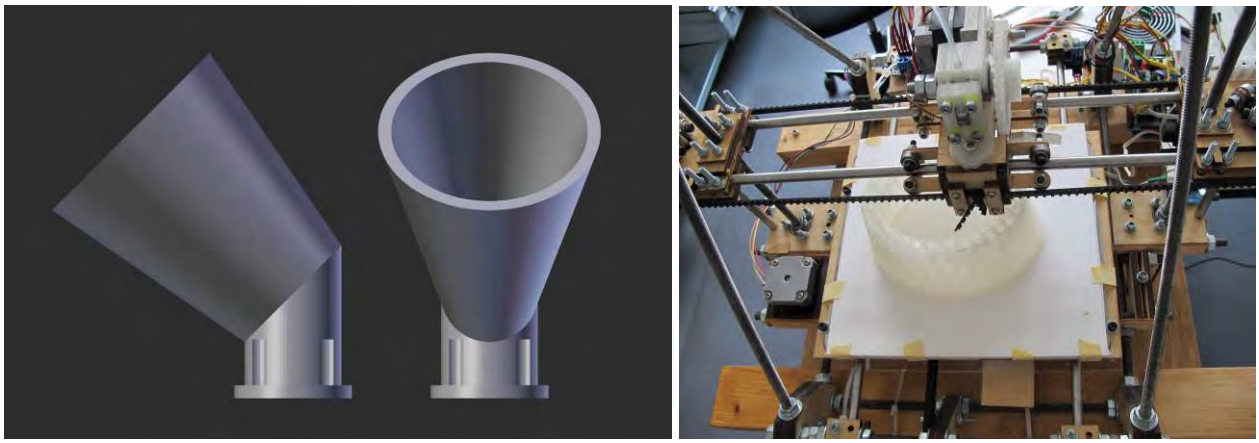

Abbildung 13: Einfülltrichter, digitales Modell (links) und Fertigung im RepRap FFF-3D-Drucker (rechts)

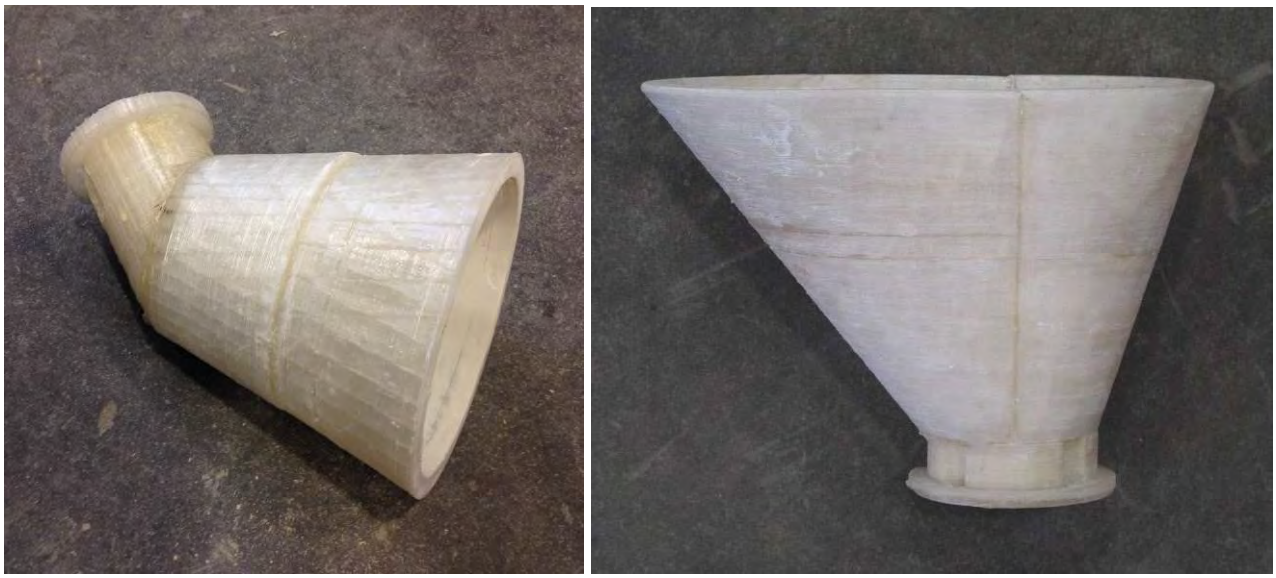

Abbildung 14: Einfülltrichter, fertige Trichter

Bei dem Motor für den Extruder handelt es sich um einen bipolaren Schrittmotor mit 200 Schritten pro Umdrehung, einem Haltemoment von 3 Nm und einem Phasenstrom von 4,2 A. Durch Mikroschrittbetrieb (Microstepping) des Powerlolu Schrittmotortreibers kann die Schrittanzahl des Schrittmotors von 200 auf 400 Schritte pro Umdrehung verdoppelt werden. Bei dem Motor handelt es sich um das gleiche Modell, wie es auch an den drei Achsen des Raumportals verbaut

ist. Er wurde, wie das Portal, über BZT Maschinenbau GmbH, D-33818 Leopoldshöhe bezogen und hat dort die Typenbezeichnung Fl.60 4.2A 3N, Art.-Nr.: KTE190. Die Beschreibung der Steuerung des Extruder-Motors erfolgt in Punkt 4.3.1 Portalsystem und 4.3.2 Industrieroboter.

Einfülltrichter und Düse werden mittels der Flansche am Schneckenrohr befestigt. Das Schneckenrohr wird mit seiner Befestigungsplatte und mittels einer Stahlplatte an einem 500 mm langen Aluminium-Systemprofil befestigt. Die Förderschnecke wird mit einer Wellenkupplung an der Welle des Schrittmotors befestigt. Der Motor wird mithilfe eines Stahlwinkels ebenfalls an dem Aluminium-Systemprofil befestigt (Abbildung 15). Die Lage von Stahlplatte und Stahlwinkel am Aluminium-Systemprofil ist variabel. So kann der Extruder auf die unterschiedlichen Schnecken eingestellt werden und die Einfüllhöhe variiert werden. Um eine leichte Reinigung zu ermöglichen lassen sich das Schneckenrohr durch das Lösen von nur einer und der Motor durch das Lösen von nur zwei Flügelmuttern vom Profilsystem trennen. Mittels verschiedener Stahlplatten, die auf der Rückseite des Profilsystems angeschraubt werden, kann der Extruder an den Manipulatoren oder fix über einer beweglichen Bauplattform befestigt werden.

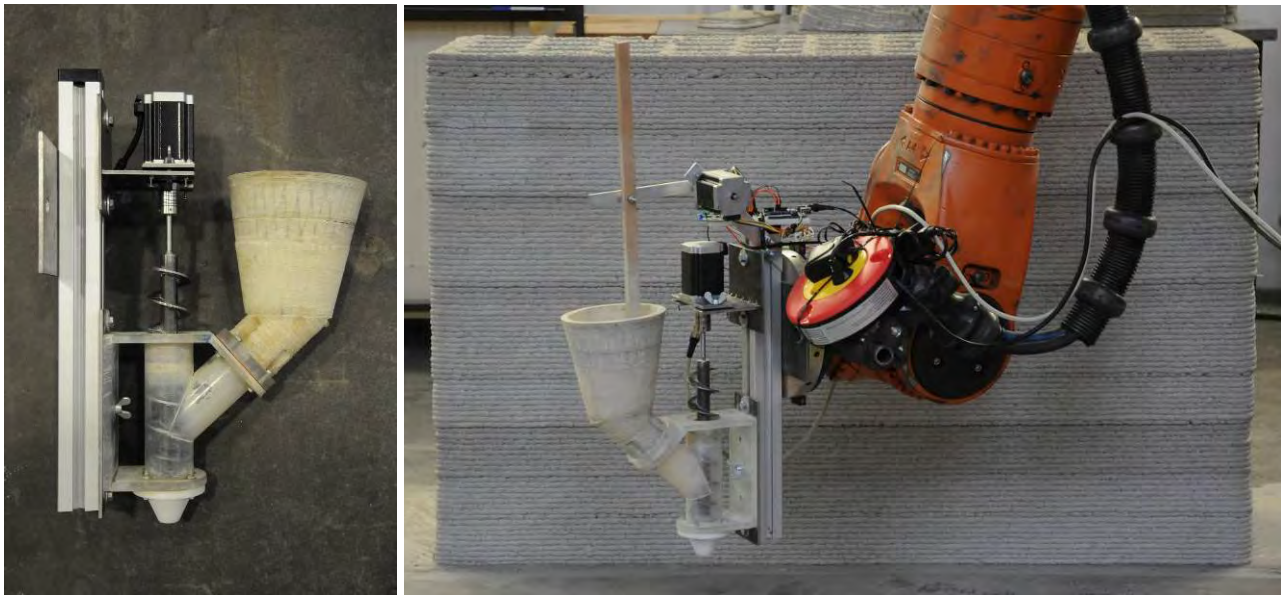

Abbildung 15: Extruder III, rechts montiert am Roboter und mit Fließunterstützer

Zur Förderung des Materialflusses vom Einfülltrichter in das Schneckenrohr wurde bei manchen Versuchen ein Mechanismus eingesetzt, der einen Holzstab durch einen Schrittmotor im Einfülltrichter auf und ab bewegt (Abbildung 15 rechts). Es handelt sich ebenfalls um einen, oben beschriebenen bipolaren Schrittmotor von BZT vom Typ Fl.60 4.2A 3N mit einer Arduino Mikrocontroller-Steuerung.

4.3 Manipulatoren

4.3.1 Portalsystem

Für kleinformatige Versuche steht eine 3-Achsen CNC-Portalfräse vom Typ PF 1000-P des Herstellers BZT Maschinenbau GmbH, D-33818 Leopoldshöhe zur Verfügung. Das Portal hat einen Verfahrweg von ca. 670 mm x 890 mm x 110 mm (X, Y, Z) und wird über drei bipolar angeschlossene Schrittmotoren angetrieben (Abbildung 16).

Abbildung 16: CNC-Portalfräse BZT PF 1000-P mit montiertem Extruder II

Für Versuche mit Extruder II und III können diese direkt an der Werkzeugaufnahme des Portals befestigt werden und über die Bauplattform bewegt werden. Mithilfe der hölzernen Montageplatte kann Extruder II exzentrisch an die Werkzeugaufnahme des Portals geschraubt werden. Dadurch ergibt sich eine Größe des verfügbaren Bauraumes von ca. 500 mm x 700 mm x 110 mm (X, Y, Z). Extruder III wird über das Aluminium-Systemprofil an die Werkzeugaufnahme des Portals geschraubt. Die zentrische Montage des Extruders erlaubt mehr Bewegung entlang der X-Achse. Durch die zusätzliche Tiefe des Aluminium-Systemprofils wird der Verfahrweg der Y-Achse jedoch eingeschränkt. Für Versuche mit dem Extruder III steht somit ein Bauraum von ca. 550 mm x 600 mm x 110 mm (X, Y, Z) (Abbildung 17 links) zur Verfügung.

Um Versuche mit dem Extruder I durchzuführen, ist es auf Grund seines großen Eigengewichtes notwendig, diesen statisch über dem Portal zu befestigen, und stattdessen die Bauplattform zu bewegen. Hierfür wurde ein Aufsatz mit einer ca. 400 mm x 400 mm großen Bauplattform an der

Werkzeugaufnahme des Portals befestig, wodurch sich ein Bauraum von 400 mm x 400 mm x 110 mm (X, Y, Z) ergibt (Abbildung 17 rechts).

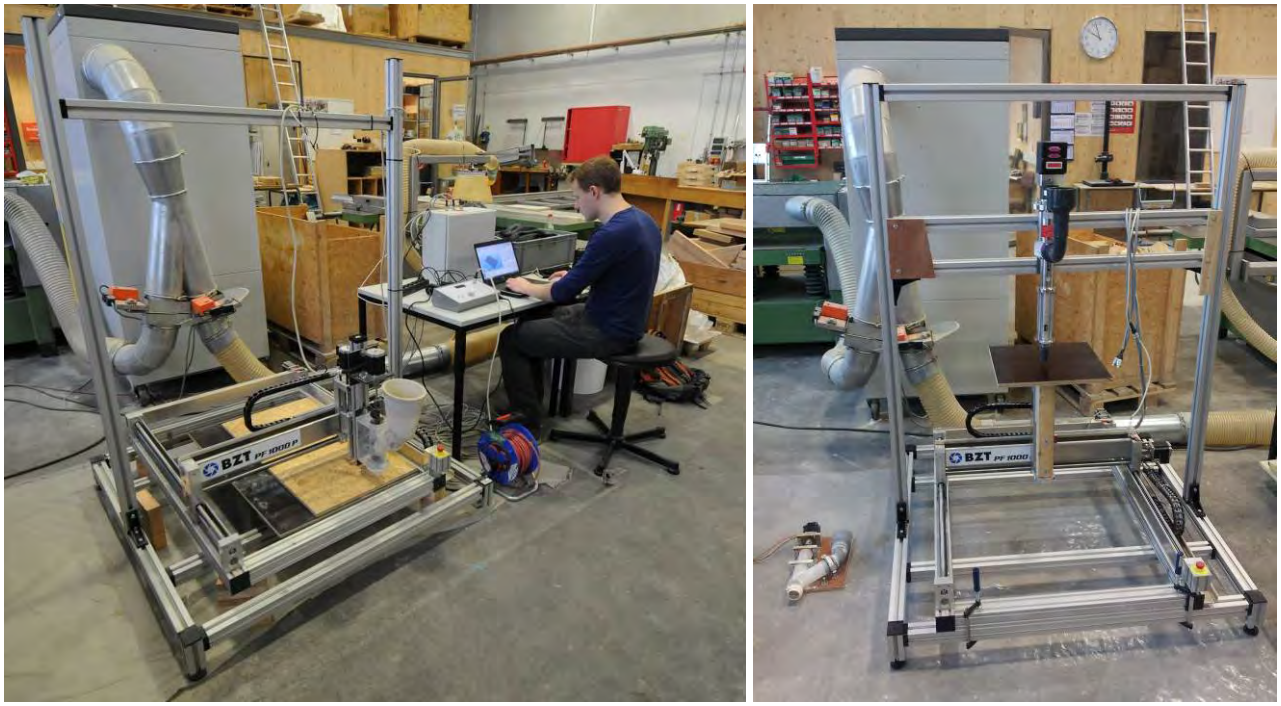

Abbildung 17: CNC-Portalfräse BZT PF 1000-P mit montiertem Extruder III (links) und mit aufgesetzter beweglicher Bauplattform und statisch montiertem Extruder I

Für die Steuerung des Portals kam Open-Source- bzw. Freeware-3D-Drucker-Hard- und -Software zur Anwendung. Bei der Auswahl der Komponenten musste auf die Größe des Portals und die damit erhöhten Leistungsanforderung geachtet werden. Linhart (2014) stellt eine Übersicht und Bewertung der in Frage kommenden Komponenten bereit. Aufgrund des auswechselbaren Mikrocontrollers und der frei wählbaren Schrittmotortreiber fiel die Wahl auf ein Arduino Mega Mikrocontroller Board mit aufgesetztem RAMPS 1.4.2 (‚RepRap Arduino Mega Pololu Shield') und Powerlolu Schrittmotortreibern. Die Teile wurden von der German RepRap GmbH, D-85622 Feldkirchen bezogen. Die gewählte open Source Firmware Repetier und die kostenlose Steuerungssoftware Repetier-Host sind Projekte der Hot-World GmbH & Co. KG, D-47877 Willich.

Mittels Repetier-Host können die X-, Y- und Z-Achse des Portals gesteuert werden. Dies erfolgt mit gängigen Maschinensteuerungsbefehlen nach DIN 66025-1:1983-01 bzw. ISO 6983-1:2009, sogenanntem ‚G-Code'. Dieser Code wird Zeile für Zeile an den Mikrocontroller gesendet, wo die Anweisungen in einzelne Motorimpulse umgewandelt werden.

Die benötigte Extrudiergeschwindigkeit während der Fahrt wird beim Extruder I über eine eigenständige von ViscoTec Pumpen- u. Dosiertechnik GmbH bereitgestellte Steuerung manuell geregelt.

Im Falle des Extruders II und III kann auch die Extrusionsmenge über Repetier-Host wie bei einem klassischen Fused-Filament-Fabrication (FFF) 3D-Drucker gesteuert werden. Die Erstellung von Fahranweisungen für das Portal und den Extruder geschieht bei diesen Druckern über sogenannte ‚Slicer'-Programme, die, basierend auf einigen voreingestellten Parametern, 3D-Modelle automatisch in Schichten und einzelne Fahrspuren unterteilen. Da die generierten Fahrspuren für den 3D-Druck mit thermoplastischem Kunststoff optimiert sind, können diese sehr komplex ausfallen, um z.B. Kühlzeiten, Materialretraktion, zusätzliche Extrusion etc. zu berücksichtigen. Ein weiteres Problem bei der Verwendung von existierender Slicing-Software ist, dass die Extrudiergeschwindigkeit über die einzuziehende Länge des kalten Kunststofffilaments angegeben wird, den sogenannten E-Wert. Für den hier verwendeten flüssigen Holzleichtbeton ist dies ungeeignet.

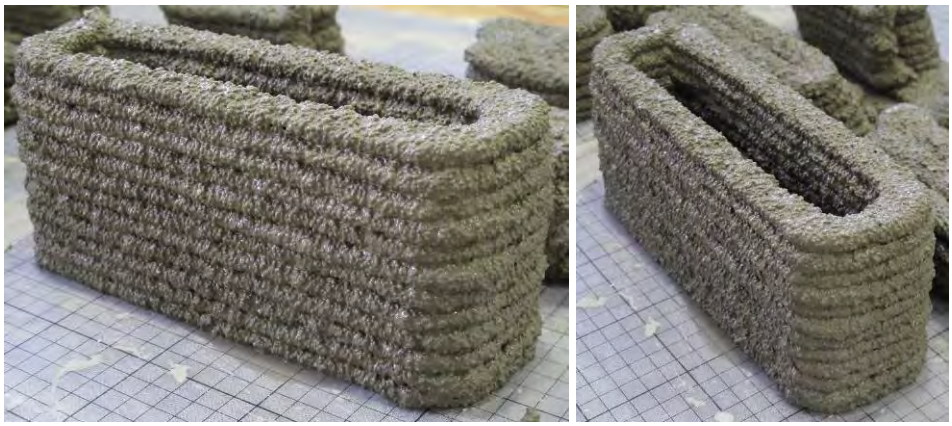

Abbildung 18: Hohlkastenprofil aus extrudiertem Leichtbeton, hier aus einem Leichtbeton mit der Gesteinskörnung Blähglas Liaver, Körnung 1 - 2 mm

Parameter - Hohle Wandscheibe							G-Code
Layer 1							
Länge	mm	150					
Abstand	mm	50					M83
Travel Feedrate	mm/min	3000					G1 F3000
Start	(x,y) mm	100	250				G1 X100 Y250
Höhe Z	mm	10					G1 Z10
Druck Feedrate	mm/min	800					G1 F800
Extr. V	mm/s	4					
VorExtr.	mm	2.8					G1 E2.8
		x	y	Delta	Ve (mm/s) mm/s	Me (mm)	
Anfangspunkt		100	250	0	0	0	G1 X100 Y250
		100	400	150	4	45	G1 X100 Y400 E45
		150	400	50	4	15	G1 X150 Y400 E15
		150	250	150	4	45	G1 X150 Y250 E45
		100	250	50	4	15	G1 X100 Y250 E15
		Extra Extr.	1.6				G1 E1.6
		Rev. Extr.	-2				G1 E-2
							G1 Z40

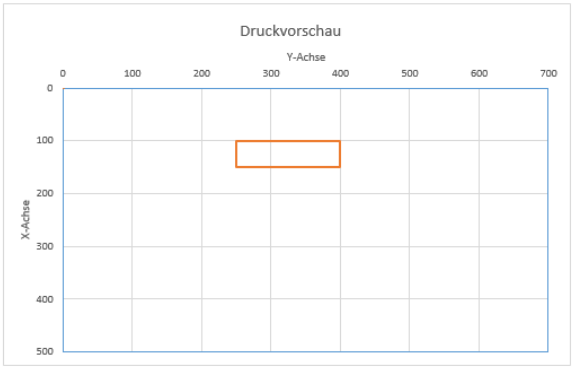

Abbildung 19: Microsoft Excel Tool zur Erstellung von G-Code, hier für eine Schicht eines Hohlkastenprofils mit den Abmessungen 150 mm x 50 mm

Aus diesen Gründen wurde es als zielführender angesehen, die Fahr- und Extrusionsanweisungen manuell mithilfe eines Microsoft Excel Tools zu generieren. Mit diesem Tool wird zunächst die gewünschte Fahrspur jeder Schicht anhand weniger Parameter, wie Anfangspunkt, Länge und

Breite der Geometrie, evtl. Fahrspurabstand von Parallelspuren etc. beschrieben. Der parametrische Aufbau erlaubt dabei eine schnellere Änderung der Versuchsgeometrie. Zusammen mit der Angabe der Fahrgeschwindigkeit (der sogenannten „Feedrate“) F und der Extrusionsmenge E wird aus den Eckpunktkoordinaten G-Code für die CNC-Portalsteuerung generiert. Die benötigte Extrusionsmenge für den jeweiligen Streckenabschnitt wird so berechnet, dass die Extrudiergeschwindigkeit konstant bleibt. Abbildung 19 zeigt beispielhaft die Programmierung von G-Code für ein Hohlkastenprofil (150 mm x 50 mm), ähnlich dem in Abbildung 18 gezeigten, mit dem Excel Tool. Die linke Seite der Tabelle stellt den parametrischen Aufbau der Geometrie dar. Der G-Code wird in der rechten Spalte generiert. Zusätzlich hilft eine Druckvorschau (rechts in Abbildung 19) bei der Kontrolle der Fahrspur. Der G-Code kann anschließend kopiert und direkt als Text in Repetier-Host eingefügt werden.

Die Bündelung von Extrudiergeschwindigkeit und Fahrbewegungen des Portals in Repetier-Host ermöglicht es, genaue Anweisungen je Streckenabschnitt zu definieren. Beispielsweise können unterschiedliche Geschwindigkeiten, Pausen, und auch Beschleunigungen programmiert werden. Ein Nachteil ist jedoch, dass während des Druckvorgangs keine Korrektur der Extrudiergeschwindigkeit vorgenommen werden kann. Auch wenn z.B. für Versuche mit mehreren Betonrezepturen von unterschiedlicher Viskosität die Extrudiergeschwindigkeit angepasst werden soll, muss für jeden Versuch der generierte Code neu in Repetier-Host kopiert werden.

Für Versuche mit dem im folgenden Abschnitt vorgestellten Industrieroboter wurde zusätzlich noch eine eigenständige Extrudersteuerung entwickelt, die ebenso am CNC-Portal mit Extruder II und III verwendet werden kann.

4.3.2 Industrieroboter

Für die Fertigung der großformatigen Testobjekte konnte ein sechs-Achsen-Industrieroboter vom Typ Kuka KR 150 L110 (Abbildung 20) des Lehrstuhls für Baurealisierung und Baurobotik (Prof. Thomas Bock) an der Technischen Universität München gemietet werden. Das Gerät hat eine maximale Reichweite von 3.500 mm und eine Tragkraft von 110 kg. Zusätzlich ist der Roboter auf einer ca. 7 m langen Lineareineit aufgestellt die als siebte Achse fungiert. Hierdurch wird die Reichweite des Roboters noch einmal erheblich vergrößert. Gesteuert wird der Roboter über einen Kuka KR C 2 Controller mit der Softwareversion KR C V5.6.12.

Für Arbeiten mit dem Roboter wurde nur Extruder III verwendet. Das Aluminium-System-Profil kann über eine Adapter-Stahlplatte mit zwei Schrauben am Anbauflansch des Roboters befestigt werden. Da es nicht möglich war den Extruder in die Steuerung des Kukas mit einzubinden, wurde eine externe Steuerungseinheit bestehend aus einem Arduino Uno und einem Powerlolu Schrittmotortreiber entworfen. Mit dieser lässt sich die Umdrehungsgeschwindigkeit sowie Drehrichtung des Extruders manuell steuern.

Zwar erlaubt dies eine Korrektur der Extrusionsmenge während der Fahrt, eine synchrone Programmierung mit den Roboterbewegungen ist jedoch nicht möglich. Aus diesem Grund

wurden die einzelnen Schichten des zu druckenden Objekts aus geschlossenen Schleifen mit stets gleichem Anfangs- und Endpunkt aufgebaut, so dass auch mehrere Schichten in Folge ohne Absetzen in einem Zug gedruckt werden konnten. Die Extrusion wird bei Beginn und Ende der Roboterbewegung manuell über die externe Steuerung gestartet und wieder gestoppt.

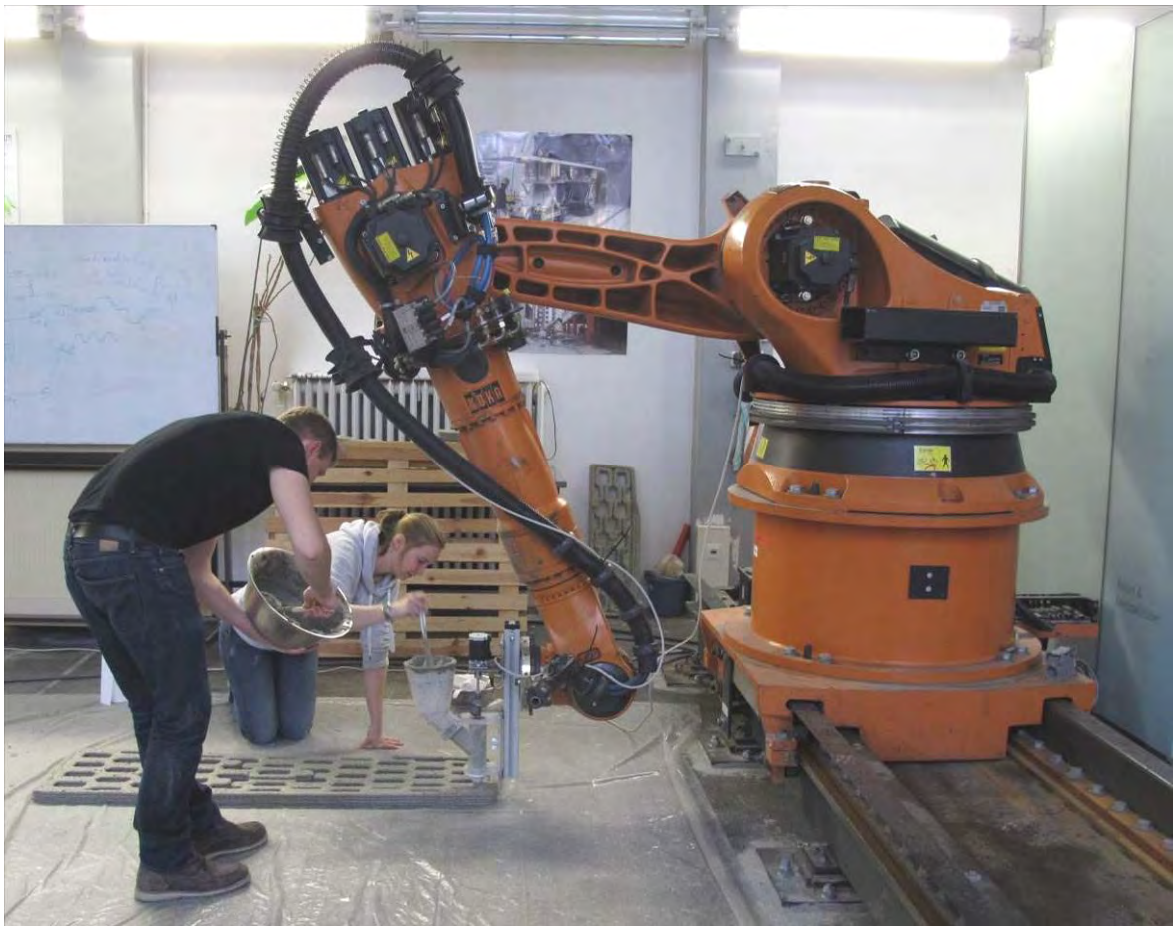

Abbildung 20: Industrieroboter Kuka KR 150 L110 des Lehrstuhls für Baurealisierung und Baurobotik mit montiertem Extruder III

```
24  BAS(#PTP_PARAMS,10) ;
25
26  PTP XP1                          ;Anfangspunkt (muss manuell gesetzt werden)
27  HALT                             ;Haltebefehl für Überprüfung / Befüllen des Extruders
28  BAS(#CP_PARAMS,0.1)              ;Fahrgeschwindigket für Linearfahren (0,1 m/s)
29  $APO.CVEL=80                     ;Eckpunktapproximiation um (80%)Geschwindigkeit in Ecken beizubehalten
30  FOR I = 1 TO 10 STEP 1           ;Start der Schleife für 10 Schichten
31  LIN_REL{Z 10} C_VEL              ;Anheben des Extruders um 10 mm
32  LIN_REL{X 0,Y 150} C_VEL         ;Relative Linearfahrten zu den jeweiligen Koordinaten mit Eckpunktapproximation
33  LIN_REL{X -50,Y 0} C_VEL
34  LIN_REL{X 0,Y -150} C_VEL
35  LIN_REL{X 50,Y 0} C_VEL
36  ENDFOR                           ;Ende der Schleife
37  END                              ;Ende des Programms
```

Abbildung 21: Kuka Programmiersprache, hier am Beispiel eines Hohlkastenprofils mit den Abmessungen (L x B x H) 150 mm x 50 mm x 100 mm

Die Programmierung der Fahrspuren erfolgt ähnlich wie bei dem CNC-Portal. Anstelle von G-Code wird der Roboter mit einer eigenen Kuka Programmiersprache gesteuert die weitaus komplexere Befehle, zum Beispiel Bedingungen und Schleifen, zulässt. Um die Fahrspur zu erstellen, wird zunächst wie bei dem CNC-Portal die Geometrie einer oder mehrerer Schichten als Koordinatenliste beschrieben. Da die genaue Position des zu druckenden Objektes noch nicht feststeht, werden die Koordinaten nicht als absolute Punkte, sondern ausgehend von einem willkürlich festgelegten Anfangspunkt als Platzhalter relativ zum jeweils vorherigen Punkt beschrieben. Diese Liste an Relativkoordinaten wird anschließend in für den Kuka verständliche Befehle umformatiert, mit zusätzlichen Befehlen, wie Fahrgeschwindigkeit, Eckpunktapproximation und Schleifen für die Wiederholung der Schicht, ergänzt und auf den Kuka Controller kopiert. Danach wird der Roboter manuell in die gewünschte Startposition bewegt und der Anfangspunkt in der Koordinatenliste durch die aktuelle Position ersetzt. Abbildung 21 zeigt ein kommentiertes Beispiel für Fahranweisungen in der Kuka Programmiersprache. Die Fahrspur beschreibt ein Hohlkastenprofil (L x B x H) 150 mm x 50 mm x 100 mm, ähnlich dem in Abbildung 18 gezeigten.

5 Untersuchungen zur Eignung der Extruder

5.1 Allgemeines

Bevor Versuche zur Entwicklung von extrusionsfähigen Materialien durchgeführt werden, und Objekte durch die Extrusion von Holzleichtbeton additiv gefertigt werden konnten, wurden die verschiedenen zur Verfügung stehenden Extruder und Extruderelemente auf ihre grundsätzliche Eignung als materialverarbeitendes und -transportierendes System in diesen Prozessen untersucht.

5.2 Extruder I

Wie in Punkt 4.2.2 bereits dargestellt, gelten Exzenterschneckenpumpen als besonders geeignet zur Förderung abrasiver und feststoffbeladener Medien. Auch ihr Einsatz in Mörtelpumpen lässt vermuten, dass diese Pumpenbauart für die Förderung von Holzleichtbeton geeignet ist. In Vorgesprächen mit dem Hersteller ViscoTec Pumpen- u. Dosiertechnik GmbH wurde dies von dieser Seite auch bestätigt. Es wurde deshalb für das Projekt von der ViscoTec Pumpen- u. Dosiertechnik GmbH eine Exzenterschneckenpumpe vom Typ ViscoTec Dispenser 3VMP22, das größte Modell dieses Herstellers, zu günstigen Konditionen gemietet.

Abbildung 22: Versuche mit Exzenterschneckenpumpe ViscoTec Dispenser 3VMP22 im Technikum der ViscoTec Pumpen- u. Dosiertechnik GmbH

Bei der Inbetriebnahme des Gerätes im Labor an der Technischen Universität München zeigte sich, das die Förderung von Frischbeton mit Anteilen von Holzspänen nicht ohne weiteres möglich ist. Bei einem ersten Testlauf wurde die Pumpe stehend über der beweglichen Bauplattform des Raumportals angeordnet. Die Zufuhr des Baumaterials erfolgte über einen kleinen Trichter und einen 45°-Rohrbogen. Zunächst wurde die Funktionsfähigkeit des Extruders durch Einfüllen von Wasser geprüft. Anschließend wurde Frischbeton, bestehend aus WUTZ Spezialzement für Holzbeton, Buchenspänen Lignocel HB 500-1000 und Wasser eingefüllt. Eine Förderung dieses Frischbetons war jedoch nicht möglich. Es wurde lediglich eine kleine Menge Wasser ausgepresst, anschließend blockierte die Schnecke und der Motor kam zum Stehen. Da sich das Material in der Pumpe innerhalb kürzester Zeit verfestigt hatte, war es auch nicht möglich, das Gerät zu öffnen und zu reinigen. Die Versuche mussten deshalb abgebrochen, und die Pumpe im Werk der Fa. Viscotec in Töging überholt werden.

Abbildung 23: Extruder I mit ViscoTec Dispenser 3VMP22 liegend aufgestellt und mit unmittelbar aufgesetztem Edelstahltrichter, links im Bild die elektronische Steuerung (Bauer 2015)

Anschließend wurden im Technikum der ViscoTec Pumpen- u. Dosiertechnik GmbH in Töging a. Inn weitere Tests durchgeführt. Dabei wurde die Pumpe in einer schräg liegenden Position aufgestellt. Die Zufuhr des Baumaterials erfolgte über einen Trichter aus Edelstahl und ein flexibles Rohr mit geringer Krümmung (Abbildung 22). Um bei einem erneuten Misserfolg die Reinigung des Geräts zu erleichtern, wurde das Bindemittel Zement bei den Versuchen durch Lehm (Clayfix Feinputz) ersetzt. Bei dem Versuch, ein Gemisch aus Lehm, Buchenspänen Lignocel HB 500-1000 und Wasser auszubringen, versagte der Extruder nach wenigen Umdrehungen. Auch Versuche mit einem kleineren Pumpenmodell gleicher Bauart (ViscoTec

Dispenser 3RD12) führten zu dem gleichen Ergebnis. In allen Fällen ließ sich nur mineralisches Material (Lehmmörtel Clayfix Feinputz) ohne Holzanteile fördern. Sobald dem Mörtel Spanmaterial beigemischt war, führte dies unmittelbar zum Blockieren des Rotors.

Die Eignung der Exzenterschneckenpumpe ViscoTec Dispenser 3VMP22 als Förderer in einem Extruder für Holzleichtbeton wurde daraufhin systematisch in einer Bachelorarbeit (Bauer 2015) untersucht. Dabei wurde der Extruder liegend mit unmittelbar aufgesetztem Edelstahltrichter aufgestellt (Abbildung 23), um das Medium auf möglichst direktem Weg der Saugseite der Pumpe zuzuführen.

Die Versuche wurden zunächst mit CLAYTEC Baulehm und vier verschiedenen Spansorten (Arbocel C320, Lignocel BK 40-90, Lignocel 9 und Lignocel HB 500-1000) durchgeführt. Für jede Spansorte wurde eine Versuchsreihe durchgeführt, bei der der Anteil der Holzspäne im Mörtel Schritt für Schritt gesteigert wurde. Begonnen wurde mit einem Gewichtsverhältnis von Spänen zu Lehmpulver von 0,05. Anschließend wurde der Spananteil in jedem Schritt um 0,025 erhöht. Um bei höheren Spananteilen weiterhin förderbare Mörtel zu erhalten wurde der Wasseranteil entsprechend angepasst. Die maximal erreichbaren Werte für das Gewichtsverhältnis von Spänen zu Lehmpulver lagen zwischen 0,175 und 0,225 (Arbocel C320: 0,2; Lignocel BK 40-90: 0,225; Lignocel 9: 0,175; Lignocel HB 500-1000: 0,2). Bei Mörtelmischungen mit einem größeren Spananteil kam es entweder zu einer Blockade des Rotors oder zu Entmischungserscheinungen.

Abbildung 24: Stator des ViscoTec Dispenser 3VMP22 nach dem Versuch mit Arbocel C320 und SCHWENK Portlandkalksteinzement. Entwässerter Spanrückstand an der Saugseite (links) und spanreduzierter Frischbeton an der Druckseite (rechts) (Bauer 2015).

Im Folgenden wurden Versuche mit Holzleichtbetonrezepturen unter Einsatz der beiden Spansorten mit den kleinsten Spangrößen (Arbocel C320 und Lignocel BK 40-90) und Portlandkompositzement (SCHWENK Portlandkalksteinzement) durchgeführt. Hierbei wurde der in den Versuchen mit Lehm ermittelte maximal förderbare Spananteil gewählt (Arbocel C320: 0,2; Lignocel BK 40-90: 0,225). In beiden Fällen kam es sofort zu einer Entmischung des Frischbetons

in den Förderkammern zwischen Rotor und Stator und in der Folge zu einem Blockieren des Rotors (Abbildung 24).

Eine umfassende Untersuchung, inwieweit Exzenterschneckenpumpen grundsätzlich für die Förderung von Holzleichtbeton geeignet sind, und welche Parameter hierbei zu berücksichtigen sind (z.B. Schneckengeometrie, Material von Stator und Rotor), konnte in diesem Projekt nicht durchgeführt werden. Von einem Einsatz des ViscoTec Dispenser 3VMP22 als Förderer in einem Extruder für Holzleichtbeton wurde im weiteren Verlauf des Projektes jedoch abgesehen.

5.3 Extruder II

Die grundsätzliche Eignung von Extruder II für die Extrusion von Holzleichtbeton war bereits aus Talke (2014) und Strobel (2015) bekannt. In Talke (2014) konnten mit dem Extruder II unter Einsatz von WUTZ Spezialzement für Holzbeton und Buchenspänen Lignocel HB 500-1000 bis zu 500 mm lange Spurfahrten und verschiedene mehrschichtige Objekte realisiert werden. Negativ fiel lediglich auf, dass im Betrieb Material im Schneckenrohr nach oben gedrückt wird. Als Ursache hierfür wird die starke Progression der Schnecke, in Kombination mit der Verjüngung der Schnecke zur Saugseite hin angesehen. Auch zeigte sich, dass der Extruder aufgrund der Dimensionen der Schnecke nur für feine Spanfraktionen und die Extrusion von sehr dünnen Raupen geeignet ist. Aus diesem Grund wurde beschlossen, aufbauend auf den Erfahrungen mit Extruder II, einen Versuchsextruder (Extruder III) zu entwickeln. Währenddessen konnte aber unter Einsatz von Extruder II an den unter Punkt 6 vorgestellten Materialversuchen weitergearbeitet werden.

5.4 Extruder III

Wie unter Punkt 4.2.4 beschrieben, wurden für den Versuchsextruder verschiedene Förderschnecken, Schneckenrohre, Düsen und Einfülltrichter gefertigt. Ziel der im Folgenden beschriebenen Versuche war es, herauszufinden, welche dieser Elemente in welcher Kombination und Anordnung die besten Resultate hervorbringt.

Die Zielgrößen der Versuche wurden wie folgt formuliert: Erste Priorität hat ein stetiger Materialfluss ohne ein Blockieren der Drehbewegung durch Feststoffanteile im Fördermedium und ohne ein Entmischen des Frischbetons. Dabei wird eine möglichst gute Steuerbarkeit angestrebt, also eine möglichst gute Proportionalität zwischen Drehgeschwindigkeit und extrudierter Materialmenge über den gesamten Drehzahlbereich. Im besten Fall kann der Extruder auch Ventilfunktion übernehmen. Das bedeutet, ein Anhalten der Drehbewegung führt auch zu einem sofortigen Stopp des Materialflusses. Schließlich wird noch, aus den unter Punkt 2 genannten Gründen, ein kurzer Förderweg des Frischbetons im Extruder angestrebt. Langfristig auch zu berücksichtigende Zielgrößen, wie ein vertretbarer Verschleiß und ein geringer Energieverbrauch, mussten hier zunächst ausgeklammert werden.

In einer noch laufenden Bachelorarbeit (Starke 2016) wurde die Proportionalität zwischen Drehzahl und Volumenstrom bei den vier verschiedenen Förderschnecken (Abbildung 8 und Abbildung 25) des Versuchsextruders und bei unterschiedlichen Einfüllorten des Frischbetons in den Schneckengang untersucht.

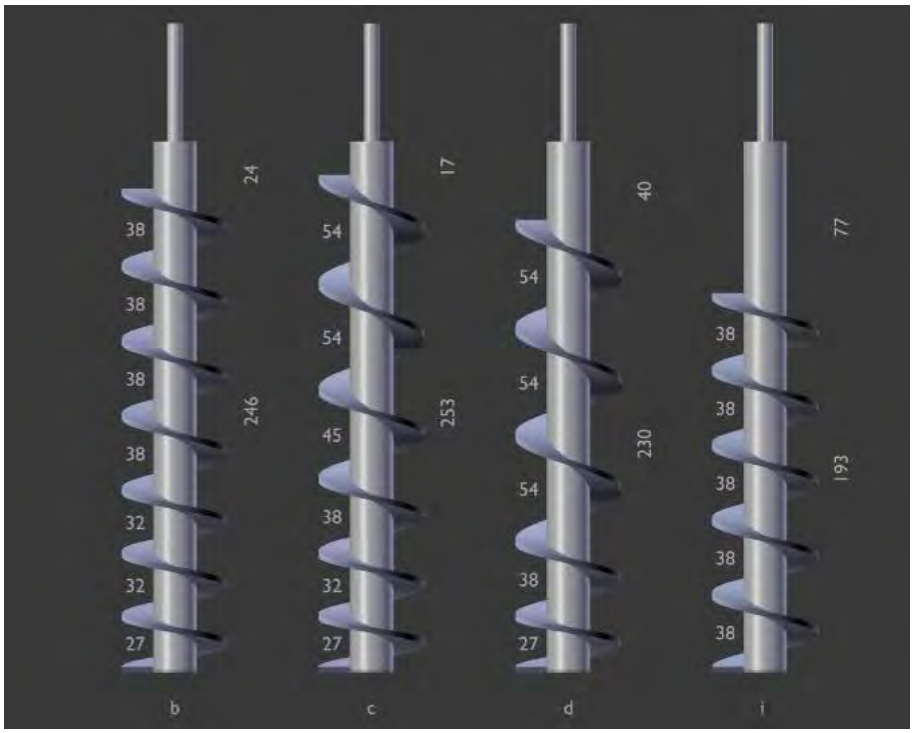

Abbildung 25: Bei den Versuchen eingesetzte Förderschnecken. Schnecken b, c und d mit Ganghöhen von 27 mm am unteren Ende und jeweils unterschiedlich starker Progression und Schnecke i mit einer konstanten Steigung von 38 mm

Es wurde folgende Rezeptur verwendet: 1.000 g SCHWENK Portlandkalksteinzement, 120 g Lignocel 9, 14 g Luftporenbildner MasterAir 77, 520 g Wasser. Stabilisier und Beschleuniger wurden nicht eingesetzt.

Die Drehzahl wurde in sechs Stufen schrittweise von 1,7 bis 213 Umdrehungen in der Minute erhöht und jeweils nach der gleichen Zeitspanne von 4,5 s die Masse des extrudierten Frischbetons durch Wiegen ermittelt. Mithilfe der zuvor ermittelten Frischbetondichte konnte die extrudierte Masse pro Zeiteinheit in einen Volumenstrom umgerechnet werden. Abbildung 26 zeigt beispielhaft zwei Versuchsergebnisse.

Die besten Ergebnisse wurden mit den Förderschnecken b und i bei einem Einfüllen des Frischbetons seitlich im unteren Bereich erzielt, also mit kurzen Förderwegen und mit Schnecken mit geringer oder gar keiner Progression. Bei diesen Konstellationen war weder ein Blockieren noch ein Entmischen des Frischbetons zu beobachten.

Versuche mit auf dem Schneckenrohr stehendem Trichter und Einfüllung von oben führten zu keinen befriedigenden Ergebnissen und mussten wegen Blockierens abgebrochen werden. Dies ist vermutlich auf den hierbei aufgrund der Versuchsanordnung vergleichsweise langen Förderweg zurückzuführen.

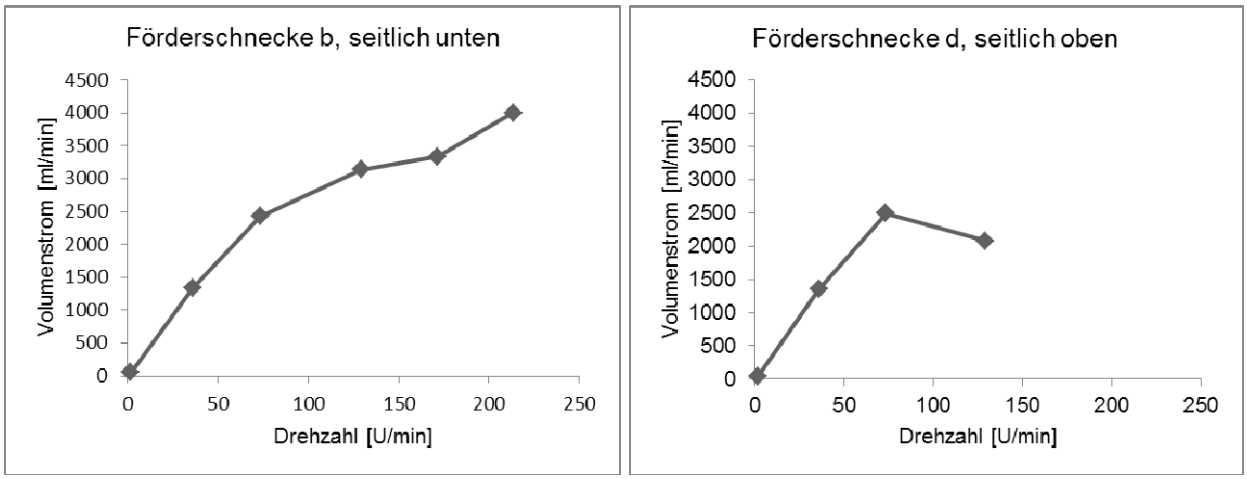

Abbildung 26: Ergebnisse der Extrusionsversuche, links Schnecke b (geringe Progression) bei Einfüllung seitlich im unteren Bereich, rechts Schnecke d (starke Progression) bei Einfüllung seitlich im oberen Bereich (nach Starke 2016)

Düsen mit Öffnungsdurchmessern < 20 mm und Flankenneigungen < 20° führten immer wieder zu Ausbildung eines Filterkuchens und infolgedessen zu einem Blockieren des Materialflusses.

Aufgrund der Ergebnisse der Extrusionsversuche, wurde bei den im Punkt 7 beschriebenen Versuchen mit großformatigen Testobjekten die Schnecke b mit seitlich im unteren Bereich angebrachten Einfülltrichter und mit einer Düse von 20 mm Öffnungsdurchmesser und 20° Flankenneigung eingesetzt. Dabei zeigte sich auch, dass der Materialfluss an der Düse durch Anhalten des Motors vollständig und ohne Verzögerung gestoppt werden konnte. Ein zusätzliches Ventil ist bei dieser Bauart von Extruder also nicht erforderlich.

6 Materialentwicklung und -prüfung

6.1 Allgemeines

An Werkstoffe (im vorliegenden Fall Beton), die bei der additiven Fertigung durch Extrusion eingesetzt werden sollen, werden sehr unterschiedliche, teils sich wiedersprechende Anforderungen gestellt. Während der Frischbeton im materialverarbeitenden und -transportierenden System gut fließfähig sein muss, soll er nach dem Austreten aus der Düse möglichst schnell Festigkeit entwickeln. Nur wenn dies gewährleistet ist, können eine praxisgerechte Baugeschwindigkeit und nennenswerte geometrische Freiheit erreicht werden. Darüber hinaus werden an die Festbetoneigenschaften die gewöhnlichen Anforderungen bezüglich Festigkeit, Wärmeleitfähigkeit, Brandverhalten etc. gestellt. Ein Markt für Baustoffe zum Einsatz in der additiven Baufertigung steckt noch in den Anfängen (s. z.B. CyBe 2016). Auch Ausgangsmaterialien speziell zur Herstellung von Holzleichtbeton sind rar am Markt. Es mussten deshalb (obgleich dies nicht der zentrale Gegenstand des Forschungsprojektes war) in einem gewissen Umfang Materialentwicklung betrieben werden.

6.2 Versuche mit Spezialzement für Holzbeton

WUTZ Spezialzement für Holzbeton ist ein auf Weißzement basierendes Bindemittel und wurde für die Herstellung von Kunst- und Bastelobjekten aus Holzleichtbeton entwickelt. Zudem ist er laut Hersteller ebenso für Zuschläge wie Heu oder Papier geeignet. Der Hersteller empfiehlt eine Mischung des Zements mit Holzspänen im Verhältnis 1:1, bezogen auf den Raumanteil, oder 3:1, bezogen auf das Gewicht (Backstein Engineering 2016).

Erste Versuche zur Extrudierbarkeit von WUTZ Zement wurden im Rahmen einer Bachelorarbeit (Strobel 2015) mit dem Extruder II am Portalsystem durchgeführt. Der Fokus lag dabei auf der Findung extrusionsfähiger Holzleichtbetone mit möglichst hohem Spananteil und hoher Biegezugfestigkeit. Zum Einsatz kamen Buchenspänen (Lignocel HB 500-1000) und Fichtenspänen (G 8/20), sowie Zitronensäurepulver oder Saccharose in Form von einfachem Kristallzucker als Additive. Für die Untersuchung der Druckauflösung wurden zwei unterschiedliche Düsendurchmesser (15 und 20 mm) verwendet.

Die Ermittlung der Biegzugfestigkeit wurde an der Holzforschung München in Anlehnung an DIN EN 310:1993-08 ‚Holzwerkstoffe; Bestimmung des Biege-Elastizitätsmoduls und der Biegefestigkeit‘ durchgeführt, um die Vergleichbarkeit mit vorangegangen Arbeiten zu gewährleisten. Es wurden je Betonmischung drei Probekörper aus vier Schichten von zwei nebeneinanderliegenden Raupen mit der 20 mm Düse gedruckt. Anschließend wurden diese auf das Maß 200 mm x 25 mm x 25 mm (L x B x H) zurechtgesägt (Abbildung 27).

Die Versuche ergaben, dass sich mit beiden Spanarten grundsätzliche extrudierbare Betone herstellen lassen. Beide Varianten ließen sich durch die 20 mm Düse extrudieren. Betone mit Buchenspänen konnten ebenfalls durch die 15 mm Düse gefördert werden, die Fichtenspäne

führten jedoch aufgrund Ihrer Größe schnell zum Verstopfen des Extruders. Bei Mischungen mit Fichtenspänen konnte ein Span/Zement-Masseverhältnisse (s/z-Wert) von bis zu 0,17 und Betondichten von ca. 780 kg/m³ erreicht werden. Betonmischungen mit Buchenspänen ließen sich bei einem s/z-Wert von 0,3 noch extrudieren. Die Trockenrohdichte bei diesem Spananteil lag bei ca. 860 kg/m³.

Abbildung 27: Probekörper für Biegezugversuche aus WUTZ Spezialzement für Holzbeton und Buchenspänen Lignocel HB 500-1000, gedruckte Rohlinge (links) und zugeschnittene Probeköper (rechts) (Strobel 2015)

Auffällig für beide Zement-Span-Kombinationen ist, der hohe Wasserzementwert (w/z-Wert), der erforderlich ist, um die Betonmischungen extrudieren zu können. Dieser lag je nach Anteil der Holzspäne zwischen 0,8 und bis zu 1,0. Der hohe Wasseranteil wirkt sich auch negativ auf die resultierende Festigkeit des Betons aus. Die durchgeführten Biegezugversuche ergaben Festigkeiten von 0,98 - 2,21 N/mm².

Als weiterer negativer Aspekt erwies sich das sehr schnelle Ansteifen des Betons. Die untersuchten Betonmischungen konnten stets nur in sehr geringen Mengen angemischt und extrudiert werden, da sonst das Material bereits im Extruder erstarrt wäre. Erst durch die Zugabe von Zitronensäurepulver oder Kristallzucker (Saccharose) als Verzögerer konnte die Verarbeitungsdauer von 5 auf ca. 15 Minuten verlängert, und ein Erhärten des Betons bereits im Extruder verhindert werden. Trotzdem war die Verarbeitungszeit zu kurz, um das Material in baupraktischen Mengen anzumischen und eine gleichmäßige Extrusion zu gewährleisten.

6.3 Versuche mit mineralisierten Spänen

Verschiedene Holzinhaltstoffe, wie Fette und Harze und insbesondere Holzzucker, können den Abbindeprozess des Betons erschweren oder vollständig unterbinden (Cziesielski 1975). Dies macht sich in einem schalungsfreien Fertigungsprozess, bei dem ein schnelles Ansteifen entscheidend ist, besonders störend bemerkbar. Ein vielversprechender Ansatz, dem zu begegnen besteht im Einsatz von mineralisierten Spänen (Cziesielski 1975; Garrecht & Klatt 2012; Klatt 2012). Neben einem günstigeren Abbindeverhalten führt der Einsatz von mineralisierten

Spänen auch zu verbesserten Festbetoneigenschaften, wie z.B. einer deutlich höheren Druckfestigkeit (Garrecht & Klatt 2012).

Abbildung 28: Mineralisch ummantelte Späne CEMWOOD CW 1000

Auf dem Markt erhältliche mineralisierte Späne (AGRESTA 2016; Bockelmann 2016; Cemwood 2016a; Cemwood 2016b) weisen meist, auch aufgrund ihrer vorgesehenen Anwendung als Bodenhilfsstoff oder Hohlraum- und Ausgleichsschüttung, längliche Spangeometrie auf und sind deshalb als Leichtzuschlag in Extrusionsbeton ungeeignet. Die CEMWOOD Späne, insbesondere CW 1000 (Abbildung 28), haben jedoch eine vergleichsweise gedrungene Form.

Abbildung 29: Durch Extrusion eines Leichtbetons mit der Gesteinskörnung CEMWOOD CW 1000 gefertigtes Bauteil (Modell aus Immel 2015)

Es wurden deshalb im Rahmen einer Bachelorarbeit (Immel 2015) Versuche mit CEMWOOD CW 1000 und CW 2000 durchgeführt. Diese Späne werden bei ihrer Herstellung in einem an der Technischen Universität Darmstadt entwickelten Mischverfahren (Garrecht & Klatt 2012) mit einer

mineralischen Ummantelung versehen (Cemwood 2016c). Es konnten extrudierfähige Frischbetone mit einen Span-Zement-Gewichtsverhältnis (s/z-Wert) von bis zu 0,29 realisiert werden. Abbildung 29 zeigt ein durch Extrusion gefertigtes Bauteil. Zum Einsatz kamen hierbei SCHWENK Portlandkalksteinzement und CEMWOOD CW 1000. Der w/z-Wert betrug 0,45, der s/z-Wert 0,19. Die Extrusion erfolgte mit dem Extruder II am Portalsystem und unter Einsatz einer Düse mit einem Öffnungsdurchmesser von 25 mm.

Da die mineralisierten Späne ein Komposit aus mineralischen und organischen Stoffen darstellen, gibt der s/z-Wert nur bedingt Auskunft über den Holzanteil im Beton. In Anlehnung an Kuhnhenn (2010) kann angenommen werden, dass der Holzgewichtsanteil am mineralisierten Span bei ca. 70% liegt. Zudem führte die Geometrie und Oberflächenbeschaffenheit der Späne immer wieder zum Blockieren des Extruders. Weil aber eine eigene Herstellung von mineralisierten Spänen speziell für Zwecke der Extrusion im Projekt aus Zeit- und Kostengründen nicht möglich war, wurde dieser ansonsten sehr vielversprechende Weg hier nicht weiter verfolgt.

6.4 Versuche mit Blähglas

Die im Folgenden beschriebenen Versuche mit der mineralischen Gesteinskörnung Blähglas stellen eine Strategie dar, sich der Entwicklung eines extrusionsfähigen Holzleichtbetons auf einem Umweg zu nähern. In orientierenden Vorversuchen hatte sich gezeigt, dass ein rein mineralisches System aus Blähglas und Zement wesentlich unkomplizierter ist als ein Komposit aus Holz und Zement; mit einem Portlandkompositzement und Blähglasgranulat mit einer Körnung von 1 - 2 mm konnten auf Anhieb mehrschichtige Objekte, wie das auf Abbildung 18 gezeigte Hohlkastenprofil hergestellt werden. Die Versuchsstrategie sah nun vor, einen optimal extrudierbaren Leichtbeton auf Blähglasbasis zu entwickeln, dessen Konsistenz zu bestimmen, um dann Schritt für Schritt eine Rezeptur für einen Holzleichtbeton mit ähnlichen Konsistenzwerten zusammenzustellen.

In einer Bachelorarbeit (Martius 2015) wurden Versuchsreihen mit unterschiedlichen Gesteinskörnungsanteilen sowie verschiedenen Zusatzmitteln und -stoffen durchgeführt. Sämtliche beschrieben Rezepturen wurden mit dem Holcim Weißzement und Poraver Blähglasgranulat angemischt und unter Einsatz des Extruders II auf ihre Eignung zur Extrusion untersucht.

Begonnen wurde mit Mischungen ohne Zusatzmittel und -stoffe, um geeignete Blähglasanteile in Bezug auf den Zementgehalt zu ermitteln. Mit ausgewogenen Sieblinien (vorwiegend Bereich 3, grob- bis mittelkörnig nach DIN 1045-2:2008-08) konnten Betone mit einem maximalen Blähglasanteil von 75 Vol.-% extrudiert werden. Es konnten jedoch nicht immer gleichmäßige Spuren erzeugt werden und es kam zu Blutungserscheinungen.

Im nächsten Schritt wurde versucht, eine möglichst gleichmäßige Spur zu erzeugen. Um dies zu erreichen, wurde schrittweise der Blähglasanteil reduziert. Mit einer Mischung aus Poraver 0,5 - 1 mm (140 g) und 2 - 4 mm (120g) auf 550 g Holcim Weißzement bei einem w/z-Wert von > 0.6

konnten nahezu gleichmäßige Spuren generiert werden. Dies entspricht einem volumenmäßigen Anteil des Blähglasgranulats von ca. 66% bezogen auf den Zement. Der Leichtbeton neigte jedoch weiterhin zum Bluten.

Um dem Bluten entgegenzuwirken und um eine weitere Verbesserung der Verarbeitbarkeit zu erreichen, wurden nun die Zusatzmittel Fließmittel, Stabilisier und Luftporenbildner in die Versuche mit einbezogen. Als Ausgangspunkt wurden Richtrezepturen von Poraver herangezogen und auf dieser Basis, ergänzt durch Manjura (2015), Verbesserungen erarbeitet. Daraus entstanden die folgenden beiden Mischungen:

Mischung 1: 550 g Holcim Weißzement; 140 g Poraver 0,5 - 1 mm, 120 g Poraver 2 - 4 mm; 100 g Calcit; 8 g PCE Fließmittel MasterGlenium ACE 430; 5 g Luftporenbildner MasterAir 77; 276 g Wasser

Mischung 2: 550 g Holcim Weißzement; 176 g Poraver 0,25 - 0,5 mm, 145 g Poraver 1 - 2 mm; 1,4 g PCE Fließmittel MasterGlenium ACE 430; 2,8 Luftporenbildner MasterAir 77; 2,2 g Stabilisierer Centrament Stabi M 508; 300 g Wasser

Abbildung 30: Entmischung im Extruder (Martius 2015)

Mischung 1 ließ sich gut extrudieren, neigte aber nach wie vor zu leichtem Bluten (Abbildung 31). Bei Mischung 2 war kein Bluten zu beobachten, die Mischung war aber zähflüssig und nicht voll zufriedenstellend in Bezug auf die Verarbeitbarkeit (Abbildung 32). Bei beiden Mischungen war

auch eine Entmischung im Extruder (Abbildung 30) zu beobachten, die aber das Ergebnis nicht weiter beeinträchtigte.

Abbildung 31: Extrusion von Mischung 1 (Martius 2015)

Abbildung 32: Extrusion von Mischung 2 (Martius 2015)

Um das Entmischen gänzlich zu unterbinden und die Verarbeitbarkeit weiterhin zu verbessern wurden weitere Variationen in Bezug auf die eingesetzten Zusatzmittel vorgenommen. Es zeigte sich, dass bei Rezepturen ohne Fließmittel die Entmischungserscheinungen stark reduziert waren, sodass Fließmittel in den weiterentwickelten Rezepturen weggelassen wurde. Mit den Zusatzmitteln Luftporenbildner und Stabilisiere lässt sich eine gut zusammenhaltende Frischbetonmasse, mit guten Verarbeitungseigenschaften herstellen. Auf Basis dieser beiden Zusatzmittel ließen sich zwei Mischungen entwickeln die gute Verarbeitbarkeit und zufriedenstellende Spurfahrten gewährleisten (Abbildung 33 und Abbildung 34):

Mischung 3: 550 g Holcim Weißzement; 140 g Poraver 0,5 - 1 mm, 120 g Poraver 2 - 4 mm; 3 g Luftporenbildner MasterAir 77; 5 g Stabilisierer Centrament Stabi M 508; 330 g Wasser

Mischung 4: 550 g Holcim Weißzement; 140 g Poraver 0,5 - 1 mm, 120 g Poraver 2 - 4 mm; 1,8 g Luftporenbildner MasterAir 77; 4 g Stabilisierer Centrament Stabi M 508; 300 g Wasser

Abbildung 33: Extrusion von Mischung 3 (Martius 2015)

Abbildung 34: Extrusion von Mischung 4 (Martius 2015)

Da die Konsistenz als ein guter Indikator für die Extrudierbarkeit und Baubarkeit der Mischung angesehen werden kann, wurde von den verschiedenen Mischungen mittels Hägermann-Tisch (Abbildung 35) gemäß DIN EN 1015-3:2007-05 ‚Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil 3: Bestimmung der Konsistenz von Frischmörtel (mit Ausbreittisch)' das Ausbreitmaß in Abhängigkeit von der Zeit nach dem Mischen bestimmt. Des Weiteren wurde die Dichte bestimmt.

Abbildung 35: Hägermann-Ausbreittisch für Handbetrieb, mit Zählwerk, Glasplatte und Setztrichter mit Aufsatz

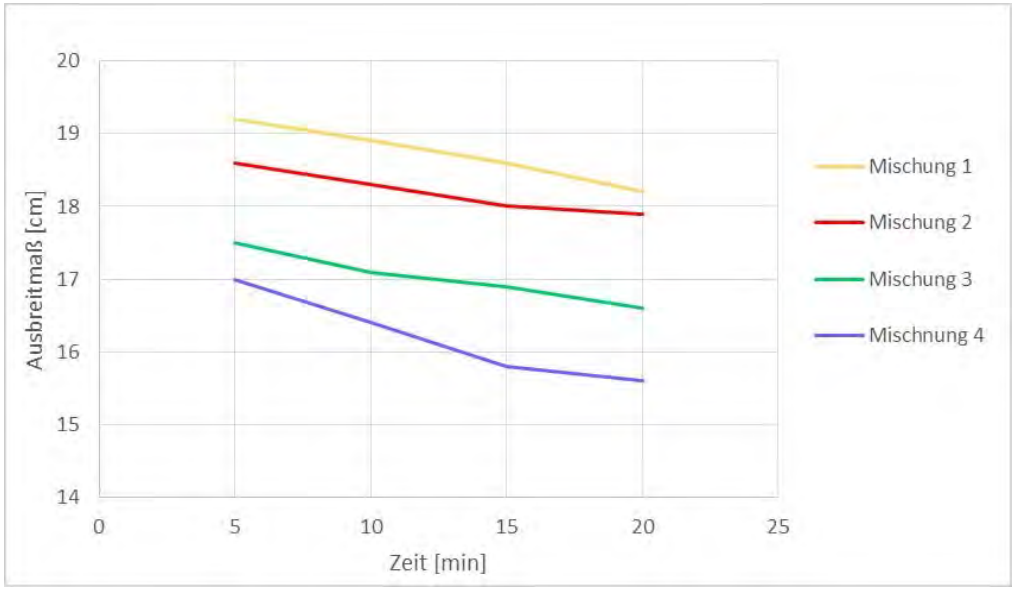

Abbildung 36: Ausbreitmaße der Mischungen 1 - 4 (nach Martius 2015)

Das Ergebnis der Versuche lässt den Schluss zu, dass sich Leichtbetone der Dichteklasse 1,0 und mit einem mittleren Ausbreitmaß von ca. 160 - 170 mm (Abbildung 36) zur Extrusion eignen. Zudem bietet ein w/z-Wert von 0,5, bei Einsatz von Luftporenbildner und Stabilisierer, eine gute Grundlage für die Entwicklung weiterer Extrusionsbetone.

6.5 Versuche mit unbehandelten Fichtenspänen und Portlandkalksteinzement

Aufbauend auf den Erkenntnissen aus den Versuchen mit Blähglas (Punkt 6.4), wurden Rezepturen mit Holzleichtbeton entwickelt, die den dort ermittelten Werten bezüglich Ausbreitmaß (ca. 160 - 170 mm) und Dichte (Dichteklasse 1,0) entsprechen. Als Zuschlag kamen die unbehandelten Nadelholzspäne Lignocel 9 zum Einsatz, welche im Vergleich bezüglich der Partikelgrößen (s. Abbildung 3) im mittleren bis oberen Bereich liegen. Als Bindemittel wurde ein Portlandkalksteinzement (CEM II) verwendet, da dieser Aufgrund des Füllstoffes Kalksteinmehl im Vergleich zum Portlandzement (CEM I) eine bessere Verarbeitbarkeit aufweist und eine längere Verarbeitungszeit hat.

Begonnen wurde mit einem Holzspäne-Anteil von 9 Masse-% bezogen auf den Zement (s/z-Wert von 0,09). Es kamen die Zusatzmittel Luftporenbildner und Stabilisierer in verschiedenen Mengenverhältnissen zum Einsatz.

Bei ersten Versuchen mit jeweils einem der Zusatzmittel stellte sich heraus, dass ein geringer Anteil (unterster Wert des empfohlenen Dosierbereichs) an Stabilisierer ausreichend ist um einen guten Zusammenhalt zu gewährleisten ohne dabei die Verarbeitbarkeit negativ zu beeinflussen. 1 g Stabilisierer (Centrament Stabi M 15) auf 500 g Zement erwies sich als ausreichend. Luftporenbildner hingegen musste, um eine gute Verarbeitbarkeit zu erhalten und dem Entmischen entgegenzuwirken, in vergleichsweise größeren Dosen beigemischt werden. Der Luftporenbildner stabilisiert die durch chemische Reaktionen von Holz, Wasser und Zement entstehenden Luftporen, wodurch ein gleichmäßiges, stabiles Gefüge entsteht; dies wirkt sich positiv auf die Verarbeitbarkeit aus. 10 g Luftporenbildner (MasterAir 77) ist bei 500 g Zement ein als Ausgangspunkt geeigneter Wert.

In weiteren Versuchen wurde der Holzanteil auf bis zu 16 Masse-% bezogen auf den Zement (s/z-Wert 0,16) gesteigert. Das entspricht bei den eingesetzten Materialien SCHWENK Portlandkalksteinzement und Lignocel 9 einem Volumenverhältnis Späne zu Zement von 1:1. Die Zusatzmittel wurden jeweils so dosiert, dass sich eine Mischung entsprechend dem Konsistenzbereich F3 ergab. Eine gut förderbare Holzbetonrezeptur ist:

Mischung A: 500 g SCHWENK Portlandkalksteinzement; 80 g Lignocel 9; 13 g Luftporenbildner MasterAir 77; 1 g Stabilisierer Centrament Stabi M 15; 305 g Wasser

Diese Rezeptur benötigt allerdings über 3 Stunden um eine erste geringe Oberflächenfestigkeit zu entwickeln und mehrere Tage, um ausreichend abzubinden, dass das Werkstück zerstörungsfrei von der Druckfläche entfernt werden kann. Deshalb wurde in einem weiteren Schritt zusätzlich ein Beschleuniger eingesetzt. Nach Zugabe von 8 g Beschleuniger (SikaRapid C-100) auf 500 g Zement (liegt im unteren Bereich der empfohlenen Dosierung von 1 - 4 % des Zementgehaltes) konnte bereits ab 20 - 30 Minuten nach der Extrusion eine leichte Oberflächenverfestigung der Raupen beobachtet werden. Solange der Frischbeton im Mischer oder Extruder in Bewegung gehalten wird, ist eine Verarbeitung auch über eine darüber hinausgehende Zeitspanne möglich.

Eine höhere Dosierung des Beschleunigers, auch die Maximaldosierung, führte zu keiner erkennbar schnelleren Entwicklung der Oberflächenfestigkeit der extrudierten Raupen. Die Rezeptur für die Mischung, welche allen Versuchsanforderungen genügt, lautet:

Mischung B: 500 g SCHWENK Portlandkalksteinzement; 80 g Lignocel 9; 11 g Luftporenbildner MasterAir 77; 1 g Stabilisierer Centrament Stabi M 15; 8 g Beschleuniger SikaRapid C-100; 305 g Wasser

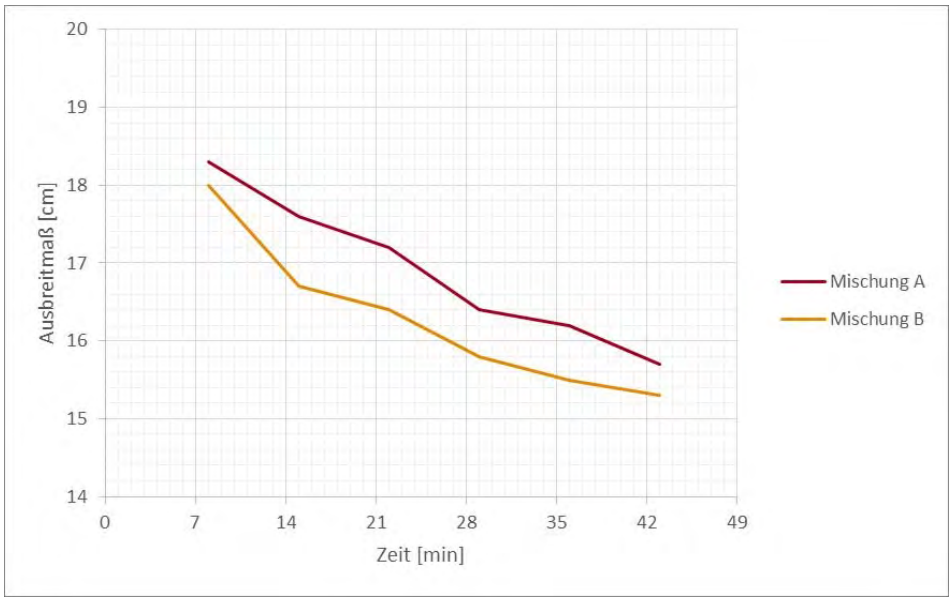

Abbildung 37: Ausbreitmaß der Mischungen A und B

Diese Rezeptur hat ein mittleres Ausbreitmaß von ca. 160 mm (Abbildung 37) bei einer Frischbetonrohdichte von ca. 1.000 kg/m³ und befindet sich somit diesbezüglich in dem angestrebten Bereich der Mischungen 3 und 4. Sie weist gute Eigenschaften in Bezug auf die Verarbeitbarkeit auf. Gleichmäßige Spurfahrten sind möglich und beim Drucken von mehreren Raupen übereinander entstehen nur geringe Deformationen. Mischung B wurde bei allen in den Punkten 6.6, 6.6.3, 6.7, 6.8 und 7 beschriebenen Prüfungen und Versuchen eingesetzt. Bei einer weiterführenden Material- und Verfahrensentwicklung wären insbesondere Wege zu finden, die ein noch schnelleres Ansteifen des Betons nach dem Verlassen des Extruders ermöglichen.

6.6 Festigkeitsprüfungen

6.6.1 Allgemeines

Um die Festigkeitswerte des Werkstoffs zu ermitteln, der aus der hier entwickelten Material-Verfahrens-Kombination hervorgeht, wurden Prüfungen an Würfeln und Prismen durchgeführt, die durch Extrusion des speziell entwickelten Holzleichtbetons gefertigt worden waren. Um feststellen zu können, inwiefern der Druckvorgang einen Einfluss auf die Festigkeit besitzt, wurden mit der gleichen Rezeptur sowohl gedruckte und anschließend in Form geschnittene, als auch durch

Gießen in Schalung gefertigte Probekörper geprüft. Die Probekörper wurden in Wasser gelagert und die Festigkeiten nach 7 bzw. 28 Tagen ermittelt. Die Trockenrohdichte des gedruckten Werkstoffs wurde anhand der in Punkt 6.7 verwendeten Platte ermittelt und liegt bei 995 kg/m³.

6.6.2 Prüfung der Druckfestigkeit von Würfeln nach DIN EN 12390-1:2012-12, DIN EN 12390-2:2009-08 und DIN EN 12390-3:2009-07

Die Herstellung der gedruckten Probekörper erfolgte durch Drucken von Platten mit den Abmessungen (L x B x H) 350 mm x 125 mm x 110 mm. Nach 24 Stunden Luftlagerung (20°C und 65% Luftfeuchte) wurden die Würfel auf die Abmessungen 100 mm x 100 mm x 100 mm zugesägt (Abbildung 38) und anschließend bis zur Prüfung in einem Wasserbad bei 20°C gelagert.

Abbildung 38: Gedruckte und auf Maß geschnittene Probekörper für die Prüfung der Druckfestigkeit

Nach 7 Tagen wurde die erste Druckfestigkeitsprüfung an 3 geschalten und 3 gedruckten Prüfkörpern vorgenommen. Die gedruckten Würfel wurden mit stehenden Raupen, also in Raupenrichtung, geprüft. Die Würfel wurden kurz vor der Prüfung der Wasserlagerung entnommen, abgeschliffen, vermessen und gewogen. Nach Einlegen in die Prüfvorrichtung wurden die Würfel mit 0,5 kN/s Belastungsgeschwindigkeit bis zum Versagen belastet. Es waren charakteristische Versagensformen zu erkennen. Die geschalten Würfel erreichten eine Druckfestigkeit von 10,04 N/mm², während die in Raupenrichtung geprüften gedruckten Würfel einen Wert von 8,87 N/mm² erreichten.

Eine weitere Druckfestigkeitsprüfung erfolgte nach 28 Tagen. Die Prüfkörper, wiederum 3 geschalte und 3 gedruckte, wurden kurz vor der Prüfung der Wasserlagerung entnommen, abgeschliffen, vermessen und gewogen. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug ebenfalls 0,5 kN/s. Es waren wieder charakteristische Versagensformen zu erkennen. Die geschalten

Probekörper erreichten eine Druckfestigkeit von 12,12 N/mm², während die in Raupenrichtung geprüften gedruckten Würfel einen Wert von 10,30 N/mm² erreichten.

Aus den Druckfestigkeitsprüfungen ist erkennbar, dass bei der Herstellung mittels Extrusion geringfügig verminderte Druckfestigkeitswerte erzielt werden als bei der herkömmlichen Herstellung mittels Schalung.

Die einzelnen Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen nach DIN EN 12390-3:2009-07 sind in Anhang 1 zusammengestellt.

6.6.3 Prüfung der Biegezugfestigkeit von Prismen nach DIN EN 196-1:2005-05

Die Biegezugfestigkeit des entwickelten Holzleichtbetons wurde an Prismen mit den Abmessungen (L x B x H) 160 mm x 40 mm x 40 mm durchgeführt. Es wurden drei Arten von unterschiedlichen Prismen hergestellt. Zusätzlich zu durch Gießen in Schalung hergestellten Prismen wurden, um eine vermutete Richtungsabhängigkeit der Festigkeitswerte zu berücksichtigen, zwei unterschiedlich ausgerichtete Arten von gedruckten Prismen hergestellt: rechtwinklig zu den Raupenspuren ausgerichtete Prismen und parallel zu den Raupenspuren ausgerichtete Prismen (Abbildung 39).

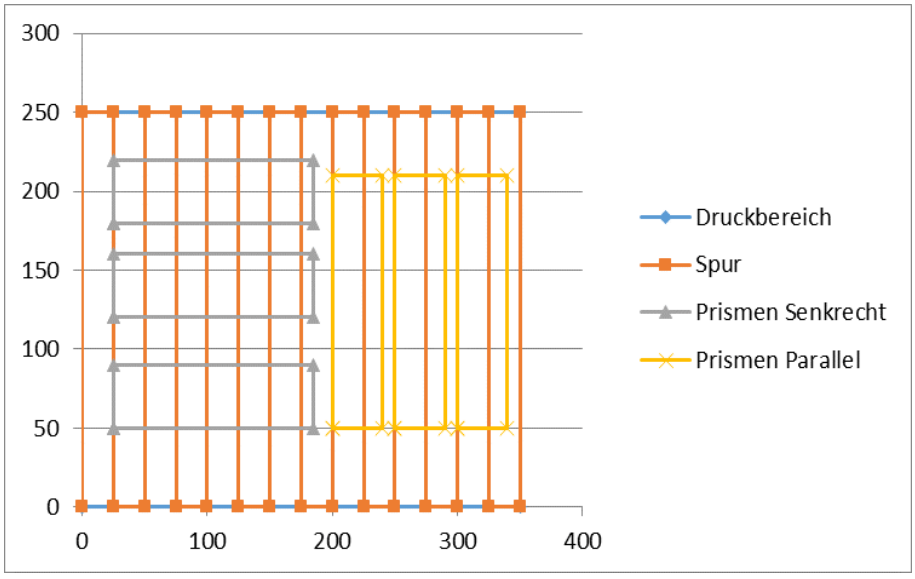

Abbildung 39: Durch Drucken und auf Maß schneiden hergestellte Probekörper für Biegezugprüfungen, rechtwinklig zu den Raupenspuren ausgerichtete Prismen (grau) und parallel zu den Raupenspuren ausgerichtete Prismen (gelb)

Analog zu den Würfeln wurden die gedruckten Prismen aus Platten zugeschnitten. Dazu wurde Platten mit den Abmessungen (L x B x H) 350 mm x 250 mm x 50 mm hergestellt (Abbildung 40 links). Nach 24 Stunden Luftlagerung (20°C, 65% relative Luftfeuchte) wurden die Prismen ausgeschalt bzw. zugesägt und anschließend bis zur Prüfung bei 20°C im Wasserbad gelagert.

Abbildung 40: Drucken der Platten für die Herstellung von Prüfprismen (links) und Biegezugprüfung (rechts)

Es erfolgte ein Biegezugbestimmung nach 7 und eine nach 28 Tagen. Dabei wurden die Prüfkörper kurz vor der Prüfung der Wasserlagerung entnommen, abgeschliffen, vermessen und gewogen. Anschließen wurden die Prismen in die Prüfeinrichtung (Abbildung 40 rechts) eingelegt und mit 0,05 kN/s Belastungsgeschwindigkeit bis zum Bruch belastet.

Nach 7 Tagen besaßen die geschalten Prismen eine Biegezugfestigkeit von 3,35 N/mm^2, die rechtwinklig zu den Raupenspuren ausgerichteten eine Biegezugfestigkeit von 2,55 N/mm^2, und die parallel zu den Raupenspuren ausgerichteten eine Biegezugfestigkeit von 3,57 N/mm^2. In einem Alter von 28 Tagen wurden Festigkeiten von 3,87 N/mm^2 bei den geschalten, 3,05 N/mm^2 bei den rechtwinklig zu den Raupenspuren ausgerichteten und 4,08 N/mm^2 bei den parallel zu den Raupenspuren ausgerichteten Prismen erreicht.

Aus den Biegezugversuchen wird ersichtlich, dass der Herstellungsprozess einen richtungsabhängigen Einfluss auf die Festigkeit besitzt. Die Festigkeit quer zu den Raupenspuren ist erwartungsgemäß geringer als die von durch Gießen in Schalung gefertigten Probekörpern. In Richtung der Raupenspuren jedoch ist die Festigkeit der gedruckten Prüfkörper höher als die der gegossenen.

Die einzelnen Ergebnisse der Biegezugfestigkeitsprüfungen nach DIN EN 196-1:2005-05 sind in Anhang 2 zusammengestellt.

6.6.4 Prüfung der Druckfestigkeit von Prismen nach DIN EN 196-1:2005-05

Die Hälften der auf Biegezugfestigkeit geprüften Prismen wurden anschließend auf ihre Druckfestigkeit geprüft. Die gedruckten Prismen wurden rechtwinklig zu den Raupenspuren mit 0,5 kN/s Belastungsgeschwindigkeit bis zum Versagen belastet.

Nach 7 Tagen besaßen die geschalten Prismen eine Druckfestigkeit von 9,47 N/mm^2, die rechtwinklig zu den Raupenspuren ausgerichteten eine Druckfestigkeit von 8,69 N/mm^2, und die parallel zu den Raupenspuren ausgerichteten eine Druckfestigkeit von 9,29 N/mm^2. In einem Alter von 28 Tagen wurden bei den geschalten 11,77 N/mm^2, den rechtwinklig ausgerichteten 10,95 N/mm^2 und bei den parallel ausgerichteten Prismen 10,71 N/mm^2 gemessen.

Da mehrere Einzelwerte der an den Prismen durchgeführten Druckfestigkeitsprüfungen nach DIN EN 196-1:2005-05 um mehr als ± 10 % vom Mittelwert abweichen und deshalb nach Norm zu verwerfen wären, sollte zur Beurteilung der Druckfestigkeit die Ergebnisse der Prüfung nach DIN EN 12390-3:2009-07 herangezogen werden. Die einzelnen Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen nach DIN EN 196-1:2005-05 sind in Anhang 2 zusammengestellt.

6.7 Prüfung der Wärmeleitfähigkeit

Für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit des Holzleichtbetons wurde ein Prüfkörper gedruckt und anschließend durch Sägen und Fräsen auf das Maß (L x B x H) 450 mm x 450 mm x 50 mm geschnitten (Abbildung 41). Die Rezeptur des Holzleichtbetons und das 3D-Druckverfahren sind identisch mit denen, die bei den Festigkeitsprüfungen eingesetzt wurden.

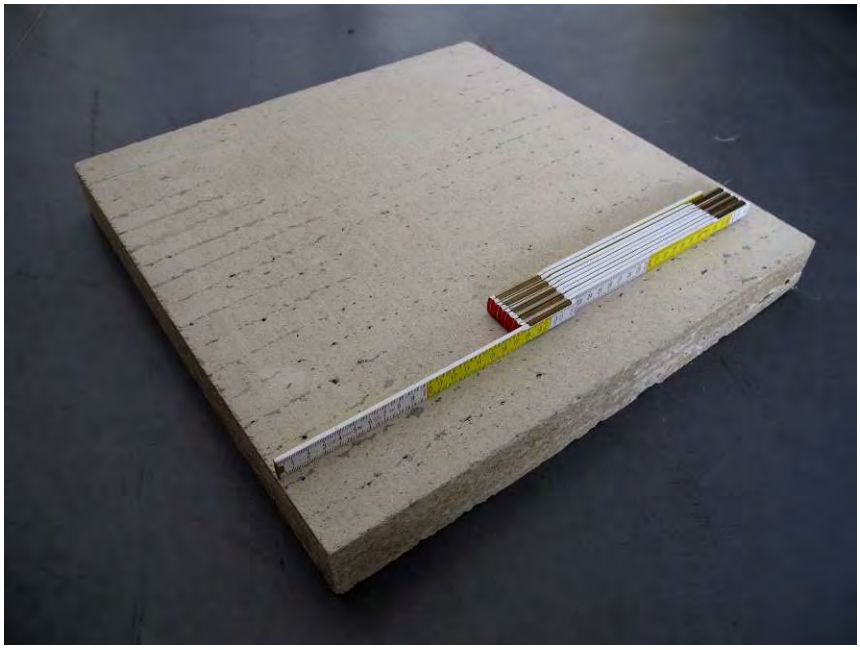

Abbildung 41: Prüfkörper aus Leichtbeton für die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit

Die Prüfung der Wärmeleitfähigkeit wurde mit einem Wärmestrommessplatten-Gerät in Anlehnung an DIN EN 12667:2001-05 durchgeführt. Das verwendete Wärmestrommessplatten-Gerät besitzt den Aufbau „Symmetrische Anordnung mit einem Prüfkörper“ (Anordnung b) nach Abschnitt 5.3.1 DIN EN 12667:2001-05. Die Prüfanordnung ist in Abbildung 42 dargestellt.

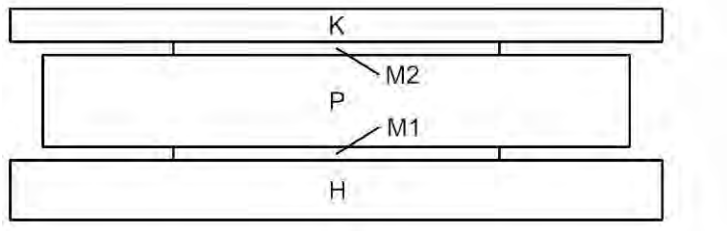

Abbildung 42: Prüfung der Wärmeleitfähigkeit, schematische Darstellung der Messanordnung: Prüfkörper (P), Heizplatte (H), Kühlplatte (K) und Wärmestrommessplatten (M1 undM2)

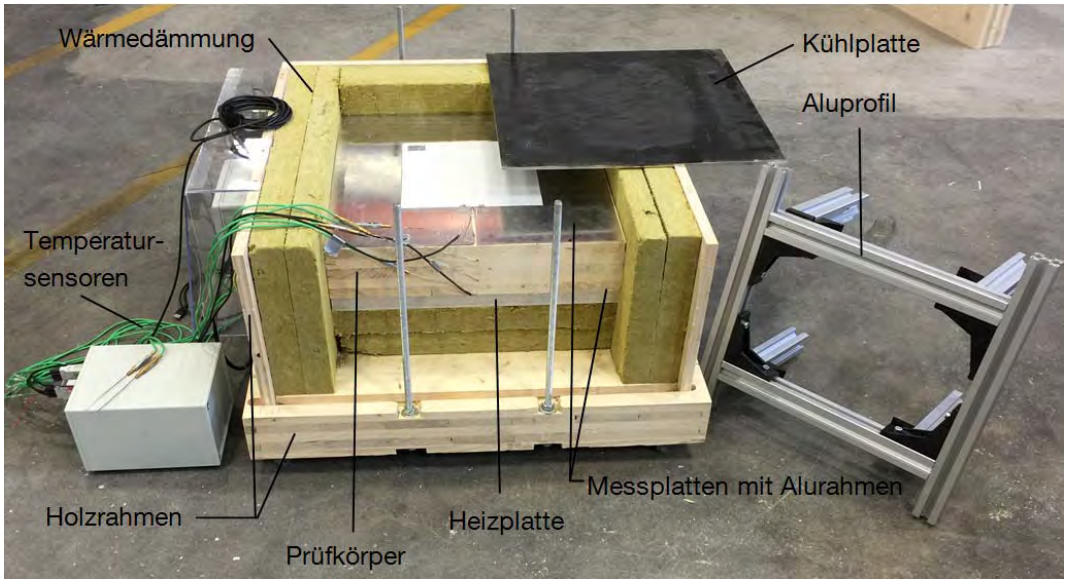

Abbildung 43: Prüfgerät für die Wärmeleitfähigkeit in geöffnetem Zustand

Das Gerät (Abbildung 43) ist ausgelegt für Probekörper mit den Maßen (L x B) 500 x 500 mm mit Stärken bis zu 100 mm. Geprüft wird mit dem Probekörper in liegender Position.

Die Hauptbestandteile des Gerätes sind eine Heizplatte, eine Kühlplatte und zwei Wärmestrommessplatten. Der plattenförmige Probekörper wird zwischen Heizplatte und Kühlplatte platziert und der von der Heizplatte zur Kühlplatte fließende Wärmestrom mithilfe der Wärmestrommessplatten gemessen. Diese befinden sich in der Versuchsanordnung zwischen Heizplatte und Probekörper bzw. Kühlplatte und Probekörper (Abbildung 42).

Die Heizplatte besteht aus einer Aluminiumplatte mit den Abmessungen (L x B x H) 500 x 500 x 20 mm. In die Heizplatte sind auf der dem Probekörper abgewandten Seite im Abstand von 31,25 mm Nuten eingefräst, in denen sich ein Heizdraht befindet.

Die Kühlplatte besteht aus einer Aluminiumplatte mit den Abmessungen (L x B x H) 500 x 500 x 6 mm. Die Kühlung erfolgt über die Umgebungstemperatur. Die Kühlplatte ist auf der dem Probekörper abgewandten Seite geschwärzt. Die dunkle Seite befindet sich ganz oben, exponiert zur Umgebung und stellt den „kalten“ Abschluss des Messaufbaus dar.

Bei den Wärmestrommessplatten handelt es sich um das Modell FQA019C (Wärmeflussplatte Typ 119) des Herstellers Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH aus D-83607 Holzkirchen. Sie haben die Abmessungen (L x B x H) 250 x 250 x 1,5 mm. Die Messunsicherheit wird vom Hersteller mit 5% angegeben. Bei den Berechnungen wurde jeweils ein Mittelwert der beiden Messwerte der Messplatten genommen. Eine Kalibrierung mit einem Referenzprüfkörper erfolgte bisher noch nicht. Die Wärmestrommessplatten sind umgeben von einer Ausgleichsplatte aus Aluminium mit den Abmessungen (L x B x H) 500 x 500 x 1,5 mm mit einer zentrischen, der Messplatte entsprechenden Aussparung von 250 x 250 x 1,5 mm. Unmittelbar neben den Wärmestrommessplatten ist zusätzlich jeweils ein Temperaturmessfühler angeordnet.

Auf fünf Seiten ist das Paket aus Heiz-, Kühl-, Messplatten und Probekörper umgeben von einer 100 mm starken Wärmedämmschicht aus Mineralwolle mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,04 W/(m*K). Die dunkle Seite der Kühlplatte bleibt ungedämmt. Umgeben ist der gesamte Versuchsaufbau von einem Holzrahmen, der diesen auf den gedämmten Seiten kastenförmig einfasst. Mithilfe von am Holzrahmen befestigten Gewindestangen und eines Gestänges aus Aluminiumsystemprofilen kann der Versuchsaufbau zusammengespannt werden. Der Aufbau wurde mithilfe von Thermographie-Aufnahmen geprüft. Die Temperatur auf der Oberfläche des Prüfkörpers erwies sich dabei als gleichmäßig und die Dämmschicht als frei von Leckagen.

Während des Versuchs wird die Oberflächentemperatur des Prüfkörpers auf der warmen Seite mithilfe der Heizplatte konstant auf einem Niveau von ca. 40 °C gehalten. Nach Erreichen des stationären Zustandes wird die Prüfung 24 Stunden lang durchgeführt. Die Messdaten der Temperatur und der Wärmestromdichte werden alle 10 Sekunden aufgezeichnet. Anhand der gemessenen Werte für die Wärmestromdichte auf der Ober- und Unterseite des Prüfkörpers und der Differenz der von den beiden Temperatursensoren gemessenen Werte kann die Wärmeleitfähigkeit λ mit der folgenden Formel berechnet werden:

$$\lambda = q*s / (T1 - T2) = q*s / \Delta T$$

λ: Wärmeleitfähigkeit [W/(m*K)]
q: Wärmestromdichte [W/m²]
T1: Temperatur warme Prüfkörperseite [°C]
T2: Temperatur kalte Prüfkörperseite [°C]
ΔT: Temperaturdifferenz warme und kalte Seite [K]
s: Prüfkörperdicke [m]

Es wurden 5 Messungen im stationären Zustand durchgeführt. Messung 1 Auswertung über eine Zeitspanne von ca. 30 Minuten, Messung 2 von ca. 40 Minuten und Messung 3 von ca. 10

Minuten, Messung 4 von ca. 50 Minuten, Messung 5 von 3,5 Stunden, wobei alle 10 Sekunden sämtliche Daten aufgezeichnet wurden.

Die Messungen lieferten die in Tabelle 4 aufgeführten Daten, aus denen der λ-Wert zu ca. 0,25 W/(m*K) errechnet werden kann.

Tabelle 4: Prüfung der Wärmeleitfähigkeit, gemessene Werte und berechneter Wert der Wärmeleitfähigkeit

	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Messung 4	Messung 5
T1 [°C]	38,802	38,657	38,8	39,02	39,0
T2 [°C]	27,447	25,100	27,4	28,2	27,9
ΔT [K]	11,356	13,557	11,4	10,82	11,1
q [W/m²]	55,458	66,900	55,508	57,21	58,52
λ [W/(m*K)]	0,24	0,25	0,24	0,26	0,26

6.8 Überhangversuche

6.8.1 Allgemeines

Als Überhang bezeichnet man eine Auskragung von Bereichen eines Bauteils über weiter unten liegende Bereiche. Die geometrische Freiheit additiver Fertigungsverfahren hängt ganz entscheidend davon ab, inwiefern es möglich ist, Überhänge zu drucken. Hier ist die Performance des Partikelschichtdruckens grundsätzlich besser als die des Extrusionsverfahrens, da bei letzterem kein stützendes Partikelbett vorhanden ist. Können gar keine Überhänge gebaut werden, so können nur Bauteile mit vertikalen oder nach innen geneigten Begrenzungsflächen gedruckt werden. Bereits die Machbarkeit von auch nur geringen Überhängen steigert die geometrische Freiheit signifikant, auch deshalb weil damit die Möglichkeit hinzukommt, materialsparende, provisorische Stützkonstruktionen für noch weiter überhängende oder Öffnungen überspannende Bereiche zu bauen.

Beobachtungen bei den vorangegangenen Versuchen gaben Anlass zu der Vermutung, dass Leichtbetone, und auch der hier eingesetzte Holzleichtbeton, in Hinblick auf die Machbarkeit von Überhängen besonders gut abschneiden. Dies sollte in einer kleinen Versuchsreihe verifiziert werden.

Beim Versagen von Bauteilen mit Überhängen konnten zwei Mechanismen beobachtet werden. Erstens ein nach unten Fließen des überhängenden Teils der obersten, frisch abgelegten Raupe. Und zweitens ein Quetschen weiter unten liegender Raupen durch die von oben einwirkende exzentrische Belastung. Um den ersten Versagensmechanismus isoliert beobachten zu können, wurden zunächst zwei Versuche (Überhangversuch I und II) durchgeführt, bei denen eine über eine definierte Kante überhängende Raupe gedruckt wurde. Mit dem in Überhangversuch I und II

ermittelten maximalen Maß für den Überhang sollte anschließend in einem weiteren Versuch (Überhangversuch III) ein Bauteil mit zehn horizontal gegeneinander um dieses Maß versetzten Schichten gedruckt werden.

Für die Überhangversuche wurde der Extruder III (‚Versuchsextruder') an der Werkzeugaufnahmeplatte des Portalsystems befestigt. Es kam die Förderschnecke b mit geringer Progression zum Einsatz, die so im Schneckenrohr platziert war, dass der Einfüllstutzen in einer Höhe von 50 - 120 mm oberhalb des unteren Endes der Förderschnecke positioniert war. Es wurde eine Düse mit einer Öffnungsweite von 20 mm und einem Innenwinkel von 20° verwendet. Die Extrudiergeschwindigkeit betrug 170 - 200 Schritte pro Sekunde, also 25,5 bis 30 Umdrehungen der Förderschnecke pro Minute. Die Fahrgeschwindigkeit war auf 50 mm pro Sekunde eingestellt.

Der Beton wurde in Chargen von 2,5 kg Zement mit dem Mischquirl Korb-Ø 65 mm an der Bohrmaschine gemischt. Es wurde folgende Rezeptur verwendet: 2.500 g Zement (SCHWENK Portlandkalksteinzement), 400 g Späne (Lignocel 9), 5 g Stabilisierer (Centrament Stabi M 15), 55 g Luftporenbildner (MasterAir 77), 40 g Beschleuniger (SikaRapid C-100), 1.525g Wasser.

6.8.2 Überhangversuch I: Maß des Überhangs über eine Kante

Ziel von Überhangversuch I war es, das maximal mögliche Maß des Überstandes der Raupen über eine definierte Kante zu ermitteln. Raupen in Form von Schlaufen wurden so auf eine Holzwerkstoffplatte gedruckt, dass das Ende der Schlaufen über die Kante der Platte übersteht (Abbildung 44). Der Pfad für die Extrusion war so modelliert, dass das Maß des Überstandes dabei von Schlaufe zu Schlaufe in Schritten von 1 mm von 0 auf 10 mm ansteigt.

Tabelle 5: Überhangtest I

Schlaufe Nr.	Überstand soll [mm]	Überstand gemessen [mm]	Unterkante Überstand unter Oberkante Platte [mm]
1	0	4	0
2	1	6	1
3	2	6	1
4	3	7	2
5	4	7	3
6	5	8	5
7	6	9	8
8	7	10	9
9	8	10	10
10	9	10	11
11	10	10	15

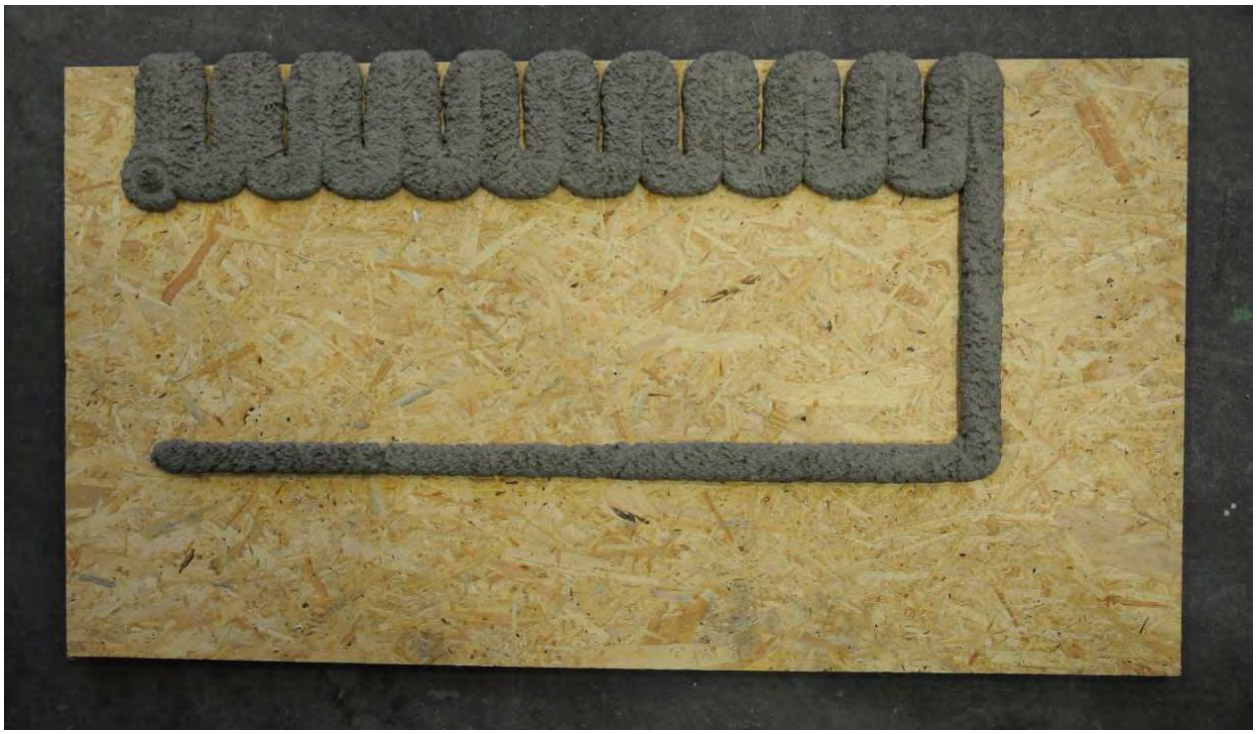

Abbildung 44: Überhangversuch I, Draufsicht, von rechts nach links zunehmender Überstand

Abbildung 45: Überhangversuch I, Vorderansicht, von links nach rechts zunehmender Überstand

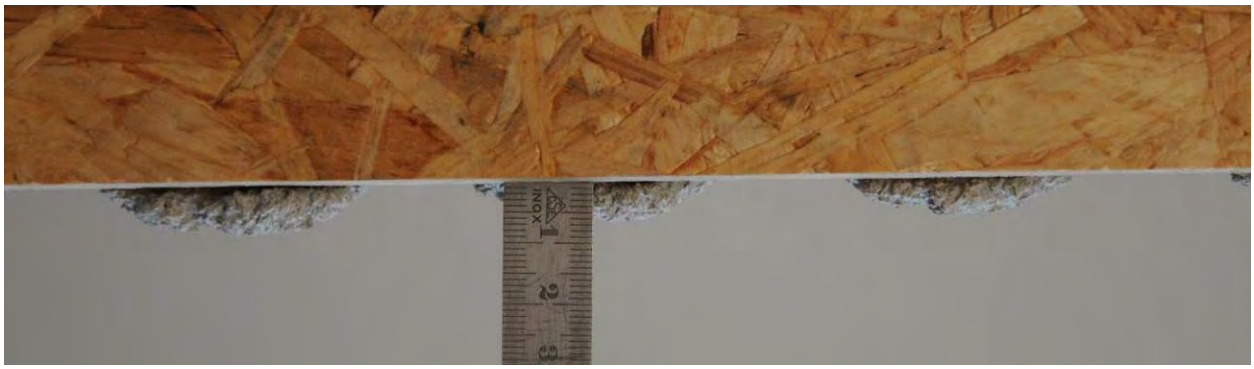

Abbildung 46: Überhangversuch I, Untersicht, Detail Schlaufe Nr. 5 mit einem Überstand von 7 mm

Das Fließen des Holzleichtbetons über die Kante nahm deutlich erkennbar proportional zum Maß des Überstands zu (Abbildung 45). Bis zur 5. Schlaufe mit einem modellierten Überstandsmaß von 4 mm und einem gemessenen Überstandsmaß von 7 mm (Abbildung 46) konnte der Überstand als stabil bewertet werden. Das maximale Maß, um das der Beton unter die Oberkante geflossen war betrug 3 mm. Ab der 6. Schlaufe mit einem modellierten Überstandsmaß von 5 mm und einem gemessenen Überstandsmaß von 8 mm wurde das Fließen des Betons als derartig ausgeprägt bewertet, dass ein solcher oder größere Überstände voraussichtlich nicht zum Bau von stabilen Überhängen mit dieser Mischung geeignet sind. Die Werte für die einzelnen Schlaufen sind in Tabelle 5 zusammengestellt.

6.8.3 Überhangversuch II: maximales Maß der Länge des maximalen Überhangs über eine Kante

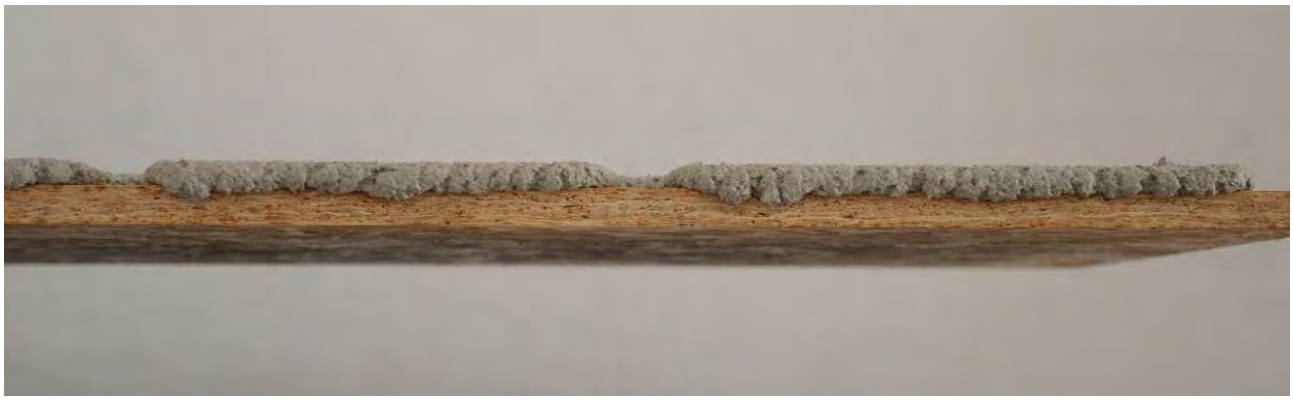

Abbildung 47: Überhangversuch II

Ziel dieses Versuches war es, zu prüfen, ob das in Überhangversuch I ermittelten Maß des maximalen Überstandes auch über längere Strecken stabil ist. Die Raupen wurden entlang der Kante der Holzwerkstoffplatte gedruckt. Sie wurden so platziert, dass sie mit einer Längsseite mit dem in Überhangversuch I ermittelten Maß des maximalen Überstandes von 4 mm (Maß im Modell) über die Kante überstehen. Es wurden 4 Abschnitte von 50 mm, 100 mm, 150 mm und 200 mm (Achsmaß im Modell) gedruckt.

Das gemessene Maß des Überstandes lag zwischen 6 und 8 mm. Der Überhang war über die ganze Länge stabil. Ein Einfluss der Länge des überstehenden Abschnittes auf die Qualität des Überhangs war nicht erkennbar (Abbildung 47).

6.8.4 Überhangversuch III: Bauteil mit zehn horizontal gegeneinander versetzten Schichten

Ziel dieses Versuches war es, ein Bauteil mit dem in Überhangversuch I und II ermittelten maximalen Maß für den Überhang über mehrere Schichten hinweg zu drucken. Es wurde eine Geometrie mit Wabenmuster gewählt, wie sie auch beim Bau der großformatigen Bauteile (Abbildung 50) zum Einsatz kommt. Die Waben haben ein Maß von 90 mm x 125 mm (Achsmaß im Modell), die Schichtgeometrie hat die Gesamtmaße 205 mm x 375 mm (Achsmaß im Modell).

Es wurden 10 Schichten gedruckt. Die jeweils gleiche Schichtgeometrie wurde bei jeder Schicht um 3 mm gegenüber der darunter liegenden Schicht entlang der Längsachse horizontal versetzt gedruckt. Das gegenüber dem ermittelten maximalen Maßes von 4 mm (Maß im Modell) um 1 mm reduzierte Maß von 3 mm wurde gewählt, da nun nicht mehr auf eine definierte Kante gedruckt wird, sondern auf die abgerundete Flanke einer Raupe.

Abbildung 48: Überhangversuch III

Das Ergebnis ist in Abbildung 48 zu sehen. Es konnte ein Überhang von 26 mm (gemessen) bei einer Bauteilhöhe von 100 mm (gemessen) erreicht werden. Der Überhang beträgt also 26 %.

Bei der untersten Raupe kann, wie erwartet, im Bereich der Überhänge, und zwar jeweils nur auf der Seite des Überhangs, eine leichte Quetschung beobachtet werden.

6.9 Versuche zur subtraktiven Nachbearbeitung

Während die additive Fertigung durch Extrusion in Bezug auf Materialqualität und Baugeschwindigkeit Vorteile gegenüber den Verfahren des selektiven Bindens zeigt, schneidet sie zunächst schlechter ab, wenn es um die geometrische Freiheit geht. Hier ergeben sich erhebliche Vorteile aus der guten Bearbeitbarkeit des Holz-Zement-Verbundwerkstoffs: In den Bereichen des Bauteils, wo eine gute Passform erforderlich ist (z.B. Bauteilanschlüsse) oder bestimmte Oberflächenqualitäten gewünscht werden, kann die zunächst additiv generierte Grobform durch subtraktive Nachbearbeitungsschritte auf Sollgeometrie gebracht werden. Auf diese Weise wird

Baugeschwindigkeit mit Präzision im Detail vereinbar und es steht eine große Bandbreite an Gestaltungsmöglichkeiten für die Bauteiloberflächen zur Verfügung.

Abbildung 49: Durch Extrusion additiv gefertigtes und mittels Fräsen partiell subtraktiv nachbearbeitetes Bauteil aus Holzleichtbeton (WUTZ Spezialzement für Holzbeton und Buchenspäne Lignocel HB 500-1000). Extrusion und Fräsen erfolgten beide auf dem BZT PF 1000-P Portalsystem. (Modell aus Stanglmayr 2015)

Um die Machbarkeit und die Potentiale einer subtraktiven Nachbearbeitung von additiv gefertigten Bauteilen aus Holzleichtbeton zu studieren, wurden im Rahmen einer Bachelorarbeit (Stanglmayr 2015) verschiedene Bearbeitungsverfahren experimentell untersucht.

Es zeigte sich, dass sich das Material gut mit handelsüblichen Werkzeugen sägen, fräsen, bohren und schleifen lässt. Insbesondere die Kombination von Fräsen und Schleifen mit der additiven Fertigung durch Extrusion ist vielversprechend, vor allem wenn hier zum Führen der Werkzeuge bei den additiven und subtraktiven Fertigungsschritten derselbe Manipulator eingesetzt wird (Abbildung 49).

7 Entwurf und Bau von großformatigen Testobjekten

7.1 Allgemeines

Den Abschluss des Projektes stellte der Bau von großformatigen Testobjekten dar (Abbildung 59). In diesen sollten erste Erfahrungen in der Anwendung der vorgeschlagenen Material-Verfahrens-Kombination im Bauwerksmaßstab gemacht werden und die in den kleinformatigen Einzelversuchen gewonnenen Erkenntnisse überprüft werden. Gleichzeitig sollten die Testobjekte zum Einsatz als Demonstrator geeignet sein.

Gelungene Demonstrationen von Verfahren der additiven Fertigung verbinden meist eine plakative Veranschaulichung der herstellungstechnischen Potentiale der vorgeschlagenen Lösung auf der einen mit Hinweisen auf mögliche attraktive Anwendungen auf der anderen Seite. Da die vielversprechendste Einsatzmöglichkeit der hier vorgeschlagenen Material-Verfahrens-Kombination in der Herstellung von wärmedämmenden und selbsttragenden, monolithischen Außenwänden gesehen wird, war es naheliegend, diese Anwendung für die geplanten großformatigen Testobjekte zu wählen. Die für diese Anwendung sinnvollen Hohlraumstrukturen im Inneren des Bauteils illustrieren auch die anwendungsneutralen, rein fertigungstechnischen Möglichkeiten (filigrane Strukturen, enge Radien etc.) des Verfahrens in hinreichendem Maße. Von der verbreiteten Gepflogenheit, für Demonstratoren der additiven Fertigung möglichst unregelmäßige Geometrien einzusetzen, wurde hier zunächst bewusst Abstand genommen. Stattdessen wurde mit Geraden, ebenen Flächen und rechten Winkeln modelliert, um evtl. auftretende Fehler im Ergebnis möglichst deutlich hervortreten zu lassen.

Mögliche Alternativen wurden zunächst in nicht maßstäblichen Handskizzen durchgespielt und eine Auswahl anschließend in CAD (Blender, MicroStation) räumlich modelliert. Die für den Bau ausgewählten Varianten wurden in bemaßten, maßstäblichen Zeichnungen (Handzeichnungen oder CAD) ausgearbeitet und daraus mithilfe von Tabellenkalkulation (Excel) die Punktkoordinaten berechnet. Diese Koordinaten konnten, wie in Punkt 4.3.2 dargestellt, in die Software für die Robotersteuerung importiert werden.

Beim Design der Testobjekte waren bestimmte, aus dem Prozess herrührende Randbedingungen zu berücksichtigen. Diese kommen zum Teil aus der Geometrie des Raupenquerschnitts, der eine Breite von 25 mm und einer Höhe von 10 mm aufweist und als liegendes Oval aus zwei, durch Geraden miteinander verbundenen Halbkreisen vereinfacht beschrieben werden kann. Hieraus ergibt sich z.B., dass vollkommen geschlossene, horizontale Flächen in Richtung quer zum Extrusionspfad als Maß immer ein Vielfaches von 25 mm aufweisen müssen. Die Bauteilhöhe folgt entsprechend einem Modul von 10 mm. Des Weiteren wurde bei der Auslegung der Schichtgeometrien darauf geachtet, dass Anfangs- und Endpunkt einer Schicht immer dieselben Koordinaten haben, um so eine kontinuierliche Fahrt, nicht nur innerhalb einer Schicht, sondern auch beim Übergang von einer Schicht zur nächsten realisieren zu können. Die Schichtgeometrien der im Rahmen des Projektes gefertigten Testobjekte sind in Abbildung 50 in der Übersicht dargestellt.

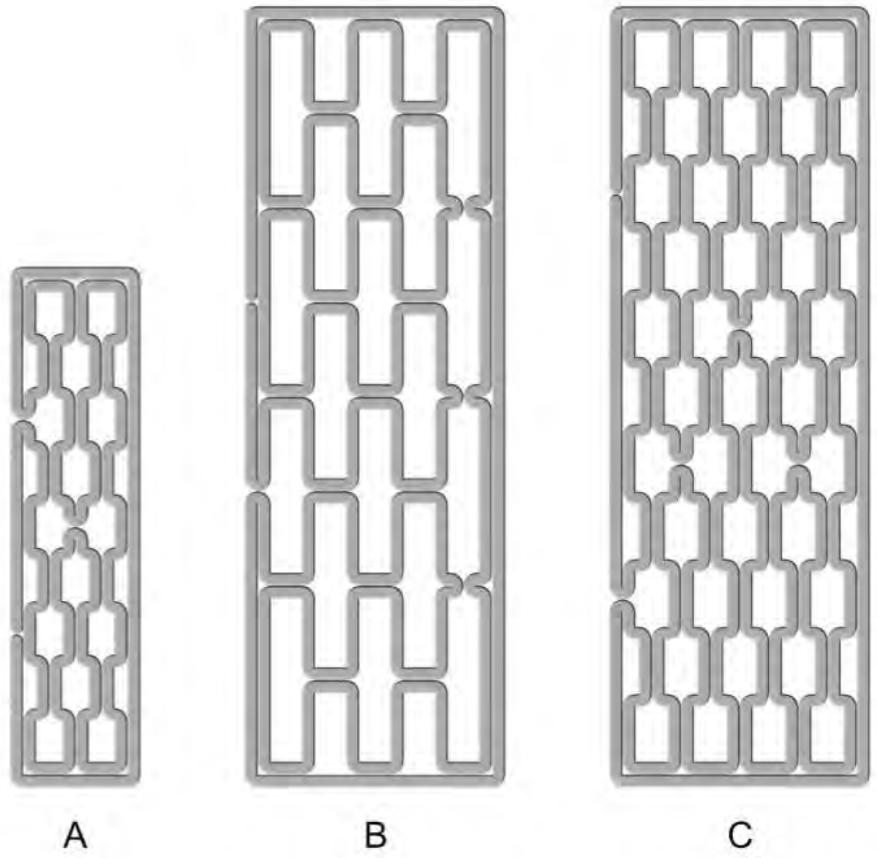

Abbildung 50: Schichtgeometrien der Wandelemente, Geometrie A mit den Außenmaßen 250 mm x 1.000 mm und Geometrie B und C mit den Außenmaßen 500 mm x 1.500 mm.

7.2 Vorversuche

Es wurden vier Vorversuche mit Schichtgeometrie A (Abbildung 51) mit bis zu 18 Schichten ausgeführt. Die Vorversuche dienten der Kontrolle der Punktberechnungen und des Maschinencodes, sowie der Abstimmung von Fahrgeschwindigkeit und Extrudiergeschwindigkeit aufeinander und auf den Frischbeton. Es zeigte sich, dass die Fahrwege tangential zur Hauptachse des Roboters (senkrecht durch die Mitte des Sockels) aufgrund eines Fehlers in der Steuerungssoftware des Roboters konvex in Richtung Hauptachse gekrümmt gefahren wurden. Außerdem wurden diese Fahrwege stark verkürzt ausgeführt. Die beiden letzten Versuche mit Geometrie A und alle nachfolgenden Versuche wurden deshalb so ausgeführt, dass Krümmung und Verzerrung auf die kurzen Seiten des jeweiligen Bauteils fallen, dieses also mit seiner Längsachse senkrecht zur Hauptachse des Roboters gefertigt wurde. Bei den so gedruckten Bauteilen wurde deren Länge und Höhe mit vertretbaren Abweichungen korrekt ausgeführt, während die Breite die beschriebenen Fehler aufwies. Beispielsweise hat das letzte mit Geometrie A gedruckte Bauteil mit 18 Schichten eine Länge von 990 mm und eine Höhe von 173 bis 180 mm, aber eine Breite von nur 200 bis 215 mm (gegenüber 250 mm soll).

Abbildung 51: Ergebnis eines Vorversuchs mit sechs Schichten der Schichtgeometrie A, Demonstration der Festigkeit durch Einsatz als Träger über eine Spannweite von 70 cm

Für die Versuche mit den größeren Bauteilen mit einer Grundfläche von 500 mm x 1.500 mm wurde zum Mischen des Betons ein Zwangsmischer eingesetzt. Beim ersten dieser Versuche (Geometrie C) zeigte sich, dass das Mischen im Zwangsmischer ein zu starkes Aufschäumen des Betons bewirkte. Es wurden deshalb, wie in Punkt 7.3 im Detail beschrieben, in den anschließenden Versuchen nur noch die Komponenten Zement, Späne, Wasser und Stabilisierer im Zwangsmischer gemischt und der restliche Mischvorgang (Zugabe von Luftporenbildner und Beschleuniger) anschließend mit dem Handmixer ausgeführt. Dieses Vorgehen führte zu einem Frischbeton mit den gewünschten Eigenschaften.

Auf der Grundlage dieser Erkenntnisse wurde als sechster und letzter Vorversuch ein Testobjekt mit der Geometrie B und 16 Schichten gedruckt. Das Ergebnis konnte, mit Ausnahme der beschriebenen Verzerrungen, als zufriedenstellend bewertet werden und die eingesetzten Prozesse, Einstellungen und Rezepturen als Ausgangspunkt für den in Punkt 7.3 genauer beschriebenen Versuch herangezogen werden. Aus den Ist-Maßen des Bauteils mit Geometrie B

von (L x B x H) 1.500 mm x 365 - 438 mm x 160 mm konnten für die folgenden Versuche Skalierungsfaktoren für die Breitenmaße in Abhängigkeit von ihrer Lage auf der Länge des Bauteils berechnet werden.

7.3 Bau einer Testwand mit Schichtgeometrie C

Die Geometrie des digitalen Modells wurde auf Grundlage des Ergebnisses des letzten Vorversuchs in Excel so skaliert, dass nach der Verzerrung durch die Robotersteuerung die Zielgeometrie erreicht wird. Die Skalierungsfaktoren in x-Richtung des Modells lagen zwischen 1,15 und 1,4 je nach Lage in z-Richtung. Die aus der Skalierung resultierenden Maße des Modells waren (L x B) 1.500 mm x 575 - 700 mm.

Für den Bau der Wand wurde folgende Rezeptur verwendet: 12,5 kg Zement (SCHWENK Portlandkalksteinzement), 2.000 g Späne (Lignocel 9), 25 g Stabilisierer (Centrament Stabi M 15), 200 g Beschleuniger (SikaRapid C-100), 275 g Luftporenbildner (MasterAir 77), 7.625 g Wasser. (Für die letzten 13 Schichten wurde der Beschleuniger Sika Spritzbetonbeschleuniger Signit L-5601 AF verwendet, davon jedoch nur 50 g da dieser eine stärkere Wirkung besitzt.)

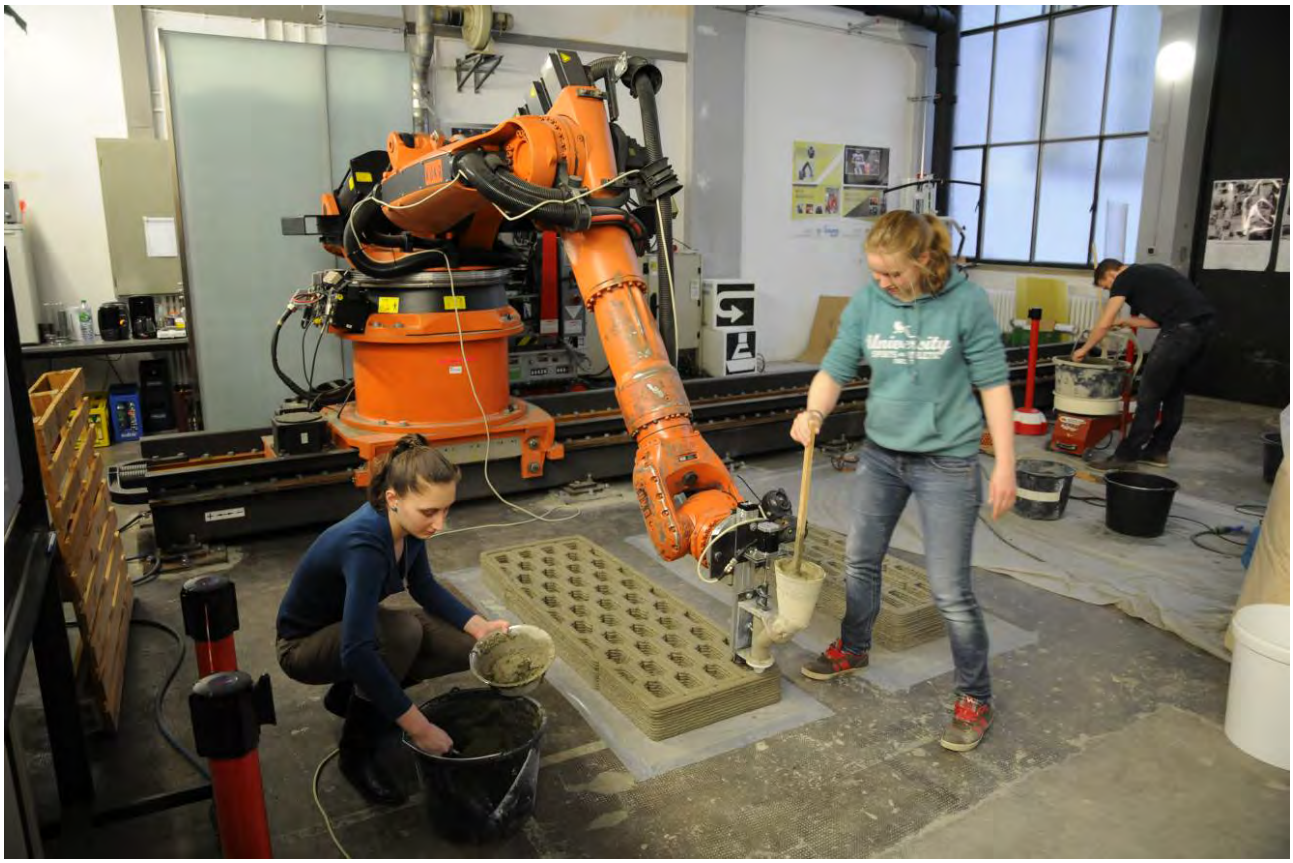

Abbildung 52: Bau der Testwand mit Schichtgeometrie C

Gemischt wurde in Chargen zu je 12,5 kg Zement (halber Sack). Eine solche Charge lieferte ausreichend Material für 4 - 4,5 Schichten der Wand. Die Mengenbestimmung erfolgte für den Zement durch Teilen des Sacks. Alle übrigen Komponenten wurden gewogen. Die Holzspäne wurden zunächst mit der Hälfte des Wassers in Zwangsmischer vorgenässt und 5 min lang gemischt. Anschließend wurde der Zement zusammen mit dem Stabilisierer und dem restlichen Wasser hinzugefügt und der Beton ca. 2 min lang im Zwangsmischer gemischt. Danach wurde die Mörtelwanne aus dem Zwangsmischer herausgenommen und nur noch mit dem Mörtelmixer gemischt. Nach Zugabe des Luftporenbildners wurde 30 s lang, und abschließend nach Zugabe des Beschleunigers noch einmal 40 s lang mit dem Mörtelmixer gemischt. Die Frischbetonrohdichte wurde mehrfach durch Wiegen ermittelt und ein Wert von 1.040 kg/m³ festgestellt.

Tabelle 6: Chronologie des Druckvorgangs der Testwand

Datum	Anzahl Schichten kontinuierlich gedruckt	Schichtnr.	Kommentar
4.2.16	9	1 - 9	
4.2.16	8	10 - 17	
4.2.16	9	18 - 26	
5.2.16	9	27 - 35	
5.2.16	17	36 - 52	
5.2.16	16	53 - 68	Ausbruch an äußerer Schicht
8.2.16	12	69 - 80	Ausbruch an äußerer Schicht
10.2.16	13	81 - 93	modifizierte Geometrie, Ausbruch an äußerer Schicht

Nach dem Mischen wurde der Frischbeton für den Druckvorgang in kleine Gefäße umgefüllt und anschließend mit einem Löffel in den Trichter des Extruders eingefüllt (Abbildung 52). Um einen kontinuierlichen Fluss des Materials vom Trichter in das Schneckenrohr und in den Schneckengang der Förderschnecke zu erreichen, war ein Nachschieben mit einem Holzstab notwendig. Dies geschah zunächst von Hand, am letzten Tag aber auch motorisiert mit Schrittmotor (Abbildung 15 rechts). Bei allen großformatigen Versuchen wurde die Förderschnecke b mit einer geringen Progression eingesetzt. Der Einfüllstutzen mündet in einer Höhe von 50 mm - 120 mm oberhalb des unteren Endes der Förderschnecke in das Schneckenrohr. In diesem Bereich hat die Förderschnecke eine Ganghöhe von 38 (oben) bis 32 mm (unten). Am unteren Ende hat die Förderschnecke eine Ganghöhe von 27 mm. Der Schneckengang hat hier einen Querschnitt von 384 mm². Die verwendete Düse hat eine kreisförmige Öffnung mit einem Durchmesser von 20 mm, also einer Fläche von 314 mm², und im Innern eine Neigung der Flanken von 20°. Die Fahrgeschwindigkeit betrug in der Regel 75 mm/s. Beim Beginn eines neuen Druckabschnitts wurde zunächst mit einer Fahrgeschwindigkeit von 30 mm/s gestartet, dann auf 50 mm/s und schließlich auf 75 mm/s erhöht. Die Fahrgeschwindigkeit in Richtungen in denen skaliert wurde, war jedoch stets, durch die fehlerhafte interne Berechnung

der Robotersteuerung, gegenüber der eingestellten Geschwindigkeit reduziert. Experimentelle Variationen der Fahrgeschwindigkeiten zeigten, dass auch größere Geschwindigkeiten mindestens bis zu 100 mm/s möglich sind. Die Zeit, die für die Extrusion einer Schicht benötigt wurde, betrug ca. viereinhalb Minuten. Die Extrudiergeschwindigkeit wurde, mit dem Ziel einer möglichst konstanten Raupenbreite, je nach Frischbetonkonsistenz zwischen 180 und 250 Motorschritten pro Sekunde variiert. Dies entspricht, bei den eingesetzten Schrittmotoren und der gewählten Einstellung der Schrittmotorsteuerung auf halbe Schritte und damit 400 Schritte pro Umdrehung, umgerechnet 27 bis 37,5 Umdrehungen der Förderschnecke pro Minute.

Abbildung 53: Fehlstelle in der Raupe (links) ist nach zwei weiteren Schichten (rechts) gut ausgeglichen

Es wurden insgesamt 93 Schichten mit bis zu 17 Schichten an einem Stück ohne Pause und bis zu 42 Schichten an einem Tag gedruckt (Tabelle 6, Abbildung 54, Abbildung 55 und Abbildung 56). Die reine Druckzeit betrug ca. 7 Stunden. Im Allgemeinen konnten die Betonraupen ununterbrochen und von gleichmäßigem Querschnitt ausgebracht werden. Kleine Fehlstellen in den Raupen wurden von nachfolgenden Schichten gut ausgeglichen (Abbildung 53). Mit Ist-Maßen des Bauteils von (L x B x H) 1.492 - 1.500 mm x 490 - 513 mm x 925 - 940 mm sind die Abweichungen von den Soll-Maßen von (L x B x H) 1.500 mm x 500 mm x 930 mm gering. Eine darüber hinaus gehende Abweichung vom Soll konnte lediglich an der Stirnwand nahe dem Robotersockel beobachtet werden. Diese Fläche mit ebener Sollgeometrie erhielt aufgrund des Fehlers in der Steuerungssoftware des Roboters eine konvexe Krümmung in Richtung Robotersockel mit einem Stich von ca. 20 mm.

Die jeweils untersten Schichten eines kontinuierlich gedruckten Abschnitts (deutlich z.B. die Schichten 27 und 53) weisen eine geringfügig größere Spurbreite gegenüber den übrigen Schichten auf (Abbildung 55 und Abbildung 56). Dies führt bei der äußersten Spur, welche durch die angrenzende innere Spur an einem Ausweichen nach Innen gehindert wird, zu einer leichten Exzentrizität nach außen. An vielen Stellen ist auch ein schlechter Verbund zwischen

nebeneinanderliegenden Raupen zu beobachten. Zusätzlich reißen die Fugen zwischen den Raupen teils auch durch Schwinden noch auf.

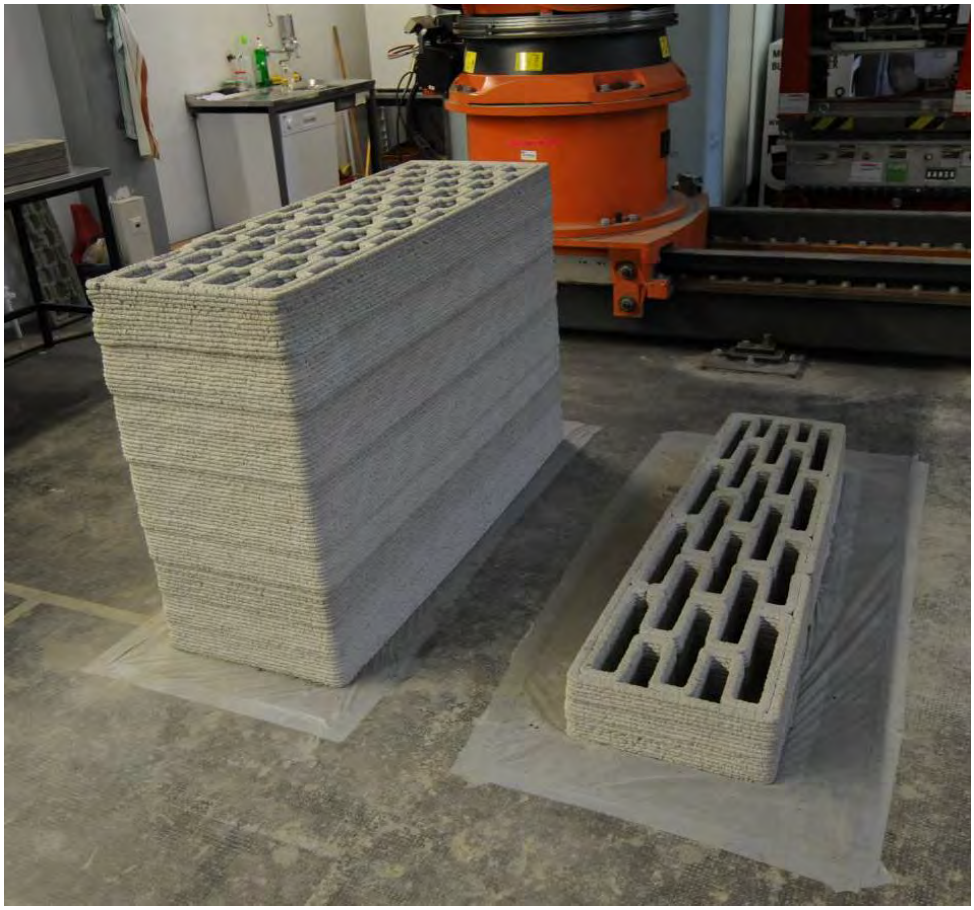

Abbildung 54: Testwand mit Schichtgeometrie C (links) und Vorversuch mit Schichtgeometrie B (rechts)

Nach dem Druck von 68 Schichten brach links neben dem vertikalen Stoß auf einer der Längsseiten ein 16 Schichten hohes ca. 1.030 mm x 160 mm (B x H) großes Stück der äußeren Schicht aus (Abbildung 56). Die Fehlstelle wurde mit einer Leiste überbrückt und der Druckvorgang später fortgesetzt. Es gab anschließend noch zwei weitere, kleinere Ausbrüche rechts neben dem Stoß. Diese wurden mit einer Holzplatte und Schraubzwingen gestützt bzw. ebenfalls mit einer Leiste überbrückt. Bei den letzten 13 Schichten wurde, um eine bessere Stabilität zu erreichen, eine modifizierte Geometrie eingesetzt. Bei dieser ist jede zweite Schicht gegenüber der vorigen gespiegelt, so dass der Stoß abwechselnd an zwei unterschiedlichen Stellen der Längswand zu liegen kommt und es dadurch eine Verzahnung zwischen den Schichten gibt, die der äußeren Schicht zusätzlichen Halt gibt. Außerdem wurde der Startpunkt für die Schichten ins Innere der Fläche gelegt. Dadurch fallen die beim Start eines neuen Druckabschnittes notwendige Justierung der Extrudiergeschwindigkeit auf eine neue Materialcharge und die damit verbundenen Schwankungen der Spurbreite nicht in die empfindliche äußere Schicht.

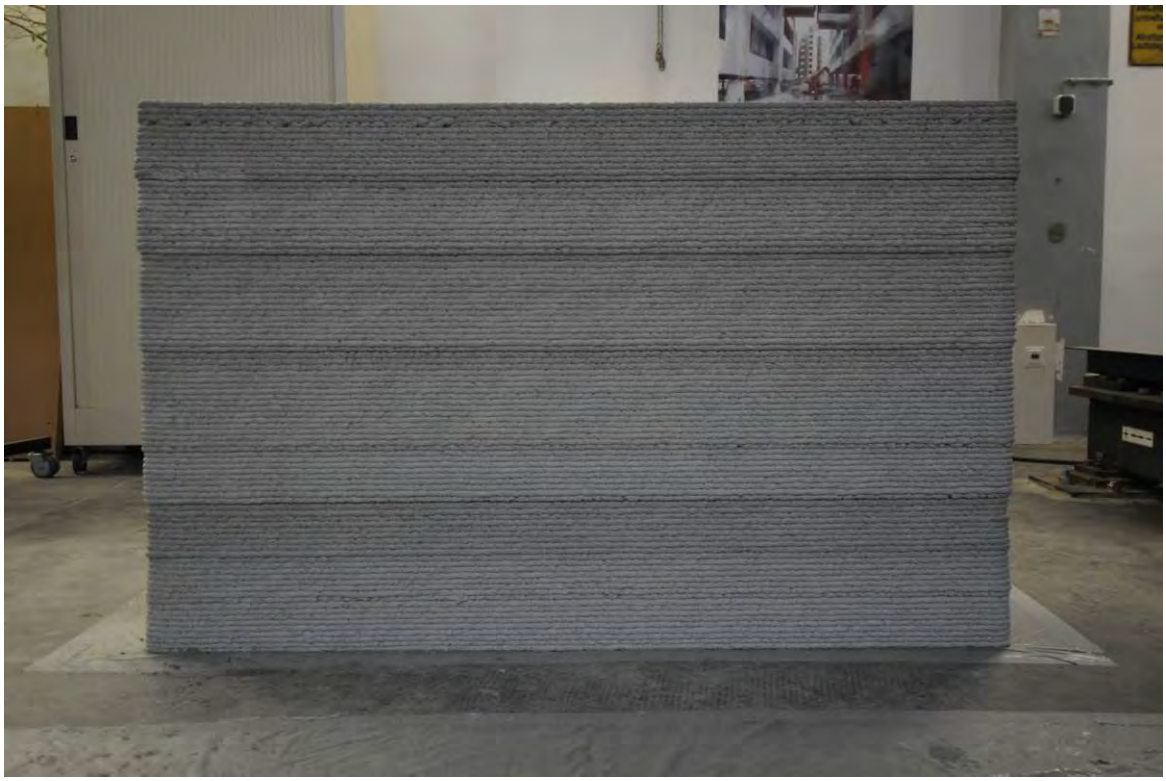

Abbildung 55: Vorderseite der Testwand

Abbildung 56: Rückseite der Testwand mit Ausbrüchen

7.4 Bau eines Testobjektes mit Schichtgeometrie D

Um die bei der ersten Testwand beobachteten Defizite zu vermeiden, wurden verschiedene Maßnahmen als potentiell zielführend identifiziert. Lange, seitlich nicht gehaltene Abschnitte (wie die äußere Schicht der Testwand) sind zu vermeiden. Stattdessen sollte durch die Ausbildung von Schlaufen (wodurch so etwas wie Stützpfeiler entstehen) oder durch einen mäanderförmigen Verlauf eine Stabilisierung der aus aufeinander liegenden Raupen aufgebauten vertikalen Scheiben erfolgen. Wie schon bei den letzten 13 Schichten geschehen, kann zudem die Schichtgeometrie lagenweise derart gewechselt werden, dass es dadurch zu einer Verzahnung zwischen den Schichten kommt. Der Startpunkt für die Schichten sollte ins Innere der Fläche gelegt werden, damit die beim Start eines neuen Druckabschnittes notwendige Justierung der Extrudiergeschwindigkeit nicht in die anfällige äußere Schicht fällt. Bild Abbildung 57 zeigt zwei derartig gestaltete Schichtgeometrien.

Ein Testobjekt mit der Schichtgeometrie D und den Außenmaßen (L x B) 1.000 mm x 275 mm wurde, mit der gleichen Rezeptur und den gleichen Einstellungen für Fahr und Extrudiergeschwindigkeit wie das Bauteil C, 14 Schichten hoch gebaut. Im Bereich der verzahnten Schlaufen zeigte sich auch die erwartete Stabilisierung. Allerdings erwiesen sich die langen, ungehaltenen Abschnitte der einspurigen Außenscheibe als instabil und begannen nach 12 Schichten wegzukippen (Abbildung 58).

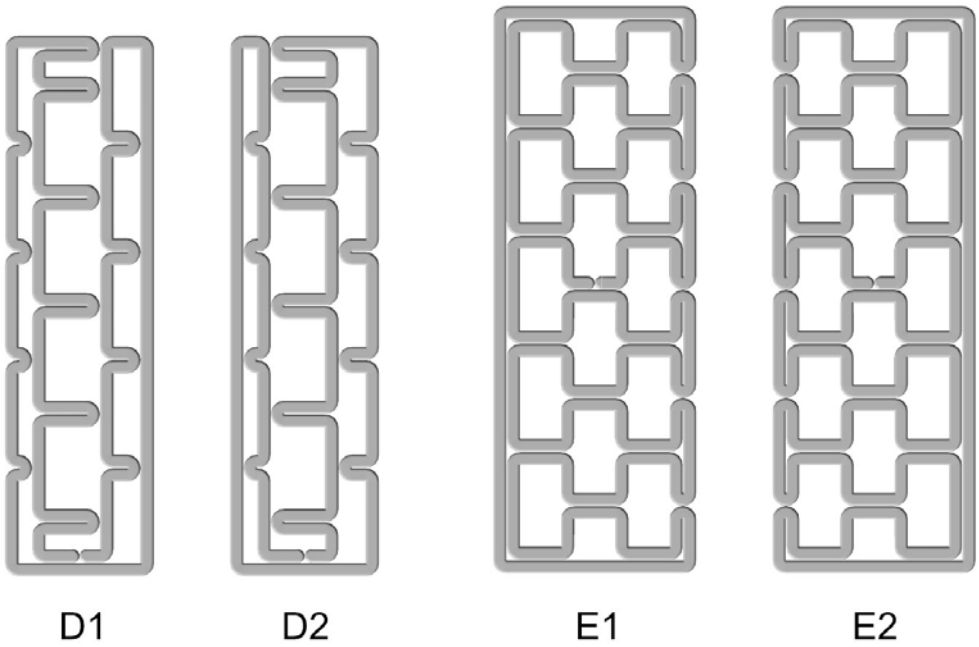

Abbildung 57: Schichtgeometrien D und E mit innenliegendem Startpunkt und stabilisierenden Schlaufen. Geometrie D1 und D2 bzw. E1 und E2 werden jeweils alternierend ausgeführt, so dass es zu einer Verzahnung im Bereich der Schlaufen kommt.

Abbildung 58: Bau eines Testobjektes mit Schichtgeometrie D, Wegkippen eines der ungehaltenen Abschnitte der einspurigen Außenscheibe nach 12 Schichten

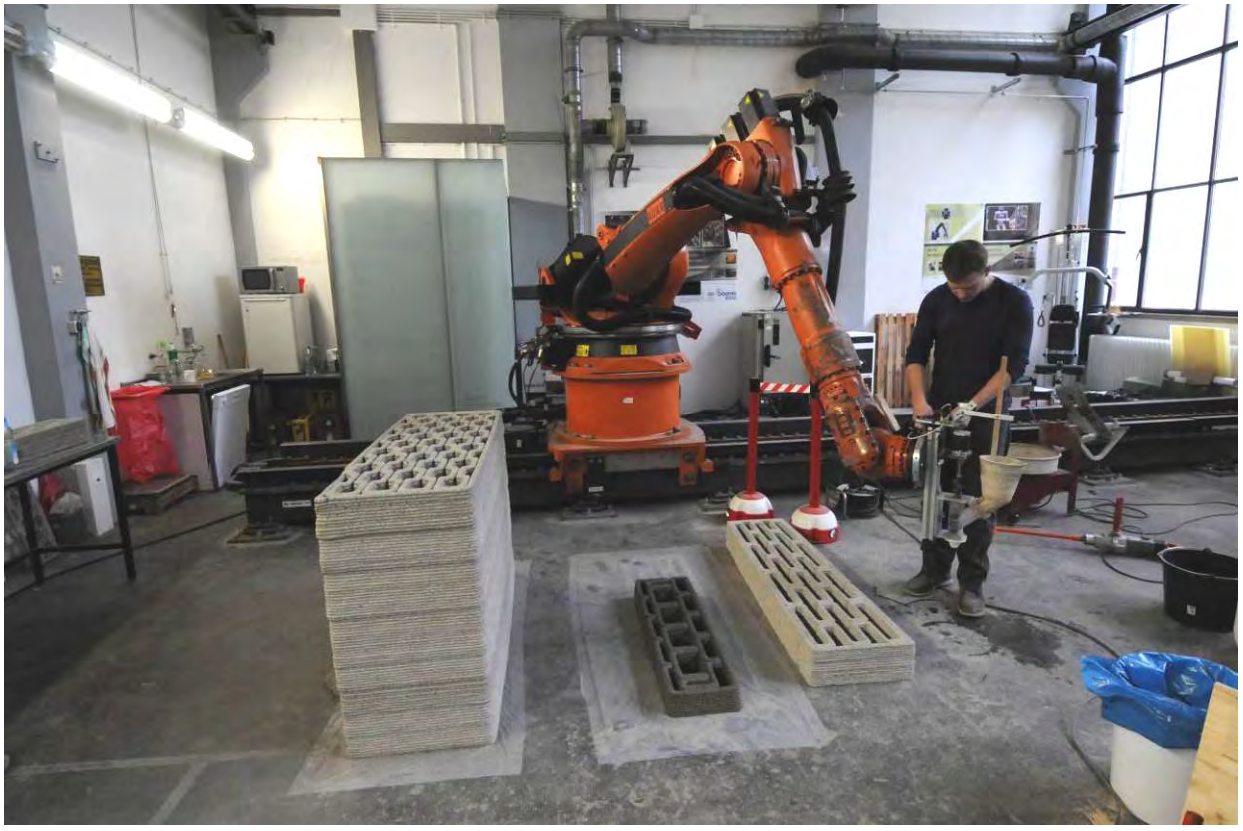

Abbildung 59: Roboterlabor mit dem am Industrieroboter montierten Versuchsextruder und den verschiedenen großformatigen Testobjekten

Eine weitere denkbare Verbesserungsmaßnahme wäre es, abseits des Bauteils eine Kalibrierspur zu drucken, um die für die jeweilige Charge passende Extrudiergeschwindigkeit für eine über alle Schichten hinweg gleiche Spurbreite zu finden. Ob eine doppelte Außenschicht, wie dies bei kunststoffbasierten 3D-Druckverfahren (FDM/FFF) teils praktiziert wird, zu einer Verbesserung führt, wäre zu untersuchen. Ebenfalls zu untersuchen wäre eine Optimierung der Geometrie des Raupenquerschnittes; es wird vermutet, dass flachere Querschnitte zu stabileren Strukturen führen, was jedoch auf Kosten der Baugeschwindigkeit (weniger hohe Querschnitte) bzw. der Feingliedrigkeit (breitere Querschnitte) geschieht. Auch kann davon ausgegangen werden, das Bauteilformen mit gekrümmten Oberflächen weniger Stabilitätsprobleme zeigen, als die hier gewählten ebenen Geometrien. Schließlich sollten Unterbrechungen des Druckvorgangs möglichst vermieden werden und stattdessen durchgehend gemischt und gedruckt werden. Um dies auch in einem praxisgerechten Maßstab realisieren zu können ist jedoch in erster Linie noch weiterführende Materialforschung erforderlich, mit dem Ziel, präzise auf den Druckvorgang eingestellte Betonrezepturen zu finden.

8 Fazit

In vorliegendem Bericht wurden Forschungsarbeiten vorgestellt, die die Entwicklung eines Verfahrens für die additive Fertigung durch Extrusion von Holzleichtbeton zum Gegenstand hatten. Es wurden Versuche mit unterschiedlichen Materialien und Geräten durchgeführt und abschließend durch den Bau von großformatigen Testobjekten die Machbarkeit des Verfahrens nachgewiesen.

Die Schneckenextruder mit düsennaher Förderschnecke ebenso wie der Industrieroboter als Manipulator zeigten sich als sehr gut geeignet für die Realisierung einer großmaßstäblichen additiven Fertigung durch Extrusion von Beton.

Der im Projekt entwickelte extrudierfähige Holzleichtbeton besteht aus Portlandkalksteinzement und unbehandelten Weichholzspänen in einem Volumenverhältnis von 1:1 und verschiedenen Additiven. Er weist eine Druckfestigkeit von ca. 10 N/mm² und eine Biegezugfestigkeit von ca. 4 N/mm² auf und liegt damit im Bereich von Leichtbetonen auf rein mineralischer Basis. Die Trockenrohdichte beträgt 995 kg/m³. Die Wärmeleitfähigkeit liegt bei ca. 0,25 W/(m*K). Aufgrund von Angaben aus der Literatur kann davon ausgegangen werden, dass die Baustoffklasse A2 erreicht wird.

Entsprechend seiner geringeren Dichte weist Holzleichtbeton, ebenso wie andere Leichtbetone, zwar geringere Festigkeiten auf als Normalbeton. Diesem Nachteil steht jedoch, wie die Arbeiten im Projekt ergaben, eine Reihe von Vorteilen gegenüber:

Der Ersatz der sonst üblichen, schweren Gesteinskörnungen im Beton durch Partikel aus dem nachwachsenden Rohstoff Holz stellt einen Beitrag zur Schonung von Umwelt und endlichen Ressourcen dar.

Durch das geringe Gewicht des Betons ist es möglich, in wesentlich größerem Maße Überhänge zu bauen, als dies mit schwerem Beton der Fall ist. Dies erlaubt darüber hinaus grundsätzlich auch den Bau von temporären Stützkonstruktionen, die mit einem Minimum an Materialeinsatz auskragende oder Öffnungen überbrückende Bereiche abstützen. Dies beides zusammengenommen bedeutet eine signifikante Steigerung der geometrischen Freiheit des Extrusionsverfahrens.

Die gute Bearbeitbarkeit ermöglicht eine subtraktive Nachbearbeitung in Bereichen, wo ein hoher Präzisionsgrad (z.B. an Bauteilanschlüssen) oder besondere Oberflächenqualitäten erforderlich sind. Die Kombination von additiven und subtraktiven Fertigungsschritten stellt einen vielversprechenden Lösungsansatz dar, um Baugeschwindigkeit und geometrischer Auflösung miteinander zu vereinen.

Die geringe Wärmeleitfähigkeit des Leichtbetons in Verbindung mit den Möglichkeiten des Verfahrens zur Fertigung von formoptimierten Bauteilen erlaubt die Herstellung von

monolithischen Hüllelementen - für Neubau und Bestandssanierung - ohne die Notwendigkeit zusätzlicher Wärmedämmung. Dies unterstützt ein einfaches, robustes Bauen und erleichtert das Recycling.

In der Summe erwies sich die additive Fertigung durch Extrusion von Holzleichtbeton als eine Technologie mit großem Potenzial. Um dieses voll auszuschöpfen muss, neben Einzelfragen zum Verfahren, vor allem die Materialentwicklung und -optimierung zum Gegenstand weiterführender Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen gemacht werden.

9 Literaturverzeichnis

3ders (2013): LAYWOO-D3: New FDM filament can print wood with tree rings. http://www.3ders.org/articles/20120920-laywoo-d3-new-fdm-filament-can-print-wood-with-tree-rings.html (Abruf vom 31.10.2013)

3ders (2015): WinSun China builds world's first 3D printed villa and tallest 3D printed apartment building. http://www.3ders.org/articles/20150118-winsun-builds-world-first-3d-printed-villa-and-tallest-3d-printed-building-in-china.html (Abruf vom 30.12.2015)

3dprint.com (2015): Concrete Plans: CyBe's Berry Hendriks Describes Plans to 3D Print with Mortar. http://3dprint.com/35727/cybe-berry-hendriks-concrete/ (Abruf vom 30.12.2015)

AGRESTA Société par actions simplifiée à associé unique (2016): AGRESLITH-C - wood aggregate for lightweight concrete. http://www.agresta.fr/en/construction/8-agreslith-c-wood-aggregate-for-lightweight-concrete.html# (Abruf vom 12.3.2016)

Aumann, Q. (2013): Versuche zum Einbringen von Bindemittel in Schüttungen aus Holzspänen. Bachelor's Thesis am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion (mitbetreut von Holzforschung München), Technische Universität München, 2013

Backstein Engineering GmbH (2016): WUTZ ® Spezialzement für Holzbeton, 20 kg. http://www.moertelshop.com/Holzbeton-Zement-guenstig-kaufen (Abruf vom 13.3.2016)

Bauer, B. (2015): Versuche zur Ermittlung der Eignung von Exzenterschneckenpumpen für die Extrusion von Holzleichtbetonmörtel. Bachelor's Thesis am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Technische Universität München, 2015

Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften (2016): Pumpe. In: Digitales Wörterbuch der deutschen Sprache der Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften. http://www.dwds.de/?qu=Pumpe (Abruf vom 24.2.16)

Bittermann, H.-J.; Kempf (2007), J.: Fördern von Flüssigkeiten mit Feststoffen. PROCESS-Pumpenseminar vom 6.4.2007. http://www.process.vogel.de/stroemungstechnik/pumpen/articles/61782/ (Abruf vom 4.3.2016)

Bockelmann-Holz GmbH (2016): Gala Deko Stixx - die Innovation aus dem Hause Bockelmann. http://www.bockelmann-holz.de/de/gala-deko-stixx.html (Abruf vom 12.3.2016)

Breit, W.; Schulze, J.; Heese, C.; Bund, B. (2014): Hochwärmedämmende monolithische Sichtbetonaußenteile aus Architekturleichtbeton. Abschlussbericht, Forschungsinitiative Zukunft Bau, Band F 2894, Fraunhofer IRB Verlag, 2014

CEMWOOD GmbH (2016a): CW 1000 Hohlraum- und Ausgleichsschüttung. http://www.cemwood.de/de/produkte/cw-1000-hohlraumschuettung/ (Abruf vom 13.3.2016)

CEMWOOD GmbH (2016b): CW 2000 Ausgleichsschüttung. http://www.cemwood.de/de/produkte/cw-2000-ausgleichsschuettung/ (Abruf vom 13.3.2016)

CEMWOOD GmbH (2016c): Vom Holzspan zum Endprodukt. http://www.cemwood.de/de/technologie/vom-holzspan-zum-endprodukt/ (Abruf vom 13.3.2016)

CyBe.eu (2015): The Free Form Folly, BEYOND. https://www.youtube.com/watch?v=II6IuWAFH_o (Abruf vom 30.12.2015)

CyBe.eu (2016): Filament - CyBe mortar. http://www.cybe.eu/category/filament/ (Abruf vom 13.3.2016)

Cziesielski, E. (1975): Beton mit Fasern aus Holz. In: Holz als Roh- und Werkstoff 33 (1975), S.303-307

DIN 1045-2:2008-08, Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1

DIN 15201-1:1994-04, Stetigförderer; Benennungen

DIN 66025-1:1983-01, Programmaufbau für numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen; Allgemeines

DIN EN 1015-3:2007-05, Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil 3: Bestimmung der Konsistenz von Frischmörtel (mit Ausbreittisch); Deutsche Fassung EN 1015-3:1999+A1:2004+A2:2006

DIN EN 12390-1:2012-12, Prüfung von Festbeton - Teil 1: Form, Maße und andere Anforderungen für Probekörper und Formen; Deutsche Fassung EN 12390-1:2012

DIN EN 12390-2:2009-08, Prüfung von Festbeton - Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen; Deutsche Fassung EN 12390-2:2009

DIN EN 12390-3:2009-07, Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN 12390-3:2009

DIN EN 12667:2001-05, Wärmetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät - Produkte mit hohem und mittlerem Wärmedurchlasswiderstand; Deutsche Fassung EN 12667:2001

DIN EN 196-1:2005-05, Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit; Deutsche Fassung EN 196-1:2005

DIN EN 206-1:2001-07, Beton - Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206-1:2000

DIN EN 310:1993-08, Holzwerkstoffe; Bestimmung des Biege-Elastizitätsmoduls und der Biegefestigkeit; Deutsche Fassung EN 310:1993

Dini, E.: D-Shape – the technology. http://www.d-shape.com/tecnologia.htm (Abruf vom 16.6.10)

FD3D GmbH (2016): extrudr - biodegradable plastics. http://extrudr.eu/collections/bdp/green-tec (Abruf vom 14.3.2016)

Filipaj, P. (2010): Architektonisches Potential von Dämmbeton. vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 2010

Garrecht, H.; Klatt, A. (2012): Potenziale und Grenzen gefügedichter Leichtbetone aus nachwachsenden Rohstoffen, Mineralisch ummantelte Holzspäne als Leichtzuschlag für Beton. BFT international, Vol. 78, Nr. 2 (2012), S. 116-119

Gliniorz, K.-U.; Natterer, J. (2002): Mineralisiertes Holz im statischen Einsatz. In: Mikado 2/2002, S.64-66

Heinz, D.; Urbonas, L. (2008): Holzbau der Zukunft, Teilprojekt 16: Holzbeton. Technische Universität München: 2008. http://www.hb.bv.tum.de/HDZ/forschungsberichte/teilprojekt-16.pdf (Abruf vom 9.8.2012)

Henke, K. (2015): Additive Fertigung im Bauwesen - Verfahren der additiven Baufertigung, Potentiale von Holzbeton und anderen Leichtbaustoffen. In: Reinhart, G.; Zäh, M. (Hrsg.): 19. Augsburger Seminar für additive Fertigung - Prozessketten und digitale Werkzeuge. München: Herbert Utz, 16. Juni 2015

Henke, K.; Treml, S. (2013): Wood Based Bulk Material in 3D Printing Processes for Applications in Construction. In: European Journal of Wood and Wood Products. Heidelberg: Springer, Jan. 2013, Vol. 71, Issue 1, pp 139-141, DOI 10.1007/s00107-012-0658-z

Immel, C. (2015): Additive Fertigung durch Extrusion mit Holzleichtbeton unter Zugabe von mineralisierten Spänen. Bachelor's Thesis am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion (unterstützt von Holzforschung München), Technische Universität München, 2015

ISO 6983-1:2009, Automation systems and integration -- Numerical control of machines -- Program format and definitions of address words -- Part 1: Data format for positioning, line motion and contouring control systems

Khoshnevis, B. (2010): Contour Crafting. http://www.contourcrafting.org/ (Abruf vom 11.6.2010)

Klatt A.; Garrecht H. (2012): Entwicklung einer mineralischen Ummantelung zur vollständigen Umhüllung von Holzspanmaterial, 2012, http://www.massivbau.tu-darmstadt.de/media/fg_wib/wib_forschung_bilder/

Klatt, A. (2012): Mineralisch ummantelte Holzspäne als Leichtzuschlag für Beton - Potentiale und Grenzen modifizierter organischer Materialien. Dissertation am Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie, Technische Universität Darmstadt, 2012

Krippner, R. (2004): Untersuchungen zu Einsatzmöglichkeiten von Holzleichtbeton im Bereich von Gebäudefassaden. Dissertation an der Fakultät für Architektur, Institut für Entwerfen und Bautechnik, Lehrstuhl für Gebäudetechnologie, Technische Universität München, 2004

Krippner, R.; Niebler, D.; Issig, H. (2008): Holzleichtbeton im Hochbau, Teilprojekt 17 des Forschungsprojekts Holzbau der Zukunft, 2008 http://www.hb.bv.tum.de/HDZ/forschungsberichte/teilprojekt-17.pdf (Abruf vom 9.8.2012)

Kuhnhenn, R. (2010): Mineralisierter Holzspan. Deutsche Patent- und Markenamt. Patent DE 102010051059 A1. Anmeldetag: 11. Nov. 2010

Linhart, Ch. (2014): Elektronische Steuerung für ein Raumportal zum Einsatz in der additiven Fertigung. Bachelor's Thesis am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Technische Universität München, 2014

Lim, S.; Buswell, R.A.; Le, T.T.; Austin, S.A.; Gibb, A.G.F.; Thorpe, T. (2012): Developments in construction-scale additive manufacturing processes. In: Automation in Construction 21 (2012), S.262-268

Loughborough University (2012): 3D Concrete Printing: an innovative construction process. http://www.buildfreeform.com/index.php (Abruf vom 21.6.2012)

Manjura, D. (2015): Gespräch mit Herrn David Manjura, Dennert Poraver GmbH, Abteilung Anwendungstechnik, anlässlich gemeinsamer Versuche am 28.7.2015 am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, TUM

Martius, C. (2015): Versuche zur Bestimmung von Materialkennwerten für die Extrusion von Leichtbeton. Bachelor's Thesis am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Technische Universität München, 2015

NETZSCH Pumpen & Systeme GmbH (2016): Geometrien - Geometrie-Ausführungen. https://pumpen.netzsch.com/de/produkte-loesungen/nemo-exzenterschneckenpumpe/geometrien/ (Abruf vom 4.3.2016)

Open3DP (2011): Woodn't You Know It – 3DP in wood. http://open3dp.me.washington.edu/2011/04/woodnt-you-know-it-3dp-in-wood/ (Abruf vom 25.11.2011)

Pegna, J. (1997): Exploratory investigation of solid freeform construction. In: Automation in Construction 5 (1997), S.427-437

Schlaich, M.; Hückler, A. (2012): Infraleichtbeton 2.0. In: Beton- und Stahlbetonbau 107 (2012), Heft 11, S. 757-766

Stanglmayr, S. (2015): Subtraktive Nachbearbeitung von additiv gefertigten Bauteilen aus Holzleichtbeton. Bachelor's Thesis am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Technische Universität München, 2015

Starke, M. (2016): Untersuchung und Bewertung von Förderschnecken für die Extrusion von Leichtbeton (Arbeitstitel). Bachelor's Thesis am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion (in Bearbeitung), Technische Universität München, 2016

Strobel, J. (2015): Materialversuche für die Extrusion von Holzleichtbeton. Bachelor's Thesis am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Technische Universität München, 2015

Talke, D. (2014): Entwurf, Bau und Test einer Versuchseinrichtung für die additive Fertigung mittels Extrusion von Holzleichtbeton. Master's Thesis am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Technische Universität München, 2014

ViscoTec Pumpen- u. Dosiertechnik GmbH (2011): Dispenser 3VMP22 - Produktdatenblatt. 11/2011

ViscoTec Pumpen- u. Dosiertechnik GmbH (2016): Unternehmen - ViscoTec Pumpen- u. Dosiertechnik GmbH - Perfekt dosiert! http://www.viscotec.de/unternehmen (Abruf vom 10.3.2016)

WinSun (2015): 3D Printing Construction. http://www.yhbm.com/index.php?m=content&c=index&a=lists&catid=67 (Abruf vom 26.5.2015)

Wohlers Associates Inc. (2015): Wohlers Report 2015 – About the Report. http://www.wohlersassociates.com/2015report.htm (Abruf vom 30.12.2015)

Wohlers, T.; Gornet, T. (2011): History of additive manufacturing. Online Supplement zum Wohlers Report 2011. http://www.wohlersassociates.com/history2011 (Abruf vom 22.3.2012)

Z Corporation (2009): 3DP™ Consumables Catalog. 2009

Zäh, M. F. (2006): Wirtschaftliche Fertigung mit Rapid-Technologien - Anwender-Leitfaden zur Auswahl geeigneter Verfahren. München: Hanser, 2006

Zhao, H.; Zhu H.Y.; Zhou, Y.L.; Wang, Q.W. (2011): Research of Wood Plastic Composites application based on Fused Deposition Modeling technology. In: EMEIT 2011- International Conference on Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology, Location: Harbin, Heilongjiang, China

10 Anhang

10.1 Anhang 1

Festigkeitsbestimmung nach DIN EN 12390-3:2009-07, Prüfung von Festbeton, Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern (Würfel)

Bezeichnung	Alter	Prüftag	Gewicht[1]	Abmessungen			Rohdichte[1]	Druckfläche	Druckfestigkeit	
	Tage	Datum	[g]	Höhe [mm]	Länge [mm]	Breite[mm]	[g/cm2]	[mm2]	Bruchlast [kN]	[N/mm2]
Würfel_geschalt_7d_01	7	18.01.2016	1394,8	100	100	102	1,37	10200	105,4	10,33
Würfel_geschalt_7d_02	7	18.01.2016	1385,6	100	100	102	1,36	10200	102,2	10,02
Würfel_geschalt_7d_03	7	18.01.2016	1417,7	100	100	100	1,42	10000	97,7	9,77
						Mittel	1,38		Mittel	10,04
Würfel_gedruckt_7d_01	7	19.01.2016	1284	99	100	101	1,28	10100	90,2	8,93
Würfel_gedruckt_7d_02	7	19.01.2016	1279,1	100	99	102	1,27	10098	91,4	9,05
Würfel_gedruckt_7d_03	7	19.01.2016	1290,9	99	100	101	1,29	10100	87,2	8,63
						Mittel	1,28		Mittel	8,87

Bezeichnung	Alter	Prüftag	Gewicht*	Abmessungen			Rohdichte	Druckfläche	Druckfestigkeit	
	Tage	Datum	[g]	Höhe [mm]	Länge [mm]	Breite[mm]	[g/cm2]	[mm2]	Bruchlast [kN]	[N/mm2]
Würfel_geschalt_28d_01	28	08.02.2016	1449	100	100	103	1,41	10300	131,4	12,76
Würfel_geschalt_28d_02	28	08.02.2016	1440	100	100	99	1,45	9900	124,7	12,60
Würfel_geschalt_28d_03	28	08.02.2016	1338	101	99	100	1,34	9900	109,1	11,02
						Mittel	1,40		Mittel	12,12
Würfel_gedruckt_28d_01	28	09.02.2016	1342	99	100	102	1,33	10200	101,7	9,97
Würfel_gedruckt_28d_02	28	09.02.2016	1317	99	100	100	1,33	10000	101,2	10,12
Würfel_gedruckt_28d_03	28	09.02.2016	1350	100	100	101	1,34	10100	109,1	10,80
						Mittel	1,33		Mittel	10,30

[1] Wasserlagerung bis zur Prüfung (wassergesättigt)

10.2 Anhang 2

Festigkeitsbestimmungen nach DIN EN 196-1:2005-05, Prüfverfahren für Zement, Teil 1: Bestimmung der Festigkeit (Prismen)

Bezeichnung	Alter	Prüftag	Gewicht[1]	Abmessungen			Bruchhöhe	Rohdichte[1]	Druckfläche	Biegezugfestigkeit		Druckfestigkeit			
	Tage	Datum	[g]	Höhe [mm]	Länge [mm]	Breite [mm]	[mm]	[g/cm2]	[mm2]	Bruchlast [N]	[N/mm2]	Bruchlast [kN]	[N/mm2]	[N/mm2]	
Prism_senkrecht_7d_01	7	18.01.2016	330,8	39,3	159,9	39,5	39,5	1,33	1580	1004	2,44	14,32	17,53	9,06	11,09 [2]
Prism_senkrecht_7d_02	7	18.01.2016	314,5	39,3	159,2	39,4	39,4	1,28	1576	1006	2,47	12,50	12,21	7,93	7,75 [2]
Prism_senkrecht_7d_03	7	18.01.2016	328,7	39,0	159,6	39,5	39,0	1,34	1580	1091	2,76	13,00	12,80	8,23	8,10
							Mitel	1,32		Mittel	2,56			Mittel	8,69
Prism_geschalt_7d_01	7	18.01.2016	356,8	40,0	160,2	39,4	40,0	1,41	1576	1350	3,16	14,63	14,69	9,28	9,32
Prism_geschalt_7d_02	7	18.01.2016	345,2	40,0	160,1	39,7	40,0	1,36	1588	1395	3,27	15,31	14,58	9,64	9,18
Prism_geschalt_7d_03	7	18.01.2016	339,9	40,2	160,2	39,4	40,1	1,34	1576	1551	3,61	15,30	15,30	9,71	9,71
							Mittel	1,37		Mittel	3,35			Mittel	9,47
Prism_parallel_7d_01	7	18.01.2016	326,3	39,2	159,5	38,7	39,2	1,35	1548	1450	3,61	15,89	15,65	10,26 [2]	10,11
Prism_parallel_7d_02	7	18.01.2016	327,8	39,4	159,6	39,1	39,1	1,33	1564	1549	3,89	15,03	15,27	9,61	9,76
Prism_parallel_7d_03	7	18.01.2016	315,4	39,0	159,8	39,2	39,1	1,29	1568	1362	3,42	13,31	13,44	8,49	8,57
Prism_parallel_7d_04	7	18.01.2016	329,3	39,4	159,1	39,2	39,1	1,34	1568	1348	3,38	13,79	13,78	8,79	8,79
							Mittel	1,33		Mittel	3,57			Mittel	9,30

Bezeichnung	Alter	Prüftag	Gewicht*	Abmessungen			Bruchhöhe	Rohdichte*	Druckfläche	Biegezugfestigkeit		Druckfestigkeit			
	Tage	Datum	[g]	Höhe [mm]	Länge [mm]	Breite [mm]	[mm]	[g/cm2]	[mm2]	Bruchlast [N]	[N/mm2]	Bruchlast [kN]	[N/mm2]	[N/mm2]	
Prim_senkrecht_28d_01	28	08.02.2016	348,0	39,3	159,7	39,2	39,3	1,41	1568	1138	2,81	17,40	17,00	11,10	10,84
Prim_senkrecht_28d_02	28	08.02.2016	344,5	38,6	159,2	39,5	38,6	1,42	1580	1114	2,91	17,90	17,30	11,33	10,95
Prim_senkrecht_28d_03	28	08.02.2016	335,8	39,3	159,8	39,3	39,3	1,36	1572	1213	3,00	16,50	15,60	10,50	9,92
Prim_senkrecht_28d_04	28	08.02.2016	337,2	39,4	160,3	39,4	39,4	1,36	1576	1273	3,12	15,30	15,90	9,71 [2]	10,09
Prim_senkrecht_28d_05	28	08.02.2016	345,7	39,1	159,6	39,4	39,1	1,41	1576	1360	3,41	20,50	19,10	13,01 [2]	12,12 [2]
							Mitel	1,39		Mittel	3,05			Mittel	10,96
Prism_geschalt_28d_01	28	08.02.2016	349,3	40,0	160,2	39,0	40,0	1,40	1560	1498	3,51	17,30	17,30	11,09	11,09
Prism_geschalt_28d_02	28	08.02.2016	348,6	40,0	160,4	39,0	40,0	1,39	1560	1535	3,60	18,10	17,90	11,60	11,47
Prism_geschalt_28d_03	28	08.02.2016	370,6	40,0	160,4	39,6	40,0	1,46	1584	1917	4,49	19,90	20,30	12,56	12,82
							Mittel	1,42		Mittel	3,87			Mittel	11,77
Prism_parallel_28d_01	28	08.02.2016	349,2	39,5	160,0	39,3	39,5	1,41	1572	1706	4,15	15,70	18,60	9,99	11,83 [2]
Prism_parallel_28d_02	28	08.02.2016	347,9	39,3	159,5	39,1	39,3	1,42	1564	1686	4,17	15,30	19,10	9,78	12,21 [2]
Prism_parallel_28d_03	28	08.02.2016	332,8	38,7	159,9	39,0	38,7	1,38	1560	1540	3,99	15,30	14,30	9,81	9,17 [2]
Prism_parallel_28d_04	28	08.02.2016	335,5	38,9	159,8	39,4	38,9	1,37	1576	1644	4,19	16,50	16,20	10,47	10,28
Prism_parallel_28d_05	28	08.02.2016	345,6	39,5	159,8	39,4	39,5	1,39	1576	1643	4,00	17,30	17,60	10,98	11,17
Prism_parallel_28d_06	28	08.02.2016	346,7	39,6	160,3	39,6	39,6	1,38	1584	1639	3,96	18,40	17,90	11,62	11,30
							Mittel	1,39		Mittel	4,08			Mittel	10,72

[1] Wasserlagerung bis zur Prüfung (wassergesättigt)
[2] Messwerte mit Abweichung größer 10% vom arithmetischen Mittel