



Kurzbericht für das Forschungsvorhaben:

Additive Fertigung frei geformter Bauelemente durch numerisch gesteuerte Extrusion von Holzleichtbeton

Projektlaufzeit:

15.10.2014 - 30.4.2016

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

1 Zusammenfassung

Die Forschungsarbeiten hatten ein Verfahren zum Gegenstand, mit dem großformatige Bauteile durch die Extrusion von Holzleichtbeton additiv hergestellt werden können. Die Bauteile werden dabei durch das Ablegen von schmalen Frischbetonraupen schalungsfrei aufgebaut (Abbildung 1). Dies geschieht indem ein Extruder von einem Industrieroboter entsprechend der angestrebten Bauteilgeometrie im Raum bewegt wird.

2 Einführung

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. Die additiven Fertigungsverfahren haben sich bereits in vielen Bereichen der Produktion durchsetzen können.

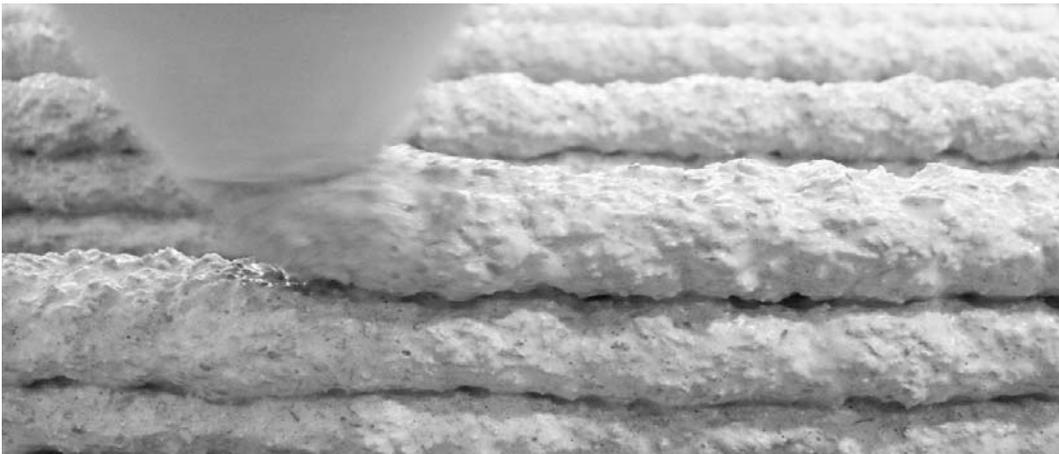


Abbildung 1: Extrusion von Holzleichtbeton

Auch für Anwendungen im Bauwesen versprechen die additiven Fertigungsverfahren ein großes Potenzial. Die für diese Verfahren charakteristische Formfreiheit, in Verbindung mit einer Wirtschaftlichkeit von kleinen Stückzahlen, kann für eine geometrische Optimierung in Hinblick auf Nutzung, Bauphysik und Tragwerk eingesetzt werden. Hohlräume für haustechnische Medien lassen sich leicht in Bauteilen integrieren. Ergänzungs- und Ersatzbauteile können individuell an den Bestand angepasst vorgefertigt werden. Die additive Baufertigung befindet sich heute noch im Entwicklungsstadium. Die meisten der bisherigen Forschungs- und Entwicklungsprojekte setzen dabei auf mineralische Werkstoffe, insbesondere auf Beton.

3 Ziel des Forschungsvorhabens

Zentrales Ziel des Forschungsvorhabens war es, die Machbarkeit einer additiven Baufertigung durch Extrusion von Holzleichtbeton nachzuweisen.

Der Ersatz der sonst üblichen, schweren Gesteinskörnungen im Beton durch Partikel aus dem nachwachsenden Rohstoff Holz stellt nicht nur einen Beitrag zur Schonung von Umwelt und endlichen Ressourcen dar, sondern führt auch zu einem vergleichsweise leichten, gut wärmedämmenden und gut zu bearbeitenden Werkstoff. Es sollte gezeigt werden, dass dadurch gegenüber vergleichbaren Lösungen mit Normalbeton, fertigungstechnische Grenzen verschoben und neue Anwendungsmöglichkeiten erschlossen werden können.

4 Durchführung der Forschungsarbeiten

Für die im Projekt durchzuführenden Versuche wurde ein extrusionsfähiger und schnell härtender Holzleichtbeton benötigt. Ein Spezialzement für Holzbeton und auf dem Markt verfügbare mineralisierte Späne erwiesen sich als Ausgangsstoffe für diesen Zweck als ungeeignet. Der daraufhin im Projekt zusammengestellte Holzleichtbeton besteht aus Portlandkalksteinzement und unbehandelten Weichholzspänen in einem Volumenverhältnis von 1:1 und verschiedenen Additiven. Er weist eine Druckfestigkeit von ca. 10 N/mm^2 und eine Biegezugfestigkeit von ca. 4 N/mm^2 auf. Die Trockenrohichte beträgt ca. 1.000 kg/m^3 . Die Wärmeleitfähigkeit liegt bei ca. $0,25 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Aufgrund von Angaben aus der Literatur kann davon ausgegangen werden, dass die Baustoffklasse A2 erreicht wird.

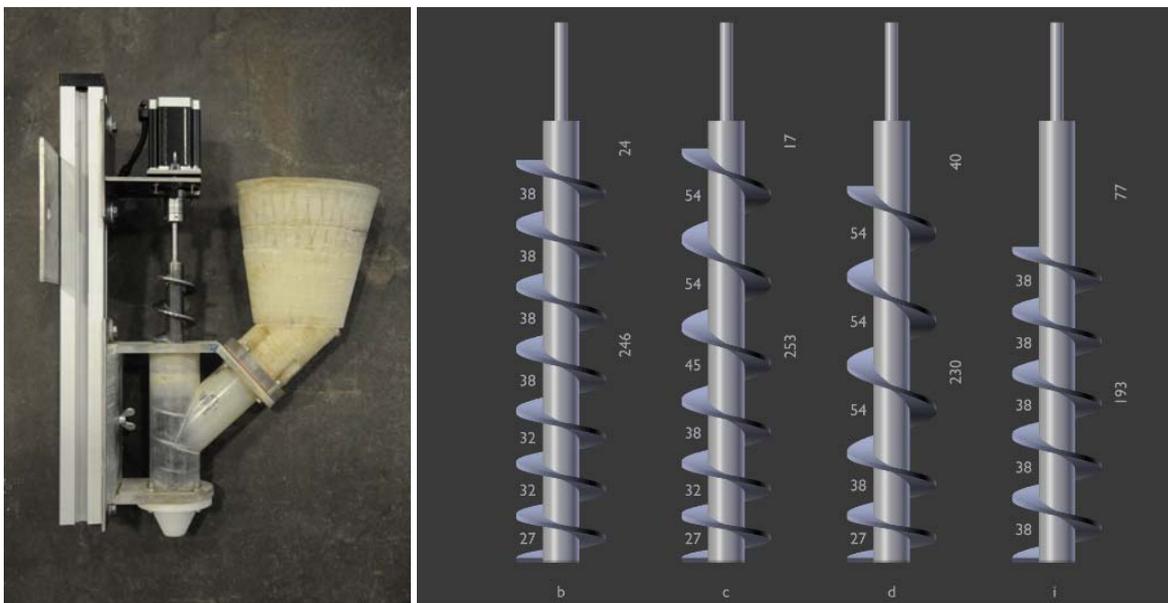


Abbildung 2: Versuchsextruder (links) und bei den Versuchen eingesetzte Förderschnecken (rechts). Schnecken b, c und d mit Ganghöhen von 27 mm am unteren Ende und jeweils unterschiedlich starker Progression und Schnecke i mit einer konstanten Steigung von 38 mm.

Als Extruder dient ein von einem Schrittmotor angetriebener Schneckenförderer, der den Frischbeton von oben nach unten durch eine Düse mit einer kreisförmigen Öffnung drückt. Die Zufuhr des gemischten Betons erfolgt in kleinen Chargen von Hand über einen Trichter. Mit dieser technisch einfach umzusetzenden Lösung konnte erreicht werden, die Zeit zwischen Mischen und Ausbringen des Betons kurz zu halten. Der im Projekt entwickelte Versuchsextruder mit einem

Schneckendurchmesser von 54 mm ist modular aufgebaut und erlaubt es, verschiedene Schnecken, Düsen und Einfülltrichter zu testen (Abbildung 2). Als gut geeignet erwiesen sich Förderschnecken mit geringen Steigungen und geringer oder gar keiner Progression, bei einer seitlichen Materialzufuhr im unteren Bereich der Schnecke. Bei der Wahl einer Düse mit einer kreisförmigen Öffnung von 20 mm Durchmesser und einer Flankenneigung von 20° konnten mit dieser Konstellation Frischbetonraupen mit einem konstanten Querschnitt von (B x H) 25 mm x 10 mm generiert werden.



Abbildung 3: Portalsystem mit montiertem Versuchsextruder

Zur Führung des Extruders wurde ein 6-Achsen-Industrieroboter mit einer Reichweite von 3.500 mm und einer Tragkraft von 110 kg eingesetzt (Abbildung 6). Außerdem stand für kleinformatische Versuche ein 3-Achsen-Portalsystem mit einem Bauraum von ca. 670 mm x 890 mm x 110 mm (X, Y, Z) zur Verfügung (Abbildung 3).

Da aufgrund der geringen Wärmeleitfähigkeit des Holzleichtbetons und der geometrischen Freiheiten des Verfahrens ein besonders vielversprechendes Anwendungsgebiet dieser Material-Verfahrens-Kombination in der Herstellung von strukturell und bauphysikalisch optimierten, monolithischen Hüllelementen zu sehen ist, wurden als Testobjekte mehrere großformatige Wandelemente mit innerer Hochlochstruktur gedruckt. Das größte dieser Objekte hat die Abmessungen (L x B x H) 50 cm x 150 cm x 93 cm (Abbildung 6).

Um den Gewinn an geometrischer Freiheit zu untersuchen, der sich durch den Einsatz dieses leichten Betons mit Holzpartikeln als Zuschlag ergibt, wurden verschiedene Überhangversuche durchgeführt. Es konnte unter anderem ein Testobjekt bestehend aus zehn Schichten von jeweils (L x B x H) 230 mm x 400 mm x 10 mm gedruckt werden, bei dem jede Schicht gegenüber der darunter liegenden horizontal um 3 mm versetzt ist (Abbildung 4). Bei einer Höhe von 100 mm konnte ein Überhang von 26 mm und somit von 26 % gemessen werden.



Abbildung 4: Durch Extrusion von Holzleichtbeton gefertigtes Testobjekt mit Überhang



Abbildung 5: Durch Extrusion additiv gefertigtes und mittels Fräsen partiell subtraktiv nachbearbeitetes Testobjekt aus Holzleichtbeton (Modellbau S. Stanglmayr)

Ein Vorteil leichter Betone gegenüber Normalbeton ist ihre gute subtraktive Bearbeitbarkeit. Additiv auf Grobform gedruckte Bauteile können so, dort wo es erforderlich ist, subtraktiv präzise auf Sollgeometrie gebracht werden (Abbildung 5). Versuche mit verschiedenen Bearbeitungsverfahren zeigten, dass sich Holzleichtbeton gut mit handelsüblichen Werkzeugen für die Metallbearbeitung sägen, fräsen, bohren und schleifen lässt.

5 Ergebnisse

Additive Baufertigung kann durch die Extrusion von Holzleichtbeton realisiert werden.

Ein Schneckenextruder mit düsennaher Förderschnecke zusammen mit einem Industrieroboter als Manipulator stellt ein hierfür geeignetes System dar.

Die Verwendung eines Betons mit Zuschlägen aus einem nachwachsenden Rohstoff kann einen Beitrag zur Schonung von Umwelt und endlichen Ressourcen leisten.

Die Festigkeiten des im Projekt eingesetzten Holzleichtbetons liegen in der Größenordnung derer von Leichtbetonen auf rein mineralischer Basis.

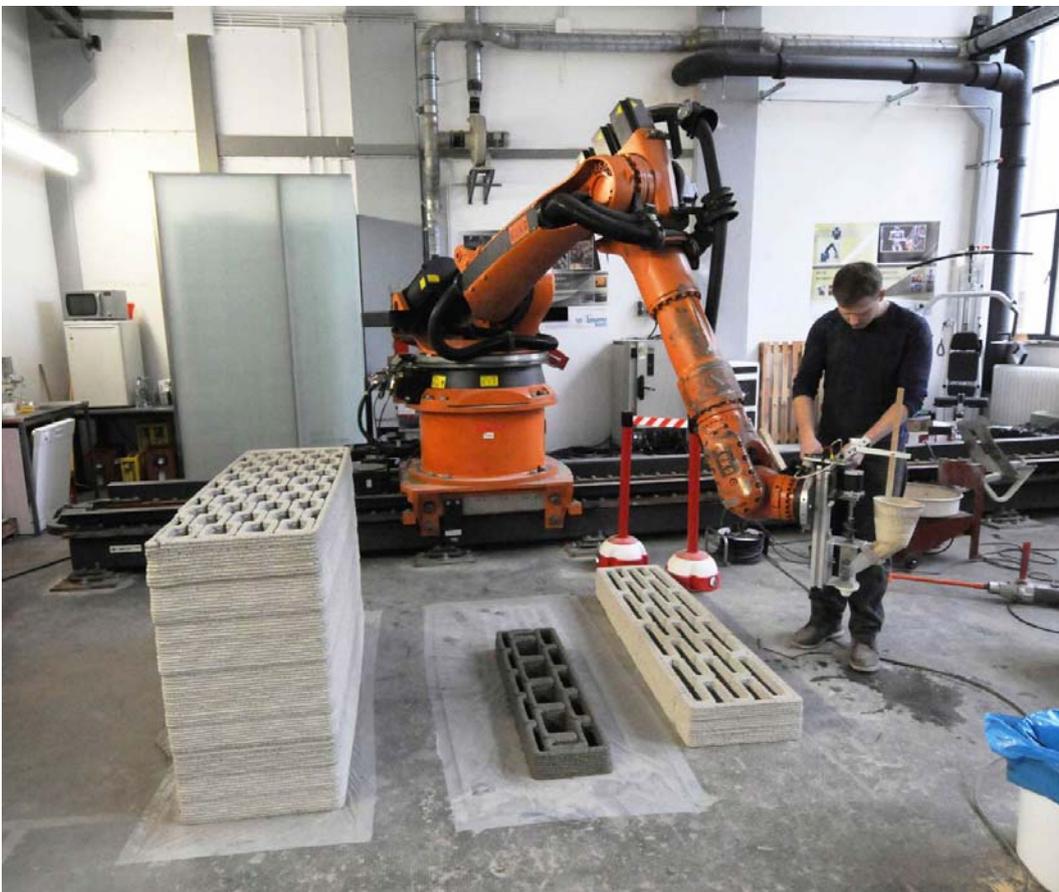


Abbildung 6: Industrieroboter mit montiertem Versuchsextruder und verschiedenen damit gebauten großformatigen Testobjekten aus Holzleichtbeton

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 zusätzlich 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, in denen 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.

Für die Material-Verfahrens-Kombination sind Anwendungen sowohl beim Neubau, als auch im Bestand zu sehen.

Durch die Möglichkeit der Herstellung von passgenauen Ersatz- und Ergänzungsbauteilen eröffnet die additive Baufertigung, insbesondere im Zusammenspiel mit einer digitalen Bestandserfassung, neue Chancen bei Sanierung und Erneuerung.

Die geringe Wärmeleitfähigkeit des Leichtbetons in Verbindung mit den Möglichkeiten des Verfahrens zur Fertigung von formoptimierten Bauteilen erlaubt die Herstellung von monolithischen Hüllelementen ohne die Notwendigkeit einer zusätzlichen Wärmedämmung. Dies unterstützt ein einfaches, robustes Bauen und erleichtert das Recycling.

In der Summe erwies sich die additive Baufertigung durch Extrusion von Holzleichtbeton als eine Technologie mit großem Potenzial.

Auf dem Weg zu einer baupraktischen Anwendbarkeit sind an erster Stelle Materialentwicklung und -optimierung, mit dem Ziel einer Verbesserung der Frisch- und Festbetoneigenschaften, zum Gegenstand weiterführender Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen zu machen. Neben dem Einsatz unterschiedlicher Zementarten und Additive wären auch Alternativen bezüglich der Gesteinskörnung zu untersuchen, mineralisch ummantelte Späne und Blähglasgranulat versprechen hier gute Resultate.

Anlagenseitig ist vor allem der Extruder zu einer kombinierten und kontinuierlich arbeitenden Mischer-Extruder-Einheit weiterzuentwickeln. Die Raupenquerschnitte sind zu optimieren und die dafür erforderlichen Düsen zu entwickeln. Daneben wären, zur Steigerung von Baugeschwindigkeit, Formtreue, Auflösung und Oberflächenqualität, die Möglichkeiten der Kombination von additiven, umformenden und subtraktiven Fertigungsschritten genauer zu untersuchen.