

Anwendungsmöglichkeiten des 3D-Betondrucks im Bauwesen

Der 3D-Betondruck steht trotz aller Fortschritte in der architektonischen Anwendung noch am Anfang seiner Entwicklung. In der Bautechnik eröffnet diese neue, effiziente und ressourcenschonende Herstellungsmethode für Planer und Ausführende neue Denkansätze und ungeahnte ökonomische und gestalterische Potenziale.

Text Georg Grasser Fotos Paris Tsitsos

Das Potenzial des 3D-Druck-Verfahrens

3D-Druck ist derzeit in aller Munde. Zahlreiche Medienmeldungen sowie Wirtschaftsforschungen, die hohe Wachstumsprognosen voraussagen, unterstreichen die allgemeine Präsenz der additiven Fertigungstechnik. Erste Ansätze dazu wurden in den 1980er Jahren entwickelt und patentiert. Zu dieser Zeit wurden quasi alle Produkte in industrieller Massenfertigung hergestellt. Es gab aber ein paar Nischen, weshalb diese Technologie schon damals relevant war und in die Entwicklung einiger Unternehmen aufgenommen wurde.

Beschränkter Zugang zu Ressourcen sowie limitierte Lagermöglichkeiten waren beispielsweise Probleme im militärischen Bereich, weshalb eine lokalisierte Produktion durch 3D-Druck als vielversprechende Lösung dieser Probleme gesehen wurde. Ein weiterer Vorteil dieser Technologie ist natürlich, dass mit dem gleichen System unterschiedlichste Objekte realisiert werden können.

Seit dem Start dieser Entwicklungen haben zahlreiche Verfahren sowie Materiallösungen für die additive Fertigung den Weg auf den öffentlichen Markt gefunden. Verschiedene Metalle können zum Beispiel durch punktuell Laser-Sintern verarbeitet werden. Dies wird unter anderem im Medizinsektor zum Herstellen von Prothesen, oder in der Luftfahrt- und Automobilbranche auch schon für die Massenfertigung diverser Bauteile eingesetzt. Das bekannteste 3D-Druck-Verfahren ist das FDM (Fused-Deposition-Modelling), in welchem Schicht für Schicht dünne Extrusionen von heißem Plastik übereinandergelegt werden und somit schlussendlich ein räumliches Objekt entsteht.

Die Form oder Geometrie eines Objektes wird am Computer bestimmt. Hier wird das digital gezeichnete Objekt über diverse Softwarepakete in ein Protokoll umgewandelt, das an den 3D-Drucker geschickt und dort abgefahren wird. Für die digitale Vorbereitung gibt es inzwischen zahlreiche Softwarepakete sowie Ergänzungen, die zum Beispiel Topologieoptimierungen erlauben, in denen komplexe Geometrien mit einer perfekten Materialverteilung entstehen. Dadurch gibt es effiziente Abläufe, welche die Qualitäten von additiven

Verfahren perfekt ergänzen und diese inzwischen auch in der Massenfertigung relevant machen. Zusammengefasst kann gesagt werden, dass sich alle 3D gedruckten Bauteile, die in unterschiedlichen Industriebereichen realisiert werden, in den Geometrien entscheidend von herkömmlich gefertigten Bauteilen unterscheiden. Alle Objekte sind im Kontext des Herstellungsverfahrens sowie unter performativen Aspekten, z. B. Materialverbrauch oder statischen Anforderungen, entwickelt. Im Bauwesen gibt es prinzipiell dasselbe Potenzial – Freiheit in der Formentwicklung und eine ressourcenschonende Produktion durch digitalisierte Prozesse und Verfahren. Das sollte in der Zukunft eine individualisierte, kostengünstige und insbesondere auch eine nachhaltige Produktion im Bauwesen ermöglichen. 3D-Betondruck für das Bauwesen weicht jedoch stark von anderen, in der Industrie etablierten, additiven Verfahren ab. Neben den komplexen Materialeigenschaften von Beton spielen vor allem die Größenverhältnisse und das dadurch resultierende Gewicht eine enorme Rolle.

Ein Haus aus dem 3D-Drucker

Seit Jahren wird medienwirksam über Häuser aus dem 3D-Drucker berichtet, bis vor kurzem aber nur durch Visualisierungen kommuniziert. Inzwischen haben eine Reihe von Unternehmen erste Projekte realisiert, unter anderem von dem chinesischen Unternehmen WinSun oder zuletzt auch von den Firmen COBOD in Dänemark und PERI in Deutschland. Generell gibt es im europäischen Raum in jedem Land zumindest eine Firma oder Forschungseinrichtung, die sich diesem Thema widmet und gleichzeitig unterschiedliche Ansätze verfolgt. Grundsätzlich lässt sich wohl in „onsite“ (Vorortproduktion) und „offsite“ (Fertigteilproduktion) unterscheiden, was sich sowohl in Hinsicht der automatisierten Drucksysteme als auch in den Anforderungen des Materials widerspiegelt.

Im Kontext „Haus aus dem 3D-Drucker“ wird überwiegend auf eine Vorortproduktion referenziert. Aktuell wird für dieses Verfahren meist ein Drei-Achsen-Portalsystem

verwendet, das ebenfalls für die kleinen Modellbau-Drucker angewandt wird, nur wesentlich größer. Der mögliche Bauraum wird hierbei durch die Dimension des Robotersystems bestimmt. Nach dessen Aufbau auf der Baustelle werden tatsächlich Hausgrundrisse Schicht (Layer) für Schicht aufgebaut. Dementsprechend ist jeder einzelne Layer relativ lang und wird meist mit einem von Grund auf steiferen Beton umgesetzt.

Beim Ansatz der Fertigteilproduktion werden meistens Industrieroboter verwendet, die zwar einen beschränkten Bauraum bieten, gleichzeitig aber sehr flexibel und präzise sind. In der Regel verfügt ein Industrieroboter über sechs Freiheitsgrade (Achsen) und kann deshalb nicht nur vertikal von oben Material extrudieren, sondern auch in schiefen Ebenen arbeiten. Die Präzision erlaubt das Arbeiten mit geringeren Schichthöhen und -breiten und kann so eine gleichmäßige Oberfläche sowie formtreue Bauteile gewährleisten. Durch den kleineren Bauraum wird oft mit Zwei-Komponenten-Materialien gearbeitet. Das bedeutet, der Beton wird mit einem Beschleuniger bei der Aushärtung unterstützt. Prinzipiell kann auch mit kleineren Toleranzen gearbeitet werden, was Potenziale in der Zusammenarbeit mit anderen Gewerken birgt.

Beide Ansätze arbeiten immer mit der Extrusion von Beton, was das charakteristische Bild erzeugt. Die einzelnen Layer lassen sich an der Oberfläche ablesen und prägen das Gesamtbild aller Objekte, wobei bis dato ganz unterschiedliche Qualitäten in der Gleichmäßigkeit und Feinheit erzielt werden. Immer wieder gibt es Diskussionen bezüglich der Glättung dieser Layer, um die gewohnt ebene Oberfläche zu erreichen. Grundsätzlich sollte der Layer aber als Ausdruck der Technologie gesehen werden, so wie jede andere Bauweise auch ein für sich charakteristisches Bild erzeugt.

Trotz aller Fortschritte steht der 3D-Betondruck in der architektonischen Anwendung noch am Anfang der Entwicklung. Die derzeit von der Bauindustrie entwickelten 3D gedruckten Häuser sind meist Repliken von uns bekannten Haustypen, die in einem konstruktiven Kontext von Ziegel- oder Betonwänden mit Stahlbetondecken entwickelt wurden. Gleichzeitig darf nicht vergessen werden, dass viele der grundsätzlichen Überlegungen zum 3D-Betondruck-Prozess, wie er aktuell im Vorort-Verfahren demonstriert wird, zwischen 1990 und 2000 durch Behrokh Khoshnevis¹ skizziert und teilweise patentiert wurde.

Hier wird noch hauptsächlich versucht, möglichst kostengünstig und schnell zu drucken, um das quantitative Potenzial zu forcieren. Dazu gehören unter anderem die Geschwindigkeit, die damit verbundenen Arbeitsstunden, oder die Integration von Leerverrohrung für die Haustechnik. Trotzdem müssen Oberflächen nachträglich immer noch geschliffen oder verputzt werden. Geometrische Freiheiten werden kaum genutzt und räumliche Entwicklungen begnügen sich mit dem Status quo.

Um das Thema 3D-Betondruck weiterzuentwickeln, ist es jedoch wichtig zu sehen, dass das Verfahren neben ökonomischen auch gestalterische Potenziale hat. Als Referenz kann hier, wie so oft, die Geschichte des Betonbaus herangezogen werden. Beispielsweise wurden immer wieder mal innovative und materialeffiziente Deckenstrukturen sowie Schalen- und Kuppelkonstruktionen umgesetzt, die danach aber, bedingt durch den hohen Aufwand in der Herstellung, oft wieder an Bedeutung verloren. Die damaligen Errungenschaften werden jedoch nun wieder aufgegriffen und in Forschungseinrichtungen werden erste Prototypen entwickelt, bei denen 3D-Betondruck als integrierte Schalung fungiert. Umso mehr gilt es in Zukunft vernünftige Wege zu finden, um nachhaltig qualitativ gute Architektur zur Verfügung zu stellen, sowie Projekte, Bauherren und Investoren für die Realisierung zu finden, damit individuelle Fertigung und kundenspezifische Lösungen vermehrt angeboten werden können.

Noch gibt es keine technischen Richtlinien und Normen für den 3D-Druck

Für den 3D-Betondruck im Hochbau braucht es jedoch noch viel Forschung, da es zur Umsetzung eine Vielzahl von Akteuren benötigt. Da 3D-Betondruck eine grundlegend neue Herstellungsmethode ist, gibt es für Planer und Ausführende kein Wissen zu Langzeiterfahrung. Auch die Normierung fehlt noch gänzlich. Die normativen Vorgaben des Hochbaus sind hierzulande meist schwierig oder nicht anwendbar, was wiederum einen finanziellen Aufwand durch experimentelle Nachweise bedeutet.

AVI

**EINFACH,
SCHNELL UND
SICHER!**

Perfekt für
schubbeanspruchte
Platten

QUERKRAFTELEMENTE **QE**

Erfahren Sie mehr auf www.avi.at

¹ Behrokh Khoshnevis ist Professor für Industrial & System Engineering, Mechanical & Aerospace Engineering und Civil & Environmental Engineering und ist Direktor des Zentrums für Rapid Automated Fabrication Technologies (CRAFT) an der University of Southern California. Er ist Erfinder des 3D-Druckers.

Andere Länder, wie die Niederlande oder die USA, scheinen mit dem Thema weniger konservativ umzugehen und es besteht ein allgemeines Interesse der Behörden und der Wirtschaft in diese Technologie zu investieren. Ebenso könnte 3D-Betondruck neue Denkansätze in der Bautechnik anstoßen. Betonbauteile verfügen üblicherweise über konventionelle Stahlbewehrung, um Zugkräfte aufzunehmen und so könnte eine Optimierung der Geometrie zu einer Lastbeanspruchung vornehmlich durch Druckkräfte führen, was dann auch in Materialeinsparung resultieren könnte. Oft fallen diese Ansätze dann jedoch einem erhöhten Schalungsauf-

Im Jahr 2017 konnte beispielsweise die TU Eindhoven die erste Fahrradbrücke aus dem 3D-Drucker in den Niederlanden umsetzen. Um die vorhandenen Richtlinien und technischen Vorschriften konventioneller Betonbautechnik anzuwenden und zu erfüllen, wurde die Brücke als vorgespannte Tragkonstruktion ausgeführt. Da keine Schalung notwendig war und sie im 3D-Druckverfahren einfach als Hohlkörper ausgeführt werden konnte, wirkte sich dieser Ansatz positiv auf die herstellungsbedingte emittierte CO₂-Menge aus.

Interdisziplinäre Zusammenarbeit ist nötig

In Österreich hat sich der Baustoffhersteller Baunit mit der Innovation des 3D-Drucks verschrieben und legte 2015 mit einer Kooperation mit der Universität Innsbruck, im Speziellen mit dem Institut für experimentelle Architektur, Abteilung Hochbau, den Grundstein dazu. Die Universität hatte dabei bereits einiges an Vorerfahrung, sowohl auf dem Gebiet der digitalen Fertigung mit Industrierobotern als auch im Bereich von parametrischer Entwurfsplanung, gesammelt. Als Ergebnis dieser Forschung und dem Ausblick auf ein wirtschaftliches Potenzial wurde 2017 das Spin-off *incremental3d GmbH* gegründet.

Hierbei sollten die Grundlagen mit Fokus auf Design und Gestaltung im Produktdesign erprobt, die erlernten Fähigkeiten sukzessive weiterentwickelt und in den Hochbau übergeführt werden.

Designobjekte werden mittlerweile vor allem in Zusammenarbeit mit Künstlern und Designern entwickelt und es wird eine Topf-Serie unter dem Namen *myPot* vertrieben. Sehr interessant ist dabei die Flexibilität und Logistik des Systems. Vom Entwurf bis zur Auslieferung vergehen dabei oft nur zwei bis drei Wochen, wobei der 3D-Drucker an einem Tag mehrere Objekte herstellen kann.

Fallbeispiele

Das Potenzial sowie die Herausforderungen der 3D-Betondrucktechnik wurden im Rahmen eines temporären Pavillons zum 350-jährigen Jubiläum der Universität Innsbruck im Jahr 2019 aufgezeigt, → siehe *Abbildung 2*.

In nur wenigen Wochen – von den ersten Entwurfskizzen bis zur Fertigstellung – wurde ein geometrisch komplexes Objekt in Zusammenarbeit von der *incremental3d GmbH*, der Universität Innsbruck, Baunit und Porr umgesetzt.

In Sachen Tragwerkstechnik wurden, dank langjähriger Erfahrung und der Vorreiterrolle im Bereich des 3D-Betondrucks der Universität Eindhoven unbürokratische Lösungsansätze entwickelt. Jedes der 47 Betonelemente des Pavillons wurde als für sich unabhängiges Tragwerk entworfen und individuell



1
Entwicklung einer Kleinserie in Kooperation mit dem Designer Philipp Aduatz, © Paris Tsitsos, Rupert Asanger

2
Der Jubiläumspavillon der Universität Innsbruck, 2019, © Rupert Asanger



wand zum Opfer. Hier könnte die 3D-Drucktechnik in Zukunft jedenfalls einen wichtigen Beitrag leisten und historische Prinzipien aus druckbeanspruchten Konstruktionen könnten zu relevanten Referenzen für Hoch- und Tiefbauanwendungen werden. In Kombination mit dem 3D-Druckverfahren würde eine aufwendige Schalung gänzlich wegfallen und das Material punktuell dort, wo es benötigt wird, noch präziser platziert werden. Es fällt somit kostenintensive Arbeit weg, es wird dadurch weniger Material verwendet und Ressourcen werden geschont.

analysiert. Dabei wurde die maximale Zugkraft des Betons nicht überschritten und die Bewehrung nur für zusätzlich statisch notwendige Sicherheit sowie einen effizienten durchgängigen Druckprozess in Betracht gezogen. An ausgewählten Elementen wurde mit innovativer Carbonfaserverstärkung gearbeitet. 3D-Betondruck ist ein additives Schichtungsverfahren. So kann die resultierende Materialeigenschaft kaum als heterogen betrachtet werden und daher lediglich in Richtung des Druckstrangs eine gewisse Konstanz der Zugaufnahme gewährleistet werden.

Zu diesem Zeitpunkt waren nur geringe experimentelle Materialwerte vorhanden, und so wurde der Material-Sicherheitsfaktor für ein Bauwerk dieser Klasse (CC1, RC1, EN 1990-1), statt der im Betonbau üblichen 1.5, auf 2.0 erhöht. Durch diese Einstufungen wurde die Geometrie des Tragwerks als Hohlkörper mit einer inneren Struktur modelliert. Obwohl die eingesetzte 3D-Drucktechnik im Herstellungsprozess adaptive Wandstärken im Bereich von 15 bis 35 mm erlaubt, wurde für die Modellierung mit einer Konstanten von 30 mm vorgenommen und die innere Struktur ausschließlich orthogonal ausgeführt, um eine sichere Kontrolle des Druckprozesses gewährleisten zu können und das Bauteil weniger anfällig auf Schwindung oder ungleichmäßige Erhärtung zu machen. Beachtung fand bei der Dimensionierung des Tragwerks auch, dass ein durchgehender Druckpfad erreicht wurde. Unabhängig davon wurde in den unteren Bereichen der großen vertikal stehenden Elemente ein um das vierfach höherer Materialauftrag angewandt. Dies begünstigt eine Verlagerung des Schwerpunkts, erhöht so die Stabilität der Elemente und optimiert punktuelle Lastaufnahmen zum Fundament → siehe Abbildung 3.

Ein entscheidender Faktor für die Umsetzung des Projektes war aber auch die zu diesem Zeitpunkt bereits weit fortgeschrittene Material- und Druckprozesstechnik mit einem guten Zusammenspiel der Fördertechnik. Eine ideale Konsistenz des 2-komponentigen Materials war für die geometrisch komplexen Objekte entscheidend. Das von Baunit entwickelte Material „PrintCret 230“ wies dabei eine mittlere Druckfestigkeit von 55 MPa und eine Zugfestigkeit von 10 MPa auf. Die Rohdichte lag bei 1.990 kg/m³ und das Größtkorn bei 2.0 mm. Das in diesem Projekt verwendete System hatte eine Arbeitsleistung von bis zu 600 kg/Stunde.

Ein ebenso wichtiger Punkt in der Herstellung von 3D gedruckten Betonelementen war die Maschinenprogrammierung, ein Spezialgebiet der incremental3d GmbH. Da die zu fertigenden Elemente unterschiedliche Druckbahnstärken zur Erzielung der modellierten Geometrie aufweisen, war die Verwendung eines Sechs-Achs-Industrieroboters ein entscheidender Vorteil. Es wurde demnach nicht im herkömmlichen Sinne nur über horizontale Druckebenen Material aufgebaut, sondern der Druckkopf passte sich kontinuierlich an die Druckebene an. Das Zusammenspiel all dieser Parameter ermöglichte letztendlich eine effiziente und ressourcensparende Herstellungsweise. In Zahlen bedeutet das, dass beim umgesetzten Versuchsbau nur



3

Jedes Bauteil wurde dem Lastfall entsprechend optimiert



4

3D gedruckte Außenanlagen am Campus Technik der Universität Innsbruck

25 % der Materialmenge im Vergleich zu einer konventionellen Herstellungsvariante aus Beton benötigt wurde. Das ist ein starkes Argument für die weitere Entwicklung dieser Technik im Bereich Hochbau und Architektur. Es sollte aber auch erwähnt werden, dass Sonderformen, die mit 3D-Betondruck einfach herstellbar sind, oft in Logistik und Aufbau aufwändiger sein können und deshalb eine integrierte Planung vom Entwurf bis zur Montage nötig ist.

Ein weiteres Anwendungsbeispiel konnte die incremental3d GmbH am Campus Technik der Universität Innsbruck umsetzen. Die Architekten ar:ck planten eine Adaptierung der Außenanlagen des Studierendenwohnheimes Europaheim, wobei das Augenmerk auf die Gestaltung des neuen Innenhofs gelegt wurde. Geschwungene Formen und ein fließender Übergang zum bestehenden Terrain ließen eine herkömmliche Ausführung mit Stützwinkel aus dem Baukastensystem ausscheiden. Stattdessen wurden 158 maßgeschneiderte Bauteile mit Variationen in Höhe und Radius ausgeführt. Die Fugenteilung zwischen den Bauteilen erlaubte große gestalterische Freiheit und so konnte auch ein fließendes, zartes Spiel zwischen konvexen und konkaven Vertikalen realisiert werden.

Die notwendige Traglast der filigranen Bauteile konnte durch die Integration einer textilen Bewehrung auf der Rückseite erreicht werden.

Ausblick

Das große Interesse für ähnliche Projekte speziell in der Landschaftsgestaltung zeigt, dass es einen Markt für den 3D-Betondruck gibt und Planer und Bauherren sich dieser Möglichkeit bedienen wollen. Ob sich diese Innovation in der Bauwirtschaft in breiterer Anwendung und ebenso schnell wie in anderen Industriebereichen durchsetzen kann, bleibt abzuwarten.



Dipl.-Ing. Georg Grasser, MAS
Senior Scientist am Institut für experimentelle Architektur,
Abteilung Hochbau der
Universität Innsbruck und
Mitbegründer des Spin-Off
incremental3d GmbH.
georg.grasser@incremental3d.eu