

3D-Druck im Sonderschalungsbau

J. Teizer, A. Blickle, M. König, H. Mattern, O. Leitzbach, T. King, D. Guenther

1 Zusammenfassung

Das Thema 3D-Druck ist derzeit in vielen Medien präsent. Die unter dem Begriff verstandenen Techniken wecken hohe Erwartungen, die Geschäftsvolumen sind jedoch, verglichen mit konventionellen Fertigungsmethoden, noch relativ gering. Gerade in der Bauindustrie werden diese Techniken bisher kaum eingesetzt. Warum findet eine Technik, die die Gestaltungsmöglichkeiten herkömmlicher Methoden übertrifft, in einer kreativen Branche wie dieser noch keine breitere Anwendung?

Dreidimensionale (3D)-Druckverfahren weisen als digitale Fertigungsmethoden eine Reihe entscheidender Vorteile auf. Die durchgängige und zielgerichtete Prozesskette vom Entwurf bis zur Ausführung mittels Computer schafft neue Freiheiten und ermöglicht kurze Produktionszeiten – oft nur wenige Tage vom Entwurf bis zum fertigen Bauteil. Im Gegensatz dazu ist die analoge Fertigung von vielen Schnittstellen zwischen nicht automatisierten Gewerken sowie einer starken Rückwirkung der Fertigungstechnik auf den Entwurf gekennzeichnet, was einen höheren Zeitaufwand von oftmals Wochen oder Monaten bedeutet. Gerade der 3D-Druck auf Baustellen birgt enormes Marktpotenzial, bedarf aber noch eingehender technischer als auch wirtschaftlicher Lösungen.

Der 3D-Druck wird in vielen anderen Branchen auch außerhalb der Prototypen- und Einzelteilerfertigung eingesetzt. Dazu zählen unter anderem der Maschinenbau, die Gießereibranche, die Medizintechnik und eine Vielzahl von Be-

reichen in der Forschung und Entwicklung, des Designs und in der Ausbildung. Im Bauwesen kommen die Vorzüge der Technik bisher vor allem beim Erstellen von 3D-Gebäudemodellen im kleinen Maßstab und als Prototyp zur Visualisierung einzelner Bauteiltypen in der Endfertigung nennenswert zur Anwendung.

Dieser Artikel stellt konventionelle Konstruktionsmethoden für den Aufbau von großflächigen und komplexen geometrischen Strukturen vor, die auf zweckgebauten und automatisierten 3D-Druckmaschinen basieren. Der Artikel zeigt somit erste Ansätze zur fehlenden Verbindung zwischen anspruchsvoller architektonischer Gestaltung und einer effizienten Baurealisierung. Häufig bekannte Vorteile und Einschränkungen bestehender 3D-Druckprozesse, einschließlich der Modellierungs-, Druck- und Oberflächenbehandlungs-Prinzipien, werden dabei überprüft. Die Bedeutung der Auflösung, der Geschwindigkeit und der Qualität der Materialien im 3D-Druck wird erklärt. Ergebnisse einer Umsetzung anhand komplexer Schalungselemente im Betonbau werden gezeigt und erläutert. Vorteile und Einschränkungen aus der Perspektive eines Bauunternehmens werden erörtert, um zu verdeutlichen, was es benötigt, den 3D-Druck als anerkannte Bauverfahrensmethode zu etablieren.

2 Einleitung

2.1 Allgemein

Der 3D-Druck, auch als additives Produktionsverfahren bekannt, erweckt in den Medien nach wie vor hohe Aufmerksamkeit. In vielen Industriezweigen ist der 3D-Druck, der oftmals den herkömmlichen Methoden überlegen ist, zu einer etablierten Technologie für die Herstellung von 3D-Objekten geworden. Die überlagerte Produktion von skalierten Prototypen und kleineren Serien umfasst typischerweise automatisierte computergesteuerte Systeme, die auf apriori gestaltete digitale 3D-Modelle angewiesen sind. Die bestehenden Prinzipien der Modellierung, des Druckens und der Veredelung basieren auf verschiedenen Materialien wie zum Beispiel verschiedenen Papiersorten, Polymeren oder Metallwerkstoffen, die in die 3D-Form geschnitten, geschmolzen oder erweicht werden.

In der automatisierten Fertigung spielen 3D-Modelle eine wichtige Rolle. Im Bauwesen erweitert mittlerweile die BIM-Methode (Building Information Modeling) die traditionelle 3D-Modellierung. BIM vereinheitlicht die nahtlose Integration und Verwaltung vieler zuvor eigenständig definierter Prozesse der Planung, Planung, Konstruktion sowie dem Betrieb und der Wartung einschließlich der Terminierung (4D), Kostenschätzung und Baufortschrittsverfolgung (5D). Gemeinsam stellen sie die notwendige Basis der Informationen für handelsübliche oder zu entwickelnde 3D-Druckstrategien für den Bau dar.

Während die Vorteile und Grenzen der 3D-Druckprozesse eine sorgfältige Überprüfung für ihre endgültige Anwendung erfordern, hat selbst die Bauindustrie bereits erfolgreich mehrere industrielle Anwendungen übernommen. Diese sind oftmals noch Prototypen, zum Beispiel aufeinander-

Jochen Teizer

jochen@teizer.de
RAPIDS Construction Safety and Technology Laboratory

Markus König

koenig@inf.bi.rub.de

Hannah Mattern

hanna.mattern@rub.de
Ruhr-Universität Bochum
Lehrstuhl für Informatik im Bauwesen

Alexander Blickle

alexander.blickle@zueblin.de
Ed. Züblin AG

Olaf Leitzbach

lb@meva.de
MEVA Schalungs-Systeme GmbH
Haiterbach, Germany

Tobias King

tobias.king@voxeljet.de

Daniel Guenther

daniel.guenther@voxeljet.de
voxeljet AG
Friedberg, Germany

derfolgende Betonschichten in der Fabrikation einer gewünschten Struktur oder Form. Wenngleich diese ersten Erfolge des 3D-Druckens wichtig sind, bedarf es der genauen Definition von Anforderungskriterien, um in naher Zukunft 3D-Fertigungsmethoden in der Baupraxis zu etablieren.

Eine der wichtigsten Herausforderungen im Bauwesen ist die Notwendigkeit eines großformatigen 3D-Druckens komplexer geometrischer Formen im Rahmen von Projekten, in denen Bauzeit, Kosten und Qualität die vorherrschenden und bestimmenden Erfolgsfaktoren sind. Während Komplexität und Umfang der geplanten Struktur in der Regel während des architektonischen Entwurfsprozesses gelöst werden können, scheitert die endgültige Fertigung von großformatigen geometrischen Formen oftmals noch an der technischen Realisierbarkeit und Wirtschaftlichkeit.

2.2 Ursprung und bisherige Entwicklung im 3D-Druck

Der 3D-Druck ist in vielen Branchen für die Herstellung von physikalischen Objekten zu einer etablierten Technologie geworden. Einer der Ursprünge des sogenannten additiven Produktionsverfahrens ist ein Patent des Massachusetts Institute of Technology [1]. Es beschreibt einen Prozess zum Herstellen von Bauteilen anhand des schichtweisen Aufbaus von Materialien mittels Automation. Die überlagerte Produktion von skalierten Prototypen und kleineren Serien verwendet in der Regel automatisierte und computergesteuerte Systeme, die auf apriori gestaltete digitale 3D-Modelle angewiesen sind. In vielen Industrien gelten beim 3D-Druck die allgemeine Grundsätze für die 3D-Modellierung, das Drucken und die Veredelung unter Verwendung des Schneidens, Schmelzens oder Erweichens von Papier, Polymer oder Metallmaterialien.

Während die Vorteile und Grenzen der 3D-Druckprozesse eine sorgfältige Überprüfung für ihre endgültige Anwendung erfordern, hat die Bauindustrie bereits einige industrielle Anwendungen erfolgreich eingeführt, zum Beispiel nach dem Prinzip des Contourcrafting. Eine der grundlegenden Herausforderungen aus der Sicht der Praktiker ist jedoch die Notwendigkeit eines großformatigen 3D-Druckens komplexer geometrischer Formen bei Bauprojekten, bei denen Bauzeit, Kosten und Qualität die vorherrschenden und bestimmenden Erfolgskriterien sind. Obwohl die computergestützte digitale Planung vor der Bauausführung zu kürzeren Produktionszeiten führen kann, gilt es aus bauunternehmerischer Sicht zuerst den Beweis einer wirtschaftlichen Anwendung unter Kontrolle der Qualität zu erlangen.

3 Funktionsprinzipien von 3D-Druckprozessen

Das fundamentale Prinzip des 3D-Drucks ist, dass eine 3D-Aufgabenstellung auf eine 2D-Aufgabenstellung reduziert wird, das heißt ein beliebig geformter 3D-Körper wird im Rechner in 2D-Schichten zerlegt. Diese zunächst virtuellen Schichten werden in ein reales Objekt übersetzt, indem aufeinanderfolgende Schichten erzeugt und einzeln bearbeitet werden. Dabei muss jede neue Schicht jeweils mit der vorherigen verbunden werden. Die nach diesem Prinzip arbeitenden Verfahren werden aufgrund des wiederholten Hinzufügens von Volumen auch generative oder additi-

ve Fertigungsverfahren genannt. Dieses Formverfahren ermöglicht eine nahezu unbegrenzte Geometriefreiheit, Einschränkungen sind fast nur noch durch die Werkstoffe gegeben. Dieses Grundprinzip setzen die heute gebräuchlichen Maschinen in unterschiedlicher Weise um. Häufig wird dabei eine Arbeitsplattform eingesetzt, die sich während des Fertigungsprozesses schichtweise absenkt. Manche Verfahren tragen Pulvermaterialien auf, die dann mit einem Laser verändert oder mit einem Tintenstrahlkopf verklebt werden. Andere Verfahren bringen Material durch große oder kleine Düsen direkt auf. Überhänge an den gewünschten Bauteilen werden hier meist durch spezielle Hilfsstrukturen gestützt. Im Folgenden werden die wesentlichen gängigen 3D-Druckprozesse beschrieben und anschließend verschiedene Anwendungsbeispiele im Bauwesen untersucht.

3.1 Stereolithographie

Basis für das SLA-Verfahren ist ein mit einem flüssigen lichtaushärtenden Kunstharz gefüllter Behälter und eine Bauplattform, die in dieses Bad abgesenkt werden kann (Bild 1). Die Schichten werden durch Aushärtung des Harzes mit einem Laserstrahl auf der Harzoberfläche erzielt. Nach dem Aushärten senkt sich die Plattform um wenige Zehntel Millimeter ab, und das Harz wird glattgestrichen.

Diese Schritte werden so lange wiederholt, bis das Bauteil komplett gefertigt ist. Überhänge müssen durch besondere Strukturen gestützt werden. Nach dem Bauen wird das Bauteil aus dem Harzbad gefahren, getrocknet und gegebenenfalls nachbelichtet. Danach werden die Stützstrukturen entfernt, indem sie abgebrochen werden. Es entstehen Bauteile mit hoher Festigkeit, transparenten Eigenschaften sowie einer guten Auflösung, die sowohl Krümmungen sauber abbildet als auch feinste Detaillierungen ermöglicht.

Verwendet werden im Wesentlichen Polymerhybridharze des Typs Epoxid/Acryl. Die Harze sind zum Teil mit keramischen Zuschlägen gefüllt. Allgemein erreicht die Festigkeit Größenordnungen, die von 2K-Gießharzen bekannt sind. Die größten Maschinen verfügen über Nutzvolumen, die sogenannten Bauräume, von bis zu zwei Kubikmetern Rauminhalt. Dieses Verfahren eignet sich im Architekturbereich insbesondere für den Modellbau.

3.2 Selektives Lasersintern

Bei diesem Verfahren wird Pulver in einer dünnen Schicht auf eine Bauplattform aufgebracht, die sich meist in einem Stahlbehälter, einer so genannten Baubox, bewegt. Anschließend wird es schichtweise, dem jeweiligen Bauteilquerschnitt entsprechend durch einen über die Kontur streichenden Laserstrahl aufgeschmolzen und so verbunden (Bild 2). Die erhöhten Temperaturen im Prozessraum ermöglichen die Reduzierung der notwendigen Energie zum Aufschmelzen mit dem Laser. Die einzelnen Schritte werden so lange wiederholt, bis das Bauteil fertig in dem Pulverblock vorliegt. Nach Abkühlen des Baubehälters werden die Bauteile vom umgebenden losen Pulver befreit. Die Qualität der Bauteiloberfläche hängt vom verwendeten Pulver ab. Normalerweise kommen Partikel mit einem Mittelkorn von circa 50 µm zum Einsatz, das heißt es entstehen poröse Oberflächen von geringer Rauheit. Es lassen sich sowohl Metalle wie Aluminium, rostfreie Stähle oder Titan als auch Kunststoffe, meist Polyamid 11 oder Polyamid 12, ver-

arbeiten. Die Materialeigenschaften sind mit denen konventionell verarbeiteter Werkstoffe vergleichbar. Üblicherweise sind die Bauteile aufgrund des Thermomanagements der Maschinen nicht wesentlich größer als ein Achtel Kubikmeter. Eingesetzt wird dieses Verfahren hauptsächlich für die Einzelstück- oder Kleinserienfertigung hochwertiger und hochbelasteter Anlagenteile im Maschinenbau.

3.3. Fused-Deposition-Modeling und Contourcrafting

Zentrales Element bei diesem Verfahren ist eine meist beheizte Extrudierdüse, durch die plastifizierbares Baumaterial strangförmig gepresst wird (Bild 3). Die Bewegung der Düse erfolgt relativ zur Bauplattform. Dabei wird, wie bei den oben beschriebenen Verfahren, ein Schnittbild des Bauteils durch Abfahren der Kontur und Schraffieren des Innenbereichs aufgebracht. Überhänge sind auch bei diesem Verfahren durch Stützstrukturen abzufangen. Diese werden oft von einer zweiten Düse unter Verwendung eines anderen Materials aufgebracht. Durch die Düse können unterschiedliche Materialien wie beispielweise Kunststoffe, Wachse, Betonpasten oder Keramikpasten gepresst werden. Am üblichsten sind aufgeschmolzene Kunststoffe wie ABS, Polycarbonat oder Polylactide. Nach dem Bauprozess wird das Bauteil von der Bauplattform gelöst und die Stützstruktur entfernt, je nach Material durch Ausbrechen oder Auswaschen.

Eine Variante ist das Contourcraftin, bei dem eine verstellbare Wandung das aus der Düse gepresste, noch nicht feste Material an der freien Ausbreitung hindert [2], [3]. Diese Wandung besteht aus parallelen Platten, die um die Düse gedreht werden können. Dies ermöglicht beispielsweise, schnell abbindenden Beton zu senkrechten Wänden zu formen. Das beschriebene Verfahren erzeugt, verglichen mit den oben genannten Verfahren, sehr geringe Detailauflösungen und Oberflächengüten. Die Volumenleistung würde erst bei sehr großen Düsen als hoch einzuordnen sein, wobei dann womöglich die Dateilauflösung geringer wird. Die Festigkeit ist relativ gering und entspricht in der Schichtebene dem Basiskunststoff, in Richtung der Schichtung ist sie wesentlich schwächer. Zur Fertigung stehen bereits Bauräume von mehr als zehn Kubikmetern zur Verfügung.

3.4 3D-Druck mit Tintenstrahldruckkopf

Der Einsatz einer flüssigen Tinte und deren flächiger Auftrag sind eng verwandt mit dem Drucken auf Papier. Ein Tintenstrahldruckkopf mit meist vielen tausend Düsen wird im Gegensatz zu den oben beschriebenen Verfahren nicht entlang einer Kontur geführt, sondern überstreicht das Baufeld mäanderförmig (Bild 4). Dabei werden die matrixförmig angeordneten Düsen entsprechend der Kontur angesteuert. Die Tinte wird erst nach Verlassen des Druckkopfs fest, beispielsweise durch eine von UV-Licht angeregte Polymerisation. Nicht pulverbasierte Verfahren drucken Stützkonstruktionen und Bauteil jeweils mit anderen Materialien – ähnlich wie es beim Fused-Deposition-Modeling nötig ist.

Bei pulverbasierten Verfahren wird ähnlich wie beim Lasersintern zunächst Pulver aus unterschiedlichsten Materialien vollflächig verteilt. Dieses wird dann durch das schichtweise Aufdrucken der Tinte verklebt und der Vorgang solange wiederholt, bis das Bauteil fertig gestellt ist. Der Entpackvorgang ist vergleichbar mit dem jeweils oben

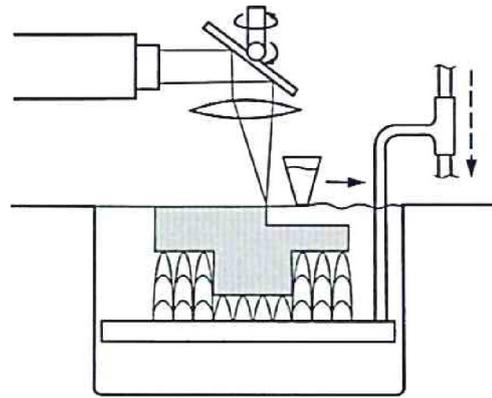


Bild 1. Stereolithographie [1]

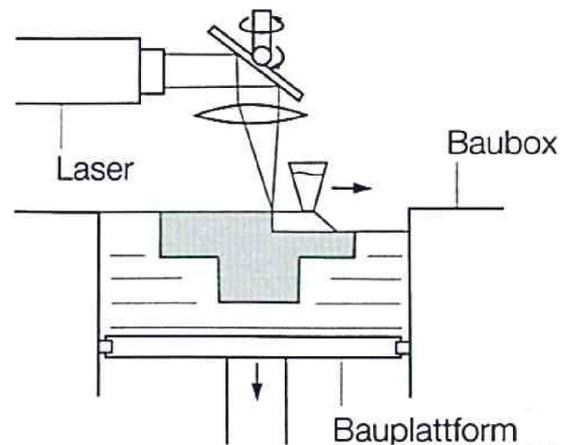


Bild 2. Schematische Darstellung des Lasersintern 3D-Druckverfahren [1]

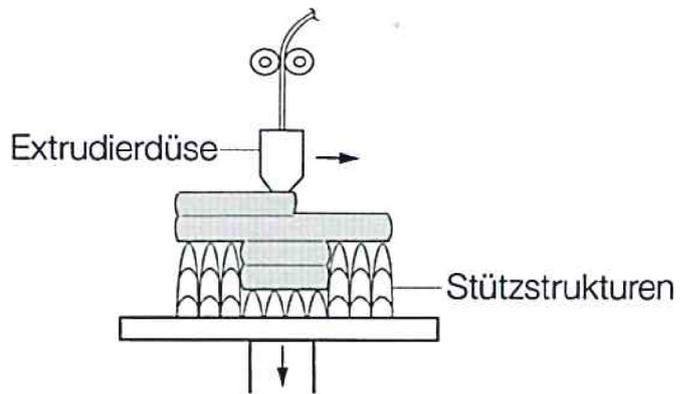


Bild 3. Fused Deposition Modeling-Verfahren (FDM) [1]

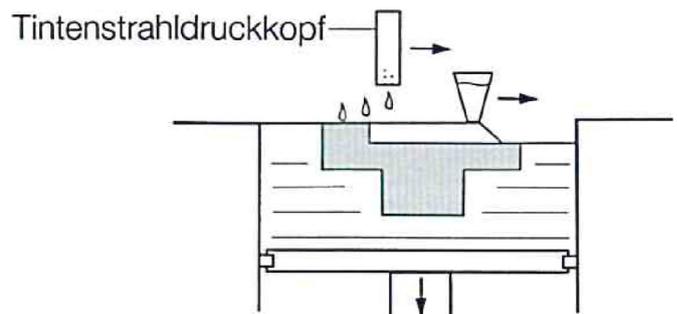


Bild 4. Pulverbasiertes Drucken [1]

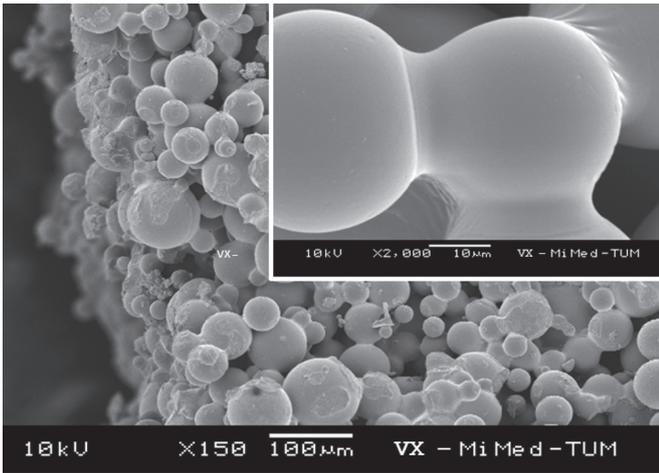


Bild 5. Detail einer Verbindung von Materialien

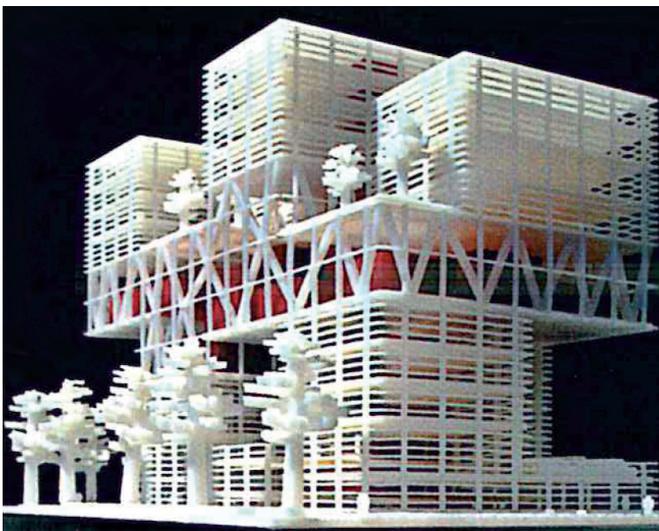


Bild 6. Farbiger gedrucktes Gebäudemodell [1]

beschriebenen Vorgehen. Auch bei diesen Techniken sind hohe Auflösungen möglich.

Pulverbasierte Verfahren sind durch die Korngröße des Materials eingeschränkt, die nicht beliebig reduziert werden kann. Durch die vielen Düsen sind große Volumenleistungen möglich. Die Festigkeit ist bei pulverbasierten Verfahren im Allgemeinen gering. Sie kann durch ein nachfolgendes Einbringen von 2K-Kunstharzen gesteigert werden [4]. Das Detail einer solchen Verbindung ist beispielhaft anhand eines PolyPor Systems, das einen chemischen Aktivator im Pulver vorsieht, in **Bild 5** dargestellt. Der Bauraum der derzeit größten Produktionsmaschine umfasst 8 m³. Dies lässt im Bauwesen nur eine beschränkte Anzahl an Anwendungen zu [5].

3.5 Verfahrenskosten im 3D-Druck

Die Gesamtkosten für 3D-Druckverfahren umfassen die Kosten für Maschinen, Material sowie Handarbeit, die hauptsächlich beim Entpackvorgang auftritt. Die Stereolithographie und das Lasersintern liegen am oberen Ende der Skala, im Bauwesen betragen die Kosten in 2015 bei beiden Verfahren für ein Volumen von einem Kubikmeter bei über 30 000 Euro. Beim pulverbasierten 3D-Drucken im Werkstoff Sand liegen sie dagegen nur bei circa 3 000 Euro/m³. Noch günstiger ist, je nach Material, das FDM-

Verfahren mit Kosten unter 2 000 Euro/m³. Je nach Verfahren lassen sich die zur Verfügung stehenden Bauräume mehr oder weniger gut ausnutzen. Ein Beispiel zur besseren Veranschaulichung: Es sollen Fassadenelemente mit einer Fläche von 1 m² und Ornamenten mit 10 cm Tiefe erzeugt werden. Pro Kubikmeter können circa zehn Elemente erstellt werden. Damit würde der Quadratmeter Fassadenfläche mit Lasersintern 3 000 Euro kosten, mit pulverbasiertem 3D-Druck 300 Euro und mit FDM 200 Euro.

3.6 Bisherige Anwendungsgebiete

In der Anwendung wird unterschieden zwischen dem direkten Einsatz des 3D-gedruckten Werkstücks und der indirekten Erzeugung des Zielbauteils über 3D-gedruckte Werkzeuge.

Vom Ausdrucken von Gebäudemodellen für Präsentationszwecke auf 3D-Druckmaschinen machen bereits viele Architekten Gebrauch, bislang hauptsächlich in Form von einfarbig weißen Modellen. Eine Besonderheit beim pulverbasierten 3D-Druck ist der Ausdruck in Farbe (**Bild 6**). Einer größeren Verbreitung in Entwurfsprozessen stehen allerdings derzeit noch hohe Kosten und das Fehlen einer komfortablen Datenaufbereitung entgegen.

Das oben beschriebene Lasersintern-Verfahren kann Bauteile mit hoher Auflösung und ausgezeichneten Festigkeitswerten erzeugen, wie beispielsweise für gesinterte Profile als Muster für Kunststofffenster oder Armaturen. Eine weitere Fertigungstechnik ist das vom italienischen Ingenieur Enrico Dini entwickelte Verfahren D-Shape, das erstmalig 2009 vorgestellt wurde.

Das chinesische Unternehmen Winsun entwickelt und produziert ganze Häuser mittels 3D-Druck. Mit einer Technik ähnlich dem Contourcrafting werden Wandelemente gefertigt, die im Wesentlichen extrudierte Prismenkörper darstellen, die ihre Querschnittskontur über die Höhe des Körpers nicht ändern. Die so erzeugten, im Vergleich zu anderen 3D-Drucktechniken sehr einfachen Elemente lassen sich zu Bauteilen zusammensetzen und mit weiteren Elementen wie Fenstern verbinden – die derzeitige Bandbreite der Pilotprojekte mehrerer entstehender 3D-Druckfirmen reicht von einfachen Volumenkörpern von Einfamilienhäusern (**Bild 7**) über eine Villa bis zu einem fünfgeschossigen Wohnungsbau. Obwohl die Fertigungsart dem des Betonfertigteilebaus sehr ähnelt, ist die Formfreiheit und Oberflächenbeschaffenheit aufgrund des Contourcrafting-Verfahrens der Einzelemente hier gegenüber den etablierten Bauverfahren allerdings gering und wird mit hoher Sicherheit weiterentwickelt werden müssen, bevor es für die Bau Praxis in der Fertigung großvolumiger Elemente relevant sein wird. Konzeptentwicklungen, unter anderem in Deutschland durch die Verwendung von Anbaugeräten an Betonpumpen [6], bedürfen jedoch erst der weiteren Entwicklung und Testens.

Alternativ zur direkten Fertigung nutzen die indirekten Verfahren die erzeugte Form als Werkzeug. Ein Beispiel können Sandformen sein, die für Metallgussanwendungen bereits in großen Stückzahlen gedruckt werden. Solche Werkzeuge können auch für Mineralguss oder Beton verwendet werden. Wie beim Metallguss ist die Form meist nach einem Abguss verloren, da sie mechanisch vom Gussteil entfernt wird. Von Vorteil ist die Möglichkeit, vor dem Guss Armierungen in die Form einbringen zu können. **Bild 8** zeigt einen Formkasten für ein Waschbecken aus gegossenem



Bild 7. Aus gedruckten Grundelementen zusammengesetztes Haus der Firma Windsun [1]

Beton. Dieser besteht aus zwei Hälften. Alle Strukturen im späteren Waschbecken sind in der Gussform vorhanden. Die Eingussspalte ist im Vergleich zum Metallguss wesentlich größer ausgeführt. Nach dem Aushärten des Betons wird die Form durch einen Hochdruckreiniger vom Werkstück abgetrennt. Abschließend erfolgt nur noch die Montage der Armatur. Ein sehr ähnliches Verfahren wurde auch für die Erstellung einer von Philippe Morel entworfenen Architekturskulptur angewandt (Bild 9). Die mittels pulverbasiertem 3D-Druck aus Gießereisand hergestellte Form wurde dabei mit ultrahochfestem Beton (UHPC) ausgegossen.

Ebenso ist bei der Verwendung von 3D-gedruckten Formen auch der Aufbau von Hybridschalungen möglich. Hierbei wird eine konventionelle Plattenschalung mit 3D-Elementen verbunden. Damit lassen sich sehr große Bauteile kostengünstig erstellen. Eine Variante dieser Hybridtechnik ist das Einlegen von 3D-Teilen in konventionelle Schalungen. Weitere Anwendungsgebiete sind gedruckte Sichtschutzwände (Bild 10) und aus Halbschalen gefertigte Kleinsthäuser (Bild 11). In letzterer Anwendung sind weitere bauliche Elemente in eigentlich monolithische Bauteile zu integrieren, wie Bewehrung, Leerrohre und Kabel.

4 Anwendungsfall Sonderschalungsbau am Projekt „Hauptbahnhof Stuttgart 21“

4.1 Ziele und Arbeitsschritte

Die Fallstudie die präsentiert wird, betraf die Unternehmen Ed. Die Züblin AG (Bauunternehmen der STRA-

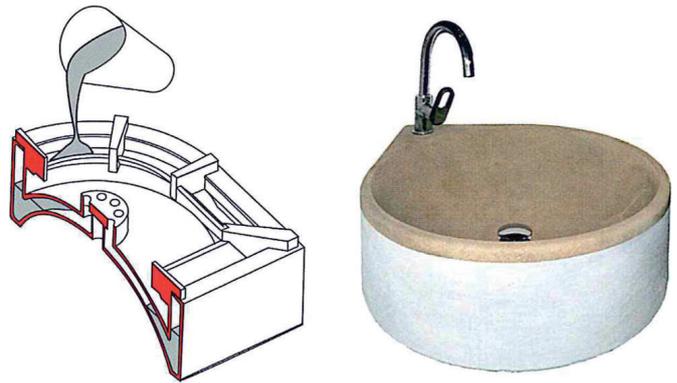


Bild 8. Waschbecken aus Betonguss: schematische Darstellung Gussvorgang in gedruckte 3D-Form (links) fertiges Waschbecken mit extern-gefertigter Armatur (rechts) [1]

BAG SE), die voxeljet AG (Hersteller von 3D-Druckmaschinen und Anbieter von großformatigen 3D-Druckelementen) und MEVA Schalungssysteme (Hersteller von Schalungssystemen). Sie haben sich zusammengetan, um das Verständnis und das Potenzial des 3D-Drucks bei der Konstruktion komplexer geometrischer Betonelemente zu untersuchen. Das Forschungs- und Entwicklungsteam der Ed. Züblin AG hatte die Projektleitung inne. Der Lehrstuhl für Informatik am Bauingenieurwesen an der Ruhr-Universität Bochum



Bild 9. 3D-gedrucktes Architekturobjekt aus Pulvergemisch mit anorganischem Verfestiger [1]



Bild 10. Hybride, aus Sand gedruckte Gussform für Fassadenpaneele aus Beton [1]



Bild 11. Als Sandmodell gedrucktes „Micro home“ [1]



fügte weitere Kompetenzen in der Literaturrecherche, BIM, Automatisierung und Robotik hinzu.

Im Rahmen des Projektes wurden bestehende Prozesse der Planung und Fertigung im Hinblick auf die Verwendung von digitalen 3D-Design-Techniken, die 3D-Druckmaschinen lesen und automatisch in der Fertigung verwenden können, analysiert. Basierend auf den Techniken der Additiven Fertigung wurde der Sonderschalungsbau als geeigneter Anwendungsfall für den 3D-Durchselektiert. Ein BIM-Modell wurde entwickelt, das strukturierte Daten in spezifische CNC-Codes transformiert. Dieses ermöglicht den Prozess für das Rapid Manufacturing [7] und die vollautomatische Fertigung komplexer Bauteile zu vervollständigen [8].

Eine weitere Projektphase konzentrierte sich auf die Umsetzung des digitalen Designs hin zur 3D-Produktion. Um die Machbarkeit des jeweiligen Ansatzes zu demonstrieren, wurden auf Basis vorhandener architektonischer Zeichnungen zuerst Tests in kleineren Maßstäben durchgeführt. Der Grund hierfür waren geringe Investitionen und Risiken. Anschließend wurde ein geeignetes Evaluierungsprojekt für einen größeren Feldversuch ermittelt. Damit wurden die Anforderungskriterien Wirtschaftlichkeit, Bauverfahren und Qualität beantwortet. Die Arbeitsschritte können wie folgend zusammengefasst werden:

1. Verständnis konventioneller und gewünschter Bauvorgänge
2. Überblick über Marktpotenzial und technische Machbarkeit
3. Digitale Designprozesse und BIM Design Generation
4. Testdruck von kleinen 3D-Prototypen
5. Auswahl eines Teststandortes und Abschluss des Digitaldesigns
6. 3D-Druck von Elementen einschließlich der Infiltration der Oberfläche mit Harz zur Erhöhung der Robustheit und Festigkeit
7. Endgültige umfangreiche Implementierung und Tests in einem realistischen Bauprojekt
8. Kritische Überprüfung der Ergebnisse und Bedürfnisse Aussage für zukünftige Forschung und Entwicklung in der Automatisierung und Robotik für 3D-Druck



Bild 12. Automatisierte 3D-Druckmaschine VX 4000 [1]

4.2 Automatisierte 3D-Drucktechnologie und Prozess

Im Rahmen des Projektes wurde die voxeljet AG VX4000 3D Druckmaschine (Bild 12) zur Herstellung der Sandformen für die Elemente verwendet. Der Platzbedarf der Maschine beträgt 25 m x 12 m und eine Höhe von 4,5 m. Als eigenständige Fabrik gehört sie zu den größten Industrieanlagen ihrer Art. Sie fertigt basierend auf einem vollautomatischen Schichtaufbau in einer sicheren Arbeitsumgebung und produziert Elemente von bis zu 8 m³ (4 m x 2 m x 1 m). Je nach Größe und Form können 3D-Drucke mehrere Dutzend Stunden dauern (15 mm / h Baugeschwindigkeit bei 600 dpi Druckauflösung). Der für den 3D-Druck ausgewählte Prozess ist in Bild 13 dargestellt.

Das voxeljet 3D-Druckverfahren bietet zwei Kunststoffmaterialien auf Basis von Poly- (methylmethacrylat) und PMMA- (auch bekannt als Acrylglas) Partikel, die durch verschiedene Harze gebunden sind. Der PolyPor B-Binder eignet sich ideal für detailgetreue Bauteile, die ein hohes Maß an Kantenschärfe, Auflösung und Kompaktheit erfordern. Das PolyPor C-Bindemittel hingegen eignet sich für vereinfachte Burn-out-Prozesse im Feinguss und für architektonische Modelle.

Die Sandarten mit unterschiedlichen Granulationen werden je nach Geometrie und Anwendungszweck einzeln für jede Bestellung ausgewählt. Die verwendete Korngröße bestimmt die Oberflächengüte des Gusses. Eine kleine Korngröße könnte für eine hohe Oberflächenveredelungsqualität erforderlich sein, wie es manchmal für architektonischen Beton erforderlich ist. Der am häufigsten verwendete Sand besteht aus Quarz und ist in den Korngrößen von 0,14 mm, 0,19 mm und 0,25 mm erhältlich. Eine weitere Möglichkeit ist der mehr temperaturbeständige Kerphalit-

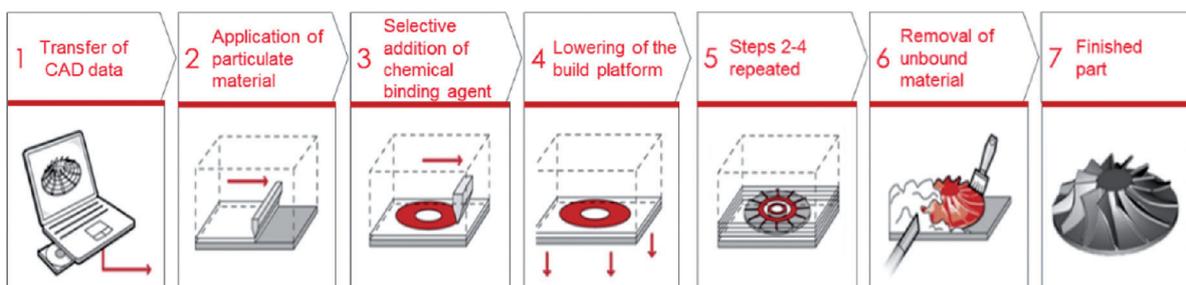


Bild 13. Prozess des pulverbasierten 3D-Drucks [1]

Sand, der für besonders komplexe Geometrien und Innenkerne für Stahlguss geeignet ist [1].

Der Standard für den Datenaustausch ist das STL-Format. Die Standard-Tessellation-Sprache verwendet orientierte Flächen, die durch Dreiecke dargestellt werden. Ihre Komposition ist: Header (Typ (ASCII, Binär), Name, Anzahl der Dreiecke (4 Bytes)) und Daten (3 Vektoren von jeweils 3 Punkten (4 Bytes), 1 Normaler Vektor). STL erlaubt es, Schnittebenen zu identifizieren, die durch alle Dreiecke laufen wie sie für den 3D-Druck benötigt werden. Die Erstellung des Jetting-Datensatzes basiert auf: Echtzeit-Bedingungen beim Drucken (mit etwas Flexibilität), Bewegungsdaten und Druckdaten. Gelegentlich ist es notwendig, den Druckkopf und das Pulverreservoir wieder aufzufüllen und die Daten speziell für den 3D-Druck zu bearbeiten.

4.3 Experimente und Ergebnisse

Es wurden zwei Experimente durchgeführt: (1) Testdruck kleiner 3D-Elemente für eine frühzeitige Rückmeldung über die Konstruktionsfähigkeit, einschließlich Materialprüfungen und (2) großformatige 3D-Elemente zur Bestimmung der Konstruierbarkeit, einschließlich der Wiederverwendbarkeit von Schalungssystemelementen.

Die Anforderungen an den 3D-Druck in diesem Projekt entstanden aus einem realistischen Bauprojekt Stuttgart 21. Die bestehende Station ist eine Endstation und stellt einen erschwerten Zugang zum wachsenden europäischen Hochgeschwindigkeitsbahnnetz dar. Neue Tunnel, ein Bahnhof und Bahnstationen müssen gebaut werden. Die auffälligsten Merkmale des neuen unterirdischen Bahnhofes sind ihre Helligkeit und visuelle Offenheit, die Ästhetik mit Sicherheitsvorteilen verbindet. Es soll eine attraktive, spezielle weiße und leichte Betonkonstruktion realisiert werden, die nur Druckbelastungen mit minimaler Baudicke ausgesetzt ist. Die Dicke der optimierten Schalenstruktur, das heißt der komplexen parabolischen Betonsäulen, wurde auf ein Hundertstel der Spannweite reduziert, wodurch es möglich ist, deutlich weniger Material für die Konstruktion als üblich zu verwenden (**Bild 14** und **Bild 15**). Diese Gründe erforderten die Wiederverwendung von Schalungselementen und die Vorfertigung von modularen Bauteilen, die eine effiziente Konstruktion ermöglichen [9], [10]. So ist das Projekt besonders geeignet für die Erforschung des Potenzials des 3D-Druckens.

4.3.1 Kleinformatiger Prototyp im Labor

Die Forschungsmethode sollte auf Experimenten mit kleineren maßstäblichen Testmodellen aufbauen. Ein vereinfachtes 3D-Modell der Kelchstütze wurde in einer BIM-Software (CATIA) generiert und in zwei Sandformsegmente un-



Bild 14. Stuttgart 21 Hauptbahnhof mit Parabolbetonsäule (links), Gestaltung nach einer Idee von Frei Otto (rechts)



Bild 15. Isometrische Ansicht des Hauptbahnhofmodells [10]

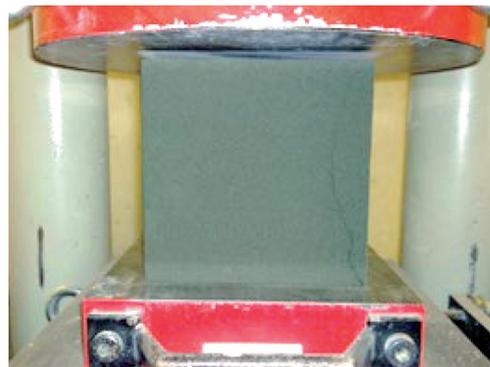


Bild 16. Kompressionstest einer Epoxidharz-infiltrierten Probe

terteilt. Später wurden sie zusammengefügt, um als Schalungssystem zu dienen. Neben der Entwicklung des allgemeinen 3D-Druckprozesses für Schalungszwecke (**Bild 14**) erlaubte das Experiment, praktische Erfahrungen mit der Handhabung und Aushärtung der Sandform mit Epoxidharz zu sammeln und auch den Beton in die Formen zu gießen und die Schalung zu entfernen. Proben mit verschiedenen Bindemittelfüllungen wurden für standardisierte Materialtests in 3D gedruckt (**Bild 16**). Die mechanischen Eigenschaften der 3D-Druckproben zeigten bis zu zehnfache größere Druck- und Zugfestigkeiten von regulärem Beton. Der Erfolg der Erzeugung der endgültigen Struktur einer parabolischen Betonsäule mit kleinem Maßstab ist in der Mitte von **Bild 17** zu sehen. Diese ersten Ergebnisse sollten wissenschaftlich weiter belegt werden.

4.3.2 Großformatiger Feldversuch

Der Großmaßstäbliche Versuch umfasste die detaillierte Element- und Schalungskonstruktionen sowie die Konstruktionsplanung (siehe ein Segment in **Bild 18**) einer parabolischen Betonsäule (Kelchfuß) im Hauptbahnhof. Aufgrund der Größe des Betonmodells wurden keine der tra-

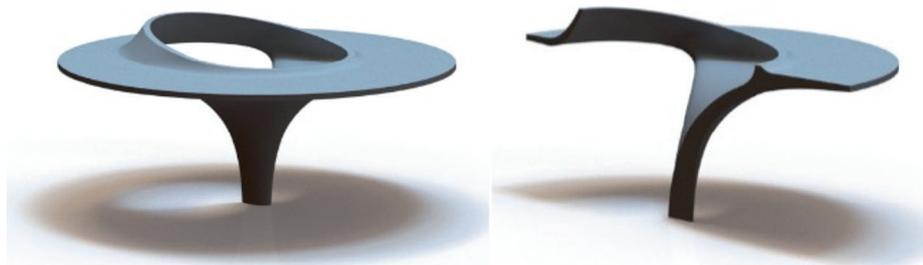


Bild 17. Konzeptionelles 3D-Modell der parabolischen Betonsäule (oben), gedruckte Sandformen (Mitte links und rechts), Beton und Schalung entfernen (unten) und fertiggestelltes Element (Mitte des mittleren Bildes)

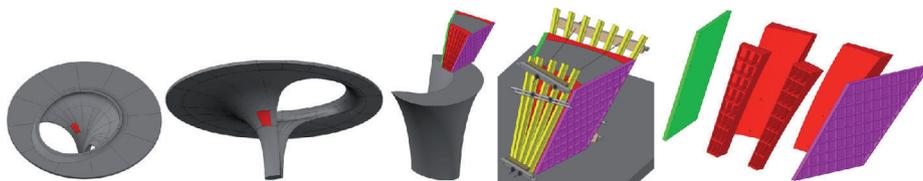


Bild 18. Detaillierte 3D-Modelle [11]

genden unterstützenden Gerüstteile für das 3D-Druckverfahren modelliert und gedruckt.

Die Elemente wurden für den effizienten 3D-Druck im VX4000 weiter angepasst und optimiert (Bild 19). Das erwartete Gesamtgewicht aller vier Elemente betrug circa 840kg. Der 3D-Druck dauerte etwa ein Tag. Die nächste Aufgabe bestand darin, die Sonderschalungselemente zur Erhöhung der Festigkeit mit Epoxidharz zu infiltrieren, das ebenfalls etwa ein Arbeitstag dauerte (Bild 20). Die abschließende Aufgabe war es, die 3D-Schalungselemente zu montieren, die Bewehrung zu flechten und das entstehende Bauvolumen zu betonieren. Der Feldversuch wurde wie in Bild 21 zu sehen, erfolgreich abgeschlossen. Umsetzung inklusive Zeitaufwendungen entsprechen bisheriger Fertigungsmethoden.

In der künftigen Arbeit wird es notwendig sein, effiziente Methoden zur Durchführung des gesamten Verfahrens für alle Betonsäulenelemente zu untersuchen. Obgleich das

3D-Drucken von komplexen Schalungselementen nicht dem 3D-Drucken der endgültigen Bauteile auf einer Baustelle entspricht, lässt eine hohe Wiederverwertungsquote der gedruckten Schalungselemente ein verbessertes Bauverfahren erwarten.

5 Ausblick

Allein in Deutschland werden jährlich circa 46 Millionen Kubikmeter Beton verbaut. Daher steht im Vordergrund der derzeitigen Forschungen oftmals der Werkstoff [12]. Hierbei gibt es Bestrebungen, die Eigenschaften von faserverstärkten oder UHPC-Werkstoffen (Ultra-High Performance Concrete) im pulverbasierten 3D-Druck nutzbar zu machen. Die Untersuchungen hierzu führen zu einem zementbasierten Werkstoff, der nach einer Endbehandlung geschlossene und witterungsbeständige Oberflächen und hohe Flammwidrigkeit aufweist. Die Festigkeit ist allerdings nicht mit üblichen Betonbauteilen vergleichbar. Der Werkstoff eignet sich daher nicht für tragende Elemente. Viele Untersuchungen beschäftigen sich auch damit, bauliche Elemente in eigentlich monolithische Bauteile zu integrieren, wie Bewehrung, Leerrohre und Kabel. An diesen Themen arbeiten mehrere Universitäten. Der Schwerpunkt hierbei liegt auf der indirekten Formgebung durch 3D-gedruckte Werkzeuge, mit dem Fokus auf großen Bauteilen mit Abmessungen von mehreren Metern im Außenbereich. Mehrere Notwendigkeiten existieren, um den 3D-Druck im Bauwesen besser zu etablieren. Beispiele sind:

- Einbinden und Nutzen genauer semantischer Daten in digitale Prototypen, unter anderem durch Nutzung neutraler offener Schnittstellen in BIM und verfügbaren Referenzwerte [13], [14], [15]
- Anpassen und Erneuern existierender Baufertigungsmethoden unter Betrachtung des gesamten Produktlebenszyklus, unter anderem Vorfertigung und Modularisierung, kalte Betonfugen in 3D-Druckabschnitten [7], [8], [16]
- Entwerfen und einsetzen günstiger, baustellentauglicher Robotersysteme, unter anderem verfügbarer Arbeitsraum; einfache Installation; Gewicht automatisierter Verfahren; Schnelligkeit der Navigation; Wetterbeständigkeit; präzise Sensorik und Steuerung; unterschiedliche Druckköpfe und Oberflächenqualitäten; kollisionsfreie Bauteile und Bausequenz; Simulation und proaktive Mensch-Maschine Interaktion [12], [13], [17], [18], [19], [20], [21], [22]

- Erstellen neuartiger Prozesse in der Baustelleneinrichtung, Logistik und Materialfluss auf Baustellen [23], [24], [25], [26]
- Etablieren von Standards und Normen bezüglich 3D-Drucken und automatisierter Fertigung

6 Fazit

Im Maschinenbau sind die 3D-Drucktechniken bereits etabliert – sie können konventionell erzeugte Bauteile mit nahezu all deren Eigenschaften und entsprechender Qualität reproduzieren. Ein Schwerpunkt hierbei liegt auf der indirekten Formgebung durch 3D-gedruckte Werkzeuge. Zudem verhalten die systemimmanenten Vorteile, darunter signifikant reduzierte Herstellzeiten, dem 3D-Druck im Maschinenbau zum Durchbruch. Im Bauwesen dagegen ist der 3D-Druck aufgrund einer Vielzahl von Gründen, unter anderem der notwendigen Produktion oftmals einzelner und zudem großer Bauteilabmessungen von mehreren Metern, noch nicht weit verbreitet. Zudem konkurrieren eine Vielzahl von noch nicht ausgereiften Verfahren und Techniken.

Die Vielfalt der möglichen Techniken und Werkstoffe im 3D-Druck zeigt jedoch breite Einsatzmöglichkeiten im Bauwesen. Die größten Bauteile liefern derzeit das Extrusionsverfahren. Ihr monolithischer Charakter erschwert allerdings die Integration zusätzlicher baulicher Elemente wie Bewehrung, Dämmung, Leerrohre oder die Verbindungselemente in den gefertigten Einzelteilen. Mittels Sintertechniken entstehen komplette Bauteile, die direkt eingesetzt werden können. Ihrem breiteren Einsatz stehen oft nur Kostengründe entgegen.

Der derzeit häufig unternommene Versuch, eine komplette Bauaufgabe mit einer einzelnen Technik zu bewältigen, ist aktuell nicht möglich. Viele Zielvorgaben an Funktion und Design lassen sich heute nur durch den Einsatz von speziellen, der jeweiligen Aufgabe angepassten, Werkstoffen erfüllen. Keine derzeit verfügbare 3D-Drucktechnik kann bisher das für sich alleine bewerkstelligen. Die Herstellung wesentlicher Teilelemente von Bauwerken hingegen ist mit 3D-Druckverfahren in Kombination mit modularen Werkzeugen durch Automation und Robotik durchaus möglich. Dabei stehen den neuen gestalterischen Freiheiten und der Möglichkeit, anstelle lohnintensiver Einzelteile komplexere Einheiten zu fertigen, allerdings noch hohe Produktions-

kosten und die noch nicht für alle Zwecke geeigneten Werkstoffe gegenüber. Sicher scheint, dass künftig zunehmend mehr Bauprojekte 3D-gedruckte Elemente enthalten oder in Teilen mit 3D-gedruckten Werkzeugen indirekt (in Fabrikhallen) oder direkt (auf Baustellen) geformt werden. Komplett gedruckte Häuser mit einem Wohnwert nach heutigen Vorstellungen werden allerdings auch in den kommenden Jahren nicht verfügbar sein. Um dieses Ziel zu erreichen, gilt es, anstatt auf publikumswirksame Maßnahmen zu setzen, das weltweit große Interesse und Investment in Forschung und Entwicklung des 3D-Drucks sinnvoll zu steuern.

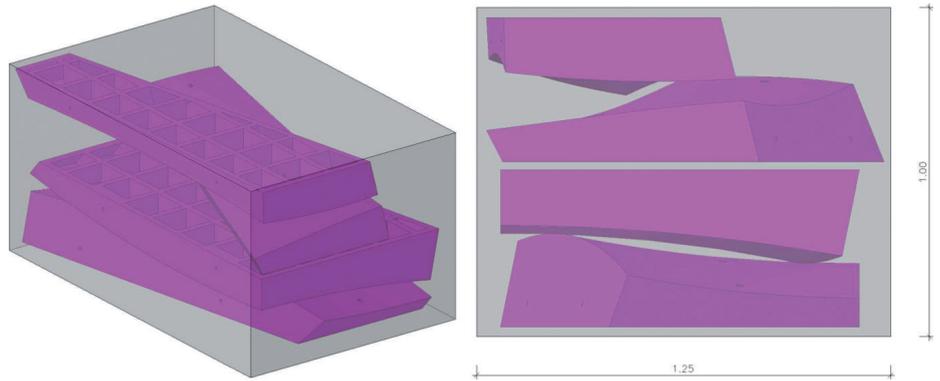


Bild 19. Produktionsmodelle für die 3D-Druckmaschine [11]



Bild 20. Vorgehensweise zum Infiltrieren des Epoxidharzes in die gedruckten Sonderschalungselemente



Bild 21. Von der digitalen Planung hin zur Ausführung auf der Baustelle

Literatur

- [1] Sachs, E. M.: Three-dimensional printing techniques, US Patent, 1993, US 5204055 A, 20. April 1993.
- [2] Guenther, D.: 3D printing – the state of the technology and the future of this process, Detail – Technology, 2015, pp. 596–600.
- [3] Khoshnevis, B.: Automated construction by contour crafting-related robotics and information technologies. In: Automation in Construction, Vol. 13 (2004), Iss. 1, pp. 5–19.
- [4] Khoshnevis, B.; Hwang, D.; Yao, K.; Yeh, Z.: Mega-scale fabrication by contour crafting. In: Industrial and Systems Engineering, Vol. 1 (2006), Iss. 3, pp. 301–320.
- [5] Teizer, J.; Venugopal, M.; Teizer, W.; Felkl, J.: (2012). Nanotechnology and its impact on construction: bridging the gap between researchers and industry professionals. In: Construction Engineering and Management, Vol. 138 (2012), Iss. 5, pp. 594–604.
- [6] Lim, S.; Buswell, R.; Le, T.; Austin, S.; Gibb, A.; Thorpe, T.: Developments in construction-scale additive manufacturing processes. In: Automation in Construction, Vol. 21 (2012), pp. 262–268.
- [7] CONprint3D: Machbarkeitsuntersuchungen zu kontinuierlichen und schalungsfreien Bauverfahren durch 3D-Formung von Frischbeton. 2016, <https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/ifd/bm/forschung/forschungsschwerpunkte/arbeitsprozesse/b3d>, 2017-07-10.
- [8] Buswell, R.A.; Thorpe, A.; Soar, R. C.; Gibb, A.: Design, data and process issues for mega-scale rapid manufacturing machines used for construction. In: Automation in Construction, Vol. 17 (2008), Iss. 8, pp. 923–929.
- [9] Ding, L.; Wei, R.; Che, H.: Development of a BIM-based Automated Construction System. In: Procedia Engineering, Vol. 85 (2014), pp. 123–131.
- [10] Oesterle, S.; Vansteenkiste, A.; Mirjan, A.: Zero waste free-form formwork. ICFF 2012, pp. 258–267.
- [11] Strabag: Research, Development and Innovation 2015/16, Strabag AG, 2016.
- [12] MEVA Schalungs-Systeme GmbH, 2016, <http://www.meva.de>, 2017-07-11.
- [13] Wangler, T.; Lloret, E.; Reiter, L.; Hack, N.; Gramazio, F.; Kohler, M.; Bernhard, M.; Dillenburger, B.; Buchli, J.; Rousset, N.; Flatt, R.: Digital Concrete: Opportunities and Challenges. In: RILEM Technical Letters, Vol. 1 (2016), pp. 67–75.
- [14] Bruckmann, T.; Mattern, H.; Spengler, A.; Reichert, C.; Malkwitz, A.; König, M.: Automated Construction of Masonry Buildings using Cable-Driven Parallel Robots. In: 33rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Auburn, Alabama, 2016, pp. 332–340.
- [15] Teizer, J.; Blickle, A.; King, T.; Leitzbach, O.; Guenther, D.: Large Scale 3D Printing of Complex Geometric Shapes in Construction. In: 33rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Auburn, Alabama, 2016, pp. 948–956.
- [16] Teizer, J.; Blickle, A.; King, T.; Leitzbach, O.; Guenther, D.; Mattern, H.; König, M.: BIM for 3D printing in construction, Springer-Verlag, 2017.
- [17] Moghadam, M.; Al-Hussein, M.; Umut, K.: Automation of modular design and construction through an integrated BIM/lean model. In: Geontechnology, Vol. 11 (2012), Iss. 2.
- [18] Schwabe, K.; König, M.; Teizer, J.: BIM Applications of Rule-based Checking in Construction Site Layout Planning Tasks. In: 33rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction, Auburn University, 2016.
- [19] Golovina, O.; Teizer, J.; Pradhananga, N.: Heat Map Generation for Predictive Safety Planning: Preventing Struck-by and Near Miss Interactions between Workers-on-Foot and Construction Equipment. In: Automation in Construction, Vol. 71 (2016), part 1, pp. 99–115.
- [20] Teizer, J.; Allread, B.S.; Fullerton, C.E.; Hinze, J.: Autonomous Pro-Active Real-time Construction Worker and Equipment Operator Proximity Safety Alert System. In: Automation in Construction, Vol. 19 (2010), Iss. 5, pp. 630–640.
- [21] Teizer, J.; Kahlmann, T.: Range Imaging as an Emerging Optical 3D Measurement Technology. In: Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2040 (2008), pp. 19–29.
- [22] Landsberger, S. E.; Sheridan, T.B.: A new design for parallel link manipulator. In: Proceedings Systems Man and Cybernetics Conference (1985), pp. 812–814.
- [23] Mattern, H.; Bruckmann, T.; Spengler, A.; König, M.: Simulation of automated construction using wire robots. Winter Simulation Conference (WSC), Washington D.C., 2016.
- [24] Babič, N.Č.; Podbreznik, P.; Rebolj D.: Integrating resource production and construction using BIM. In: Automation in Construction, Vol. 19 (2010), Iss. 5, pp. 539–543.
- [25] Kumar, S.S.; Cheng, J.C.: A BIM-based automated site layout planning framework for congested construction sites. In: Automation in Construction, Vol. 59 (2015), pp. 24–37.
- [26] Lee, G.; Cho, J.; Ham, S.; Lee, T.; Lee, G.; Yun, S.-H.; Yang, H.-J.: A BIM- and sensor-based tower crane navigation system for blind lifts. In: Automation in Construction, Vol. 26 (2012), pp. 1–10.
- [27] Lee, G.; Kim, H.-H.; Lee, C.-J.; Ham, S.-I.; Yun, S.-H.; Cho, H.; Kim, B.K.; Kim, G.T.; Kim, K.: A laser-technology-based lifting-path tracking system for a robotic tower crane. In: Automation in Construction, Vol. 18 (2009), Iss. 7, pp. 865–874.