



Nach mehr als zehn Jahren Forschung zum 3D-Druck mit Metallen an der TU Darmstadt wurde im Herbst 2019 die erste reale Brücke im 3D-Druckverfahren aus Stahl ausgedruckt.

3D-Druck

Gedruckte Brücken aus Metall

Neben dem bekannten 3D-Druck von Kunststoffen und Beton ist es seit einigen Jahren nun auch möglich, mit Metallen zu drucken. Das Verfahren basiert auf dem additiven Prinzip des Lichtbogenschweissens. Dabei sind verschiedene Techniken möglich.

Von Robert Mehl

Indirekt angefangen hat alles 2007 mit dem «Heatwave Radiator», der Abschlussarbeit von Joris Laarman an der Design Akademie in Eindhoven. Dieser ist – technisch gesehen – ein normaler, modular aufgebauter Heisswasserheizkörper,

den man additiv zu einem grösseren Heizkörper verbinden kann. Er lässt sich nicht nur an eine Wand montieren, sondern auch um Raumecken führen. Laarman bezeichnet ihn aufgrund seiner floralen Form selber als «Rokoko-Heizkörper».

In seinem Schaffen wendet sich Laarman offensiv gegen die Maxime der Moderne, dass die Form der Funktion zu folgen habe, und kreierte bewusst von Ornament überbordende Objekte. Mit dieser Haltung fiel bei ihm der damals aufkommende 3D-



bau (subtraktives Verfahren), der kunststoffbasierte 3D-Druck in kleinen Kammern sowie seit kurzer Zeit der 3D-Druck von ganzen Gebäuden mit dem Werkstoff Spritzbeton. Auf diese Weise wurde Anfang des Jahres 2021 im westfälischen Beckum das erste Wohnhaus auf deutschem Boden «ausgedruckt».

Die allgemein verbreiteten Kunststoffdruckverfahren beziehungsweise das Verfahren mit Spritzbeton, welches beim Beckumer Projekt verwendet wurde, arbeiten mit sogenannten Gentry-Druckern: Dabei bewegt sich die materialgebende Spritzdüse auf einem Schlitten, der über ein entsprechendes Schienensystem in allen drei Dimensionen im Raum verschoben werden kann. Die zu erstellenden Werkstückdimensionen sind durch die Arbeitsraumgröße limitiert.

Alternativ zu diesem System besteht die Möglichkeit, sowohl die additiv arbeitende Düse, wie auch einen subtraktiv arbeitenden Laser oder eine Fräse an einem Roboterarm zu montieren. Damit entfällt der definierte Raum, das «bedruckbare» Volumen entspricht der Reichweite des Roboterarms – in der Regel einem Mass von rund 3,5 Metern. Montiert man darüber hinaus den Roboter auf einer Schiene, kann in einer Achse die realisierbare Werkstückdimension beliebig verlängert werden. Dies geschieht es derzeit beim «White-Tower-Projekt» der ETH Zürich, wo mehrere

Druck mit seinen gestalterischen Möglichkeiten auf besonders fruchtbaren Boden: Er war mit der erste Designer überhaupt, der 3D-Druck zu seinem künstlerischen Sujet machte. Gleichwohl der «Heatwave Radiator» selber noch nicht ausgedruckt wurde, kann er als dessen unmittelbarer Vorläufer bezeichnet werden.

Zwei Verfahrensweisen

Der 3D-Druck unterscheidet zwei Techniken: das additive und das subtraktive Verfahren. Während beim subtraktiven Verfahren mit einem Laser oder mit einer robotergeführten Fräse Material aus einem Werkstoff weggenommen wird, wird beim additiven Verfahren ein Werkstück mit einer computergesteuerten Düse aufgebaut.

Zu den etablierten Produkten zählen computergeschnittene Pappen im Modell-

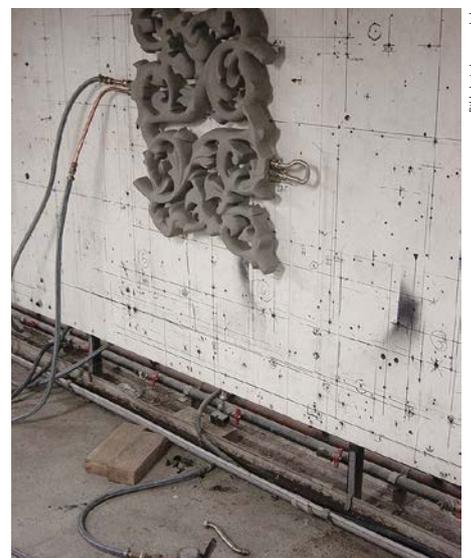


Bild: Joris Laarman Lab

«Rokoko»-Heizkörper «Heatwave Radiator» von Joris Laarman. Bei ihm handelt es nicht um einen 3D-Druck, sondern um einen direkten Vorgänger des Verfahrens.

Bild: Robert Mehl



Das erste in Deutschland «ausgedruckte» Wohnhaus steht in Beckum und entstand nach einem Entwurf von Mense-Korte Architekten + Ingenieure.

Bild: Per GmbH



Das Gentry-Verfahren arbeitet mit orthogonal angeordneten Schienen, auf denen ein Schlitten gleitet.

Meter lange Säulen aus Beton in einem Stück gedruckt werden.

Druckverfahren mit Metallen

Auf diesen grundlegenden Prinzipien basiert auch das Drucken von Metallen, insbesondere das von Stahl. Denn das Lichtbogenschweissen ist im Grunde genommen ein additives Verfahren. Ein Schutzgasschweissgerät verfügt über eine Spitze, an die ein Schweißdraht herangeführt wird. Über einen energiereichen Lichtbogen wird ein kleiner Teil des Drahtes für Sekundenbruchteile verflüssigt und einem Werkstück in definierter Menge angefügt. Mit dem Schutzgas verhindert man eine

unmittelbare Oxidation und steuert zudem die Erstarrungsdauer des aufgeschmolzenen Stahltropfens. Dessen Grösse kann man mathematisch ein definiertes Volumen zuweisen. So lassen sich mit dem Lichtbogenschweissen nicht nur bestehende Bleche zu einem Bauteil verbinden, es ist auch möglich – sofern der Schweisskopf präzise geführt wird – ganze Werkstücke zu erstellen, also «auszudrucken».

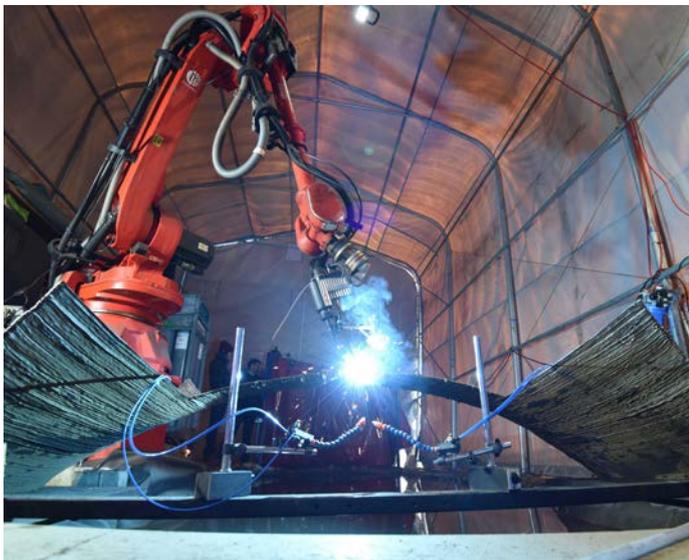
Brückenschlag der TU Darmstadt

Das Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik der TU Darmstadt unter der Leitung von Professor Jörg Lange beschäftigt sich seit langem mit diesem Verfahren. Die For-

schungen um 3D-Druck mit Metallen dauerten mehr als zehn Jahre. Nach der Erstellung verschiedener Demonstratoren entschied sich das Forschungsteam im Herbst 2019 für den Ausdruck einer realen Brücke im 3D-Druckverfahren.

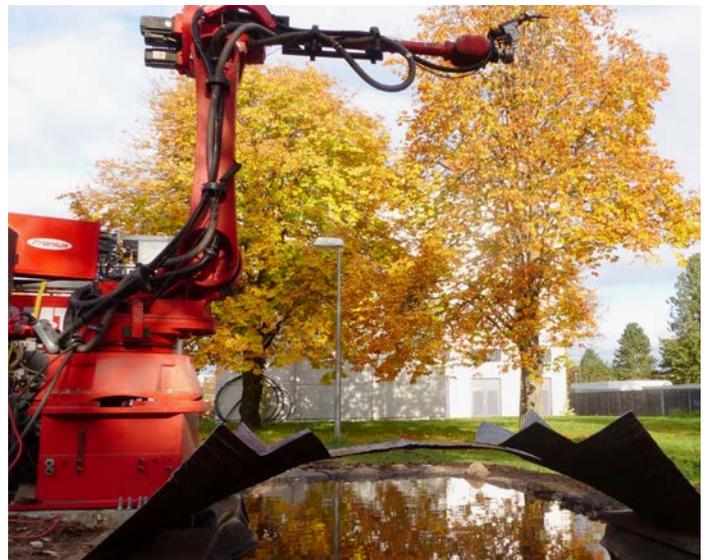
Mit dem in zwei Monaten realisierten Objekt, das eine Spannweite von 2,80 Metern besitzt, wiesen die Wissenschaftler zwei Dinge nach: Zum einen, dass es auch mit Stahl möglich ist, «schräg» zu drucken, also nicht nur vertikal eine neue Schicht auf einer älteren zu platzieren, sondern dass man sich mit einem über fünf Achsen gesteuerten Roboterarm beim Stahl-Druck auch frei im Raum bewegen kann.

Bild: Claus Voeßler



Für den 3D-Druck wurde auf den Roboterarm ein speziell entwickelter Lichtbogen-Schweisskopf montiert. Gearbeitet wurde in einem Zelt.

Bild: Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik, TU Darmstadt



Die Wasserfläche für den Brückenbau befand sich auf dem Campus der TU Darmstadt. Das Zelt wurde nach der Fertigstellung wieder abgebaut.

Zum anderen zeigten sie, dass der Brückenschlag auch über eine Wasseroberfläche hinweg erfolgen kann. Es ist nicht erforderlich, die Werkstücke in einem definierten Raum, wie einer Werkshalle, vorzuproduzieren. Obwohl die Darmstädter Brücke mit ihren Brückendimensionen eher bescheiden ist, wurde diese Ortsunabhängigkeit bislang nicht übertroffen.

Brücke für Amsterdam

In diesem Jahr kam erneut Bewegung in die Entwicklung des 3D-Druck-Verfahrens mit Metallen: Im Juli 2021 wurde über die Oudezijds Achterburgwal, einer kleinen Gracht in der Amsterdamer Altstadt, eine kleine Fussgängerbrücke geschlagen. Das Ereignis erregte viel Aufmerksamkeit, da die Brücke von der niederländischen Königin Maxima eingeweiht und der Öffentlichkeit übergeben wurde. Doch es handelt sich dabei nicht um die weltweit erste, im 3D-Druck-Verfahren erstellte Brücke, wie bei der Übergabe verkündet wurde, sondern «nur» um ein etwa doppelt so grosses Projekt, an dessen Design jedoch sichtbar Hand angelegt wurde.

Entworfen wurde die Brücke von Joris Laarman, dem bereits erwähnten geistigen Vater des «Rokoko-Heizkörpers». Realisiert wurde das Projekt mit der Computerdruckfirma MX 3D. Professor Jörg Lange von der TU Darmstadt stellt zur Brücke fest, dass diese in einer Werkshalle vorproduziert wurde. Zudem war die Amsterdamer Brücke für den Druck um 90 Grad in der Senkrechten gedreht worden, quasi hochkant auf der Seite stand, als die Metalllagen horizontal aufeinander liegend aufgetragen wurden.

Darüber hinaus besteht sie aus mehreren Bauteilen, die von bis zu sechs Robotern gleichzeitig ausgedruckt wurden. Der Transport der Brücke zur Baustelle erfolgte in Einzelteilen. Dort wurde sie von Hand zusammenschweisst. In ihrer finalen Position verlaufen nun diese Schweisslagen senkrecht, was die Regenwasserdrainage begünstigt. Horizontale Rillen, in denen sich Staunässe bildet, gibt es keine.

Die Brücke über die Oudezijds Achterburgwal wurde aus Edelstahl gedruckt, um sie unempfindlich gegenüber dem Wettergeschehen zu machen. Die Darmstädter Brücke besteht hingegen aus dem handelsüblichen Schweissdraht «G3Si1», der zur Korrosion neigt.

Die Darmstädter Wissenschaftler hatten es sich primär zur Aufgabe gesetzt, zu beweisen, dass auch mit herkömmlichen Ma-



Seitenansicht der Brücke: Gut erkennbar sind die horizontalen Schichtlagen. Allerdings zeigte die TU Darmstadt, dass man auch geneigte Lagen erzeugen kann.

terialien ein Metalldruck möglich ist. Zwischenzeitlich konnten sie jedoch aufzeigen, dass mit dem Schweissdraht «G3Si1» gedruckte Werkstücke ein vergleichbares Elastizitätsmodul – wie etwa bei gewalztem Stahl – besitzen und Knotenverbindungen damit problemlos zu erstellen sind. Bei Edelstahl wurde hingegen dessen starke Neigung zur Orthotropie nachgewiesen, das heisst, dass dessen Festigkeit in Druckrichtung deutlich höher als quer zu dieser ist.

Materialforschung am Bau

Nach dem erfolgreichen Bau des Brückendemonstrators beschäftigte sich das Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik der TU Darmstadt mit zwei grundlegenden Themen: Zum einen wollte man das Drucken von Metallen berechenbar machen, damit entsprechende Prüfnachweise erstellt werden können, die für einen Prüfingenieur nachvollziehbar sind und die von der Bauaufsicht anerkannt werden.

Zum anderen betraf es die Oberflächen, denn sowohl bei der Darmstädter wie auch bei der Amsterdamer Brücke war gestalterisch eine strukturierte Oberfläche erwünscht. Es gibt aber auch Anwendungen, wo sich dies als Nachteil erweist. Bei zyklisch beanspruchten Bauteilen ist eine glatte Oberfläche relevant, um deren Materialermüdung vorzubeugen, da strukturierte Oberflächen zu einer Kerbwirkung am Bauteil neigen.

Im konkreten Fall betraf es die robotische Nachbearbeitung mit Fräsaufsätzen. Statt dem Schweisskopf wurde der Roboter mit einer Fräse bestückt. Diese Materialabtragung könnte man als weiteren, diesmal subtraktiven 3D-Druck bezeichnen. Ein Problem stellt die Druckgenauigkeit beim Lichtbogenschweissen dar, da es durch die unvermeidlichen, schnellen Temperaturwechsel zu Schweissverzügen kommt.

Deshalb muss das Werkstück vor einer subtraktiven Nachbearbeitung mit einem 3D-Scanner eingemessen werden, da der reale Ausdruck nur bedingt dem virtuellen Computermodell entspricht. Und auf Basis dieser Realgeometrie wird dann individuell eine «passende», glatte Oberfläche gefräst.

Schutzgas ist nicht gleich Schutzgas

Unlängst hat sich das Darmstädter Institut auch mit dem Einfluss von Schutzgas beim 3D-Druck beschäftigt. Grundsätzlich wird hier das Edelgas Argon unter Zugabe unterschiedlich hoher Kohlendioxid- und Sauerstoffanteile verwendet. Handelsüblich ist ein etwas über 80 Prozent liegender Anteil an Argon, der Rest ein zweistelliger Kohlendioxidwert und eine einstellige Sauerstoffbeimischung.

Diese Zusammensetzung hat sich beim Metalldruck als weniger effizient herausgestellt als ein Arbeiten mit hochprozentigen Edelgasmengen. Grund ist, dass im entstehenden Schweissplasma, also bei



Die Brücke von MX 3D überquert in Amsterdam den Oudezijds Achterburgwal auf Höhe der Hausnummer 116 B. Der Blick aus nördlicher Richtung auf die Brücke.



Die Brückenform hat im Grundriss eine geschwungene S-Form. Um die Brücke in ihrer Mitte leichter zu machen, sind die Geländergefache perforiert.



An den Brückenköpfen gehen die Geländer in eine trichterartige Spirale über. Die Figur erinnert an den Jugendstil.

2000 bis 3000 Grad Celsius, auch das Kohlendioxid in seine Bestandteile aufgespalten wird. Es verbrennt dann ebenfalls und steigert damit noch einmal die Plasmatemperatur. Dieser Effekt verlängert wiederum die Zeitspanne, die für die Erstarrung des zuvor gesetzten Schweißpunkts erforderlich ist. Im Resultat drückt der Roboter deshalb langsamer. Hier ist abzuwägen, was wirtschaftlicher ist: Die schnellere robotische Fertigung oder das teurere Schutzgas.

Metalldruck mit Pulver

Neben dem oben beschriebenen WAAM-Verfahren (Wire Arc Additive Manufacturing) gibt es im 3D-Metalldruck eine laserbasierte Technologie, die auf der Verwendung von Metallpulver beruht. Dabei schmilzt ein leistungsstarker Laser selektiv ein Pulverbett auf, während fortwährend eine Maschine weitere Schichten gleichmässig in diesen Arbeitsraum einbringt. Dieses Verfahren ist dem zu Anfang beschriebenen Gentry-Bereich zuzuordnen, prozesstechnisch ähnelt es dem 3D-Kunststoffdruck.

Tatsächlich existiert dieses Verfahren schon seit mehr als einer Dekade und wird heute vor allem durch die Automobilindustrie vorangetrieben. Der grosse Vorteil des Verfahrens ist eine bis in den Mikrometerbereich gehende Präzision, die mit dem WAAM-Verfahren unerreichbar ist.

Für das Bauwesen nachteilig sind die vergleichbar geringen Verarbeitungsmengen. Während Jörg Lange den Druckausstoss bei dem schweißdrahtbasierten Verfahren auf fünf bis zehn Kilogramm pro Stunde beziffert, schätzt er bei dem Metallpulververfahren eine Maximalmenge von 100 Gramm pro Stunde.

Exorbitante Materialkosten

Als zweiten Faktor nennt er die exorbitanten Materialkosten. So wäre für das besonders feine, natürlich vollkommen entmagnetisierte Stahlpulver ein Preis von mehr 100 Euro pro Kilogramm anzusetzen, wohingegen der handelsübliche Schweißdrahtpreis zwischen einem und zwei Euro pro Kilogramm liegt.

Dennoch sieht Lange für das WAAM-Verfahren zum roboterbasierten Drucken im Bauwesen eine Zukunft. Er konnte nachweisen, dass das Verfahren keine Konkurrenz für die klassischen Stahlbautriebe darstellt, sondern für diese eine interessante Option sein kann, um die hohen Produktionskosten langfristig zu senken. Ein entsprechendes Feedback hat er von seinen Industriepartnern bereits erhalten.