

Die Forschungsinfrastruktur des SFB TRR 277 AMC

Additive Fertigung im Bauwesen

Die globalen Herausforderungen unserer Zeit sind der Klimawandel, das Bevölkerungswachstum und die Reduzierung des Ressourcenverbrauchs. Für das Bauwesen bedeutet dies, in den kommenden Jahrzehnten mehr zu bauen und gleichzeitig den Ressourcenverbrauch zu verringern und weniger Emissionen auszustößen. Die handwerklich organisierte Bauindustrie ist weder technologisch noch personell darauf vorbereitet, diese Herausforderungen ökonomisch und ökologisch zu bewältigen. Hier setzt der Sonderforschungsbereich TRR 277 Additive Manufacturing in Construction (AMC) der beiden Universitäten TU Braunschweig und TU München mit seiner Grundlagenforschung an. Der AMC betrachtet die additive Fertigung als eine digitale Schlüsseltechnologie für das Bauwesen, denn diese vereint die Vorteile von automatisierter und individualisierter Fertigung. Bei der additiven Fertigung werden die Bauteile ohne Formenbau schichtweise aufgebaut. Dies schafft grundlegend neue Anforderungen an Werkstoffe, Verfahrenstechniken sowie an Design und Konstruktion und kann nur in hochgradig interdisziplinären Teams von Wissenschaftler:innen aus den Bereichen des Bauwesens und des Maschinenbaus erforscht werden. Die Basis für die werkstoffübergreifende Erforschung unterschiedlicher additiver Fertigungstechnologien für die Anwendung im Bauwesen stellt die über viele Jahre systematisch aufgebaute Forschungsinfrastruktur im Bereich der digitalen Baufabrikation dar. An seinen beiden Standorten, der TU Braunschweig und der TU München, kann der AMC auf innovativste Forschungseinrichtungen zurückgreifen. Darunter befinden sich sowohl DFG-geförderte Forschungs Großgeräte wie das Digital Building Fabrication Laboratory (DBFL) und das RoboCoop^{3D} als auch eine Vielzahl eigenfinanzierter innovativer Forschungsgeräte an beiden Standorten. Die AMC-Forschungsinfrastruktur wird im Laufe des Forschungsprojekts stetig ausgebaut und erweitert. Der vorliegende Beitrag stellt die bestehende sowie die in Anschaffung und Planung befindliche Forschungsinfrastruktur vor.

Stichworte TRR 277; additive Fertigung im Bauwesen; AMC; Forschungsinfrastruktur; Digital Building Fabrication Laboratory (DBFL)

1 Einleitung

Das industrielle Zeitalter hat zum linearen Produzieren und zum Raubbau der natürlichen Ressourcen geführt. Die Folgen sind Ressourcenverknappungen, Abfallanhäufungen und die globale Erderwärmung. Auch der Bausektor ist hieran in erheblichem Umfang beteiligt. Im Unterschied zu anderen Produktionsbereichen, wo Beschränkungen durchaus eine Möglichkeit zur Gegensteuerung darstellen, wird im Bauwesen der Bedarf an Hoch- und

The research infrastructure of TRR 277 Additive Manufacturing in Construction

The global challenges of our time are climate change, population growth and the reduction of resource consumption. For the building industry, this means building more in the coming decades while at the same time using fewer resources and producing fewer emissions. The building industry, which is traditionally organised by craftsmen, is not prepared either technologically or in terms of personnel to meet these challenges economically and ecologically. This is where the Collaborative Research Centre TRR 277 Additive Manufacturing in Construction (AMC) of the both Universities of TU Braunschweig and TU Munich comes in with its basic research. The AMC considers additive manufacturing to be a key digital technology for the construction industry, because it combines the advantages of automated and customised manufacturing. In additive manufacturing, components are built up layer by layer without using a separate formwork. This creates fundamentally new requirements for materials, process technologies as well as design and construction and can only be researched in highly interdisciplinary teams of scientists from the fields of civil and mechanical engineering. The basis for cross-material research into different additive manufacturing technologies for application in construction is the research infrastructure in the field of digital building fabrication that has been systematically built up over many years. At its two locations, TU Braunschweig and TU Munich, the AMC can rely on the most innovative research facilities. These include both DFG-funded large-scale research equipment such as the Digital Building Fabrication Laboratory (DBFL) and the RoboCoop^{3D}, as well as a large number of self-financed innovative research devices at both locations. The AMC research infrastructure is constantly being expanded and extended in the ongoing research project. This article presents the existing research infrastructure as well as the research infrastructure currently being acquired and planned.

Keywords TRR 277; additive manufacturing in construction; AMC; research infrastructure; Digital Building Fabrication Laboratory (DBFL)

Infrastrukturbauten weltweit in den kommenden Jahrzehnten weiter steigen. Gründe sind die stetig wachsende Weltbevölkerung, der Nachholbedarf von China und den Schwellenländern, die zunehmende Urbanisierung sowie die Notwendigkeit neuer Bauten für die Energiewende und zum Schutz gegen die Bedrohungen durch den Klimawandel. Mit den vorherrschenden handwerklichen Bautechniken ist die Bauindustrie nicht in der Lage, diese Herausforderungen ökonomisch und ökologisch zu bewältigen. Hier ist die Wissenschaft gefordert, grundlegend



a)



b)

Bild 1 a) Digital Building Fabrication Laboratory – DBFL mit b) neuer automatisierter Betonmischanlage
a) Digital Building Fabrication Laboratory – DBFL with b) new automated concrete mixing plant

neue Bautechnologien zu erforschen, um diese Bedarfe zu decken und gleichzeitig Emissionen und Ressourcenverbräuche zu reduzieren. Der Sonderforschungsbereich TRR 277 Additive Manufacturing in Construction (AMC) hat sich zum Ziel gesetzt, die Technologie der additiven Fertigung werkstoff- und prozessübergreifend grundlegend für das Bauwesen zu erforschen. Aufbau, Struktur und Forschungsinhalte des AMC sind in [1, 2] ausführlich beschrieben. Wesentliches Merkmal des AMC ist die Zusammenführung der Forschungen im Bereich der Materialtechnologien mit denen im Prozess- und Strukturdesign. Dies bedingt einerseits hochgradig interdisziplinäre Forschungsteams und andererseits neuartige Forschungsinfrastrukturen, die in der Lage sind, die komplexen Zusammenhänge von Material, Prozess und Strukturdesign im 1:1-Maßstab experimentell zu begleiten. Im Folgenden werden die wesentlichen vorhandenen Forschungsinfrastrukturen des Sonderforschungsbereichs beschrieben. Des Weiteren werden die aktuell in der Anschaffung befindlichen und geplanten Forschungsinfrastrukturen vorgestellt.

2 Vorhandene AMC-Forschungsinfrastruktur

2.1 Digital Building Fabrication Laboratory – DBFL mit neuer automatisierter Mischanlage

Das Digital Building Fabrication Laboratory (DBFL) (Bild 1a) am Institut für Tragwerksentwurf (ITE) ist in seiner Konzeption und Ausführung einzigartig und stellt die Basis für die Forschungen im Bereich der digitalen Baufabrikation an der Technischen Universität Braunschweig dar. Die Einzigartigkeit beruht auf der Zusammenführung zweier steuerungstechnisch grundsätzlich unterschiedlicher Fertigungseinheiten in einer Anlage, nämlich einer CNC-gesteuerten 5-Achs-Portalfräse und eines 6-Achs-Schwerlastroboters. Beide Fertigungseinheiten sind an separaten 3-Achsportalen montiert, wodurch sich entsprechend weitere Freiheitsgrade für die Fertigung ergeben. Durch die Integration der robotischen Steuerung in die CNC-Steuerungsumgebung ermöglicht

das DBFL den Betrieb des CNC-Portals und des Roboterportals sowohl unabhängig voneinander wie auch in kollaborativen Arbeitsprozessen. Das DBFL wurde 2013 von Harald Kloft beantragt und 2016 in Betrieb genommen, die Gesamtinvestitionskosten von DFG, Land Niedersachsen und TU Braunschweig betragen ca. 2 Mio. Euro.

Die beiden zentralen Fertigungsprozesse des DBFL im AMC sind Material additiv aufzubauen – insbesondere mineralisch basierte Werkstoffe – sowie subtraktives Nachbearbeiten in Form von Fräsen, Schleifen und Glätten. Aber auch die Vorkonfektionierung von ebenen und räumlichen Bewehrungselementen basierend auf Endlosfasern und weitere automatisierte Anwendungen wie optische Prüfungen zur Maßhaltigkeit und variable Handlingprozesse (Pick and Place) werden im Rahmen des AMC im DBFL durchgeführt. Der verfügbare Arbeitsbereich beträgt ca. 16 m × 9 m × 3m und ermöglicht so die Produktion großmaßstäblicher Architekturbauteile.

Mitte 2022 wurde das DBFL um eine automatisierte Mischanlage erweitert, die ebenfalls in die Steuerungsumgebung integriert ist (Bild 1b). Nachdem die Betonmatrix bei additiven Fertigungsprozessen bisher manuell unter Zuhilfenahme eines 100-l-Zwangsmischers abgemischt wurde, ist nun auch die Materialbereitstellung Teil der digitalen Fertigungskette beim additiven Fertigen mit Beton. Die automatisierte Betonmischanlage der Firma Kniele besteht aus drei Bigbag-Silos, die über Rohrförderschnecken an den Konusmischer KKM 375/550 mit einer Antriebsleistung von 2 × 11 KW angeschlossen sind. Die Wasser-, Zusatzmittel- und Bindemittelzugabe erfolgt über digitale Wäge- und Dosiereinrichtungen. Durch die digitale Steuerungsintegration können für die additive Fertigung mit Beton nun auch spezielle Materialmischungen bedarfsgerecht aufbereitet werden.

Die unterschiedlichen Forschungsprojekte aus dem Bereich der Grundlagen- und anwendungsbezogenen Forschung zeigen die Vielfältigkeit des Digital Building Fabrication Laboratory. Im AMC nutzen folgende Teilprojekte die Forschungsinfrastruktur des DBFL:



Bild 2 Digitale Fertigung von bewehrten Betonbauteilen im kombinierten Prozess aus Shotcrete 3D Printing (SC3DP) und präziser Oberflächenbearbeitung durch CNC-Fräsen, entwickelt im AMC A04 Projekt und hier angewendet im DBV-Projekt (PAPER)
Digital fabrication of reinforced concrete elements using a combined process of Shotcrete 3D Printing (SC3DP) and precise surface milling via CNC milling developed in the AMC A04 project and applied here in the DBV project (PAPER)

- Im AMC-Teilprojekt A04 wird das Shotcrete 3D Printing (SC3DP) erforscht und weiterentwickelt. Als vielversprechende Alternative zur Betonextrusion werden Bauteile hier durch automatisiertes und präzises Auftragen von Spritzbeton gefertigt (Bild 2). Hierbei liegt der Fokus v. a. auf der Herstellung von tragenden Betonbauteilen und der benötigten Bewehrungsintegration. Durch Untersuchungen des robotischen Spritzprozesses hinsichtlich der geometrischen Freiheit und endkonturnahen Fertigung sowie Integrationsmöglichkeiten unterschiedlicher Bewehrungsmaterialien und Strukturen können Bauteile ressourcenschonender und effizienter gefertigt werden. Hierbei werden die Elemente zunächst auf ihren individuellen Kraftfluss analysiert und darauf basierend in einem Designprozess optimiert und bis zur Fertigung geplant. Somit können tragende Betonbauteile wie Stützen, Wände, Deckenelemente und weitere architekturmaßstäbliche Betonbauteile schalungslos und in neuartiger Gestaltungsfreiheit hergestellt werden [3–7].
- Das Teilprojekt A05 behandelt schwerpunktmäßig die automatisierte Bewehrungsintegration in die digitalen Betondruckprozesse. Insbesondere werden alternative faserbasierte Bewehrungswerkstoffe wie Glas- oder



Bild 3 Robotisches Aufbringen von Faserbewehrung auf einen im SC3DP-Verfahren gefertigten Wandkern
Robotic application of fibre reinforcement to a concrete core manufactured with the SC3DP process

Kohlenstofffasern untersucht. Das DBFL bietet die Grundlage für das neu entwickelte Fibre-Winding-Verfahren, welches eine individualisierte robotische Einbringung von kontinuierlicher Faserbewehrung in additiv gefertigte Betonbauteile ermöglicht, die in Zusammenarbeit mit Teilprojekt A04 im SC3DP-Verfahren hergestellt werden (Bild 3) [8–11].

- Beim Teilprojekt C05 Jointing Principles for AMC Components werden unterschiedlichste Verbindungsarten für Betonbauteile untersucht. Die durch die präzise subtraktive Fertigung hergestellten Dry Joints können anschließend auf ihre Festigkeit geprüft und z. B. in SC3DP-Bauteilen integriert werden (Bild 4) [12–16].
- Das Teilprojekt A07 Strukturdesign, WAAM-basierte Fertigungsmethoden und Bauteilprüfung von komplexen, individualisierten Stahlbauteilen. Ziel sind insbesondere additiv gefertigte Stahlbauteile für konstruktive Fügungen von Standardprofilen oder als Einbauteile in Betonkonstruktionen. Für den DBFL-Roboterarm wurde hierzu ein Endeffektor basierend auf einer Fronius-Anlage entwickelt, der WAAM und andere Schweißverfahren für komplexe Geometrien ermöglicht (Bild 5) [17–19].
- Ein weiteres Forschungsprojekt, das im DBFL durchgeführt und vom Innovationsprogramm Zukunft Bau des

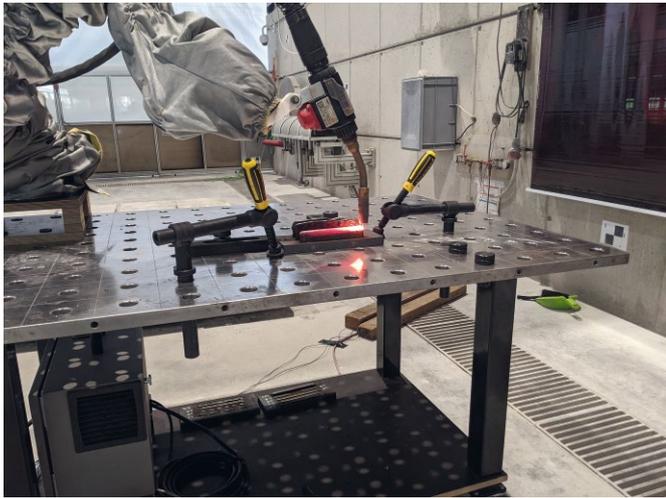


a)



b)

Bild 4 a) Fertigung von präzisen Betonverbindungen durch CNC-Fräsen, b) gefräste Betonverbindungen
a) Manufacturing of precise concrete connections using CNC-milling, b) milled concrete dry joints



Quelle: Christoph Müller, Institut für Tragwerksbau, TU Braunschweig

Bild 5 Mobiler Schweißstand im DBFL für die additive Fertigung von Stahlbauteilen mittels DED-Arc
Mobile welding stand in DBFL for additive manufacturing of steel components using DED-Arc

Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWBS) gefördert wird, beschäftigt sich mit der robotergestützten Fertigung von Stampflehmeelementen und trägt den Titel Robotic Rammed Earth. Der Forschungsschwerpunkt liegt hier auf der Zusammenführung der traditionellerweise separat ablaufenden Prozesse des Beschickens, des Ein- und Ausschalens sowie des Verdichtens von Stampflehm zu einem kontinuierlichen Gesamtprozess, wodurch die Effizienz der Stampflehmabauweise um ein Vielfaches gesteigert werden kann (Bild 6) [20, 21].

- Wesentliche übergeordnete Fragestellungen bilden beim AMC die Integration der additiven Fertigungs-



Quelle: Joshua Goslar, Institut für Tragwerksbau, TU Braunschweig

Bild 6 Robotische Fabrikation von Bauteilen aus Stampflehm
Robotic fabrication of components from rammed earth

prozesse in die digitalen Planungsprozesse und die Schnittstellen zu digital organisierten Baustellen. Außerdem werden die Prozessforschungen durch Simulationen und Modellierung begleitet. Beispiele hierfür sind fluiddynamische Simulation von Prozessschritten der SC3DP-Fertigungsprozesse (B03: [22, 23]), die Robotersteuerung (B04: [24, 25]), mobile Roboter (B05: [26]) und die optische sowie logistische Überwachung der Bauteilherstellung (C06: [27, 28]).

2.2 Industrierobotersysteme und CMT-Schweißstromquellen

Seit Anfang 2022 forscht Jonas Hensel, Projektleiter im Teilprojekt A07 und bis 2021 an der TU Braunschweig am Institut für Füge- und Schweißtechnik tätig, an der TU Chemnitz, Professur für Schweißtechnik. Die Robotersysteme und Schweißstromquellen der Professur Schweißtechnik am Institut für Füge- und Montagetechnik (IFMT) der TU Chemnitz werden insbesondere für die additiven Fertigungsverfahren DED-Arc, DED-Plasma und DED-Laser eingesetzt. Der Schweißzusatzwerkstoff kann bei diesen Systemen entweder als Pulver oder als Draht zugeführt werden. Dazu bewegt ein Roboterarm (Manipulator) das Schweißwerkzeug entlang einer programmierten Bahn, um Bauteile durch schichtweises Aufbringen von Schweißrauben zu generieren. Es lassen sich Bauteile aus unterschiedlichen Werkstoffen (Stahl, Aluminium, Titan u.a.) mit komplexen Geometrien erzeugen. Zusätzlich verfügen diese Systeme über externe Temperatur- und Geometrieerfassungssysteme mittels Wärmebildkamera und Laser-Linienscanner. Darüber hinaus ist es möglich, innere Prozessgrößen sowie Erwartungswerte zu erfassen und diese intelligent auszuwerten, um u.a. Qualitätsaspekte in situ bzw. lokal aufgelöst zu erfassen.

Die Professur Schweißtechnik ist mit den vier Robotersystemen

- KUKA KR 6 (KRC2) mit Drehkipptisch (8-Achs),
- KUKA KR 60 (KRC1),
- Comau SMART NS 16 (C4G) mit Drehkipptisch (8-Achs) und
- Comau Smart NS 16 (C4G) mit Drehkipptisch und Linearachse (9-Achs)

ausgestattet (Bilder 7, 8a).

Diese Robotersysteme lassen sich über die vorhandenen Schnittstellen mit allen robotermäßigen Schweißstromquellen koppeln. Speziell für das additive Herstellungsverfahren DED-Arc verfügt die Professur Schweißtechnik über zwei CMT-Roboter-Inverterstromquellen einschl. Schnittstellen und Peripherie (Bild 8b). Die Schweißstromquellen

- Fronius TransPuls Synergic (TPS) 5000 CMT und
- Fronius TransPuls Synergic (TPS) 400i



Bild 7 a) Der Industrieroboter KUKA KR 6 bei der additiven Fertigung von hochfesten Stahlbauteilen, b) charakteristischer schichtweiser Lagenaufbau eines WAAM-Bauteils aus hochfestem Stahl-Zusatzwerkstoff
 a) The industrial robot KUKA KR 6 during the additive manufacturing of high-strength steel components, b) characteristic layer-by-layer structure of a WAAM component made of high-strength steel additive material



Bild 8 a) Das Industrierobotersystem Comau SMART NS 16 und b) die Schweißstromquelle 400i der Firma Fronius zum robotergestützten Schweißen mit modifiziertem Kurzlichtbogen Cold Metal Transfer (CMT)
 a) The Comau SMART NS 16 industrial robot system and b) the 400i welding power source from Fronius for robot-assisted welding with modified short arc Cold Metal Transfer (CMT)

eignen sich durch ihren relativ kalten, geregelten Lichtbogen insbesondere für die additive Verarbeitung temperatursensibler Werkstoffe und zur Generierung komplexer Bauteilgeometrien (Bild 8b).

Bei dem Umform- und Abschreckdilatometer DIL 805 A/D (BÄHR Thermoanalyse GmbH) handelt es sich um ein Messgerät, mit dem sowohl Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Diagramme (ZTU) und Schweiß-ZTU-Diagramme (SZTU) als auch Zeit-Temperatur-Austenitisierungs-Schaubilder (ZTA) erstellt werden können (Bild 9). Eine temperaturgeregelte Induktionseinheit ermöglicht Probertemperaturen von bis zu 1500°C sowie Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeiten von maximal 2500 K/s. Durch eine zusätzliche laserbasierte Dehnungsmessung in Dickenrichtung werden zusammen mit der taktilen Messung der Längenänderung höchste Genauigkeiten erreicht. Es stellt dabei die Methodik einer werkstoffspezifischen, thermophysikalischen Umformsimulation dar. Mithilfe der Deformationseinheit werden Proben mit Ge-



Bild 9 Das Umform- und Abschreckdilatometer DIL805 A/D der Fa. BÄHR zur reproduzierbaren Untersuchung des Einflusses unterschiedlichster Aufwärm- und Abkühlbedingungen auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften von Versuchswerkstoffen
 The forming and quenching dilatometer DIL805 A/D from BÄHR for the reproducible investigation of the influence of different heating and cooling conditions on the mechanical-technological properties of test materials

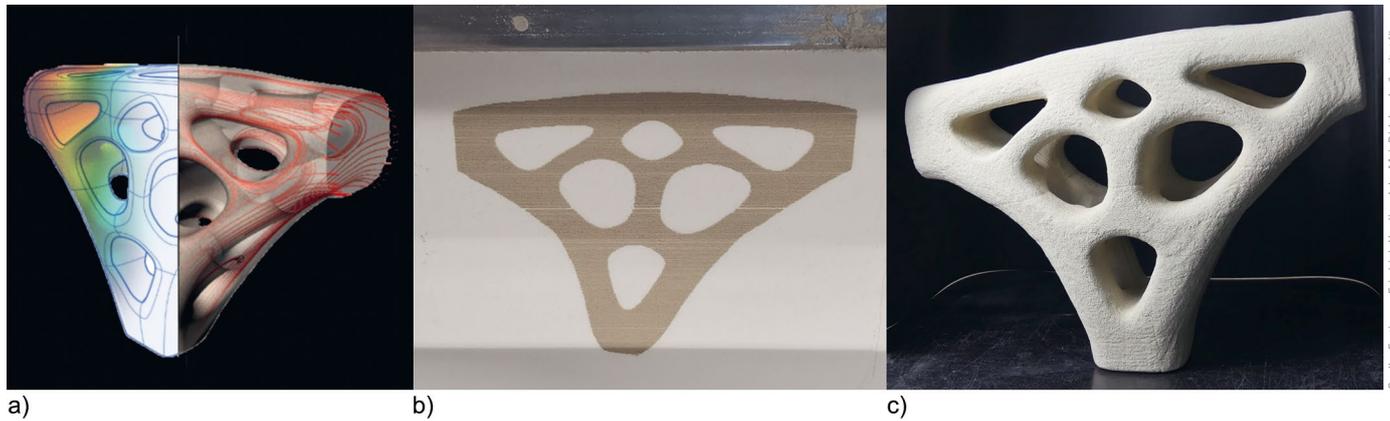


Bild 10 Topologieoptimierter Knotenpunkt, durch selektive Zementaktivierung gefertigt: a) Formfindung, b) Prozess, c) gedrucktes Ergebnis
Topology-optimised node additively manufactured with selective cement activation

schwindigkeiten bis zu 125 mm/s verformt. Damit können Umformvorgänge, wie sie beim Pressschweißen oder beim mechanischen Fügen auftreten, abgebildet und Umform-ZTU-Diagramme erstellt werden. Eine spezielle Zug-/Druckeinheit ermöglicht es, das Werkstoffverhalten unter Last auch bei hohen Temperaturen zu untersuchen und zu bewerten.

2.3 Selective Cement Activation – Partikelbett-3D-Druck durch selektive Zementaktivierung

Neben den ablegenden 3D-Beton-Druckverfahren wie der Extrusion oder dem Shotcrete 3D Printing stellen die Partikelbett-3D-Druckverfahren eine vielversprechende Alternative dar. Beim Partikelbett-3D-Druckverfahren der selektiven Zementaktivierung wird zunächst eine Partikelbettschicht bestehend aus Zement, Gesteinskörnung und ggf. Additiven aufgetragen und anschließend durch selektives Auftragen von Wasser lokal gebunden. Dieser Vorgang wird wiederholt, bis das gewünschte Objekt erstellt wurde. Der große Vorteil dieses Verfahrens liegt insbesondere in der Möglichkeit, Bauteile mit hohem Detaillierungsgrad und hoher Formfreiheit zu erstellen. Durch die Stützfunktion des nicht gebundenen Partikelbetts können auch Überhänge oder horizontal auskragende Bauteile realisiert werden (Bild 10).

Im Jahr 2020 wurde am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz an der TU Braunschweig (Dirk Lowke) ein Partikelbettdrucker für die selektive Zementaktivierung (Fa. Progress) als Teil des Projekts RheoStruc^{3D}Lab – Labor zur Charakterisierung von Baustoffen für das 3D-Drucken (Europäischer Fonds für regionale Entwicklungen und NBank, 85023242, Projektlaufzeit: 2018–2020) angeschafft. Der Partikelbettdrucker besitzt eine Baubox mit den Abmessungen $750 \times 400 \times 520 \text{ mm}^3$ ($L \times B \times H$) (Bild 11). Diese kann mit Partikelschüttungen befüllt werden, welche Korngrößen zwischen 0,01 und 2,5 mm beinhalten. Eine Walze verdichtet das Partikelbett und ermöglicht so höhere Packungsdichten als die Schüttdichte, was wiederum zu verbesserten mechanischen Eigenschaften der hergestellten Objekte führt. Die möglichen

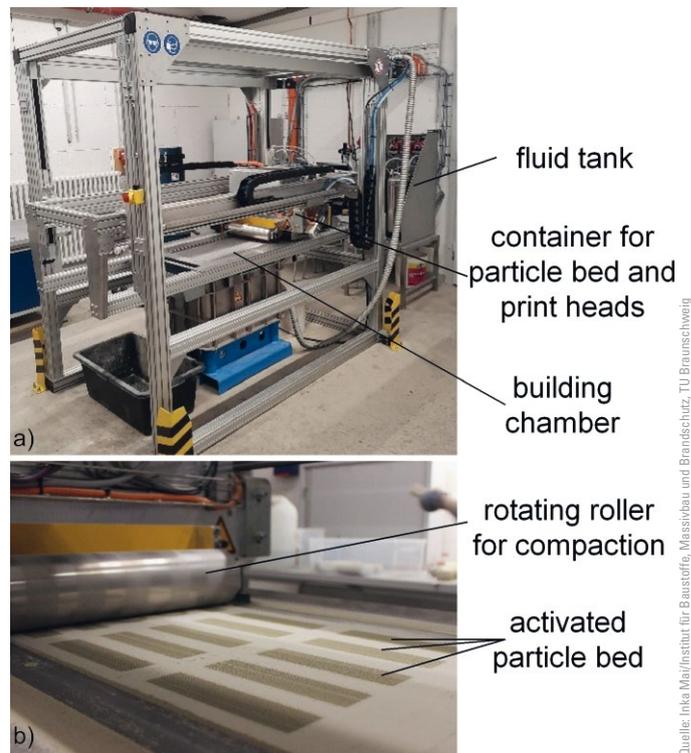


Bild 11 Partikelbettdrucker für selektive Zementaktivierung (a) sowie Ansicht des Druckers in Betrieb (b)
Particle bed printer for selective cement activation (a) and view of the printer in operation (b)

Schichtstärken sind variabel, wobei bisher 1–3 mm erprobt wurden. Für den Auftrag des Wassers oder alternativer Aktivatoren stehen zwei Flüssigkeitsvorratsbehälter zur Verfügung, die unabhängig voneinander die Düsenmodule beschicken können. Die Austrittsgeschwindigkeit der Flüssigkeit ist variabel einstellbar, wobei sich für Wasser Dosieraten von 2 bis 9 g/min als sinnvoll erwiesen haben. Je nach gewählter Dosierate, Düsendurchmesser und Fluidviskosität tritt das Fluid als einzelne Tropfen oder als Strahl aus. Erste Untersuchungen zeigen, dass beim Flüssigkeitsauftrag in Form eines Strahls eine höhere Präzision sowie höhere mechanische Festigkeiten erzielt werden können. Über die Austrittsmenge der Flüssigkeit sowie die Verfahrensgeschwindigkeit des Druckkopfs

kann bei bekannter Packungsdichte ein definierter w/z -Wert für die zu druckenden Objekte eingestellt werden. Die maximale horizontale Verfahrensgeschwindigkeit des Druckkopfs beträgt hierbei bis zu 30 m/min. Die vertikale Baurate ist unabhängig von der geometrischen Komplexität der zu druckenden Objekte in der Baubox und hängt allein von den gewählten Parametern Schichtstärke, horizontale Geschwindigkeit des Druckkopfs sowie Dosierrate der Flüssigkeit ab. Üblicherweise lässt sich ein Baufortschritt von ca. 2–4 mm/min erreichen.

Im Rahmen des AMC, Teilprojekt A01 (Particle-Bed 3D Printing by Selective Cement Activation (SCA) – Particle Surface Functionalisation, Particle-Bed Compaction and Reinforcement Implementation) wird der Partikelbettdrucker für die grundlegende Erforschung von Material-Prozess-Interaktionen eingesetzt. Dabei werden prozessseitig die einzelnen Teilprozesse und deren Parameter wie bspw. der Schichtauftrag (Schichtstärke), die Verdichtung (Verdichtungsintensität), der Flüssigkeitsauftrag (Auftragsrate), das Eindringen der Flüssigkeit und die Nachbehandlung (Art, Dauer) im Zusammenhang mit der Mischungszusammensetzung (Korngrößenverteilung, Zementart, Zusatzmittel) analysiert. Hierbei ist eine zentrale Fragestellung, wie das Zusammenspiel aus Material und Prozess gezielt genutzt werden kann, um möglichst hohe mechanische Festigkeit und eine gleichzeitig hohe geometrische Präzision der Objekte zu realisieren. Bereits jetzt kann gezeigt werden, dass die zuvor genannten Teilprozesse anhand der zugrunde liegenden Mechanismen nicht nur verstanden, sondern auch beschrieben werden können [29–34]. Ziel ist es, physikalisch basierte Materialmodelle für die selektive Zementaktivierung zu entwickeln, um die Eigenschaften der gedruckten Objekte gezielt steuern zu können sowie die Technik zur Herstellung von bewehrten Bauteilen zu erweitern. Damit wird die Voraussetzung geschaffen, dass zukünftig geometrisch komplexe, leistungsfähige, materialsparende und ökologische Bauteile hergestellt werden können.

2.4 AMC-Lab in Aching

Im AMC-Lab der Technischen Universität München in Aching bei Freising wird seit 2019 intensiv an unterschiedlichen Fragestellungen zur additiven Fertigung im Bauwesen geforscht. Das Ziel der von der TUM School of Engineering and Design betriebenen Einrichtung ist die Bündelung praktischer Versuchsaufbauten und die Förderung einer interdisziplinären Vernetzung der Forschenden.

Das AMC-Lab verfügt über eine 200 m² große Versuchshalle mit Werkstätten für die Metall- und Holzbearbeitung, einen Feinmörtelbereich sowie zusätzliche Arbeitsplätze für Kleinversuche und studentische Arbeiten. Darüber hinaus stehen dem AMC-Lab zwei möblierte Wohnungen zur Verfügung, die von Gastwissenschaftlern in gemeinsamen Forschungsprojekten angemietet werden können.

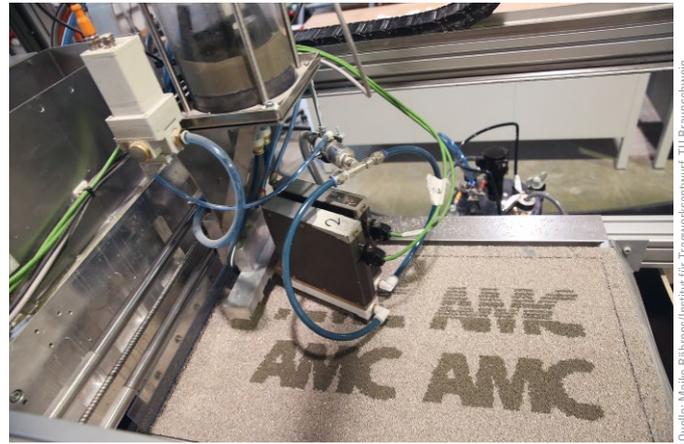


Bild 12 Selective Cement Paste Intrusion – Druckprozess im TUM AMC-Lab
Selective Cement Paste Intrusion during the printing process at the TUM AMC-Lab

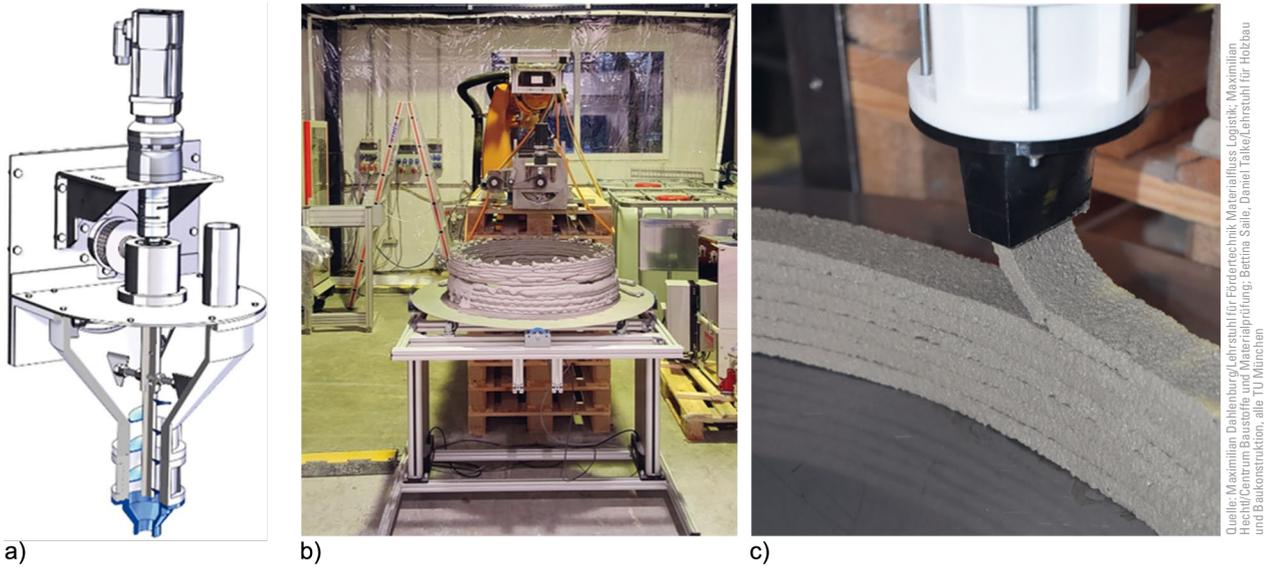
Zur Ausstattung der Versuchshalle zählen

- kleinformatige Fused-Deposition- und Stereolithografie-3D-Drucker zur Herstellung von Prototypen, aber auch funktionalen Bauteilen für die zahlreichen Versuchsgeräte,
- eine 3-Achs-CNC-Fräse mit einer Aufspannfläche von 1000 × 600 mm für die Bearbeitung von Holz, Kunststoff und Aluminium,
- ein KUKA KR210 6-Achs-Industrieroboter mit einer Reichweite von 2,7 m und einer Nutzlast von 150 kg,
- ein Anton Paar MCR702 Rheometer zur Untersuchung der Fließeigenschaften von 3D-Druck-Mörtel und
- ein Partikelbettdrucker für Selective Cement Activation und Selective Paste Intrusion (entwickelt innerhalb des DFG-Erkenntnistransferprojekts 389705984).

Den derzeitigen Forschungskern des AMC-Labs bilden drei A-Teilprojekte des TRR277, in denen neue Methoden der additiven Fertigung im Bauwesen erforscht werden. In dem Teilprojekt A02 wird das Partikelbettverfahren Selective Cement Paste Intrusion (SPI) mit Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) kombiniert, um 3D-gedruckte Stahlbetonbauteile zu realisieren. Für das Teilprojekt wurde der bestehende Partikelbettdrucker (ursprünglich für Selective Cement Activation entwickelt) mit einer Bauraumgröße von 140 l auf SPI umgerüstet (Bild 12).

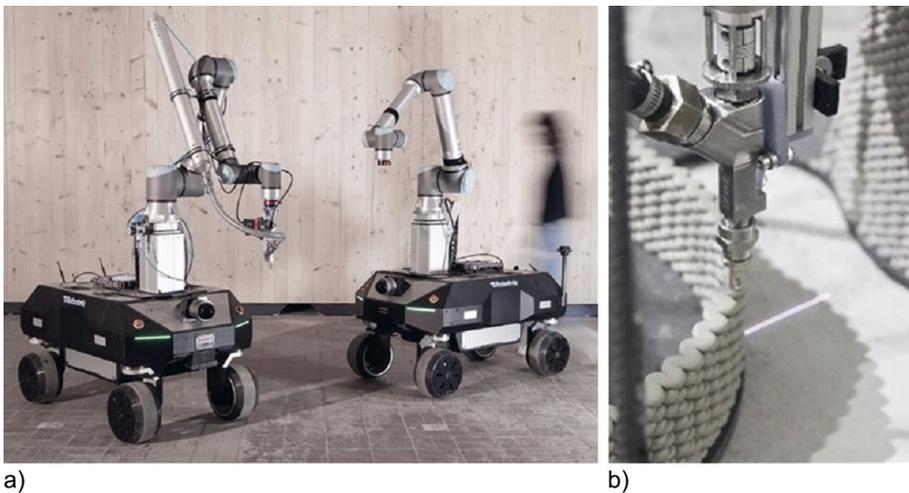
Teilprojekt A03 erforscht ein innovatives düsennahes Mischsystem zur Extrusion von Beton (Bild 13). Das entwickelte Gerät, welches über einen 6-Achs-Industrieroboter gesteuert wird, erlaubt eine präzise Steuerung der Materialzusammensetzung im Prozess und die Erstellung multifunktionaler gradierteter Betonbauteile im Realmaßstab.

Innerhalb des Teilprojekts A08 wird das neuartige Verfahren Individual Layer Fabrication (ILF) zur Herstellung von 3D-gedruckten Bauelementen aus recycelten Holzspänen und zugelassenen Holzklebstoffen erforscht. Das im Teilprojekt entwickelte Versuchsgerät, mit einer Bau-



Quelle: Maximilian Dahlenburg/Lehrstuhl für Fördertechnik, Materialfluss Logistik, Maximilian Hecht/Centrum Baustoffe und Materialprüfung, Bettina Sale, Daniel Talke/Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, alle TU München

Bild 13 a) Zeichnung Verdichtungsabschnitt V2, b) Industrieroboter mit Gradation Ready Extrusion System (GRES), c) Extrusion von düsennah gemischtem Beton
 a) Draft compression section V2, b) industrial robot with Gradation Ready Extrusion System (GRES), c) extrusion of near-nozzle mixed concrete



Quelle: Lidia Atanasova/TT Professorur Digitale Fabrikation, TU München

Bild 14 a) Zwei kollaborative mobile Roboter-Forschungsplattformen für in situ additive Fertigung, b) hier ausgestattet mit einem Keramik-3D-Drucksystem
 a) Two collaborative mobile robotic research platforms for in-situ additive manufacturing, b) here equipped with a ceramic 3D printing system

raumfläche von 500×500 mm, erlaubt es durch die Applikation von Pressdruck, während des Fertigungsprozesses den Klebstoffanteil der Bauteile drastisch zu reduzieren und für das Bauwesen taugliche Festigkeiten zu erreichen.

Diese und auch weitere im AMC-Lab angesiedelte Forschungsprojekte sind gekennzeichnet durch eine enge interdisziplinäre Zusammenarbeit der verschiedenen Projektteams und den ständigen projekt- und materialübergreifenden Austausch [35–37].

2.5 Mobile 3D-Druckeinheiten

Gegenwärtig werden additive Fertigungsprozesse direkt auf Baustellen mit großen stationären Systemen ausgeführt, von denen das Portalsystem am gebräuchlichsten ist. Diese stationären Einrichtungen bieten eine begrenzte

Skalierbarkeit, da sie üblicherweise das gesamte Bauvolumen abdecken müssen. Eine mögliche Alternative sind mobile 3D-Drucksysteme, die das Potenzial haben, Strukturen zu produzieren, die größer sind als sie selbst, die in Zukunft flexibel für die Fertigung vor Ort eingeführt werden können. An diesen Lösungen forscht Kathrin Dörfler, TT Professorin für Digitale Fabrikation an der TU München. Mobile 3D-Drucksysteme bieten das Potenzial zur Parallelisierung von Aufgaben und kooperativen Prozessen, bei denen mehrere Systeme an einzelnen Aufgaben zusammenarbeiten (Bild 15). Bei diesen mobilen Systemen handelt es sich jedoch um komplexe Entwicklungen, die die Kombination von Fachwissen auf mehreren Gebieten, u.a. der Robotik, der Bauinformatik, der Architektur und dem Bauingenieurwesen, erfordern. Ziel der Forschung in diesem Bereich ist es, experimentell Erkenntnisse aus dem Konzeptions- und Entwicklungsprozess eines als Forschungsplattform aufgebauten mobilen Systems zu gewinnen.



Quelle: TT-Professur Digitale Fabrikation, TU München

Bild 15 Visualisierung kooperierender mobiler Roboter beim extrusionsbasierten Beton-3D-Druck für Wandstrukturen direkt auf Baustellen
Visualisation of cooperating mobile robots in extrusion-based concrete 3D printing for wall structures directly on construction sites

Daher war es Ziel beim Aufbau zweier mobiler Forschungsplattformen, extrusionsbasiertes Fertigungsverfahren von Beton im Gebäudemaßstab durchführen zu können, für die vier Hauptkategorien mit jeweils spezifischen Anforderungen definiert wurden (Bild 14): A. der Roboter manipulator, B. die mobile Plattform, C. das Extrusionssystem und D. das Lokalisierungssystem.

- A. **Roboter manipulator:** Für die Manipulation des Endeffektors wurde ein kollaborativer Roboter UR10e von Universal Robots ausgewählt, der eine Reichweite von 1,3 m und ein maximales Endeffektorgewicht von 10 kg hat. Der Vorteil dieser anthropomorphen Manipulatoren besteht darin, dass sie 3D-Druckpfade ermöglichen. Da sie aufgrund der enthaltenen Kraftsensoren auch kollaborativ sind, wird außerdem eine räumliche enge Zusammenarbeit mit Menschen ermöglicht.
- B. **Die mobile Plattform:** Diese besteht aus dem Robotik RB-VOGUI+ System, das durch die Möglichkeit, entweder Hartgummireifen oder luftgefüllte Profilreifen zu montieren, sowohl für Innen- als auch für Außenumgebungen geeignet ist. Die omnidirektionale Bewegung des Systems ermöglicht eine vereinfachte Manövrierbarkeit über die Baustelle, da es in verschiedenen Konfigurationen Hindernissen ausweichen kann und einen reibungslosen Übergang unterstützt. Um den Maßstab des Gebäudes zu gewährleisten, ist eine Verlängerung erforderlich, damit der Endeffektor die Deckenhöhe erreicht. Gewählt wurde eine Erweiterung des statischen Arbeitsbereichs durch die Integration einer vertikalen Achse, wodurch der Roboter manipulator eine Gesamtablagehöhe von ca. 2,7 m erreichen kann. Dadurch entsteht eine mobile Plattform mit drei Freiheitsgraden, die in Kombination mit dem Roboter manipulator insgesamt neun Freiheitsgrade ergibt.
- C. **Extrusionssystem:** Dieses besteht aus zwei Teilen, 1) dem Materialversorgungssystem und 2) dem Materialablageungssystem. Für die Materialversorgung wurde das kontinuierliche Misch- und Pumpsystem M-Tec Duo-MixConnect gewählt, das aus einem Mischsystem und einem Materialfördersystem besteht. Dieses Mate-

rial wird dann dem Fördersystem zugeführt, wo das Material unter Druck gesetzt und durch einen Schlauch zum Materialauftragssystem am Endeffektor des Roboter manipulators transportiert wird.

- D. **Lokalisierungssystem:** Die Lokalisierung des mobilen AM-Systems ist in zwei Stufen unterteilt, wobei die erste Stufe die Lokalisierung der mobilen Plattform im globalen Koordinatensystem der Baustelle ist, die durch die Verwendung von SLAM ermöglicht wird. Die mobile Plattform ist dafür mit einem RoboSense Bpearl LiDAR ausgestattet, das ein halbkugelförmiges Sichtfeld mit einer absoluten Genauigkeit von bis zu ± 5 cm aufweist. Für eine verfeinerte Lokalisierung ist der Roboter mit einem Laser-Entfernungsmesser ausgestattet, mit dem die Position des Roboters in Bezug auf das gedruckte Objekt mit einer Genauigkeit von bis zu ± 5 mm geschätzt werden kann [28, 38–41].

2.6 Laser-Powder-Bed-Fusion – Laserstrahlschmelzverfahren

Das Laserstrahlschmelzverfahren ist ein additives Fertigungsverfahren für die Verarbeitung metallischer Werkstoffe. Das Verfahren hat sich in Branchen wie der Luft- und Raumfahrttechnik oder der Automobilindustrie bereits etabliert. Es zeichnet sich v. a. durch ein hohes Maß an geometrischer Gestaltungsfreiheit bei der Konstruktion der Bauteile aus. Auch für das Bauwesen birgt das Verfahren großes Potenzial für die additive Fertigung individualisierter und optimierter Stahlbauelemente.

Ein Beispiel hierfür sind die Verbindungsknoten moderner Freiform-Tragwerkstrukturen. Diese weisen bei vielen Konstruktionen einen hohen Individualisierungsgrad auf, welcher zu einem erhöhten Aufwand bei der konventionellen Fertigung führt. Der Einsatz des Laserstrahlschmelzens ermöglicht es, diesen Aufwand zu reduzieren. Zudem können durch die höhere Gestaltungsfreiheit Methoden der Kraftflussoptimierung eingesetzt und die Masse der Verbindungsknoten reduziert werden.

Im Bauwesen besteht v. a. der Bedarf nach großvolumigen Bauteilen. Die großen Skalen der Bauteile führen jedoch zu neuen Herausforderungen in Bezug auf die Reproduzierbarkeit und die Vorhersagbarkeit der mechanischen Eigenschaften. Für den Einsatz der Bauteile in sicherheitsrelevanten Anwendungen wie bspw. in Tragwerkstrukturen ist eine Kenntnis der mechanischen Eigenschaften der Bauteile erforderlich. Der Schwerpunkt im Sonderforschungsbereich Transregio 277 Additive Manufacturing in Construction (AMC) liegt deshalb auf der grundlegenden Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen dem Fertigungsprozess und den resultierenden mechanischen und metallurgischen Eigenschaften dieser Bauteile.

Für diese Untersuchungen werden im Rahmen des AMC am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der TU München zwei Laserstrahlschmelzanlagen der EOS GmbH eingesetzt.

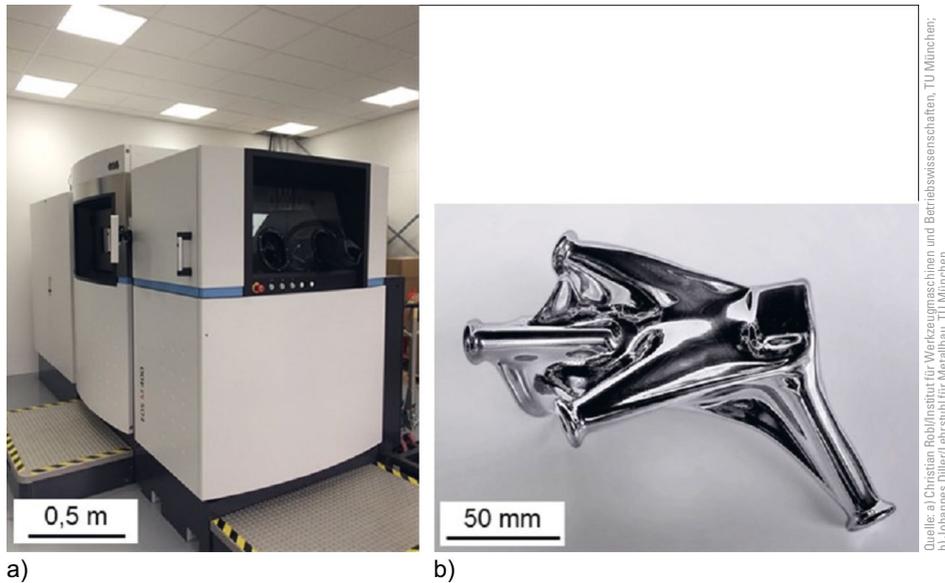


Bild 16 a) AM-Anlage vom Typ EOS M400, b) additiv gefertigter Verbindungsknoten eines Tensegrity-Turms
a) AM system type EOS M400, b) additively manufactured connecting node of a Tensegrity tower

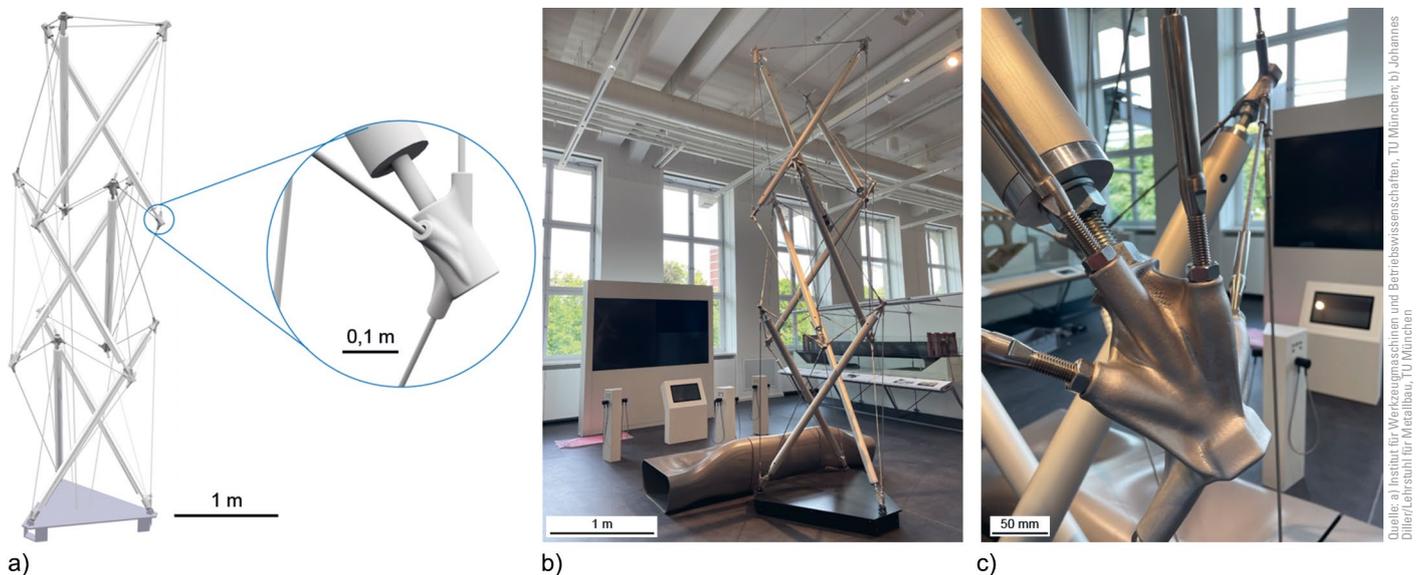


Bild 17 a) Entwurf Tensegrity-Turm mit Knotendetail, b) Tensegrity-Turm mit 3D-gedrucktem Knoten (c) aufgebaut im Deutschen Museum in München
a) Design Tensegrity tower with knot detail, b) Tensegrity tower with 3D-printed knot (c) set up in the Deutsches Museum in Munich

Die kleinere der beiden Laserstrahlschmelzanlagen ist vom Typ EOS M280. Der Bauraum hat die Dimensionen $250 \text{ mm} \times 250 \text{ mm} \times 325 \text{ mm}$ (x, y, z). Die kurzen Rüstzeiten und die gute Zugänglichkeit der Anlage ermöglichen es, die Untersuchungen zu den Prozess-Werkstoff-Wechselwirkungen schnell an neue Ergebnisse anzupassen. Im weiteren Verlauf des Projekts werden die gewonnenen Erkenntnisse auf eine größere Laserstrahlschmelzanlage vom Typ EOS M400 übertragen (Bild 16a). Mithilfe des Bauraums mit den Dimensionen $400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ (x, y, z) ist es möglich, Bauteile für die großen Skalen des Bauwesens und der Architektur zu fertigen (Bilder 16b, 17).

Neben der Verwendung der EOS-Anlagen im AMC werden diese in zahlreichen anderen Forschungsprojekten eingesetzt. Die Projekte befassen sich u. a. mit der experi-

mentellen Validierung einer am *iwb* entwickelten Prozesssimulation, mit Untersuchungen zu den fertigungstechnischen Grenzen des Verfahrens oder der Fertigung von Mikrostrukturen mit wirksamem und kontrollierbarem Dämpfungsverhalten [42–50].

3 In der Anschaffung befindliche AMC-Forschungsinfrastruktur

3.1 Mobile Roboter

Neben stationären digitalen Fertigungsanlagen können mobile Fertigungslösungen das Spektrum der digitalen Fertigung im Bauwesen deutlich erweitern. Daher wird derzeit am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig (Dirk Lowke) das Forschungs-



Bild 18 RoboCoop^{3D}: mobile Robotereinheiten für die kooperative digitale Fertigung im Bauwesen (Fa. Baubot)
 RoboCoop^{3D}: mobile robot units for cooperative digital manufacturing in construction industry (Fa. Baubot)

großgerät RoboCoop^{3D} angeschafft. RoboCoop^{3D} ist eine Einheit, bestehend aus zwei mobilen Robotern der Fa. Baubot mit jeweils sechs Gelenken, die zusammen kooperativ oder mit anderen mobilen oder stationären Robotern sowie weiteren Agenten integrativ agieren (Bild 18). Die beiden mobilen Roboter zeichnen sich durch verschiedene Traglastbereiche (70 kg bzw. 11 kg) sowie Reichweiten von > 3 m bzw. ca. 1,1 m aus und sollen in unterschiedlichen Funktionen zum Einsatz kommen. Die mobilen Roboter werden im Rahmen des DFG-Großgeräteantrags RoboCoop^{3D} – Mobile Robotereinheit für die kooperative digitale Fertigung im Bauwesen (DFG Großgerät 442517735, Laufzeit 2020–2022) beschafft und voraussichtlich im Q3/2022 in Betrieb genommen.

Mit dem RoboCoop^{3D} werden zukünftig zum einen digitale Fertigungsprozesse in situ auf der Baustelle bzw. am bestehenden Bauwerk etabliert, zum anderen werden die digitalen Fertigungsprozesse im Werk hinsichtlich ihrer Freiheitsgrade wesentlich erweitert. Neben dem Einsatz in der additiven Fertigung sollen in zukünftigen Forschungsvorhaben werkstoffübergreifend auch subtraktive Prozesse, Assemblierungsprozesse sowie die Bauwerksinstandsetzung und -verstärkung adressiert werden. Als Beispiel für die additive Fertigung sei hier der 3D-Druck von Betonbauteilen mit prozessparalleler Integration der Bewehrung genannt (Bild 16). Während ein mobiler Roboter mit seiner Mischer-Pumpeinheit ablegende, additive Fertigungsprozesse wie bspw. Extrusionsverfahren oder das Shotcrete 3D Printing ausführt, integriert der andere Roboter parallel die Bewehrung. Auch die prozessparallele Qualitätskontrolle oder aber die Installation von Sensorik im erstellten Bauteil durch den zweiten Roboter ist denkbar. Hierbei können sich die Roboter frei im Raum bewegen und mittels einer Totalstation gewünschte Positionen ansteuern. Die Mobilität der Roboter wird mit baustellengeeigneten, verfahrbaren Plattformen (> 5 km/h) sichergestellt und kann das Spektrum der digitalen Fertigung im Bauwesen somit maßgeblich erweitern, da eine Entkopplung vom Bauraum bzw. der Reichweite des Roboterarms erfolgt.

Die Etablierung digitaler In-situ- und On-Site-Fertigungsprozesse wird es zukünftig ermöglichen, die digitale Kette von der digitalen Planung (BIM) über die digitale Herstellung (z. B. additive Fertigung) bis zur digitalen Montage auf der Baustelle zu vervollständigen. Neben der Fertigung neuer Bauteile bzw. Bauwerke eröffnen mobile Roboter zudem vielversprechende Möglichkeiten im Hinblick auf die nachträgliche Verstärkung und Instandsetzung bestehender Bauwerke. Der RoboCoop^{3D} stellt somit eine zentrale Forschungsinfrastruktur für die 2. Förderperiode des Sonderforschungsbereichs dar.

3.2 Digitale Baustelle

Mit dem Projekt „Die digitale Baustelle – Bauindustrie 4.0 als Schlüssel für eine digitale und nachhaltige Bauwirtschaft“ soll ab dem zweiten Quartal 2023 eine einzigartige, innovative und digitale Großgeräteinfrastruktur an der TU Braunschweig installiert werden (www.tu-braunschweig.de/ibb/forschung/laufende-projekte/die-digitale-baustelle) (Bild 19). Mithilfe dieser Infrastruktur sollen digitale Technologien für die Bauproduktion unter realen Baustellenbedingungen erforscht und im Sinne der Industrie 4.0 als vernetztes System untersucht und weiterentwickelt werden. Additive Fertigungstechnologien stellen dabei Schlüsseltechnologien für den Wandel der Bauwirtschaft dar, denn sie besitzen das Potenzial zur Optimierung sämtlicher Dimensionen der Nachhaltigkeit (ökonomische, ökologische und soziale Aspekte). Die digitale Baustelle stellt hierfür eine anwendungsorientierte und vielseitig nutzbare Forschungsinfrastruktur dar, welche exzellente neue Forschungsmöglichkeiten zur Untersuchung der Chancen eines digitalen und integrierten Planungs- und Produktionsprozesses bietet.

Das Ziel der Forschung mit dem Forschungsgerät „Die digitale Baustelle“ einschließlich eines großformatigen 3D-Druckers, eines Digital Engineering Centers, modernen Tracking-Systemen sowie mobilen Robotereinheiten ist zum einen die Untersuchung der Integration digitaler Technologien in den Planungs- und Produktionsprozess konventioneller Bauverfahren. Zum anderen ist die Herstellung großformatiger, individualisierter und CO₂-armer 3D-Druckbauteile vorgesehen. Der neue Forschungsansatz besteht darin, dass die Geräteinfrastruktur im Sinne der Industrie 4.0 mit sämtlichen Anlagen, Maschinen und Facharbeitern digital vernetzt ist. Durch den großformatigen 3D-Drucker können u. a. Bauteile direkt auf der Baustelle hergestellt werden. Neben den statisch-konstruktiven Anforderungen ergeben sich hierdurch auch völlig neue Möglichkeiten für die Fertigung aufgrund der veränderten Logistik. Waren Bauteile bisher durch Transportgrößen bei der Vorfertigung begrenzt, können beim Vor-Ort-Drucken auf der digitalen Baustelle durch den Wegfall der Transportbeschränkungen entweder Bauwerke im Ganzen oder in sehr großformatigen Bauteilen hergestellt werden. Dies reduziert den CO₂-Footprint und erhöht die Fertigungsgeschwindigkeit. Außerdem fallen weniger Bauteilfugen an, was die Komple-

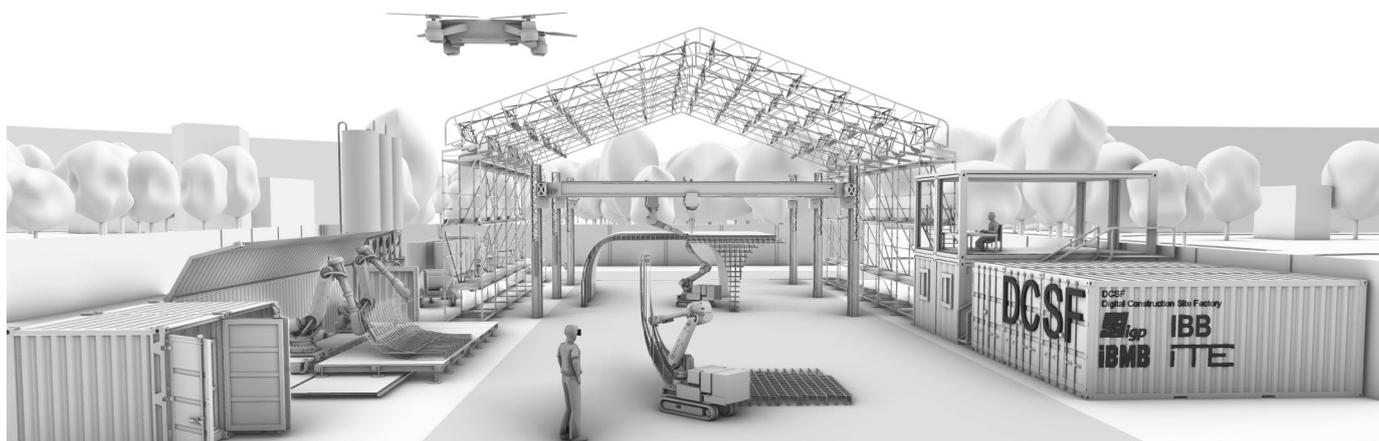


Bild 19 Vision und konzeptioneller Entwurf der digitalen Baustelle
Vision and conceptual design of the digital construction site

xität bei der Bauausführung und damit auch die Kosten reduziert.

Ein maßgebendes Ziel ist die Erprobung der baupraktischen Anwendung der bisher im Rahmen des DFG-Sonderforschungsbereichs AMC erzielten Grundlagenforschungen im Bauwerksmaßstab 1:1. Ein besonderes Augenmerk wird auf der Berücksichtigung von Nachhaltigkeitskriterien liegen. Die Forschung ist hochgradig interdisziplinär und wird neben neuen technologischen Prozessentwicklungen auch zu neuen qualifizierten Facharbeitsprofilen auf einem höheren Niveau führen. Zur Bearbeitung der interdisziplinären Forschungsfragen wirken insbesondere das Institut für Geodäsie und Photogrammetrie (IGP), das Institut für Tragwerksentwurf (ITE), das Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) sowie das Institut für Bauwirtschaft und Baubetrieb (IBB) der TU Braunschweig mit (die Einbindung weiterer Institute und Fachkompetenzen ist vorgesehen). Aktuell laufen die Planungen der vorbereitenden Leistungen und der Gerätebeschaffung. Der Start der Forschungstätigkeiten ist für Q2/2023 vorgesehen. Die Finanzierung erfolgt aus dem Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE).

4 Ausblicke

Der Sonderforschungsbereich TRR 277 Additive Manufacturing in Construction (AMC) verbindet die wesentliche Grundlagenforschung mit immer komplexeren Geräten. Dadurch werden die erforschten Technologien in ihrer tatsächlichen Anwendbarkeit für das Bauwesen realistisch einsetzbar. Die bestehende und wachsende Forschungsinfrastruktur des AMC ist in ihrem Vielklang der additiven Fertigung in der Lage, den Bauprozess per 3D-Druck abbilden zu können. In der Zukunft wird es ein weiteres AMC-Lab an der TU München geben, hier wird ein großformatiger Portalroboter zur Erforschung von neuen Materialauftragsverfahren, sowohl mit zementösen wie auch metallischen Werkstoffen, im 1:1 Baumaßstab eingesetzt. Dieses DFG-geförderte Großgerät, mit einer



Bild 20 FLOWall – Entwurf für einen ökologischen und individuellen Küstenschutz
FLOWall – design for ecological and individualised coastal protection

Fördersumme von 1 Mio. Euro, wird zu $\frac{1}{4}$ aus Mitteln der TU München und zu $\frac{1}{4}$ aus bayerischen Landesmitteln mitfinanziert.

Ein weiteres Beispiel und Ausblick für die Anwendung der AMC-Großgeräte ist die kürzlich entwickelte additiv gefertigte Küstenschutzstruktur (CPS), welche die digitalen Technologien für die individuelle und ökologische Gestaltung von städtischen Küstenlinien nutzt. Aus diesem Konzept ergeben sich adaptive Strukturen, die eine wirtschaftliche und anpassungsfähige Möglichkeit zur Renaturierung toter Küstenlinien durch die Kombination neuartiger additiver Fertigungsverfahren bieten (Bild 20).

Auch bei der Anpassung vorhandener innerstädtischer Verkehrsnetze an neue Mobilitätsanforderungen kann der AMC innovative Konzepte ermöglichen. Beispielsweise durch das Anordnen von Verkehrsinfrastrukturen in der Höhe könnte eine neuartige innerstädtische Elevated Mobility (Bild 21) geschaffen werden, die die Anforderungen der unterschiedlichen Mobilitätsgruppen berücksichtigt, ohne dabei mehr Flächen zu verbrauchen. In Kombination mit digitalen Planungstechnologien können die geometrisch komplexen Formen der sog. Mobility



Bild 21 Elevated Mobility
Elevated Mobility

Levels individualisiert hergestellt und in die bestehenden Stadträume passgenau integriert werden.

Doch auch in Hinblick auf eine weitere Zielgruppe ist der AMC aktiv und baut seine Infrastruktur weiter aus. Mit einem zusätzlichen Teilprojekt, das sich nicht explizit mit der Forschung zur additiven Fertigung beschäftigt, sondern sich einer interessierten Öffentlichkeit widmet, stellt sich der Sonderforschungsbereich auch im Bereich der Öffentlichkeitsarbeit breiter auf. Durch die Initialisierung von Lernlaboren und Makerspaces sollen ganz besonders jungen Menschen die Prozesse und Techniken des 3D-

Drucks nähergebracht werden. Der Aufbau von AMC Learning Labs soll in Form von mobilen Trucks erfolgen. Dort sollen Kinder und Jugendliche flexibel und mobil Einblicke in die 3D-Techniken erhalten. Der AMC setzt sich das Ziel, mit diesen Mitmach- und Lernlaboren jungen Menschen authentische Bauprozesse und Technologien aus erster Hand erlebbar zu machen. Grundsätzlich geht es um die Begeisterung für den MINT-Bereich und das Vertrautmachen von Technologien und Prozessen und hier insbesondere den Abbau von Berührungsängsten gegenüber hochtechnologischer Forschung und Entwicklung.

Quelle: Christian Gümbel/Harald Kloft, Institut für Tragwerkslehre, TU Braunschweig

Dank

Die Autorinnen und Autoren bedanken sich für die Förderung des SFB Transregio 277 – Additive Fertigung im Bauwesen (AMC) durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – TRR 277/1 2020 – Projektnummer 414265976.

Die Autoren bedanken sich ebenfalls bei den Industriepartnern MC Bauchemie, Baubot (Wien), Progress 3D Innovation, Rösler Oberflächentechnik GmbH und Prof. Frank Krafft, Hochschule München für die Unterstützung.

Literatur

- [1] Kloft, H. et al. (2021) *TRR 277: Additive manufacturing in construction*. Civil Engineering Design 3, no. 4, pp. 113–122. <https://doi.org/10.1002/CEND.202100026>
- [2] Kloft, H. et al. (2021) *TRR 277: Additive Fertigung im Bauwesen*. Bautechnik 98, H. 3, S. 222–231. <https://doi.org/10.1002/bate.202000113>
- [3] Neudecker, S. et al. (2016) *A New Robotic Spray Technology for Generative Manufacturing of Complex Concrete Structures Without Formwork*. Procedia CIRP 43. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.107>
- [4] Lindemann, H. et al. (2019) *Development of a shotcrete 3D-printing (SC3DP) technology for additive manufacturing of reinforced freeform concrete structures*. RILEM Bookseries 19. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99519-9_27
- [5] Baghdadi, A.; Doerrie, R.; Kloft, H. (2020) *New calculation approach for selecting and orienting the reinforcing material for robotic concrete manufacturing* in: International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) [eds.] *Proceedings of IASS Annual Symposia*. IASS 2020/21, Surrey, Aug. 23–27, 2021. pp. 1–11. www.ingentaconnect.com/content/iass/piass/2020/00002020/00000003/art00010
- [6] Lachmayer, L.; Dörrie, R.; Kloft, H.; Raatz, A. (2021) *Automated shotcrete 3D printing – Printing interruption for extended component complexity* in: The International Association for Automation and Robotics in Construction [eds.] *Proceedings of the 38th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*. ISARC, Dubai, Nov. 2–5, 2021. <https://doi.org/10.22260/ISARC2021/0098>
- [7] Dörrie, R.; Kloft, H. (2022) *Force Flow Compliant Robotic Path Planning Approach for Reinforced Concrete Elements Using SC3DP* in: Buswell, R. et al. [eds.] *Third RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*. Digital Concrete 2022, Loughborough, June 27–29, 2022. Cham: Springer International Publishing, pp. 370–375. https://doi.org/10.1007/978-3-031-06116-5_55
- [8] Hack, N. et al. (2021) *Development of a robot-based multi-directional dynamic fiber winding process for additive manufacturing using shotcrete 3d printing*. Fibers 9, no. 6. <https://doi.org/10.3390/fib9060039>
- [9] Gantner, S.; Rothe, T.; Hühne, C.; Hack, N. (2022) *Reinforcement Strategies for Additive Manufacturing in Construction Based on Dynamic Fibre Winding: Concepts and Initial Case Studies* in: Fromm, A.; Mechtcherine, V. [eds.] *Open Conference Proceedings, Vol. 1: Vision and Strategies for Reinforcing Additively Manufactured Concrete Structures*. Dresden: TU Dresden, pp. 45–59. <https://doi.org/10.52825/OCP.V1I.78>
- [10] Gantner, S. et al. (2022) *Core Winding: Force-Flow Oriented Fibre Reinforcement in Additive Manufacturing with Concrete*. RILEM Bookseries 37, pp. 391–396. https://doi.org/10.1007/978-3-031-06116-5_58
- [11] Mai, I. et al. (2021) *Large Particle 3D Concrete Printing – A Green and Viable Solution*. Materials 14, no. 20, p. 6125. <https://doi.org/10.3390/MA14206125>
- [12] Baghdadi, A.; Meshkini, A.; Kloft, H. (2020) *Parametric design of in-plane concrete dry joints by FE method and Fuzzy logic toward utilising additive manufacturing technique* in: International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) [eds.] *Proceedings of IASS Annual Symposia*. IASS 2020/21, Surrey, Aug. 23–27, 2021. www.ingentaconnect.com/contentone/iass/piass/2020/00002020/00000021/art00002
- [13] Baghdadi, A.; Heristchian, M.; Ledderose, L.; Kloft, H. (2020) *Experimental and numerical assessment of new pre-*

- cast concrete connections under bending loads. *Engineering Structures* 212, 110456. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2020.110456>
- [14] Baghdadi, A.; Heristchian, M.; Kloft, H. (2021) *Connections placement optimization approach toward new prefabricated building systems*. *Engineering Structures* 233, 111648. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111648>
- [15] Baghdadi, A.; Meshkini, A. (2021) *Inspiration of interlocking wooden puzzles in precast buildings concrete construction* in: Fivet, C. et al. [eds.] *fib Conceptual Design of Structures*. International fib Symposium, Riedholz, Sep. 16–18, 2021. <https://doi.org/10.35789/fib.proc.0055.2021.cdsymp.p066>
- [16] Lanwer, J.-P. et al. (2022) *Jointing Principles in AMC – Part 1: Design and Preparation of Dry Joints*. *Applied Sciences* 12, no. 9, p. 4138. <https://doi.org/10.3390/app12094138>
- [17] Thiele, K.; Unglaub, J.; Begemann, F. (2020) *Additive Fertigung: Vom WAAM-Bauteil zum WAAM-Bauwerk*. *Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau*, S. 19–24.
- [18] Müller, J. et al. (2019) *Design and parameter identification of wire and arc additively manufactured (WAAM) steel bars for use in construction*. *Metals (Basel)* 9, no. 7. <https://doi.org/10.3390/met9070725>
- [19] Hensel, J. et al. (2022) *Surface quality parameters for structural components manufactured by DED-arc processes*. *Materials and Design* 215, 110438. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110438>
- [20] Kloft, H. et al. (2019) *Robotische Fabrikation von Bauteilen aus Stampflehm*. *Deutsche BauZeitschrift DBZ*, H. 7/8. www.dbz.de/artikel/dbz_Robotische_Fabrikation_von_Bauteilen_aus_Stampflehm_3390495.html
- [21] Schweiker, M. et al. (2021) *Ten questions concerning the potential of digital production and new technologies for contemporary earthen constructions*. *Building and Environment* 206, 108240. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108240>
- [22] Geier, M.; Kutscher, K.; Krafczyk, M. (2021) *A Direct Effective Viscosity Approach for Modeling and Simulating Bingham Fluids with the Cumulant Lattice Boltzmann Method*. *Open Journal of Fluid Dynamics* 11, no. 1, pp. 34–54. <https://doi.org/10.4236/OJFD.2021.111003>
- [23] Geier, M.; Lenz, S.; Schönherr, M.; Krafczyk, M. (2021) *Under-resolved and large eddy simulations of a decaying Taylor-Green vortex with the cumulant lattice Boltzmann method*. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics* 35, no. 2, pp. 169–208. <https://doi.org/10.1007/S00162-020-00555-7>
- [24] Lachmayer, L. et al. (2022) *Autonomous Sensing and Localization of a Mobile Robot for Multi-Step Additive Manufacturing in Construction*. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 43B1, pp. 453–458. <https://doi.org/10.5194/ISPRS-ARCHIVES-XLIII-B1-2022-453-2022>
- [25] Lachmayer, L.; Recker, T.; Raatz, A. (2022) *Contour Tracking Control for Mobile Robots applicable to Large-scale Assembly and Additive Manufacturing in Construction*. *Procedia CIRP* 106, pp. 108–113. <https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2022.02.163>
- [26] Dielemans, G. et al. (2021) *Additive Manufacturing of Thermally Enhanced Lightweight Concrete Wall Elements with Closed Cellular Structures*. *Journal of Facade Design and Engineering* 9, no. 1, pp. 59–72. <https://doi.org/10.7480/jfde.2021.1.5418>
- [27] Buswell, R. et al. (2020) *Inspection Methods for 3D Concrete Printing*. *RILEM Bookseries* 28, pp. 790–803. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49916-7_78
- [28] Mawas, K.; Maboudi, M.; Gerke, M. (2022) *Automatic Geometric Inspection in Digital Fabrication*. www.geoinfo.uni-bonn.de/DGKGeoInfo2022/pdf-dokumente/03_DGKGeoInfo2022_MAWAS-MABOUDI-GERKE_paper_7370.pdf
- [29] Lowke, D. et al. (2018) *Particle-bed 3D printing in concrete construction – possibilities and challenges*. *Cement and Concrete Research* 112, pp. 50–65.
- [30] Lowke, D. et al. (2020) *Particle-bed 3D-printing by Selective Cement Activation – Applications, material and process technology*. *Cement and Concrete Research* 134, Special Issue, 106077. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106077>
- [31] Herding, F.; Mai, I.; Lowke, D. (2022) *Effect of Curing in Selective Cement Activation* in: Buswell, R. et al. [eds.] *Third RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*. Digital Concrete 2022, Loughborough, June 27–29, 2022. Cham: Springer International Publishing, pp. 283–288.
- [32] Lowke, D. et al. (2022) *Material-process interactions in particle bed 3D printing and the underlying physics*. *Cement and Concrete Research* 156, 106748. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106748>
- [33] Mai, I.; Lowke, D.; Perrot, A. (2022) *Fluid intrusion in powder beds for selective cement activation – an experimental and analytical study*. *Cement and Concrete Research* 156, 106771. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106771>
- [34] Mai, I.; Herding, F.; Lowke, D. (2022) *Evaluating the Effect of Methyl Cellulose on Hardened State Properties in Selective Cement Activation* in: Buswell, R. et al. [eds.] *Third RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*. Digital Concrete 2022, Loughborough, June 27–29, 2022. Cham: Springer International Publishing, pp. 289–295.
- [35] Weger, D. et al. (2020). *Reinforced Particle-Bed Printing by Combination of the Selective Paste Intrusion Method with Wire and Arc Additive Manufacturing – A First Feasibility Study* in: Bos, F.; Lucas, S.; Wolfs, R.; Salet, T. [eds.] *Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*. DC 2020, July 6–9, 2020. RILEM Bookseries 28. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49916-7_95
- [36] Tan, Y.; Dahlenburg, M.; Kessler, S.; Fottner, J. (2021) *Virtual Prototyping mit DEM zur Entwicklung eines Near-Nozzle-Mixing Verfahrens für den additiven 3D Betondruck für den Roboter Einsatz*. 25. Fachtagung Schüttgutförder-technik, OVGU Magdeburg. Magdeburg, 22./23. Sept. 2021.
- [37] Buschmann, B. et al. (2021) *Additive Manufacturing of Wood Composite Panels for Individual Layer Fabrication (ILF)*. *Polymers* 13, 3423. <https://doi.org/10.3390/polym13193423>
- [38] Dielemans, G. et al. (2022) *Mobile Additive Manufacturing: A Case Study of Clay Formwork for Bespoke in Situ Concrete Construction* in: Buswell, R. et al. [eds.] *Third RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*. Digital Concrete 2022, Loughborough, June 27–29, 2022. Cham: Springer International Publishing, pp. 15–21.
- [39] Lachmayer, L. et al. (2022) *Autonomous Sensing And Localization Of A Mobile Robot For Multi-Step Additive Manufacturing In Construction*. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XLIII-B1-2022, pp. 453–458. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2022-453-2022>
- [40] Dörfler, K. (2022) *Additive Manufacturing Using Mobile Robots: Opportunities and Challenges for Building Construction*. *Cement and Concrete Research* 158, 106772. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106772>

- [41] Dielemans, G.; Dörfler, K. (2021) *Mobile Additive Manufacturing: A robotic system for cooperative on-site construction*. IROS 2021 Workshop “Robotic Fabrication: Sensing in Additive Construction” (accepted).
- [42] Bayerlein, F.; Zaeh, M. F. (2017) *Continuous Verification and Validation for the Simulation of Distortion in Laser Beam Melting*. Simulation for Additive Manufacturing, Munich, Oct. 11–13, 2017. pp. 89–90. www.cie.bgu.tum.de/Sim-AM2017/images/download/simam17_bookofabstracts.pdf
- [43] Weirather, J. et al. (2019) *A Smoothed Particle Hydrodynamics Model for Laser Beam Melting of Ni-based Alloy 718*. Computers & Mathematics with Applications 78, no. 7, pp. 2377–2394. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2018.10.020> <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0898122118306175?via%3DIihub>
- [44] Robl, C.; Wolf, D.; Zaeh, M. F. (2019) *Method for the Simulative Determination of the Effective Mechanical Material Parameters of Support Structures in Laser Beam Melting*. Simulation for Additive Manufacturing, Pavia, Sep. 11–13, 2019. <https://congress.cimne.com/sim-am2019/admin/files/fileabstract/a251.pdf>
- [45] Haeussinger, C. et al. (2020) *On-Machine Measuring Method for the Reconstruction of Additively Manufactured Near-Net Shaped Parts*. Procedia CIRP 92, pp. 175–180. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.186>
- [46] Bayerlein, F. (2020) *Managing Form Deviation in Laser Beam Melting by Pre-Deformation* [Dissertation]. TU München. mediatum.ub.tum.de/1535958
- [47] Goetz, D.; Bachmann, A.; Wimmer, A.; Zaeh, M. F. (2021) *Topologieoptimierung beim Laser-Strahlschmelzen – Konzept zur Berücksichtigung des Fertigungsprozesses*. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb ZWF 116, S. 1–2. <https://doi.org/10.1515/zwf-2021-0001>
- [48] Diller, J.; Radlbeck, C.; Mensinger, M. (2020) *Einfluss der Abkühlrate auf das Korngefüge von Bauteilen aus austenitischem Edelstahl, hergestellt durch pulverbettbasiertes Laserstrahlschmelzen (LPBF)* (Veröffentlichung im Rahmen des AMC). Stahlbau 89, H. 12. S. 970–980. <https://doi.org/10.1002/stab.202000034>
- [49] Ghantasala, A. et al. (2021) *Node-Based Shape Optimization and Mechanical Test Validation of Complex Metal Components and Support Structures, Manufactured by Laser Powder Bed Fusion* (Veröffentlichung im Rahmen des AMC) in: Trzcielinski, S. et al. [eds.] *Advances in Manufacturing, Production Management and Process Control. Proceedings of the AHFE 2021 Virtual Conferences on Human Aspects of Advanced Manufacturing, Advanced Production Management and Process Control, and Additive Manufacturing, Modeling Systems and 3D Prototyping. Lecture Notes in Networks and Systems 274*. AHFE 2021, July 25–29, 2021. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80462-6_2
- [50] Harbig, J. et al. (2022) *Methodology to Determine Melt Pool Anomalies in Powder Bed Fusion of Metals Using a Laser Beam by Means of Process Monitoring and Sensor Data Fusion* (Veröffentlichung im Rahmen des AMC). Materials 15, no. 3, 1265. <https://doi.org/10.3390/ma15031265>

Autorinnen und Autoren

Prof. Dr.-Ing. Harald Kloft
h.kloft@tu-braunschweig.de
Technische Universität Braunschweig
Institut für Tragwerksentwurf
Pockelsstraße 4
38106 Braunschweig

Prof. Dr. sc. ETH Kathrin Dörfler
doerfler@tum.de
Technische Universität München
TT Professur Digitale Fabrikation
Arcisstraße 21
80333 München

Meike Bährens M.A.
m.baehrens@tu-braunschweig.de
Technische Universität Braunschweig
Institut für Tragwerksentwurf
Pockelsstraße 4
38106 Braunschweig

M. Sc. Gido Dielemans
gido.dielemans@tum.de
Technische Universität München
TT Professur Digitale Fabrikation
Arcisstraße 21
80333 München

M. Sc. Johannes Diller
johannes.diller@tum.de
Technische Universität München
Lehrstuhl für Metallbau
Arcisstr. 21
80333 München

M. Sc. Robin Dörrie (Korrespondenzautor)
r.doerrie@tu-braunschweig.de
Technische Universität Braunschweig
Institut für Tragwerksentwurf
Pockelsstraße 4
38106 Braunschweig

M. Sc. Stefan Gantner
stefan.gantner@tu-braunschweig.de
Technische Universität Braunschweig
Institut für Tragwerksentwurf
Pockelsstraße 4
38106 Braunschweig

Prof. Dr. Jonas Hensel
jonas.hensel@mb.tu-chemnitz.de
Technische Universität Chemnitz
Institut für Füge- und Montagetechnik
Reichenhainer Straße 70
09126 Chemnitz

Prof. Dr. Anna Keune
anna.keune@tum.de
Technische Universität München
Department Educational Sciences
Arcisstr. 21
80333 München

Prof. Dr.-Ing. Dirk Lowke
D.Lowke@ibmb.tu-bs.de
Technische Universität Braunschweig
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
Beethovenstraße 52
38106 Braunschweig

Dr.-Ing. Inka Mai
i.mai@ibmb.tu-bs.de
Technische Universität Braunschweig
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
Beethovenstraße 52
38106 Braunschweig

Dr.-Ing. Jeldrik Mainka
jeldrik.mainka@tu-braunschweig.de
Technische Universität Braunschweig
Institut für Tragwerksentwurf
Pockelsstraße 4
38106 Braunschweig

M. Sc. Gerrit Placzek
g.placzek@tu-braunschweig.de
Technische Universität Braunschweig
Institut für Bauwirtschaft und Baubetrieb
Schleinitzstraße 23A
38106 Braunschweig

M. Ed. Bettina Saile
bettina.saile@tum.de
Technische Universität München
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Arcisstraße 21
80333 München

M. Eng. Ronny Scharf-Wildenhain
ronny.scharf-wildenhain@mb.tu-chemnitz.de
Technische Universität Chemnitz
Institut für Füge- und Montagetechnik
Reichenhainer Straße 70
09126 Chemnitz

Prof. Dr.-Ing. Patrick Schwerdtner
patrick.schwerdtner@tu-braunschweig.de
Technische Universität Braunschweig
Institut für Bauwirtschaft und Baubetrieb
Schleinitzstraße 23A
38106 Braunschweig

M. Sc. Sebastian Kock
s.kock@tu-braunschweig.de
Technische Universität Braunschweig
Institut für Bauwirtschaft und Baubetrieb
Schleinitzstraße 23A
38106 Braunschweig

M. Sc. Dorina Siebert
dorina.siebert@tum.de
Technische Universität München
Lehrstuhl für Metallbau
Arcisstr. 21
80333 München

M. Sc. Daniel Talke
talke@tum.de
Technische Universität München
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Arcisstraße 21
80333 München

M. Sc. David Wenzler
david.wenzler@iwb.tum.de
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften
Boltzmannstraße 15
85748 Garching b. München

Zitieren Sie diesen Beitrag

Kloft, H.; Dörfler, K.; Bährens, M.; Dielemans, G.; Diller, J.; Dörrie, R.; Gantner, S.; Hensel, J.; Keune, A.; Lowke, D.; Mai, I.; Mainka, J.; Placzek, G.; Saile, B.; Scharf-Wildenhain, R.; Schwerdtner, P.; Kock, S.; Siebert, D.; Talke, D.; Wenzler, D. (2022) *Die Forschungsinfrastruktur des SFB TRR 277 AMC Additive Fertigung im Bauwesen*. Bautechnik 99, H. 10, S. 758–773. <https://doi.org/10.1002/bate.202200076>