

BBSR-
Online-Publikation
27/2023

CONPrint3D[®]-reinforced

Bewehrungsintegration in 3D-gedruckte Betonbauteile

von

Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine
Prof. Dr.-Ing. Frank Will
Prof. Dr.-Ing. Jens Otto
Markus Taubert
Florian Storch
Paul Plaschnick
Patrick Maiwald
Robert Jahn

CONPrint3D[®]-reinforced

Bewehrungsintegration in 3D-gedruckte Betonbauteile

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-20.05

Projektlaufzeit: 06.2021 bis 03.2023

IMPRESSUM

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Fachbetreuer

Dr. Michael Brüggemann, Brüggemann Kisseler Ingenieure
im Auftrag des BBSR, Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“
zb@bbr.bund.de

Autoren

Technische Universität Dresden, Institut für Baustoffe
Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine (Projektleitung)
Dipl.-Ing. Markus Taubert

Technische Universität Dresden, Professur für Baumaschinen
Prof. Dr.-Ing. Frank Will
Dipl.-Ing. Florian Storch
Dipl.-Ing. Paul Plaschnick

Technische Universität Dresden, Institut für Baubetriebswesen
Prof. Dr.-Ing. Jens Otto
Dipl.-Ing. Patrick Maiwald
Dipl.-Ing. (BA) Robert Jahn, M. Sc.

Redaktion

Technische Universität Dresden
Dipl.-Ing. Markus Taubert
Dipl.-Ing. Florian Storch
Dipl.-Ing. Patrick Maiwald

Stand

März 2023

Gestaltung

Technische Universität Dresden
Dipl.-Ing. Markus Taubert
Dipl.-Ing. Florian Storch
Dipl.-Ing. Patrick Maiwald

Bildnachweis

Titelbild: Technische Universität Dresden
Weitere Abbildungen: Technische Universität Dresden (wenn nicht anders kenntlich gemacht)

Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitierweise

Mechtcherine, Viktor; Will, Frank; Otto, Jens; Taubert, Markus; Storch, Florian; Plaschnick, Paul; Maiwald, Patrick; Jahn, Robert, 2023: ConPrint3D-reinforced: Bewehrungsintegration in 3D-gedruckte Betonbauteile. BBSR-Online-Publikation 27/2023, Bonn.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	6
Abstract	8
Einleitung	10
Forschungsfrage	10
Kontext der Forschungs- und Entwicklungsaufgabe	10
Zielsetzung	12
Ausgangssituation	12
Variante 1 - Aufgesetzte Bewehrungsmatte	12
Variante 2 - Umdruckter Bewehrungskorb	12
Variante 3 - Synchroner Bewehrungseinbau	12
Lösungsmethoden	13
Projektorganisation	13
Ergebnisse des Institutes für Baustoffe (IfB)	15
Anforderungen	15
Betonentwurf	15
Variante 1 - Aufgesetzte Bewehrungsmatte	15
Variante 2 - Umdruckter Bewehrungskorb	16
Variante 3 - Synchroner Bewehrungseinbau	17
Fließmitteleinstellung	17
Rheologische Eigenschaften	17
Pumpverhalten	18
Mechanische Eigenschaften im Vergleich zu konventionell hergestellten Beton	18
Versagensverhalten	18
Bewehrungsverbund	18
3D-Auszughülse	20
Bewehrungsverbund bei Vibrationsanregung	21
Bewehrungsverbund unter thermischer Einwirkung	22
Dauerhaftigkeit	25
Empfehlungen zu Prüfverfahren	25
Ergebnisse der Professur für Baumaschinen (PBM)	27
Entwicklungsprozess	27

Druckkopf	33
Variante 1 - Aufgesetzte Bewehrungsmatte	33
Variante 2 - Umdruckter Bewehrungskorb	35
Variante 3 - Synchroner Bewehrungseinbau	38
Ergebnisse des Instituts für baubetriebswesen (IBB)	46
Anforderungen	46
Prozessfluss und Nutzwertanalyse	47
Versuchsdurchführung	51
Variante 1 - Aufgesetzte Bewehrungsmatte	51
Variante 2 - Umdruckter Bewehrungskorb	54
Variante 3 - Synchroner Bewehrungseinbau	58
Aufandswerte Variante 1 und Variante 2	58
Kalkulatorischer Verfahrensvergleich	62
Baustellenumgebung	66
Fazit	67
Forschungoutput	67
Voraussichtlicher Mehrwert und Verwendbarkeit der Ergebnisse	67
Abbildungsverzeichnis	69
Tabellenverzeichnis	71
Literaturverzeichnis	72
Anlagen	75
A Anforderungsliste	75
B Ergebnistransfer	87
Erfolgte Veröffentlichungen	87
Geplante Veröffentlichungen	87

Kurzfassung

Die Bauindustrie steht vor schwerwiegenden Problemen, die sich vor allem aus der geringen Produktivität und dem zunehmenden Fachkräftemangel ergeben. Die gezielte Digitalisierung und Automatisierung aller relevanten Vorgänge – von der Planung und Bemessung bis zum tatsächlichen Bauprozess – scheinen die einzig gangbare Lösung zu sein, um die dringenden Herausforderungen zu meistern. Der digitale Betonbau ist in jüngster Zeit Gegenstand sehr rasch wachsender Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten auf der ganzen Welt geworden. Die Ansätze für den Beton-3D-Druck konzentrieren sich hauptsächlich auf die Herstellung von unbewehrten Bauteilstrukturen. Im Vergleich dazu ist die Integration von Bewehrung eher rudimentär.

Das ConPrint3D® erlaubt die Herstellung von unbewehrten Betonbauteilen im Vollwanddruckverfahren unter Laborbedingungen im Maßstab 1:1. Im nächsten Entwicklungsschritt sollen die Anwendungsszenarien auf höher beanspruchte Bauteile erweitert werden. Dies erfordert eine Bewehrungsintegration in ConPrint3D®-gedruckte Bauteile. Da Stahl das bei weitem meist genutzte Bewehrungsmaterial im Betonbau sowohl in Deutschland als auch weltweit ist, konzentriert sich die Forschungs- und Entwicklungstätigkeit auf diese Bewehrungsart, d. h. auf die Herstellung von Stahlbetonwänden durch additive Fertigung. Hierzu werden drei konkrete Bewehrungsintegrationsmethoden vorgeschlagen und auf ihre Eignung zur Steigerung der Tragfähigkeit gegenüber unbewehrten Betonkörpern, der technischen Realisierbarkeit und der wirtschaftlichen und weitestgehend normgerechten Ausführung untersucht.

Zu Projektbeginn ist eine gemeinschaftliche Anforderungsliste mit baustofflichen, baubetrieblichen und maschinentechnischen Punkten erstellt worden. Grundlage dieser Liste ist die umfassende Recherche zum Stand der Wissenschaft und Technik im Bereich der Integration von Stahlbewehrung beim Beton-3D-Druck und die aktuell geltenden Regelwerke zum Bau von Stahlbetontragwerkern. Im weiteren Projektverlauf dient die Anforderungsliste als Ausgangspunkt der eigenen Forschungs- und Entwicklungsarbeit sowie als Mittel zur Verifikation erreichter Zwischenergebnisse und Endresultaten. Unabhängig von den vorgeschlagenen Bewehrungsintegrationsvarianten existieren in jedem Themengebiet allgemeine Schwerpunkte, wie der Materialentwurf eines normgerechten 3D-druckfähigen Betons, die Beeinflussung des Fließverhaltens mittels Rütteltechnik sowie des Bewehrungsumschlusses durch die Betonflussrichtung oder die Ermittlung von ökonomischen Aufwandswerten zum Variantenvergleich und Planung eines allgemeinen Bauablaufes. Neben diesen Herausforderungen haben wechselnde interdisziplinäre Konstellationen entsprechende variantenspezifische Fragestellungen bearbeitet. Die genutzten Lösungsmethoden entsprechen dem typischen Vorgehen der jeweiligen Fachgebiete, wie die statistische Versuchsplanung (Design of Experiment), der mechatronische Entwicklungsprozess nach VDI/VDE 2206 oder die Nutzwertanalyse zur Bewertung von Entscheidungsalternativen. Der Arbeitsfortschritt ist durch regelmäßige Besprechungen auf Mitarbeiterebene und Projekttreffen mit dem projektbegleitenden Ausschuss (PA) zur Diskussion gestellt worden.

Im Rahmen des Forschungsprojektes konnte gezeigt werden, dass das Umdrucken bzw. Eindringen eines Bewehrungskorbes sowie die synchrone Herstellung eines Bewehrungsnetzes sinnvolle Weiterentwicklungen für den Beton-3D-Druck sind. Der Bindemittelbedarf des Betons wird durch den Einsatz einer groben Gesteinskörnung (Größtkorn ≤ 16 mm) und einer hohen Packungsdichte reduziert. Dies führt zur Einhaltung aller geltenden Normen. Die Variante einer extrusionsbasierten Applikation einer Betondeckung auf eine Kernwand mit aufgesetzter Bewehrungsmatte wird als nicht zielführend identifiziert. Es ist nicht gelungen den Betonfluss derart umzulenken, dass die Bewehrung umschlossen und eine vollflächige Verbindung zur Kernwand sichergestellt wird. Sollte ein Anwendungsfall nach einer derartigen Integrationsvariante verlangen, ist das Zurückgreifen auf die bestehende und genormte Spritzbetontechnologie zielführender. Der ConPrint3D®-Druckkopf wurde in seiner Düsengeometrie an den Bewehrungsbau angepasst und um einen Rüttelmotor ergänzt, der die Extrusion insbesondere bei steifer Konsistenz unterstützt. Dieser unterstützt ebenfalls die Umschließung der Bewehrung mit Beton. Die Verbundfestigkeit wird jedoch nur durch eine Vibrationsanregung am Bewehrungsstab selbst stark verbessert. Außerdem ist nachgewiesen worden, dass der kurze Zeitabstand zwischen dem Schweißvorgang zum automatisierten Bewehrungsnetzaufbau und dem

Betonieren den Bewehrungsverbund nicht signifikant beeinträchtigen. Alle Teilprozesse sind so ausgelegt, dass sie automatisiert oder automatisierbar sind. Dies bietet die Möglichkeit zur Reduktion der notwendigen ArbeitnehmerInnenzahl auf der Baustelle sowie unfallanfälliger Arbeiten (bspw. das Verlegen von Bewehrung). Im Rahmen des Projektes sind die Subsysteme bzw. Teilprozesse Netzherstellung und Betonage des synchronen Bewehrungseinbaus automatisiert worden. Eine Zusammenführung der Prozesse war nicht möglich, da am Beton-3D-Druckprüfstand der TU Dresden die entsprechende Peripherie fehlte. Weiterhin wurde nachgewiesen, dass die untersuchten Bewehrungsintegrationsvarianten im Vergleich zu konventionellen Herstellungsverfahren zukünftig eine wirtschaftliche Alternative bieten. Die Automatisierung von Prozessen auf der Baustelle führt zukünftig zu einer Verringerung der Lohnstunden, die für die Herstellung von Stahlbetonwänden benötigt wird. Ein weiterer Entwicklungsbedarf ergibt sich zur Einbindung des neuen Bauprozesses in BIM-Strukturen zur effizienten Planung und transparenten Dokumentation der Bauausführung. Zur Datenerfassung von relevanten Dokumentationsinformationen sind entsprechende Messsysteme zu designen.

Das Forschungsvorhaben zeigt, dass es mit dem ConPrint3D®-Verfahren möglich ist auf verschiedene Weise bewehrte Betonbauteile mittels 3D-Druck wirtschaftlich und weitestgehend normgerecht herzustellen. Hierraus ergeben sich zukünftige Forschungsfelder mit der Fragestellung diese Wandbauweise auch auf andere bewehrte Betonbauteile, wie bspw. Stützen oder Fundamente, auszuweiten.

Abstract

The construction industry is facing serious problems, mainly resulting from low productivity and an increasing shortage of skilled workers. The targeted digitalisation and automation of all relevant processes - from planning and dimensioning to the actual construction process - seem to be the only viable solution to overcome the urgent challenges. Digital concrete construction has recently become the subject of very rapidly growing research and development activities around the world. Approaches to concrete 3D printing are mainly focused on the production of unreinforced component structures. In comparison, the integration of reinforcement is rather rudimentary.

The ConPrint3D® allows the production of unreinforced concrete components in the solid wall printing process under laboratory conditions on a scale of 1:1. In the next development step, the application scenarios are to be extended to components subject to higher stresses. This requires reinforcement integration in ConPrint3D®-printed components. Since steel is by far the most commonly used reinforcement material in concrete construction both in Germany and worldwide, the research and development activities are focused on this type of reinforcement, i.e. on the production of reinforced concrete walls by additive manufacturing. For this purpose, three concrete reinforcement integration methods are proposed and examined for their suitability to increase the load-bearing capacity compared to unreinforced concrete bodies, the technical feasibility and the economic and largely standard-compliant execution.

At the start of the project, a joint list of requirements was drawn up with points relating to construction materials, construction operations and machine technology. This list is based on comprehensive research into the state of the art in science and technology in the field of integrating steel reinforcement in concrete 3D printing and the currently applicable regulations for the construction of reinforced concrete structures. In the further course of the project, the list of requirements serves as a starting point for the researchers' own research and development work and as a means of verifying interim results and final results. Independent of the proposed reinforcement integration variants, there are general main points in each subject area, such as the material design of a standard-compliant 3D-printable concrete, the influencing of the flow behaviour by means of vibration technology as well as the reinforcement encasement by the concrete flow direction or the determination of economic expenditure values for the comparison of variants and the planning of a general construction sequence. In addition to these challenges, changing interdisciplinary constellations have worked on corresponding variant-specific questions. The solution methods used correspond to the typical procedure of the respective disciplines, such as the statistical design of experiments, the mechatronic development process according to VDI/VDE 2206 or the utility value analysis for the evaluation of decision alternatives. The work progress has been made available for discussion through regular meetings at staff level and project meetings with the project-accompanying committee (PA).

Within the framework of the research project, it was shown that the overprinting or imprinting of a reinforcement cage as well as the synchronous production of a reinforcement mesh are sensible further developments for concrete 3D printing. The binder requirement of the concrete is reduced by using a coarse aggregate (maximum grain size ≤ 16 mm) and a high packing density. This leads to compliance with all applicable standards. The variant of an extrusion-based application of a concrete cover on a core wall with a reinforcement mat placed on top is identified as not achieving the goal. It was not possible to redirect the concrete flow in such a way that the reinforcement is enclosed and a full-surface connection to the core wall is ensured. If an application requires such an integration variant, it is more appropriate to use the existing and standardised shotcrete technology. The nozzle geometry of the ConPrint3D® print head has been adapted to reinforcement construction and a vibrator motor has been added to support extrusion, particularly in the case of stiff consistency. This also supports the encapsulation of the reinforcement with concrete. However, the bond strength is only greatly improved by vibration excitation on the rebar itself. It has also been proven that the short time interval between the welding process for automated reinforcement mesh construction and concreting does not significantly affect the reinforcement bond. All sub-processes are designed to be automated or automatable. This offers the possibility to reduce the necessary number of workers on the

construction site as well as accident-prone work (e.g. laying reinforcement). Within the framework of the project, the subsystems or sub-processes of mesh production and concreting of synchronous reinforcement installation were automated. A combination of the processes was not possible because the corresponding periphery was missing at the concrete 3D pressure test stand of the TU Dresden. Furthermore, it was proven that the investigated reinforcement integration variants offer an economic alternative in the future compared to conventional production processes. The automation of processes on the construction site will lead to a reduction in the number of wage hours required for the production of reinforced concrete walls in the future. There is a further need for development to integrate the new construction process into BIM structures for efficient planning and transparent documentation of the construction work. Corresponding measuring systems must be designed for data acquisition of relevant documentation information.

The research project shows that it's possible to produce reinforced concrete components with the ConPrint3D® process in various ways using 3D printing, economically and largely in accordance with standards. This will result in future research fields with the question of extending this wall construction method to other reinforced concrete components, such as columns or foundations.

Einleitung

Forschungsfrage

Ist die Integration von herkömmlicher Stahlbewehrung in den monolithischen Vollwanddruck mit Beton in der Art umsetzbar, dass ein weitgehend automatisierter und wirtschaftlich konkurrenzfähiger Prozess sichergestellt ist, die Tragfähigkeit gegenüber unbewehrten Druckerzeugnissen verbessert ist und die Übertragbarkeit bestehender Normen und Bemessungsregeln gegeben sind?

Kontext der Forschungs- und Entwicklungsaufgabe

Mit dem Beton-3D-Druck wird die Hoffnung verbunden, das Produktivitätssteigerungsdefizit des Bauwesens im Vergleich zu anderen produzierenden Industrien abzubauen. Durch das roboterbasierte und automatisch gesteuerte Platzieren von Beton an diskreten Positionen im Raum wird die digitale Bauprozesskette vervollständigt und der Personal- und Zeitaufwand für Bauvorhaben gesenkt [27].

Während sich einige akademische und kommerzielle Akteure auf Verfahren des selektiven Bindens und des automatisierten Spritzbeton konzentrieren, basiert die Mehrzahl der Forschungsaktivitäten auf der Extrusion von Frischbeton [39]. Hier wiederum wurden weltweit Pilotobjekte mit dem Feinfilamentdruck umgesetzt [4]. Dabei werden die Konturen vertikaler Bauteile additiv und überwiegend von Portalrobotern gefertigt und anschließend mit Dämmstoffen oder konventionellem Ortbeton verfüllt. Als Baustoffe kommen häufig feinkörnige Mörtelrezepturen mit hohem Bindemittelgehalt zum Einsatz. Diese liegen außerhalb normativer Vorgaben und sind hinsichtlich ihres Schwindverhaltens und der herstellungsseitigen Umweltauswirkungen problematisch [19].

Davon hebt sich das, an der TU Dresden entwickelte, CONPrint3D-Verfahren ab, welches den Beton-3D-Druck mit voller Wandbreite und Schichthöhen mehrerer Zentimeter vorsieht. Damit wird die Produktivität deutlich erhöht und durch die Möglichkeit zur Integration grober Gesteinskörnung die ökologischen Auswirkungen und die Schwindneigung reduziert. Maschinenseitig basiert die Technologie auf Autobetonpumpen, was die Mobilität der Maschine verbessert und heutige Standards in der Betonverarbeitung berücksichtigt [25].

Demonstratoren unterschiedlicher Größenordnungen konnten die grundsätzliche Funktionalität aller Verfahren nachweisen. Die Integration von Bewehrung ist bisher jedoch nicht überzeugend gelöst. Publiziert wurden verschiedene Ansätze zum Überbrücken prozessbedingter Fugen durch Nageln, Schrauben und Tackern [2]; [17]; [30]; [38]. Auch das Einlegen horizontaler Bewehrung, üblicherweise in die Fugen, wurde wiederholt untersucht. Dabei werden in der Regel textile Bewehrungsmedien oder Stahlbewehrung eingesetzt, regelmäßig entweder in Form zahlreicher Einzelelemente oder durch Endloswerkstoffe wie Game, Kabel oder Ketten [5]; [21]; [23]. Bisher ungelöst ist die Integration kraftflussorientierter Bewehrungsverläufe. Aus dem herkömmlichen Massivbau bekannte Bemessungskonzepte, deren Bewehrungsstrukturen aus Netzen vertikaler und horizontaler Stäbe, Diagonalbewehrungen und Bügeln zusammengesetzt werden, wurden bisher kaum in automatisierten Prozessen berücksichtigt.

Ein Beispiel hierfür ist die Technologie der chinesischen Firma HuaShang Tengda. Dort wird vorgefertigte Bewehrung mit einer geteilten Düse umgriffen und von beiden Seiten mit Beton bedeckt. Der Ansatz wurde bereits im Gebäudemaßstab umgesetzt, ist in seiner Flexibilität jedoch begrenzt. Zum einen ist für das Übergreifen sinnvoller Bewehrungsabschnitte sehr große Düsen erforderlich. Zum anderen wurden bisher nur Bewehrungsmatten mit einer Ebene verbaut [28]. Der Stahl liegt somit in der Bauteilmitte und kann nicht optimal ausgenutzt werden. Die Bewehrungsführung für viele weitere Lastsituationen können so nicht umgesetzt werden.

Weiterhin zu erwähnen ist der Meshmould-Ansatz. Ein Schweißroboter setzt hier automatisiert einen Bewehrungskorb zusammen, der anschließend mit Beton verfüllt wird (vgl. Abbildung 1). Die Frischbetoneigenschaften sind dabei so zu bemessen, dass das Bewehrungsnetz genügt, um ein Herausfließen

des Frischbetons zu verhindern. Abschließend wird eine Deckschicht aufgebracht, sodass die Bewehrung in der Verbundzone von Kernwand und Betondeckung liegt [18].



Abbildung 1: Schweißelektrode und Bewehrungsverbundzone des Meshmould-Verfahrens.

Zielsetzung

Ausgangssituation

Im Rahmen der Projektantragsstellung sind drei verschiedene Ansätze zur Bewehrungsintegration in 3D-gedruckte Betonbauteile vorgeschlagen worden. Diese werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Variante 1 - Aufgesetzte Bewehrungsmatte

Im ersten verfolgten Ansatz wird zunächst eine unbewehrte Kernwand im CONPrint3D-Verfahren gedruckt. In diese werden Queranker eingelegt, die seitlich herausstehen und als Aufhängung für herkömmliche Bewehrungsmatten dienen. Sobald diese installiert sind, wird nacheinander beidseitig die Betondeckung vom selben Druckroboter per Extrusion aufgetragen, welche zugleich den kraftschlüssigen Verbund mit der Kernwand sicherzustellen hat. Abbildung 2 zeigt das Prinzip in der Draufsicht.

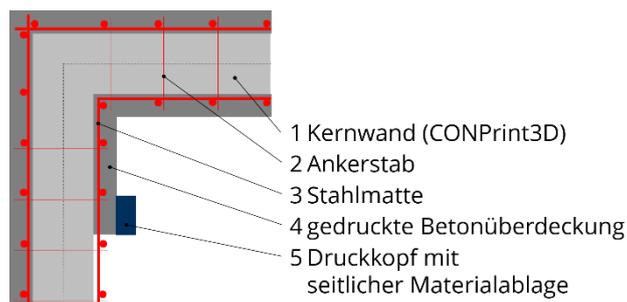


Abbildung 2: Variante 1 - Prinzipskizze in der Draufsicht

Variante 2 - Umdruckter Bewehrungskorb

Alternativ wird untersucht, ob sich freistehende Bewehrungskörbe additiv mit Beton füllen lassen. Die vorgefertigten Bewehrungselemente werden abwechselnd von beiden Seiten mit extrudiertem Beton gefüllt. Bei Bedarf steuert ein Drahtgewebe in der Wandmittelachse den Betonfluss. Abbildung 3 skizziert das Konzept.

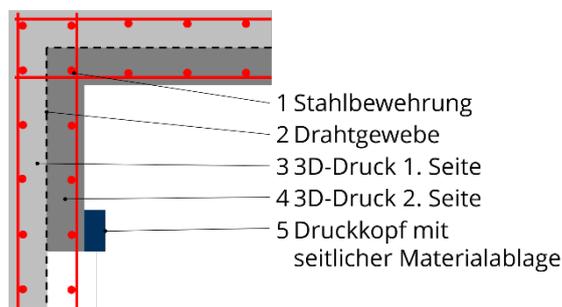


Abbildung 3: Variante 2 - Prinzipskizze in der Draufsicht

Variante 3 - Synchroner Bewehrungseinbau

Die weitreichendste Prozessintegration erfolgt mit Variante 3. Der Aufbau der Bewehrungsstruktur erfolgt hier simultan zum extrusionsbasierten Betoneinbau. Der extrudierenden Düse läuft ein Schweißroboter voraus, der das Bewehrungsnetz aus Stäben schichtweise zusammensetzt. Vertikal ragen hierfür Anschlussisen aus der obersten Schicht heraus, die von der gegabelten Düse umgriffen werden, um spätere Scheißstellen nicht mit Beton zu verunreinigen. Das Prinzip ist in Abbildung 4 dargestellt.

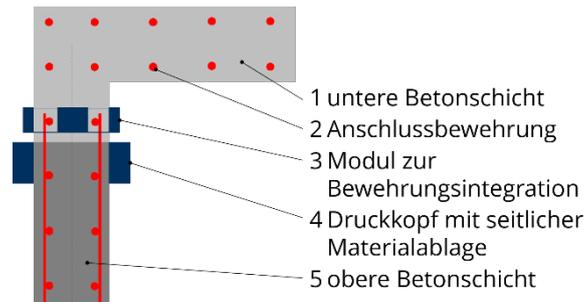


Abbildung 4: Variante 3 - Prinzipskizze in der Draufsicht

Lösungsmethoden

Die Vorarbeit der Literatursichtung- und Konzeptionierungsphase mündete in der Erarbeitung einer gemeinsamen Anforderungsliste. Die zusammengestellten Anforderungen an das Material, die Maschine und den Prozess wurden gruppiert und mit den Prioritäten „Forderung“ und „Wunsch“ mit weiteren Abstufungen belegt. Die Anforderungsliste wurde zusammen mit dem projektbegleitenden Ausschuss weiterentwickelt und diente in der letzten Projektphase als ein Instrument zur Verifizierung des Entwicklungsergebnisses. Die Bewertung des Ergebnisses anhand der Anforderungsliste kann dem Anhang entnommen werden.

Der maschinenbauliche Entwicklungsprozess richtet sich nach dem V-Modell der VDI-Richtlinie VDI/VDE 2206 [36]. Dieser Prozess beginnt mit der Ableitung von Anforderungen an das zu entwickelnde Objekt bzw. den Prozess. Für den Systementwurf wird eine Funktionsstruktur in verschiedenen Detaillierungsgraden genutzt. Die Funktionsstruktur ist eine Abstraktion der zu lösenden Entwicklungsaufgabe. Auf Basis dieser Beschreibungsform wird mit Hilfe eines morphologischen Kastens den einzelnen Teilfunktionen eine konkret umsetzbare Lösung zugewiesen und eine Vorzugsvariante für die jeweilige Bewehrungsintegrationsverfahren abgeleitet. Die domänenspezifische Entwicklung der einzelnen Komponenten erfolgt mit den klassischen Mitteln des Maschinenbaus, wie Berechnungen, Simulationen, vereinfachten Modelltests oder Experimentreihen. Dieser Entwicklungsschritt schließt mit der ersten Fertigung der Einzelkomponenten bzw. grundlegenden Systembaugruppen ab.

Im Rahmen der Systemintegration werden die einzelnen Komponenten in definierten Szenarien getestet und ggf. in Iterationsschleifen optimiert. Es erfolgt die schrittweise Zusammensetzung zum finalen Prototyp. Während dieser Testphase werden die Ergebnisse fortlaufend mit der Anforderungsliste verifiziert.

Die baubetrieblichen und bauverfahrenstechnischen Anforderungen, die sich aus der Bewehrungsintegration ergeben, wurden anhand der Normung und Fachliteratur identifiziert und in die gemeinsame Anforderungsliste überführt. Im Anschluss erfolgte die Entwicklung eines übergeordneten Prozessflussdiagramms sowie variantenspezifischer Teilprozesse. Eine Validierung der Ansätze erfolgte durch Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss. Basierend auf den erzielten Erkenntnissen wurden Versuchsanordnungen für die Herstellung der Demonstratoren abgeleitet sowie baubetrieblichen Rahmenbedingungen definiert. Nach Durchführung der Experimente erfolgte ein Rückschluss auf die spätere Baustellennutzung unter bauverfahrenstechnische Sicht sowie ein kalkulatorischer Vergleich mit konventionellen Herstellungsmethoden. Weiterhin wurden für die drei gegenständlichen Bewehrungsintegrationsvarianten Handlungsempfehlungen für die Überführung in die Praxis abgeleitet.

Projektorganisation

Ausgangspunkt der Projektkoordination war der Arbeits- und Zeitplan des Projektantrags. Abbildung 5 zeigt diesen, die geplanten Arbeitspakete sowie deren Zuordnung zu den Forschungseinrichtungen. Der aus Personalgründen um zwei Monate verzögerte Projektbeginn wurde durch eine Anpassung des Projektendes um ebenfalls zwei Monate berücksichtigt.

	Institut für Bausoffe Professur für Baumaschinen Institut für Baubetriebswesen	2021												2022												2023			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3				
AP1	Stand der Wissenschaft und Technik																												
AP2	Definition von Anwendungsszenarien und Anforderungen an die Bewehrung																												
AP3	Entwicklung, Charakterisierung und Optimierung der Betonzusammensetzungen für die automatisierte Bewehrungsintegrationsprozesse																												
AP4	Weiterentwicklung der drei Lösungsansätze für die Integration von Stahlbewehrung																												
AP5	Konstruktion des Bewehrungsintegrators																												
AP6	Fertigung und Prüfung des Bewehrungsintegrators																												
AP7	BewertunAnalyse der Wettbewerbsfähigkeit und Erarbeitung von Optimierungspotenzialen																												

Abbildung 5: Arbeitsplan

Während der Projektlaufzeit erbrachten die Forschungseinrichtungen die in den jeweiligen Arbeitspaketen vorgesehenen Leistungen. Eine Erfolgskontrolle sowie ein Abgleich mit dem Zeitplan erfolgte bei monatlichen Terminen auf Mitarbeitererebene. In größeren Abständen fanden insgesamt sechs Projekttreffen mit dem projektbegleitenden Ausschuss statt. Diese erwiesen sich als wirksames Instrument, um Zwischenergebnisse strukturiert zusammenzustellen, hinsichtlich der Praxisrelevanz bewerten zu lassen und den Arbeitsstand mit den Erwartungen des Fördermittelgebers und der Projektpartner abzugleichen. Während der gesamten Bearbeitung standen die Forschungsstellen in regelmäßigem Austausch, um Schnittstellenproblematiken effizient zu lösen.

Abweichend vom ursprünglichen Antragstext wurden Bewehrungsintegratoren für alle drei statt nur für eine Vorzugsvariante konstruiert, gefertigt und erprobt. Von einer vertieften Optimierung ausgenommen wurde nur Variante 1, da sie einen geringen Automatisierungsgrad ermöglicht, unflexibel in der Bewehrungsführung ist und keine zufriedenstellenden Druckergebnisse liefert.

Baustoffseitige Lieferprobleme in der Schlussphase des Projekts verzögerten die Versuchsabläufe, sodass einzelne Ergebnisse noch ausstehen und nachgereicht werden müssen.

Ergebnisse des Institutes für Baustoffe (IfB)

Anforderungen

Zu Projektbeginn wurden baustoffliche Aspekte in die gemeinsame Anforderungsliste eingearbeitet. Die identifizierten Anforderungen betreffen die Qualität der Ausgangsmaterialien, das rheologische Verhalten des Frischbetons, Interaktionen zwischen Beton und Bewehrung, ökologische Gesichtspunkte sowie Dauerhaftigkeitsaspekte. Weiterhin wurden diese durch kritische Limitierungen aus Normen und Regelwerken ergänzt. Die Anforderungsliste wurde dem projektbegleitenden Ausschuss vorgestellt.

Betonentwurf

Als Ausgangspunkt für den Betonentwurf diente eine in vorangegangenen CONPrint3D-Projekten erprobte Rezeptur. Wie die große Mehrzahl publizierter 3D-druckbarer Rezepturen, wies diese einen hohen Bindemittelgehalt auf. Regelmäßig werden in 3D-gedruckten Bauteilen Schwindverformungen und Risse beobachtet. Zudem belastet ein hoher Bindemittelgehalt die ökologische Qualität des Materials. Da der Zementleim jedoch für die frühe Formstabilität bei gleichzeitiger Verformbarkeit ist, führt eine bloße Reduzierung der Bindemittelphase nicht zum Ergebnis. Stattdessen wurde die Sieblinie optimiert, um den rheologischen Bedarf an Zementleim zu senken. Entsprechend des Projektziels wurde das Größtkorn zu 16 mm gewählt. Die Sieblinienoptimierung nach ANDREASEN und ANDERSEN (1929) sorgt für eine hohe Packungsdichte, indem Haufwerksporen durch jeweils kleinere Körner gefüllt werden [1]. Je dichter die Packung, desto geringer der Porenraum, der mit Zementleim zu füllen ist. Die Sieblinienoptimierung wurde im Mehlkornbereich unter Einbeziehung der Partikelgrößenverteilung des Bindemittels fortgesetzt [35]. Limitierend war laut Anforderungsliste der maximale Mehlkorngehalt, den die DIN 1045-2 in Abhängigkeit der Festigkeitsklasse, der Expositionsklasse, dem Zementgehalt und des Größtkorns vorgibt [16]. Der Zielwert wurde zu 500 kg/m³ gewählt, um unter allen Randbedingungen einsetzbar zu sein. Als Bindemittel diente ein CEM II/C (S-LL) 42,5 N. W/z-Werte zwischen 0,4 und 0,45 stellten sich als geeignet heraus und erfüllen die Anforderungen aller Expositionsklassen. Die Konsistenz kann mit PCE-Fließmitteln eingestellt werden. Entsprechend ist folgende Rezeptur Basis für die weitere Anpassung:

Tabelle 1: Basisrezeptur des 3D-druckbaren Normalbetons

Komponente	Masse [kg/m ³]
CEM II/C-M (S-LL)	464,0
Quarzsand BCS 413	136,5
Sand 0/2	516,4
Kies 2/4	286,6
Kies 4/8	266,5
Kies 8/16	415,1
Wasser	208,8
PCE-Fließmittel	nach Bedarf

Variante 1 - Aufgesetzte Bewehrungsmatte

Die Basisrezeptur wurde anschließend an die Bewehrungsintegrationsvarianten angepasst. Für Variante 1 ist das Größtkorn kleiner zu wählen, um einen homogenen Betonfluss in der Deckschichtstärke von nur wenigen Zentimetern sowie den Bewehrungsumschluss sicherzustellen. Druckversuche wurden mit einem 8 mm-Größtkorn durchgeführt. Um ein monolithisches und mechanisch homogenes Bauteil zu erzeugen, wird die

Kernwand aus demselben Beton hergestellt. Die rheologischen Anforderungen ergeben sich aus einem Kragarmmodell, dem die Annahmen zugrunde liegen, dass der Deckschichtbeton ausschließlich an der Kernwand haftet und weder durch die umschlossene Bewehrung noch durch eine Unterlage eine Abstützung erfährt. Abbildung 6 ordnet die Größen Scherfestigkeit, Haftscherfestigkeit und Haftzugfestigkeit dem Freikörperbild zu.

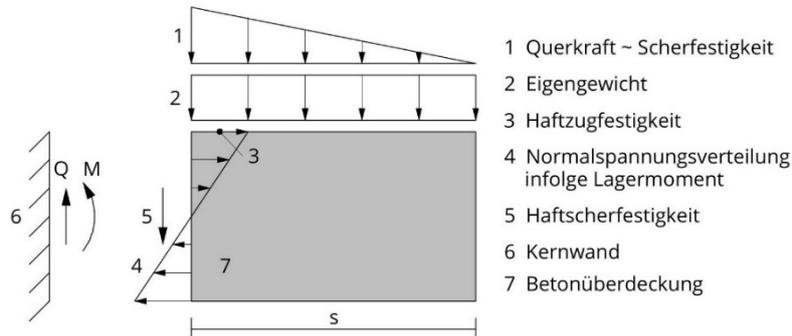


Abbildung 6: Variante 1 - Kragarmmodell für die mechanischen Belastungen an die Deckbeton der Stärke s

Den Anforderungen kann durch Beton mit hochviskosen und klebrigen Frischeigenschaften entsprochen werden. Derartige Eigenschaften stehen jedoch im Konflikt mit der Extrudierbarkeitsforderung. In den durchgeführten Versuchen ist es nicht gelungen, einen hinreichenden Anpressdruck des Frischbetons an die Kernwand aufzubauen, um einen verlässlichen Verbund und einen vollständigen Bewehrungsumschluss sicherzustellen. Im Fall überhöhter Extrusionsraten entwich das Material der Einwirkung durch seitliches Herausquellen an der Düsenöffnung. Die erprobte Rezeptur stellt sich wie folgt dar:

Tabelle 2: Angepasste Rezeptur mit 8 mm Größtkorn

Komponente	Masse [kg/m ³]
CEM II/C-M (S-LL)	452,2
Quarzsand BCS 413	185,9
Sand 0/2	660,7
Kies 2/4	395,4
Kies 4/8	424,4
Wasser	182,0
PCE-Fließmittel	nach Bedarf

Basierend auf den Ergebnissen scheint das Extrudieren einer Deckschicht einen strukturellen Nachteil gegenüber dem Einsatz von Spritzbeton zu haben, der allein durch Materialentwicklung nicht auszugleichen ist. Anhaltspunkte für weiterführende Untersuchungen sind gegebenenfalls die Reduzierung des w/z-Werts zugunsten von mehr Fließmittel, um den Leimgehalt zu reduzieren und die Viskosität weiter zu erhöhen sowie der Einsatz von Kurzfasern.

Variante 2 - Umdruckter Bewehrungskorb

Variante 2 ist hinsichtlich des Bewehrungsumschlusses vergleichbar, da dieser in einem Bereich erfolgt, der von der Maschine nicht unmittelbar erreicht werden kann. Jedoch ist kein Anpressdruck erforderlich. Um den Bewehrungsumschluss sicherzustellen, ist eine hohe Fließfähigkeit erforderlich. Ein vertikales Drahtgewebe in der Wandachse ermöglicht höhere Fließgrenzen, da es den Materialstrom umlenkt und das Hinterfüllen der Bewehrung erleichtert. Um ein Herausfließen aus dem Wandquerschnitt zu verhindern, ist weiterhin eine

hinreichende Fließgrenze erforderlich. Die Fließeingenschaften sind insofern durch eine niedrige Viskosität zu sicherzustellen.

Variante 3 - Synchroner Bewehrungseinbau

Die vollautomatisierte Variante 3 ist betontechnologisch weniger komplex. Durch die gegabelte Düse wird Beton von außen und von der Wandmittellachse an die Bewehrung angetragen. Das schließt Strömungsschatten weitgehend aus. Außerdem üben die einzelnen Betonstränge ihren Anpressdruck gegeneinander aus, was ein maßgetreues Fertigen erleichtert. Insofern gehen die Anforderungen an den Beton nicht über die an einen unbewehrten 3D-Druckbeton hinaus. Sicherzustellen ist, dass das Größtkorn an die Kanalabmessungen der gegabelten Düse angepasst ist. In den durchgeführten Versuchen war dies mit der Basismischung mit einem 16 mm Größtkorn möglich.

Fließmitteleinstellung

Die Konsistenz der Rezeptur ist ohne Additive zum 3D-Drucken geeignet. Jedoch sind unter Umständen weichere Konsistenzen erforderlich. Auch das Fließverhalten des Frischbetons wird durch weitere Faktoren wie die Kornform und Kubatur bestimmt. In diesem Fall sind Fließmittel auf Basis von Polycarboxylatethern (PCE) ein gängiges Mittel. Diese reduzieren den Wasserbedarf zum Erreichen der gleichen Konsistenz. Bei der Basisrezeptur mit einem w/z-Wert von 0,4 ist eine PCE-Dosierung von etwa 1,0 % auf die Zementmasse erforderlich. Die Laborpraxis hat gezeigt, dass eine präzise Angabe der Fließmitteldosierung nicht möglich ist. Das Fließverhalten schwankt bei Mischungsvolumen im Labormaßstab (≤ 60 l) stark mit nicht kontrollierbaren Umwelteinflüssen. Insofern wurde dem Anmachwasser kein Fließmittel zugegeben. Bei Bedarf wurde nach der Wasserzugabe eingemischt, bis die gewünschte Konsistenz erreicht war, was mit Setz- und Ausbreitmaßen verifiziert wurde.

Relevant ist jedoch, die Art der rheologischen Wirkung. Üblicherweise sind PCEs geeignet, um die Fließgrenze bis auf null abzusenken (selbstverdichtender Beton). Allerdings reduzieren sie dabei nicht die plastische Viskosität; teilweise wirken sie sogar viskositäts erhöhend. Empirisch wäre ein solcher Frischbeton als selbstnivellierend und sehr zäh zu beschreiben. Während die für die Baubarkeit erforderliche Fließgrenze mittels Dosierung sichergestellt werden kann, steigt der Leistungsbedarf in Fördereinrichtungen mit der Viskosität. Mischen, Pumpen und insbesondere Extrudieren werden energieintensiver im Vergleich zu einer KonsistenzEinstellung mit Wasser, welche aus Dauerhaftigkeitsgesichtspunkten problematisch ist.

In Zusammenarbeit mit dem Projektpartner MC Bauchemie Müller GmbH & Co. KG wurde daher die Anpassung von PCE-Fließmitteln auf übliche 3D-Druck-Anforderungen (hier Variante 3) begonnen. Ziel ist eine starke Reduzierung der Viskosität, mäßige Herabsetzung der Fließgrenze und Unterstützung der Thixotropie. Letzteres ermöglicht die Einstellung höherer Fließfähigkeiten, da im Moment der Extrusion nur die Formstabilität der aktuellen Lage sicherzustellen ist. Der Lastabtrag nachfolgender Schichten wird dann durch den raschen Strukturaufbau übernommen.

Rheologische Eigenschaften

Die Rheologie beschreibt das viskoelastische Frischbetonverhalten bei Einwirkung von Kräften. Entsprechende Anforderungen wurden bereits oben diskutiert. Im Kontext des CONPrint3D sind die entwickelten Betone eher steif. Das ist damit zu begründen, dass mit keiner anderen Technologie Schichthöhen von 50 mm extrudiert werden. Im Falle 10 mm hoher Schichten bestände die gleiche Bauhöhe aus fünf Schichten, deren Fertigung viermal von Pausen in der Länge der Schichtzykluszeit unterbrochen sind. Diese Zeitspanne ermöglicht den Strukturaufbau, sodass die erforderliche Frühfestigkeit während der Extrusion geringer ist. Beim CONPrint3D kann bei Setzmaßen nach EN 12350-2 [11] kleiner 12 cm von einer hinreichenden Formstabilität des Filaments ausgegangen werden. Betone bis zu einem Setzmaß von 5 cm wurden mit guter Qualität extrudiert. Auch darunter wurden zufriedenstellende Ergebnisse mittels Unterstützung einer Vibrationsanregung erzielt.

Pumpverhalten

Derzeit sind keine Betonpumpen am Markt verfügbar, die auf sehr kleine Förderleistungen unter $1 \text{ m}^3/\text{h}$ für Betone mit 16 mm Größtkorn ausgelegt sind. Insofern waren ausführliche Pumpversuche im Labor nicht darstellbar. Die noch ausstehende Charakterisierung beschränkt sich insofern auf Frischbetonuntersuchungen mittels Gleitrohrreometer und die am Institut für Baustoffe entwickelten Vorhersagemodelle zum Pumpverhalten [24].

Mechanische Eigenschaften im Vergleich zu konventionell hergestellten Beton

Grundlegende mechanische Eigenschaften wurden an geschalteten Probekörpern mit der Grundrezeptur ermittelt. Abbildung 7 zeigt die Druckfestigkeitsentwicklung über die ersten Tage nach der Herstellung. Demnach ist der Beton voraussichtlich der Druckfestigkeitsklasse C50/60 zuzuordnen. Die Druckfestigkeit extrudierter Proben liegt bisher etwa 33 % unter der geschalteten und verdichteten Referenz. Die, für das anisotrope Materialverhalten maßgebende, Schichtverbundfestigkeit liegt in Spaltzugversuchen bei ca. 2,5 MPa. Literaturhinweise auf eine signifikante Auswirkung der Oberflächenfeuchtigkeit auf die Schichtverbundqualität wurden bestätigt.

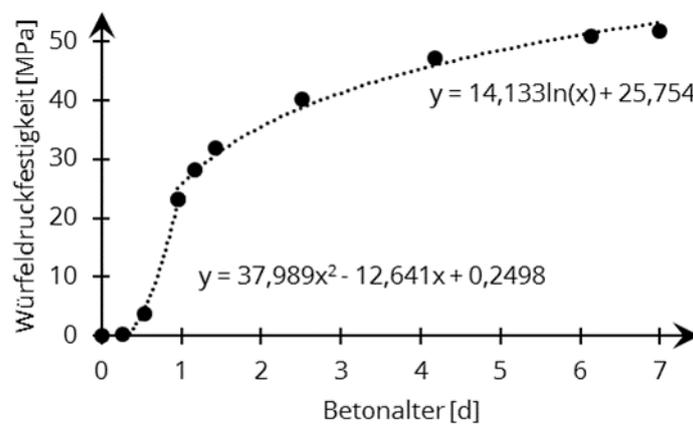


Abbildung 7: Zeitliche Druckfestigkeitsentwicklung

Mit der Zielrezeptur wurden mehrere Probekörperserien gefertigt, um die Druckfestigkeit, den E-Modul, Drei-Punkt- und Vier-Punkt-Biegefestigkeit sowie Spaltzug- und einaxiale Zugfestigkeit in verschiedenen Orientierungen an unbewehrt gedruckten und geschalteten Beton zu prüfen. Die Prüfungen hierzu werden am 24.2.2023 abgeschlossen sein.

Versagensverhalten

Zum Entwicklungsabschluss der drei Varianten werden jeweils Demonstratorwände hergestellt, aus denen Probekörper gewonnen werden. Unter anderem soll das Versagensverhalten in Dreipunktbiegeversuchen aufgezeichnet werden. Die Prüfungen hiezustehen noch aus.

Bewehrungsverbund

In Vorbereitung auf die vollautomatische Bewehrungsintegration wurden Probekörper für Stabauszugversuche mit gerippten B500B, 10 mm Betonstahlstäben additiv gefertigt. Eine gegabelte Düse, die freie Anschlussstabenden übergreift, betoniert die Stäbe in der vertikalen Betonstrangmitte ein; siehe Abbildung 8. Dabei wurden drei Einflussparameter untersucht; die Stäbe wurden sowohl horizontal (hori.) als auch vertikal (vert.) einbetoniert. Während die Stäbe entsprechend der Zielanwendung hauptsächlich in der Filamentmitte (Fil) angeordnet wurden, wurden weitere in die Fugen (Fug) eingelegt. Letztlich unterstützte

eine Vibrationsanregung teilweise die Extrusion (vib.; nvib = nicht vibriert). Abbildung 9 zeigt die gemessenen Stab-Matrix-Verbundfestigkeiten.



Abbildung 8: Versuchsaufbau zum 3D-Drucken von Stabauszugprobekörpern.

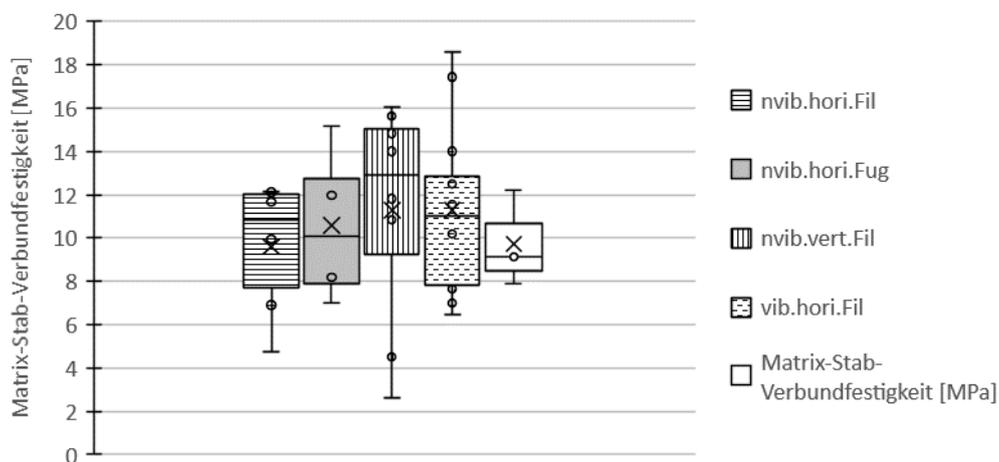


Abbildung 9: Ermittelte Verbundfestigkeiten

Die Daten zeigen Verbundfestigkeiten, die im Mittel (10,8 MPa) üblichen Bemessungsannahmen entsprechen. Allerdings streuen die Daten stark (Variationskoeffizient 35 %). Eine mögliche Ursache folgt aus der kurzen Verbundlänge von lediglich 19 mm. Signifikante Effektgrößen der Einflussparameter konnten nicht nachgewiesen werden. Bei einigen Auszugprüfungen wurde zusätzlich der Einzug am freien Stabende aufgezeichnet. Abbildung 10 stellt die über die maximale Auszugskraft normierte Auszugskraft über den Einzugsweg dar. Die Kurvenverläufe lassen sich zwei Gruppen zuordnen, die sich im Kurvenanstieg unterscheiden. Bei der Stabposition im Filament kann ein steilerer Anstieg beobachtet werden, was auf einen besseren Formschluss im Vergleich zur Stabposition in der Fuge hindeutet. Er führt jedoch nicht zu signifikant höheren Verbundfestigkeiten; vgl. Abbildung 9.

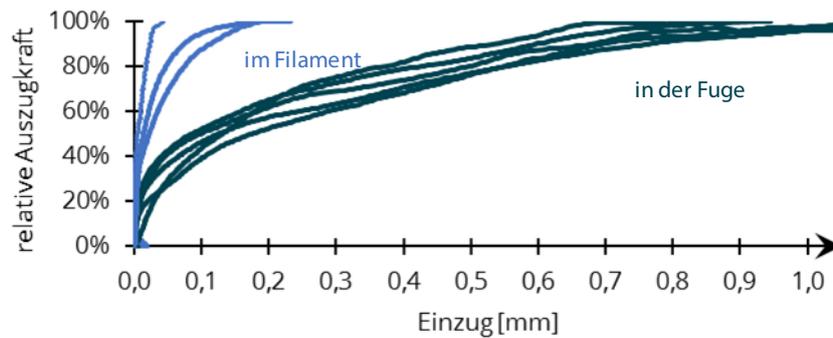


Abbildung 10: Stabeinzugcharakteristik an Proben mit Bewehrungsstäben in der Fuge oder im Filament

Im Hinblick auf die Bemessung sind insbesondere Ausreißer nach unten kritisch. Vertikale Längsschnitte entlang der Stabachse haben in einigen Fällen einen unvollständigen Bewehrungsumschluss gezeigt (siehe Abbildung 11). Insbesondere die nach unten gerichtete Seite ist anfällig für Verbundfehler. Daraus ergibt sich neben einer geminderten Tragfähigkeit auch ein Dauerhaftigkeitsproblem.

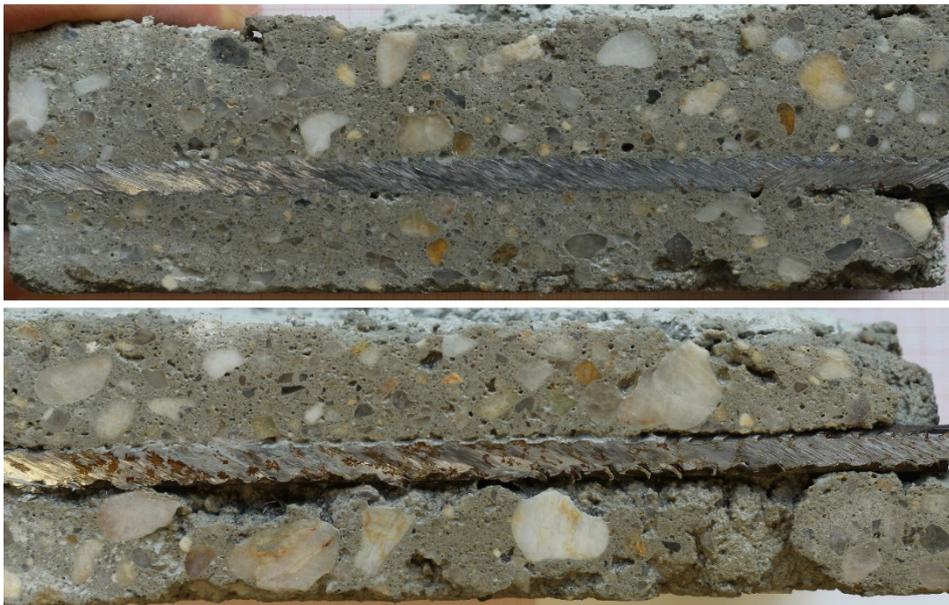


Abbildung 11: Längsschnitte mit horizontaler Bewehrungslage; 10 mm Betonstahl

3D-Auszughülse

Im Fall geschalter Auszugprobekörper ist eine Positionierung und Fixierung des Stabs mit Hilfskonstruktionen möglich. Im Stahlbetonbau wird der Bewehrungskorb mit Abstandshaltern gegen die Schalung abgestützt. In der automatisierten Variante 3 tragen sich die zu umschließenden Bewehrungsteile durch Schweißverbindungen mit bereits umgedruckter Bewehrung. Für die Herstellung von 3D-gedruckten Auszugprobekörpern ist die Positionierung des Bewehrungselements und der erforderlichen Hülsen zur Begrenzung der Verbundlänge eine Herausforderung. Gelöst wurde diese durch aus Kunststoff additiv gefertigte Einwegelemente, die die Entkopplungshülsen umfassen, mit einem gemeinsamen Fuß aufgestellt werden und die Verankerungslänge definieren (vgl. Abbildung 12). Außerdem markiert ein Fähnchen das Ende des Stabs, um dieses gezielt aus einem gedruckten Strang herausschneiden zu können. Das Stabende ist von einer Kappe geschützt, die über Sollbruchstellen entfernt werden kann und ein sauberes Stabende zum Aufsetzen eines Wegaufnehmers im Prüfstand gewährleistet. Das 3D-Modell des Bauteils ist parametrisch modelliert und kann somit problemlos an Stabdurchmesser und Filamentquerschnitte angepasst werden. Das

parametrische Modell stellt insofern ein Projektergebnis dar, das für andere Forschungseinrichtungen nützlich sein kann und diesen open-source zur Verfügung gestellt wird.



Abbildung 12: Gespaltener Auszugprobekörper mit 3D-gedrucktem Hüllrohr aus Kunststoff

Bewehrungsverbund bei Vibrationsanregung

Oben wurde bereits dargestellt, dass Vibrationseinwirkungen am Druckkopf den Materialfluss unterstützen und das 3D-Drucken steiferer Konsistenzen ermöglichen. Auf die Verbundfestigkeit haben sie jedoch keinen nachweisbaren Einfluss (vgl. Abbildung 9). Ergänzend wurde eine Vibrationsanregung der Bewehrung im Projektbegleitenden Ausschuss diskutiert und erprobt. Hierfür wurde ein auf einer Leimzwinde befestigter Vibrationsmotor direkt am Stab positioniert. Zunächst wurden Auszugproben wie oben beschrieben hergestellt. Unmittelbar nach der Betonextrusion wurde die Vibration für 10 s appliziert. Ein signifikanter Unterschied der Verbundfestigkeit zu nicht-vibrierten Referenzen konnte nicht nachgewiesen werden.

Ein weiterer Ansatz wurde zunächst an geschalteten Quadern erprobt. Die Vibrationseinwirkung wurde am freien Stabende während des Betonierens aufgebracht. Als Vergleich dienten gänzlich unverdichtete und herkömmlich auf einem Rütteltisch verdichtete Proben sowie solche, die sowohl auf dem Rütteltisch und am Stab angeregt wurden. Die Auszugfestigkeiten sind in Abbildung 13 zusammengestellt.

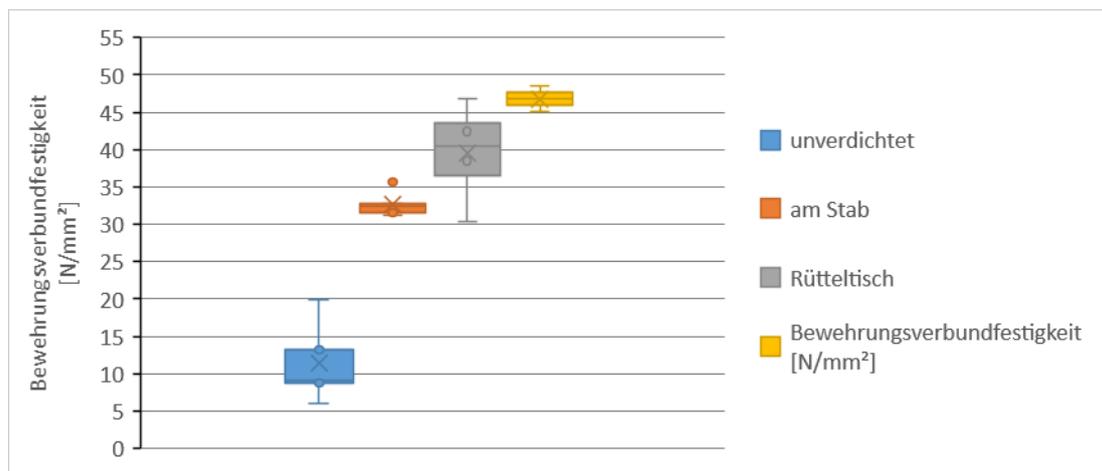


Abbildung 13: Verbundfestigkeit bei verschiedenen Verdichtungsverfahren

Die Verbundfestigkeit der unverdichteten Proben liegt im Mittel bei $11,4 \text{ N/mm}^2$ und damit in der Größenordnung additiv gefertigter Proben. Die Streuung ist jedoch groß (Variationskoeffizient 47 %). Herkömmlich verdichtete Proben schwanken in einer Range ähnlicher Größe, erreichen im Mittel jedoch Verbundfestigkeiten von $39,5 \text{ N/mm}^2$, sodass der Variationskoeffizient nur 17,8 % beträgt. Die am Stab vibrierten Proben erreichen $32,7 \text{ N/mm}^2$ und einen Variationskoeffizienten von 5,4%. Dieser ist ähnlich zu dem der mit Rütteltisch und Vibrationsmotor verdichteten Proben mit 5,2%. Diese erreichen die höchsten Verbundfestigkeiten von $46,8 \text{ N/mm}^2$, was für praktische Bauanwendungen jedoch ohne Bedeutung bleibt.

Positiv für den additiven Stahlbetonbau ist, dass sich die Verbundfestigkeit durch Vibration am Stab während des Betonierens etwa verdreifacht und zugleich deutlich weniger streut. Bedenken des Projektbegleitenden Ausschusses, dass dadurch der Verbund gestört wird, können somit zurückgewiesen werden. Diese sind durchaus im jungen Alter berechtigt, wenn frühe Hydratationsprodukte Schaden nehmen können. Während der Betonage liegen diese jedoch noch nicht vor. Die Verflüssigung unterstützt somit den Bewehrungsumschluss.

Abbildung 14 zeigt eine gespaltene Auszugprobe, bei der während der Betonage am Stab vibriert wurde. Im unteren Bildbereich ist die Betonoberfläche zu sehen, die mit dem Standfuß des Kunststoffüllrohrs in Kontakt war. Anhand des Porositätsverlaufs kann die Wirkungstiefe der Vibrationsverdichtung zu etwa 3 cm abgeschätzt werden. Insofern scheint es möglich, die Verflüssigung nur lokal am Stab hervorzurufen, ohne die globale Standsicherheit des Betonstrangs zu gefährden.



Abbildung 14: Gespaltene Auszugprobe mit Vibration am Stab

Weiterhin zu untersuchend sind die quantitative Wirkung von Frequenz und Amplitude der Vibration aus die Verflüssigung und deren Wirkungstiefe. Darüber hinaus ist von Interesse, wie weit sich die Vibration im Stab fortpflanzt bzw. wie stark die Dämpfung durch den Frischbeton ist. Außerdem ist die Beobachtung an 3D-gedruckten Probekörpern zu verifizieren.

Bewehrungsverbund unter thermischer Einwirkung

Seitens des Projektbegleitenden Ausschusses wurden zudem Bedenken geäußert, das prozessintegrierte Setzen von Schweißpunkten könnte den Bewehrungsverbund beeinträchtigen, wenn der Stahl beim Kontakt mit dem Frischbeton noch heiß ist. Zu untersuchen war die These, das Anmachwasser bei Kontakt verdampfen könnte, sodass eine geschwächte Verbundzone zurückbleibt.

Zunächst wurde dafür die Staboberflächentemperatur nach dem Schweißen thermografisch über die Abkühlzeit aufgezeichnet. Um die empfindliche Optik nicht zu beschädigen, konnte der Schweißvorgang selber nicht dokumentiert werden. Abbildung 15 zeigt ein Thermogramm einer T-Verbindung aus 8 mm-Bewehrungsstählen 10 s nach dem Schweißen mit der eigens entwickelten Schweißzange.

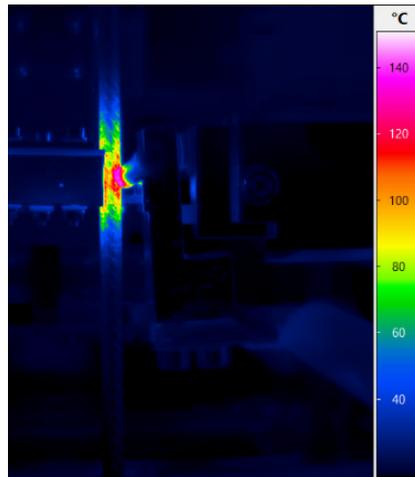


Abbildung 15: Thermogramm einer T-Verbindung von 8 mm-Bewehrungsstahl 10 s nach dem Schweißen

Der Temperaturverlauf des heißesten Bereichs an der Stabkontaktstelle über der Schweißlinse ist in Abbildung 16 dargestellt. Er lässt sich durch eine Potenzgleichung sehr gut annähern, wonach eine Temperatur von 100°C nach 11,1 s unterschritten wird.

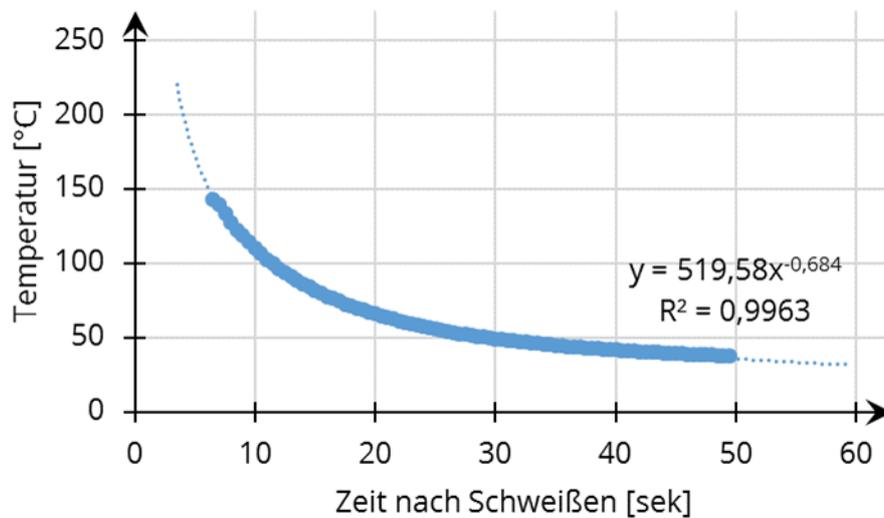


Abbildung 16: Abkühlverlauf der Schweißstelle

Designgröße für den Zeitabstand zwischen Schweißen und Betonieren in Variante 3 sind 4 s, sodass laut Extrapolation eine Temperatur von 200°C an der Schweißstelle zu erwarten ist. Das muss jedoch kein Ausschlusskriterium sein, da diese Temperatur nur lokal vorliegt. Ggf. ist eine Abminderung der Verbundlänge erforderlich, wenn nachgewiesen werden kann, oberhalb welcher Temperatur die Verbundfestigkeit abnimmt. Daher wurde aus den Daten die 3D-Fläche in Abbildung 17 erzeugt. Sie stellt die Temperatur über die Zeit und die Stablänge dar, wobei der Schweißpunkt mittig liegt.

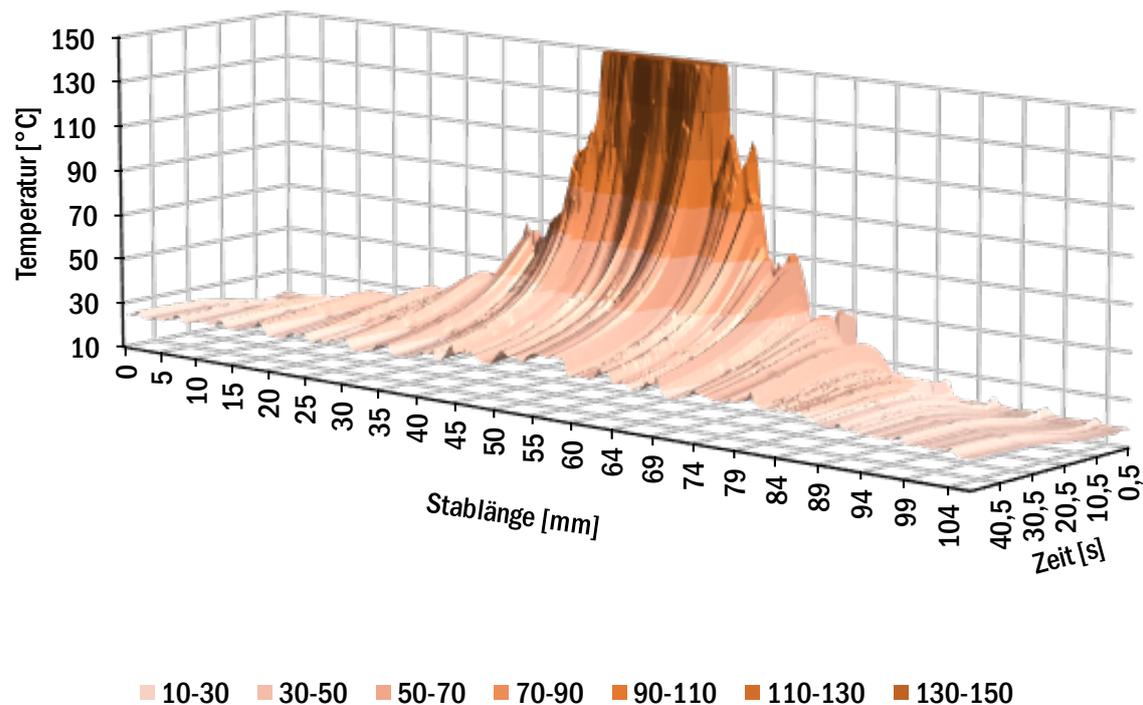


Abbildung 17: Oberflächentemperatur nach dem Schweißen über die Stablänge und die Abkühlzeit

Ausgewertet wurden Temperaturen bis zu 150°C. Die Fläche zeigt eine Riffelung, die der Profilierung des Bewehrungsstabs entspricht. Durch die Unebenheiten steht die Oberfläche lokal in einem anderen Winkel zur Wärmebildkamera, was einen Einfluss auf die aufgezeichnete Temperatur hat. Zu erkennen ist eine rasche Abkühlung, wobei die Erwärmung lokal begrenzt bleibt. So erwärmt sich nur ein Stababschnitt von etwa 4 cm auf Temperaturen über 30°C.

Im Weiteren wurde untersucht, ob die Stabtemperatur während des Betonierens mit der Verbundfestigkeit korreliert. Hierfür wurden geschaltete Stabauszugprobekörper hergestellt, deren Bewehrung im Ofen auf > 200°C erhitzt wurde. Der Beton wurde nach verschiedenen Abkühlzeiten hinzugegeben, was einen Abtrag der Verbundfestigkeit über einen Temperaturbereich ermöglicht. Die tatsächliche Oberflächentemperatur bei Betonkontakt wurde mit einer Wärmebildkamera dokumentiert. Abbildung 18 stellt die Messwerte zusammen.

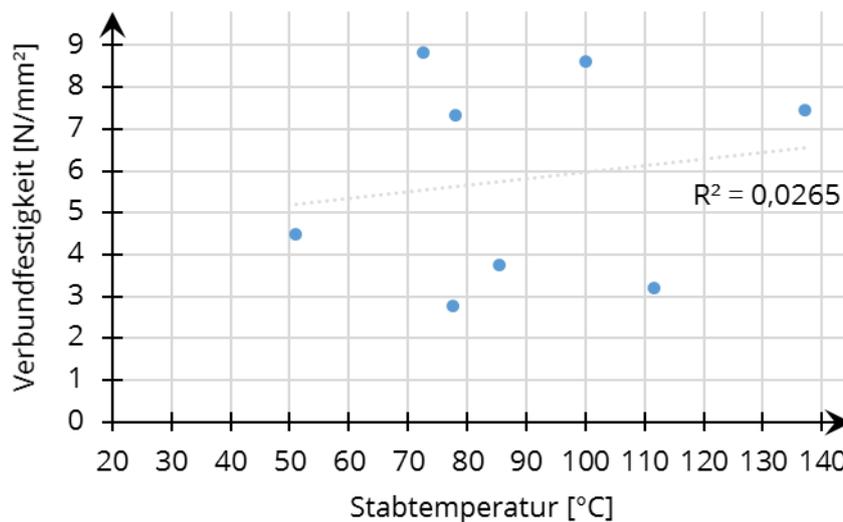


Abbildung 18: Zusammenhang von Stabtemperatur und Verbundfestigkeit

Das Diagramm zeigt Verbundfestigkeiten zwischen 2,8 N/mm² und 8,8 N/mm², wobei die Streuung ähnlich hoch wie bei anderen unverdichteten Proben ist (Variationskoeffizient 40,1 %). Deutlich wird jedoch auch, dass die Werte nicht korrelieren. Auch mittels F-Test konnte nachgewiesen werden, dass zu Konfidenzniveau von 95 % kein signifikanter Zusammenhang vorliegt. Das deckt sich auch mit den Beobachtungen, wonach ein sichtbares Verdampfen von Wasser ausbleibt. Die Gültigkeit des Ergebnisses ist auf den untersuchten Bereich zwischen 50°C und 150°C begrenzt. Es sollte nicht extrapoliert werden.

Dauerhaftigkeit

Die Dauerhaftigkeit des 3D-gedruckten Betons wird mit Wasserabsorptions- und Frosttauwchseltest charakterisiert. Geschalte Probekörper dienen dabei als Referenz. Die Untersuchungen hierzu laufen.

Empfehlungen zu Prüfverfahren

Weiterhin ist das komplexe Anforderungsprofil an 3D-druckbaren Beton eine Herausforderung. Zwar ist es gelungen, normkonformen Beton in guter Qualität additiv zu verbauen; jedoch sind Reproduzierbarkeit und Zuverlässigkeit der Technologie verbesserungsbedürftig. Ein zentraler Aspekt hierbei ist das Monitoring rheologischer Frischbetoneigenschaften, die zeitabhängig sind und von der individuellen Scherhistorie beeinflusst werden. Erforderlich sind insofern Testverfahren, die mit geringem Aufwand ohne Laborbedingungen und ohne spezialisierten Fachwissen durchgeführt werden können und sofort leicht zu interpretierende Ergebnisse liefern. Während der Materialentwicklung diente hierfür der Setzmaßversuch nach EN 12350-2 [11] in Verbindung eines Ausbreitmaßes in Anlehnung an EN 12350-5 [12], wobei dieselbe Probe den Stößen ausgesetzt wurde, von der das Setzmaß gemessen wurde. Insofern weicht die Kegelstumpfgeometrie von den Normvorgaben des Ausbreitmaßes ab. Ergänzende Versuche haben jedoch gezeigt, dass die Messungen beider Geometrien sehr gut korrelieren und ineinander umgerechnet werden können. Insofern stellt das Vorgehen eine wichtige Zeitersparnis dar.

Ergänzt wurden diese Daten durch den subjektiven Eindruck des Materials während der Handhabung. Entsprechende Erfahrung vorausgesetzt, ist eine Einschätzung der Druckbarkeit zuverlässig möglich. Jedoch ist dies keine zufriedenstellende Empfehlung für den Baustelleneinsatz. Rotationsrheometrische Messungen können jedoch auch nicht empfohlen werden, da kaum Messgeräte für Beton mit 16 mm Größtkorn angeboten werden und diese zu kostenintensiv und nicht hinreichend robust für Baustellenanwendungen sind. Zudem setzen sie Fachwissen der Anwendenden voraus. Ausschlusskriterium ist jedoch der Umstand,

dass die in diesem Projekt eingesetzten Betonkonsistenzen zu steif für dieses Messprinzip sind. In der Regel bildet sich bereits bei kleinen Scherraten eine Scherfuge im Umkreis der Messgeometrie aus, während das übrige Material im Messspalt weitgehend ungeschert bleibt. Das hat zur Folge, dass die von gleichförmigen Scherratenverteilungen ausgehenden Interpretationsmodelle nicht auf die aufgezeichneten Widerstände angewendet werden können. Zwar entsprechen die aufgezeichneten Kurvenverläufe qualitativ dem zu erwarteten Verhalten; quantitativ bleiben sie jedoch ohne Aussagekraft.

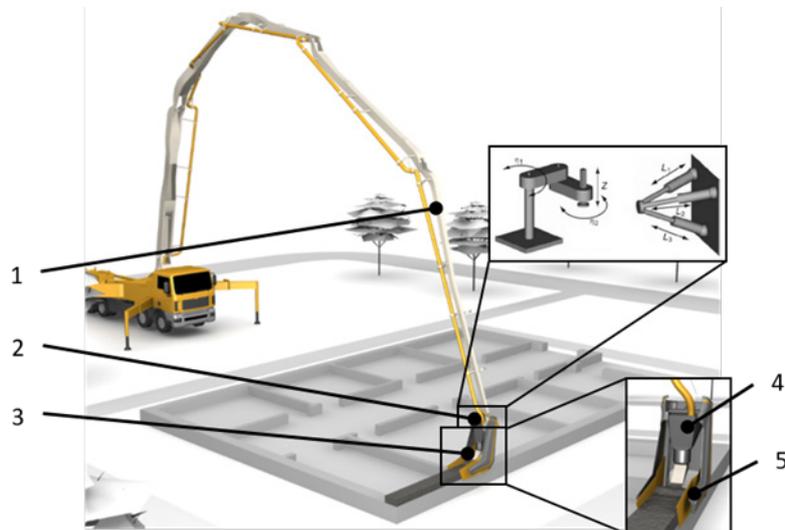
Vielversprechender sind hier Penetrationsversuche, bei denen eine Messgeometrie in den Frischbeton eingedrückt wird. Aus der Kombination von Prüfgeometrie, Eindringgeschwindigkeit und Eindringwiderstand kann dann auf wichtige Betonparameter wie die Fließgrenze geschlossen werden. Denkbar ist die Entwicklung mobiler Prüfstände, die zur Qualitätskontrolle auf Baustellen eingesetzt werden können. Deren Entwicklung ist jedoch nicht Teil dieses Projekts.

Eine weitere unverzichtbare Komponente ist die Kontrolle des Druckergebnisses im Sinne eines Abgleichs mit der Sollgeometrie und ggf. einer Anpassung der Maschinenparameter. Derzeit erfolgt dies visuell. Im Sinne der Automatisierung werden inline-Messverfahren empfohlen. Hierunter fallen zerstörungsfreie und zerstörungsarme Methoden zur Überwachung der Tragfähigkeit von bereits extrudiertem Beton. Weiterhin wird an der kontinuierlichen Vermessung des extrudierten Strangs gearbeitet, um die Anpassung der Extrusionsrate anhand des Extrusionsbildes automatisch vorzunehmen.

Ergebnisse der Professur für Baumaschinen (PBM)

Entwicklungsprozess

Aus Sicht der Baumaschinentechnik handelt es sich bei der Bewehrungsintegration um eine spezifische Aufgabe beim Beton-3D-Druck, die ein Zusatzmodul des Druckkopfes erfordert. Generell besitzen Beton-3D-Druck-Technologien die folgende Maschinenstruktur, siehe Abbildung 19.



1 Robotik; 2 Kompensationseinheit; 3 Druckkopf; 4 Extrusionsmodul; 5 Formgebungsmodul

Abbildung 19: Allgemeine Maschinenstruktur [11]; [20]

Bei der Robotik (1) können verschiedene Manipulatorsysteme, wie Raumportale, Kranausleger, Autobetonpumpen, Seilroboter oder auf Raupenfahrwerken montierte Gelenkarmroboter und Teleskopausleger zum Einsatz kommen. Das jeweilige Bauverfahren und die zu druckende Objektgröße beeinflussen die Manipulatorauswahl in hohem Maße. Neben der Bewegung des Druckkopfes (3) zählen das Tragen der Fördertechnik für den Beton und die Energieversorgung aller Systeme zu den Aufgaben des Manipulators [32]; [34].

Der Mechanismus zur Kompensation (2) ist optional. Mit dieser zusätzlichen Kinematik sollen mögliche Positionsabweichungen der Robotik, welche sich beispielsweise aufgrund von mangelnder Systemsteifigkeit ergeben, ausgeglichen werden. Hierfür kann sowohl eine serielle als auch eine parallele Kinematik eingesetzt werden [32]; [34].

Der Druckkopf (3) ist das Werkzeug des Betoneinbaus und untergliedert sich in zwei Hauptsysteme. Das Extrusionsmodul (4) übernimmt die Dosierung des Betons in Abhängigkeit der Druckgeschwindigkeit und des zu extrudierenden Querschnitts. Das Formgebungsmodul (5) bringt den Betonstrang in die gewünschte Form und stabilisiert diesen bis zur Erreichung der Grünstandfestigkeit [32]; [34].

Weitere Unterbaugruppen, die dem Einbau der Bewehrung dienen, werden als Zusatzmodule bezeichnet. Aus diesen können weitere spezifische Aufgaben für die Robotik oder andere Druckkopfmodule resultieren. Es muss die Zufuhr von Bewehrung entlang des Manipulators gewährleistet werden oder das Formgebungsmodul muss die Bewehrung mit Beton umschließen.

Eine umfangreiche Recherche zum Stand der Technik unter maschinenbaulichen Aspekten zeigt im Bereich der Bewehrungsintegration beim Beton-3D-Druck unterschiedlichste Varianten. Diese reichen von händischer und teilautomatisierter Integration bis hin zu Konzepten vollautomatischer Bewehrungsintegration. Ebenso werden verschiedenste Bewehrungssysteme, wie einzelne Bewehrungsstäbe, endlose Drähte oder

Bewehrungsmatten und -körbe, eingebaut. Eine Zusammenfassung des Stands der Wissenschaft und Technik enthält „3D-gedruckte monolithische Stahlbetonwände im CONPrint3D-reinforced Verfahren“ [26].

Beginn der Entwicklung ist die Erstellung einer Anforderungsliste. In dieser werden die Anforderungen nach Forderungen und Wünschen verschiedener Priorität kategorisiert [3]. Die gelisteten Anforderungen sind weitestgehend unabhängig von der gewählten Integrationsvariante der Bewehrung, d.h. aufgesetzte Bewehrungsmatte, umgedruckter Bewehrungskorb oder synchroner Bewehrungseinbau.

Die Anforderungen an die Entwicklung eines Bewehrungsintegrationssystems für den Beton-3D-Druck ergeben sich im Wesentlichen aus baubetrieblichen, baustofflichen und maschinenbaulichen Aspekten. Die Konfiguration des Druckkopfes wird durch die Geometrie der zu druckenden Wände, die Betonzusammensetzung (z.B. Größtkorn) und die rheologischen Eigenschaften des Frischbetons (z.B. Viskosität) sowie das Druckkopf-Manipulatorsystem (z.B. Portalroboter) und der allgemeinen Druckstrategie bedingt [26]; [33].

Mit Blick auf die gestellte Entwicklungsaufgabe werden diese Punkte um spezifische Fakten des Bewehrungsbaus erweitert. Für eine zulassungsfähige Technologie ist die Verwendung handelsüblicher Betonstähle zu bevorzugen. Die wichtigsten Eigenschaften, wie Durchmesser und äußere Geometrie (z.B. Anzahl der Rippe) oder Stahlsorte, sind nach DIN 488-1 festgelegt [8].

In der Norm DIN EN 1992-1-1 sind diverse Anwendungsregeln bei der Verarbeitung der Bewehrung und dem korrekten Einbau aufgestellt [10]. Bspw. ist bei der Verarbeitung darauf zu achten, dass es zu keiner Beschädigung der Bewehrung durch Rückbiegen kommt, da sonst deren Leistungsfähigkeit nicht gewährleistet werden kann. Ebenso ist auf eine korrekte Verlängerung der Bewehrungseisen zu achten, damit aus bemessungstechnischer Sicht ein fortlaufender Kraftfluss entstehen kann und die Lasten ordnungsgemäß in den Untergrund geleitet werden. Zur Gewährleistung der Dauerhaftigkeit der Stahlbetonkonstruktionen ist auf Basis der Expositionsklasse eine entsprechende Betondeckung während des Einbaus zu realisieren.

Neben diesen allgemeingültigen Fakten führen die zu entwickelnden Integrationsvarianten auch zu speziellen Punkten, wie der Düsenausrichtung zur Wandachse, der Richtung des Betonflusses zur Umschließung der Bewehrung oder notwendigen Taktraten. Darüber hinaus muss das Modul zur Integration von Bewehrung auch grundlegenden Anforderungen genügen, wie z.B. einem geringen Gewicht, einer hinreichenden Robustheit und einem einfachen Handling [26].

Die Funktionsstruktur dient als Abstraktion der vorliegenden Entwicklung eines Druckkopfes zur Bewehrungsintegration beim Beton-3D-Druck. Zweck ist es, einen kausalen Zusammenhang der einzelnen Teilfunktionen des Druckkopfes zu finden, unabhängig von den drei unterschiedlichen Varianten der Bewehrungsintegration.

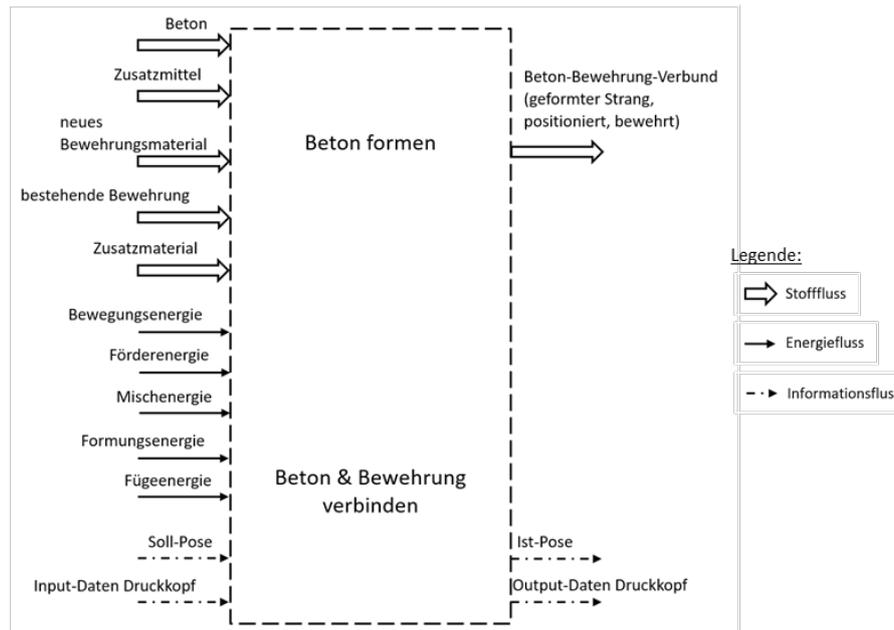
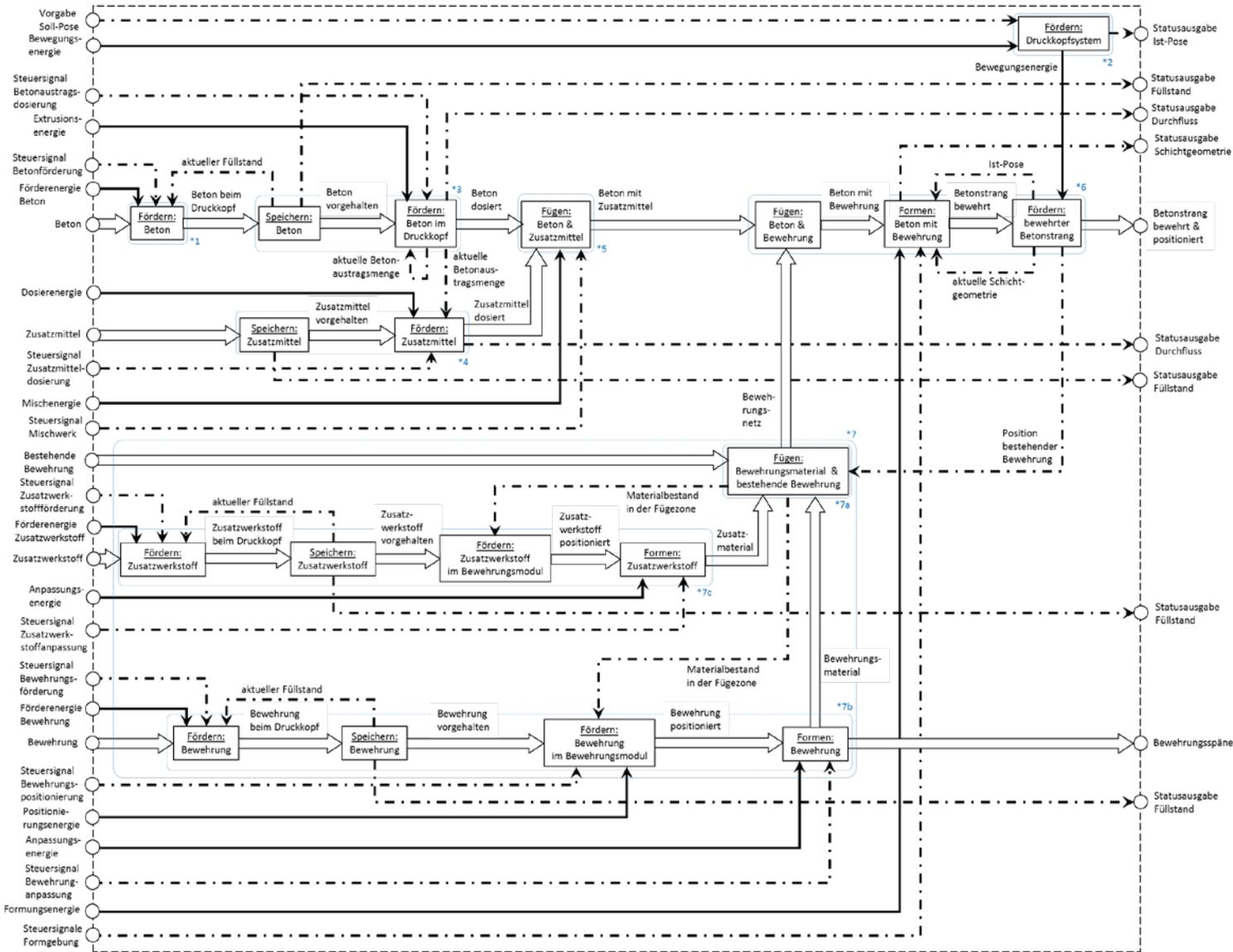


Abbildung 20: Funktionsstruktur - Black-Box-Modell - Gesamtfunktion

Das Gesamtsystem wird in lösbare Teilfunktionen untergliedert, diese Teilfunktionen werden durch einen Stoff-, Energie- und Informationsfluss miteinander gekoppelt [3]. Dabei wird von einem Black-Box-Modell, welches die Gesamtfunktion zeigt, zu einem White-Box-Modell, das die detaillierte Funktionsstruktur beinhaltet, schrittweise übergegangen. Abbildung 20 stellt das Black-Box-Modell dar. In dieser Struktur sind alle notwendigen Ein- und Ausgänge aufgeführt und die zwei Kernfunktionen benannt.

Die Abbildung 21 zeigt ein auf die wesentlichen Aspekte des Stoffflusses reduziertes Grey-Box-Modell. Die Struktur ist in 7 Teilsysteme unterteilt. Innerhalb dieser Darstellung sind die Betonfördertechnik (1) und das Bewegungssystem (2) weiterhin Black-Box-Modelle, da diese in der Entwicklung des Bewehrungsintegrationsmoduls zunächst eine untergeordnete Rolle spielen.

Der Druckkopf für die Extrusion und den Betoneinbau setzt sich aus den Teilsystemen 3 bis 6 zusammen. Der Zusatzmittelspender (4) und ein entsprechendes Mischwerk (5) sind optionale Komponenten, da die Zusatzmittelzugabe von der Betonrezeptur abhängt. Innerhalb des Formgebungsmoduls (6) erfolgt die Formgebung des Betonstranges und die schichtweise Ablage. Im Schritt „Fügen: Beton mit Bewehrung“ erfolgt der Umschluss der Bewehrung mit Beton und bildet die Schnittstelle zwischen Formgebungsmodul und Bewehrungsintegrationsmodul (7).



Legende:

- 1 Betonförderung
- 2 Bewegungssystem
- 3 Extrudermodule
- 4 Zusatzmittelpender
- 5 Mischwerk
- 6 Formgebungsmodul
- 7 Bewehrungsintegrationsmodul
- 7a Fügeeinrichtung
- 7b Bewehrungsförderung
- 7c Zusatzwerkstoffzufuhr

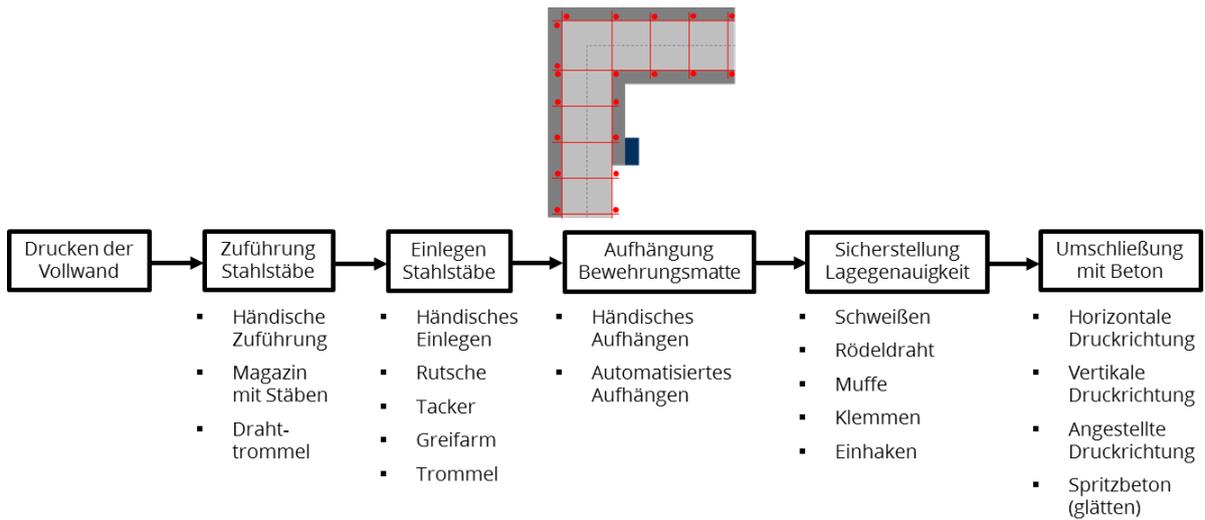
Stofffluss

Energiefluss

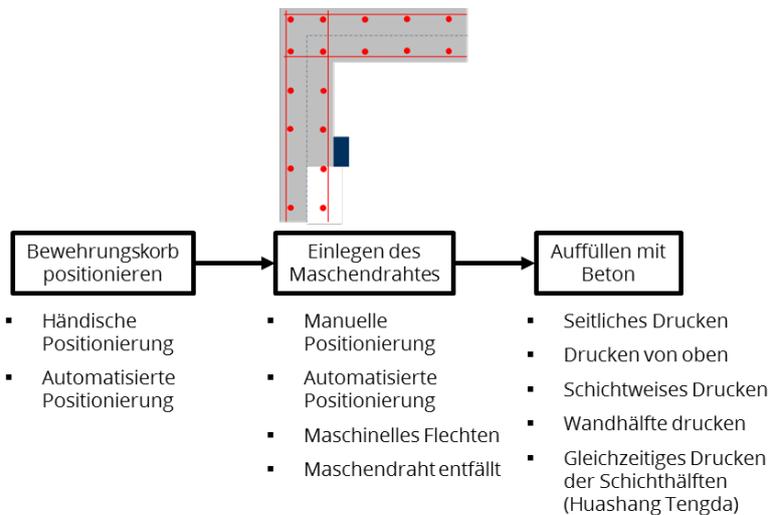
Informationsfluss

Abbildung 21: Funktionsstruktur - Grey-Box-Modell - Stofffluss

a) Variante 1 – Aufgesetzte Bewehrungsmatte



b) Variante 2 – Umdruckter Bewehrungskorb



c) Variante 3 – Synchroner Bewehrungsbau

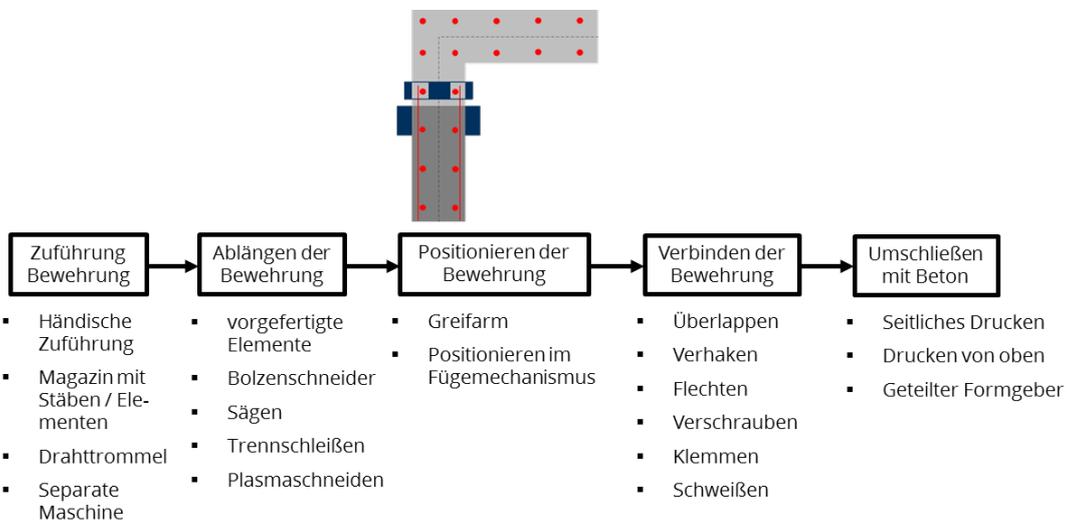


Abbildung 22: Morphologischer Kasten

Dieses setzt sich verschiedenen Teilstrukturen zusammen. Die Fügeeinrichtung (7a) übernimmt dabei die Aufgabe das neue Bewehrungsnetz zu fertigen und mit der bereits bestehenden Bewehrung innerhalb des Betonbauteils zu verbinden. Der Pfad für die Zufuhr neuer Bewehrungselemente (7b) muss ggf. mehrfach für die verschiedenen notwendigen Bewehrungselemente je Integrationsvariante umgesetzt werden. Die Einbringung von Zusatzwerkstoff (7c) für das Fügen, wie Rödeldraht oder Schweißzusatzwerkstoffen, ist optional, da dessen Notwendigkeit vom jeweiligen Fügeverfahren bestimmt wird.

Die Funktionsstruktur bildet die Energieflüsse vereinfacht ab. Die notwendigen Umwandlungen von einer beliebigen Energieart auf die letztlich wirkende Energie sind nicht enthalten. In der praktischen Umsetzung der Maschine müssen nicht zwangsweise mehrere getrennte Energieversorgungen vorliegen. Es kann eine zentrale Versorgung genutzt werden, deren Fluss aufgetrennt wird. Ebenfalls vereinfacht sind die Informationsflüsse zur Steuerung und Ausgabe von Betriebszuständen. Die internen Informationsrückflüsse zwischen den Funktionen des Stoffflusses stellen die Grundlage möglicher Regelkreise für die Automatisierung des Druckkopfes dar.

Zur Erstellung des morphologischen Kastens können entsprechend der gewählten Bewehrungsintegrationsvariante einige Funktionen entfallen bzw. zusammengefasst werden. Die allgemeinen Teilfunktionen werden in eine entsprechend dem Prozessablauf logische Reihenfolge sortiert. Anschließend werden den Funktionen konkrete Wirkelemente zugewiesen, die als potenzielle Lösungsmöglichkeit in Frage kommen. Abbildung 22 zeigt die morphologischen Kästen für die drei Varianten. Anhand dieser Kästen kann für jedes Bewehrungsintegrationsverfahren eine Lösungsvariante abgeleitet werden.

An Hand der morphologischen Kästen, der Abbildung 22, wird für alle Varianten die Umschließung der Bewehrung als universeller Schritt identifiziert, welcher in den folgenden Kapiteln näher untersucht wird. Zudem kann in der Variante 1 die Ablage der Queranker als wesentlicher Untersuchungsgegenstand genannt werden. Da es momentan kein Beton-3D-Druckverfahren mit vollautomatisiertem Einbau von Stahlbewehrung gibt, wird in der Variante 3 das Verbinden der Bewehrungselemente untereinander ein wesentlicher Untersuchungsgegenstand.

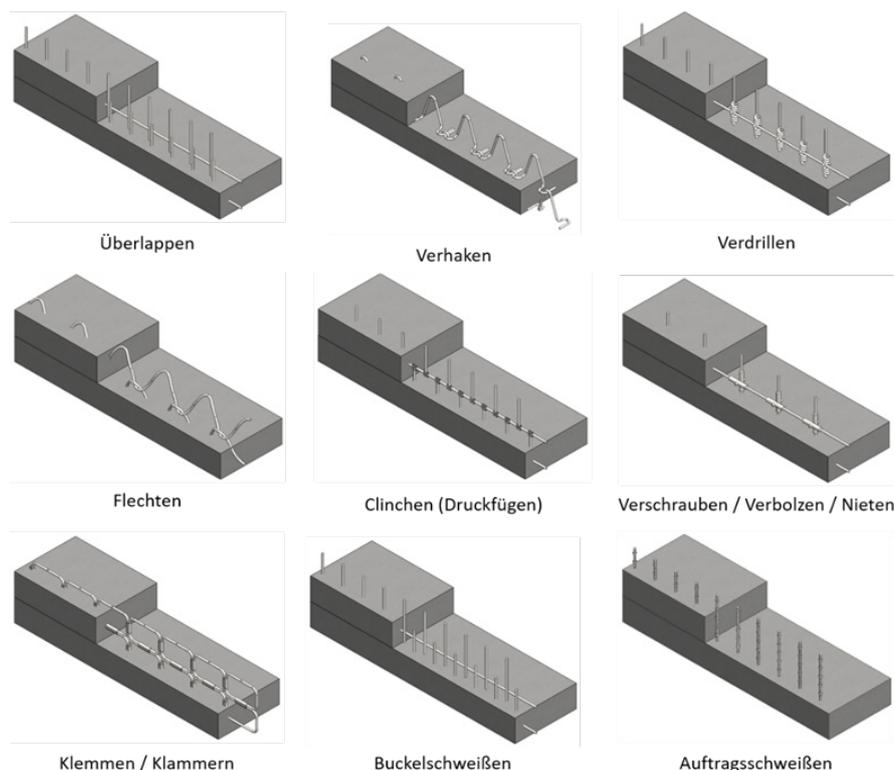


Abbildung 23: Variante 3: Konzepte zur Herstellung von Bewehrungsnetzen [26]

Für das Verbinden der zweidimensionalen Bewehrungsstrukturen beim synchronen Bewehrungsbau sind in Abbildung 23 auf Basis der DIN EN 8580 unterschiedliche Fertigungsprinzipien dargestellt. Schweißen stellt dabei die vielversprechendste Option da [15]; [26].

Druckkopf

erfolgen diverse Modultests, um die Wirkungsweise einzelner Komponenten nachzuweisen. Zur Gewährleistung der Extrusion von Betonen mit 16 mm Größtkorn ist die Materialkombination von Schnecken und Zylinder des Extruders auf Stahl/Schlauch E592-EPDM umgestellt worden [34].

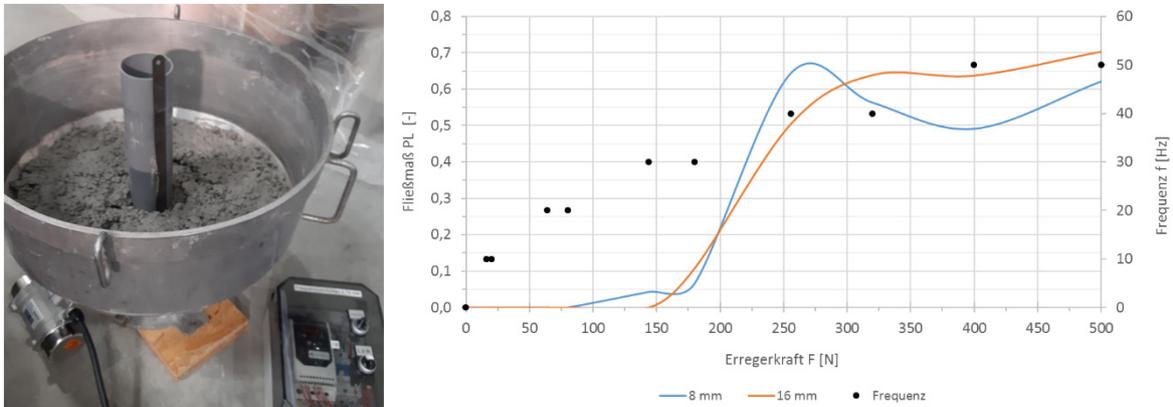


Abbildung 24: Beeinflussung des Fließmaßes durch Vibration [32]; [34]

Neben dieser Anpassung zeigt die Abbildung 24 die Beeinflussung der Fließfähigkeit des Betons bei Nutzung eines Außenrüttlers. Das Fließmaß PL wird mit einem Steigrohr nach DIN EN 12350-10 ermittelt [13]. Zur Variation der Erregerkräfte F wurden die Frequenz f und die Unwuchtmasse variiert, wobei jeweils bei gleicher Frequenz zwei unterschiedliche Unwuchten am Rüttler durch entsprechende Massenaufgabe erzeugt wurden. Für beide Betone (Gesteinskörnung bis 8 mm bzw. bis 16 mm) ist zu erkennen, dass erst ab einer bestimmten Erregerkraft eine Beeinflussung der Fließfähigkeit einsetzt. Im Bereich von 350 bis 500 N Erregerkraft, die in der vorliegenden Konfiguration bei einer Frequenz ab 40 Hz erreicht wird, weisen die Verläufe keine signifikanten Veränderungen auf. Das Verhalten ist sprunghaft [27]. Dieser Effekt soll an der Düse gezielt eingesetzt werden, um den Umschluss von Bewehrung und Beton zu verbessern und die Extrudierbarkeit entsprechender Betonrezepturen mit 16 mm zu gewährleisten.

Variante 1 - Aufgesetzte Bewehrungsmatte

An Hand des morphologischen Kastens aus Abbildung 22 ist für die Variante 1- aufgesetzte Bewehrungsmatte eine Lösungsvariante abgeleitet worden. Die Abbildung 25 zeigt einen Konstruktionsentwurf das Bewehrungsintegrationsmodul für die Einlage von Querankern der Variante 1. Der Druckkopf bewegt sich entlang der Druckrichtung v_{DK} . Die Magnettrommel (3) und das Entnahmerad (2) werden mit einem Motor angetrieben. Durch die Drehung des Entnahmerades wird ein Stab aus dem Magazin (1) entnommen und auf der Trommel platziert. Der Stab wird abgelegt und beim Überfahren mit der Trommel in den Beton gedrückt (4). An der Austrittsöffnung wird die aktuelle Betonschicht ausgetragen und der Queranker in die Kernwand eingedrückt (5). Mit Hilfe des Cutters (6) wird der Betonstrang abgetrennt und saubere Abschlüsse einer Betonschicht erstellt. Anschließend werden die mit Abstandshaltern präparierten Bewehrungsmatten an den überstehenden Querankern befestigt, bspw. mit Bindedraht. Am Bajonett-Verschluss (7) wird das Formgebungsmodul mit Bewehrungsintegrationssystem gegen ein Formgebungssystem für den Druck der entsprechenden Betonüberdeckung getauscht und diese wird auf die Bewehrungsmatte gedrückt [27].

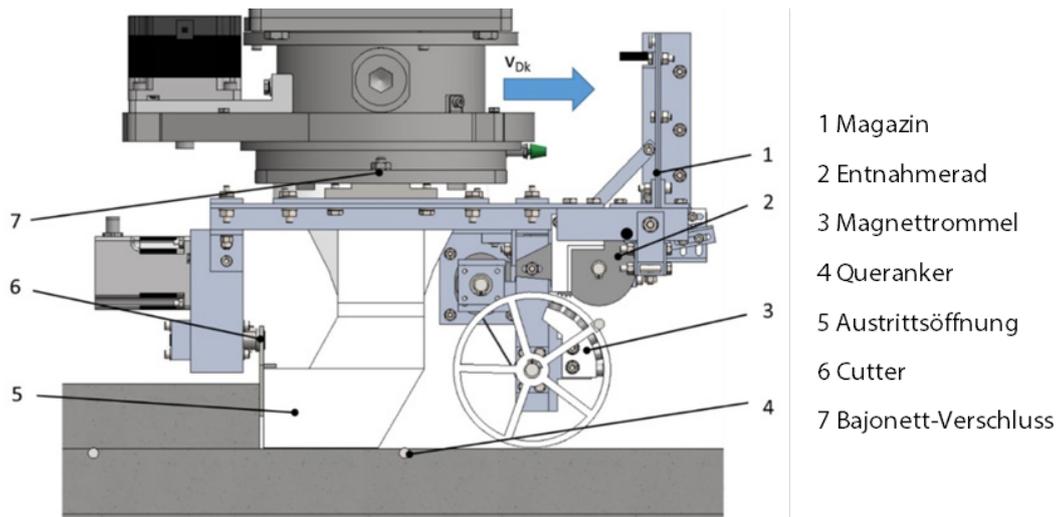


Abbildung 25: Variante 1 - Funktionsbeschreibung [27]

Bei der Herstellung der Kernwand mit Querankern ist der schwierigste Schritt die korrekte Ablage des Querankers und das Eindringen während der Überfahrt. Die



Abbildung 26 zeigt einen vereinfachten Aufbau des Druckkopfes ohne Motoren zum Test dieser Funktion. Der Stabdurchmesser beträgt 10 mm, die Länge 160 mm und die Schichtabmessung ist 150x50 mm. Das Größtkorn des Betons ist 16 mm.

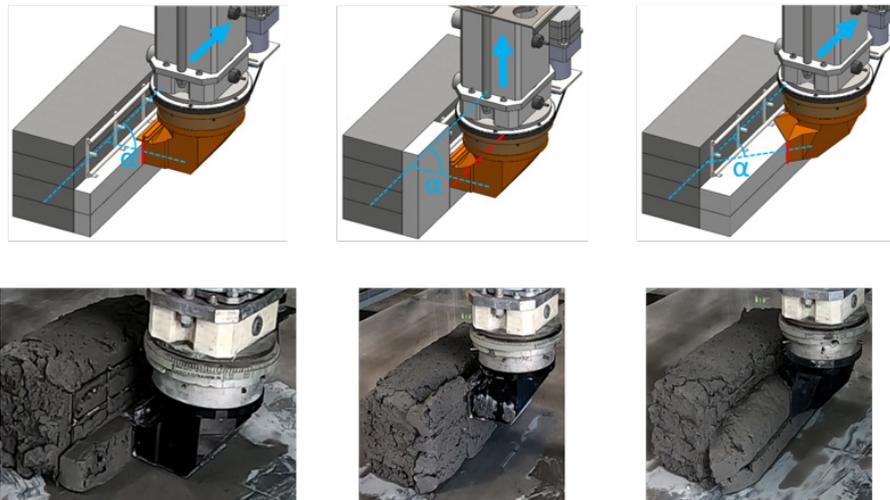
Der einzulegende Queranker liegt in einer Nut durch die Dauermagneten unter der Trommel fixiert. Wenn die Drehung ausgeführt wird, fällt das Bewehrungsessen herunter, sobald dieses die Magnetzone verlässt. Anschließend wird der vor dem Druckkopf liegende Queranker überdruckt.



Abbildung 26: Variante 1 - Einbau Queranker

Mehrere Versuche mit verschiedenen Stabdurchmessern von 6 bis 10 mm haben gezeigt, dass die Ablage und Eindringen funktioniert. Die Stäbe werden orthogonal zur Wandmittellinie abgelegt. Die Stabüberstände sind symmetrisch. Die Symmetrie wird von der Führung des Magazins während der Entnahme bestimmt, d.h. wie genau der Stab auf der Trommel platziert wird. Die Qualität der Schnittfläche wird von der Stabvorbereitung (Schnitttechnik) ab.

Die ausgeführte Magnettrommel (Stabmagnete aus Neodym: Durchmesser 10 mm, Länge: 10 mm) trägt bei verschiedenen Bewegungsszenarien des Druckkopfes eine Masse von ca. 380 g (entspricht einem Bewehrungsseisen 16 mm Durchmesser und 160 mm Länge).



a) horizontal; 90°

b) vertikal; 90°

c) horizontal; 45°

Abbildung 27: Variante 1 - Druckrichtungen und Düsenstellung beim Betonüberdeckungsdruck [26];[27]

Abbildung 27 visualisiert Möglichkeiten der Druckrichtung und Düsenstellung beim Druck der Überdeckung in Variante 1. Diese Druckvariationen haben einen direkten Einfluss auf die Ausprägung der Fuge zwischen der Kernwand und der Überdeckung. Bei einem Anstellwinkel von 90° kommt es sowohl bei horizontaler als auch vertikaler Druckrichtung zu einer starken Umlenkung des Betonstranges über die hintere Kante des Formgebungswerkzeuges, wodurch die Oberflächenqualität abnimmt. Diese verbessert sich bei einem Anstellwinkel von 45° und horizontaler Druckrichtung, da der Betonstrang hier weniger stark umgelenkt wird. Zudem ist die Fuge zwischen Kernwand und Überdeckung nicht so stark ausgeprägt wie bei den anderen Varianten.

Variante 2 - Umdruckter Bewehrungskorb

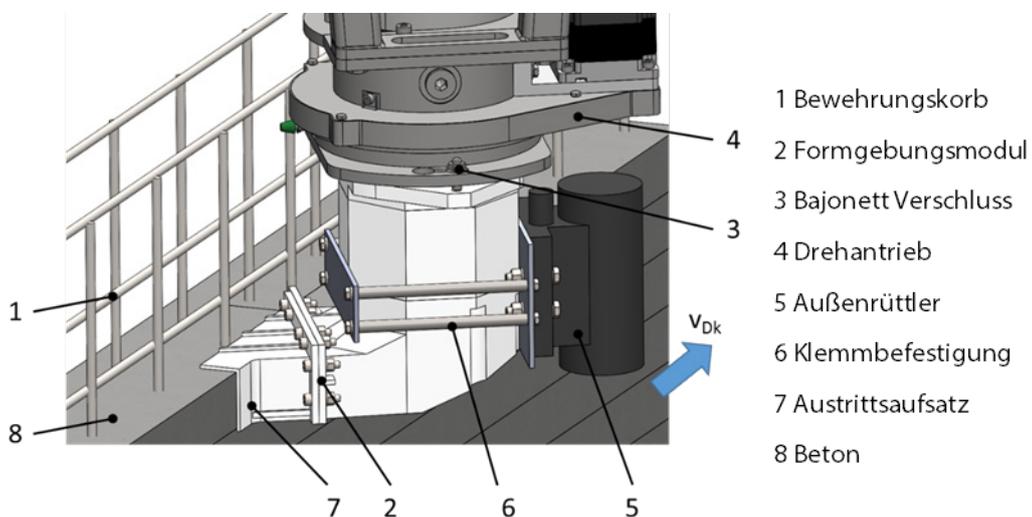
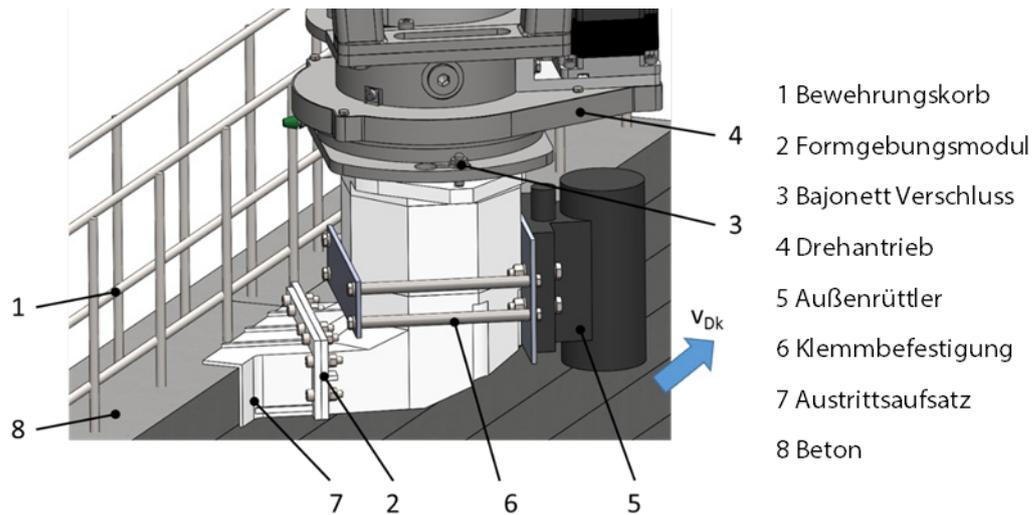


Abbildung 28: Variante 2 - Funktionsbeschreibung



Die

Abbildung 28 stellt einen konstruktiven Entwurf für einen Druckkopf zur Bewehrungsintegration entsprechend der Variante 2 dar. Die Druckbewegung erfolgt entlang der Pfeilrichtung v_{DK} . Der Bewehrungskorb (1) ist bereits gesetzt. Der Betonaustrag (8) erfolgt mit dem Formgebungsmodul (2). Dieses besitzt einen Anstellwinkel für die Austrittsöffnung (2) und kann mit Hilfe des Drehantriebes (4) des Extrusionsmoduls an der Bewehrung ausgerichtet werden. Der Außenrüttler (5) wird mit einer Klemmverbindung (6) am Formgebungsmodul befestigt. Mit der Hilfe des Rüttlers kann die Fließfähigkeit beeinflusst werden und die Umschließung der Bewehrung mit Beton unterstützt werden. Die Glättflügel und Verrundung der Austrittskante (7) formen eine glatte Strangoberfläche. Am Bajonett-Verschluß (7) wird das Formgebungsmodul mit dem Extrusionsmodul verbunden.

In Abbildung 29 ist zu erkennen, dass unabhängig von der Druckrichtung ein Strömungsschatten hinter den Bewehrungsstäben entsteht, wenn der Bewehrungskorb entsprechend Variante 2 umgedrückt wird. Zudem tritt in der Wandmitte immer eine Fuge auf, die bei zu langer Druckdauer einer Wandhälfte zu einer „kalten Fuge“ führt und die Endfestigkeit oder Dauerhaftigkeit der gesamten Wand beeinträchtigen kann.



a) horizontal; 90°

b) vertikal; 90°

Abbildung 29: Variante 2 - Fugenbildung in Wandmitte

Auf Grund der Erkenntnisse zur Beeinflussung der Fließfähigkeit aus Abbildung 24 soll dies auch an der Düse dazu führen, die Fließfähigkeit des Betons zu beeinflussen und den Umschluss des Bewehrungs Eisens zu verbessern. Hierfür ist entsprechend Abbildung 24 die Rüttlerwirkung an der Austrittsöffnung eines Formgebungsmoduls getestet worden.



Abbildung 30: Variante 2 - Vibration an der Düse

Die Betonstränge sind mit und ohne Nutzung des Außenrüttlers abgelegt. Dafür wurde zunächst ohne die Nutzung des Außenrüttlers für eine Druckgeschwindigkeit von 50 mm/s und der Soll-Schichtgeometrie 150x50 mm der Kopplungsfaktor c für den Betonaustrag bestimmt. Anschließend sind die Versuche mit einer konstanten Unwucht von $5,07 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}$ und verschiedenen Außenrüttlerfrequenzen f_a durchgeführt worden. Nach der Ablage wird die Schichtbreite b und -höhe h an verschiedenen Messstellen des Stranges gemessen.

Der Tabelle 3: Variante 2 - Beeinflussung der Stranggeometrie durch Rüttler kann entnommen werden, dass an der Düse ein analoges Verhalten zur Abbildung 24 zu beobachten ist. Ab einer gewissen Grenzerregung setzt eine sprunghafte Verbesserung des Fließverhaltens ein. In der Tabelle 3 erkennbar daran, dass die gemessene Austrittsgeometrie bei 40 bzw. 50 Hz Rüttelfrequenz wesentlich größer ist als die Soll-Geometrie.

Tabelle 3: Variante 2 - Beeinflussung der Stranggeometrie durch Rüttler

		Außenrüttlerfrequenz f_a [Hz]											
		0			30			40			50		
Kopplungsfaktor c [deg/mm]		4,3	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1
	Schichtbreite b [mm] Schichthöhe h [mm]	b_1	152	151	152	185	180	185	210	208	204	205	209
h_1		48	49	49	53	52	55	55	54	52	54	58	55
b_2		153	150	150	180	180	183	215	215	201	207	210	215
h_2		49	49	48	20	20	52	56	56	53	56	58	57
b_3		153	151	151	178	179	180	209	211	205	202	211	213
h_3		51	49	49	47	48	50	56	55	54	56	56	57

Die beschriebene und in Abbildung 24 gezeigte Nutzung eines Rüttlers lässt sich auch in ähnlicher Weise auf die Austrittsgeometrien der Variante 1 für den Druck der Überdeckung oder Variante 3, siehe Abbildung 40. Die Bewegungsrichtung der Düse ist in horizontaler Richtung mit einem Anstellwinkel von 60° . Im Vergleich



Abbildung 31 ist zu erkennen, dass der Umschluss um die horizontalen Bewehrungseisen verbessert wird. Hinter den vertikalen Eisen verbleibt im Vergleich eine kleinere Lücke.



Abbildung 31: Variante 2 - Düsenrichtung horizontal; 60°; Rüttler 50Hz



Abbildung 32: Variante 2 - Mehrfache Anstellwinkel der Austrittsöffnung

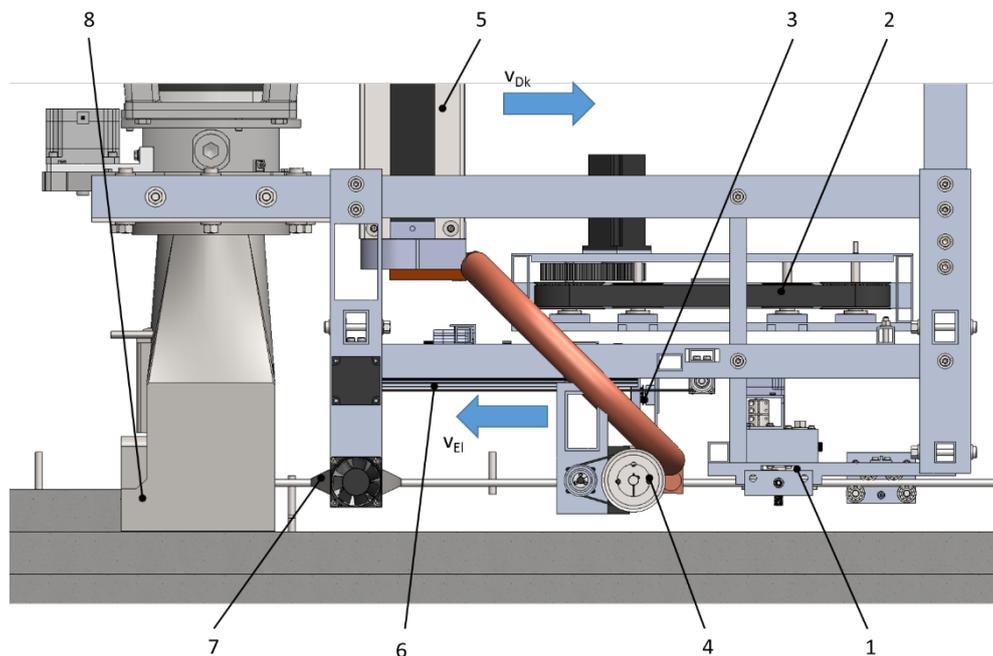
Die Abbildung 32 zeigt einen Düsenaufsatz mit 2 Anstellwinkel. Neben dem horizontalen Anstellwinkel von 60° hat die Austrittsöffnung auch einen Anstellwinkel in vertikaler Richtung von 45°. Dies ermöglicht einen Betonaustrag von schrägen und vorne auf den Bewehrungskorb.

Die Bewegungsrichtung der Düse ist, wie zuvor, horizontal und während des Druckvorganges wird durch den Außenrüttler eine Vibration an der Düse eingebracht. Das Druckergebnis zeigt Abbildung 32. Im Vergleich mit Abbildung 31 ist zu erkennen, dass die Lücke hinter den vertikalen Bewehrungseisen geschlossen werden kann, wodurch sich die Umschließung der Bewehrung mit Beton weiter verbessern lässt.

Variante 3 - Synchroner Bewehrungseinbau

Abbildung 33 veranschaulicht die Bewehrungsintegration der Variante 3 - synchroner Bewehrungseinbau. Der Druckkopf bewegt sich in der Druckrichtung v_{Dk} . Die horizontale Zuführung (1) fördert die horizontalen

Bewehrungseisen in die Schweißzange (4). Die vertikalen Bewehrungseisen befinden sich in einem Magazin (2). Die vertikale Zuführung (3) entnimmt diese und positioniert sie innerhalb der Schweißzone der Elektroden (4). In der Zange (4) werden die horizontalen und vertikalen Stäbe im Kreuzstoß zum Bewehrungsnetz verschweißt. Der Schweißtransformator (5) stellt den benötigten Strom zum Widerstandsschweißen zur Verfügung. Die Bewegungseinheit (6) sorgt für eine Ausgleichsbewegung v_{Ei} , damit im Moment des Fügens zwischen der geschlossenen Schweißzange und der bereits gedruckten Schicht keine Relativgeschwindigkeit auftritt. Das optionale Kühlsystem (7) reduziert die Temperatur des Schweißpunktes, damit dieser anschließend von der Austrittsdüse (8) mit Beton umschlossen werden kann.



1 Horizontale Zuführung; 2 Magazin; 3 Vertikale Zuführung; 4 Schweißzange;
5 Schweißtransformator; 6 Bewegungseinheit; 7 Kühlsystem; 8 Austrittsöffnung

Abbildung 33: Variante 3 - Funktionsbeschreibung [27]

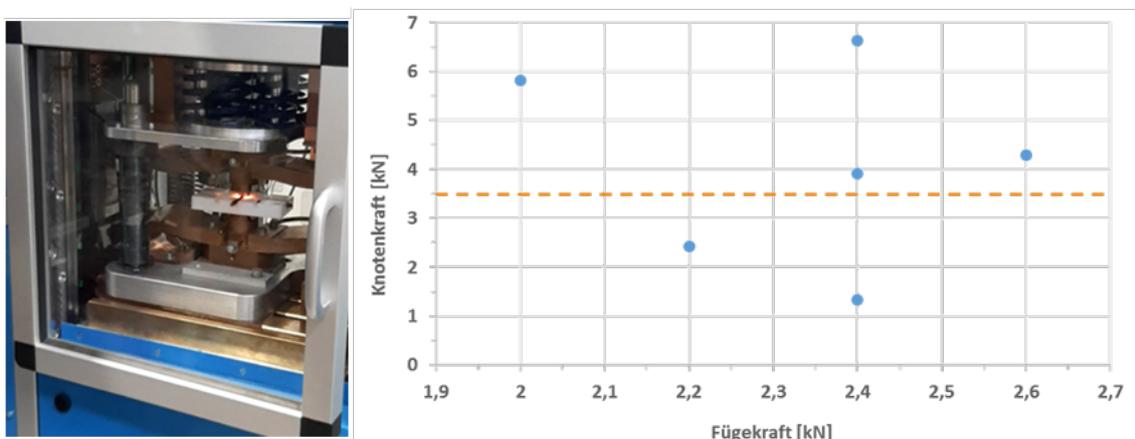
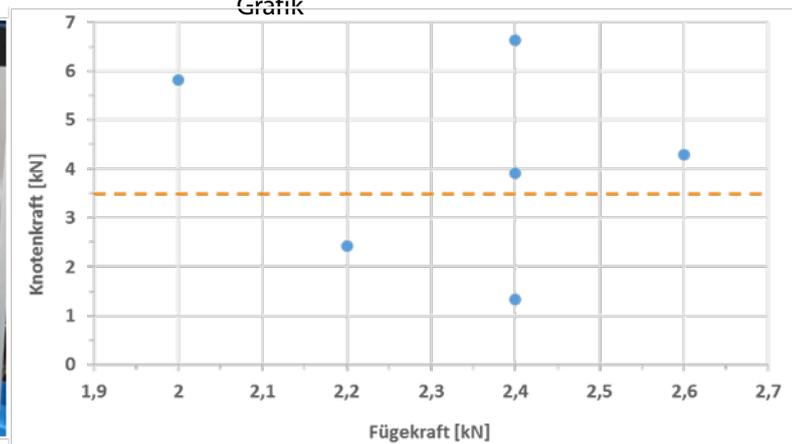


Abbildung 34: Variante 3 - Ertragbare Knotenkraft der Schweißpunkte bei minimaler Fügekraft, Stabdurchmesser 6 mm [27]

Die



Grafik



aus

Abbildung 34 zeigt die ertragbare Knotenkraft über der Fügekraft während des Schweißvorganges. Auf der Grundlage des Mindestbewehrungsgrades nach DIN EN 1992-1-1 wurde eine Machbarkeitsstudie zur Bestimmung der Taktzeit für das Positionieren und Verschweißen der Bewehrungselemente durchgeführt [10]. Dabei wurde ein druckbarer Schichtquerschnitt von $150 \times 50 \text{ mm}^2$ und eine Druckgeschwindigkeit von 5 m/min angenommen. Als Material dient ein doppelt gerippter Betonstahlstab B500B mit 6 mm Durchmesser [9]. Unter diesen Randbedingungen ergibt sich eine Taktzeit von $0,3 \text{ s}$. Mit einem gewählten Schweißstrom von 4 kA wurden Schweißproben hergestellt [31]. Die Erzeugung einer Fügekraft ist unter den Platzverhältnissen des Druckkopfes nur begrenzt möglich, weshalb diese ausgehend vom Startwert in Höhe von $2,6 \text{ kN}$ im Experiment schrittweise bis auf $2,0 \text{ kN}$ reduziert wurde [31]. Die gemäß DIN EN ISO 15630 durchgeführten Zugversuche zur Bestimmung der ertragbaren Kraft am geschweißten Knoten zeigten, dass die geforderte Mindestknotenkraft nach DIN 488-4 nicht von allen Proben erreicht wurde [9]; [14]. An Hand der eingetragenen Mindestknotenkraft (gestrichelte Linie) sollte die Fügekraft den Wert von $2,2 \text{ kN}$ nicht unterschreiten. Die beobachtete Streuung der Messergebnisse kann zum einen auf die Verunreinigung der Schweißstellen durch Oberflächenkorrosion zurückzuführen sein. Zum anderen wurde während des Schweißprozesses nicht auf die Ausrichtung geachtet, sodass zum Teil nicht Rippe an Rippe geschweißt wurde, wodurch sich unterschiedliche Fügeflächen ergeben. Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass die normativ geforderte Mindestknotenkraft mit den gewählten Schweißinstellungen grundsätzlich erreichbar ist, sodass ein Bewehrungsaufbau mittels Widerstands(Buckel-)schweißen unter Beton-3D-Druckbedingungen möglich erscheint.

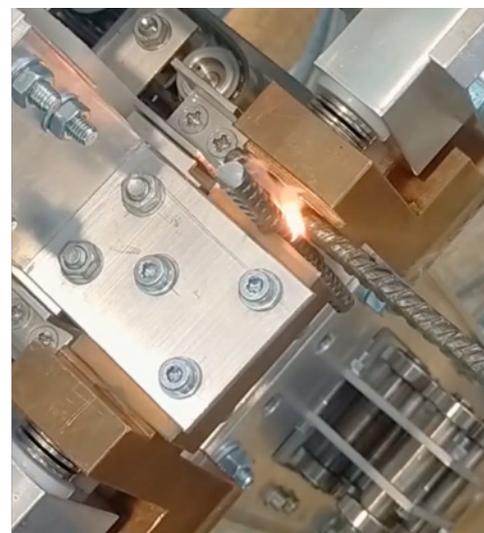


Abbildung 35: Variante 3 - Versuchsaufbau Schweißzange

Die Ergebnisse dieser Machbarkeitsuntersuchungen bilden die Grundlage der entwickelten Schweißzanges des Bewehrungsintegrationsmoduls aus

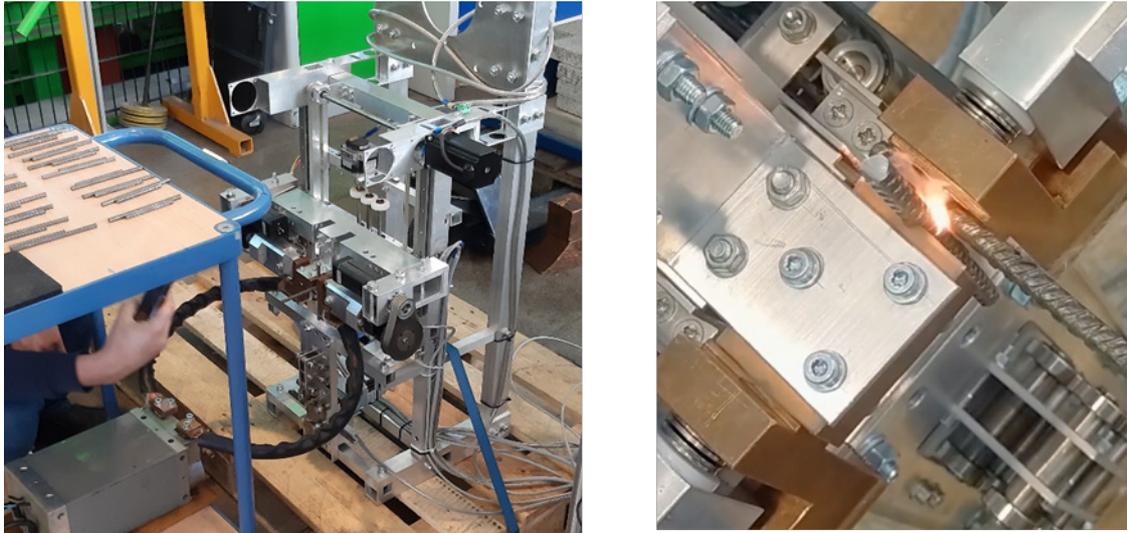


Abbildung 35. Der Versuchsaufbau ist zunächst stehend, da nur die Schweißzange auf ihre Tauglichkeit untersucht wird. Die Stäbe werden im Kreuzstoß entsprechend der Detailansicht aus Abbildung 33 in die Elektroden eingeführt. Die Elektroden werden geschlossen. Infolge des Zustellweges und der Federhärte des Tellerfederstapels ergibt sich die theoretisch maximale Fügekraft. Die Fügekraft nimmt während des Schweißvorgangs ab, wenn die beiden geschmolzenen Stabbereiche in einander gedrückt werden, da die aktuellen Elektroden nicht kraft geregelt sind. Die Schweißzeit beträgt 0,3 s. Der Schweißstrom wird durch den Schweißtransformator bereitgestellt und gemessen. Anschließend wird die geschweißte Probe in der Zugmaschine entsprechend DIN EN ISO 15630 bis zum Versagensfall (Bruch) gedehnt und die Knotenkraft gestimmt [14].

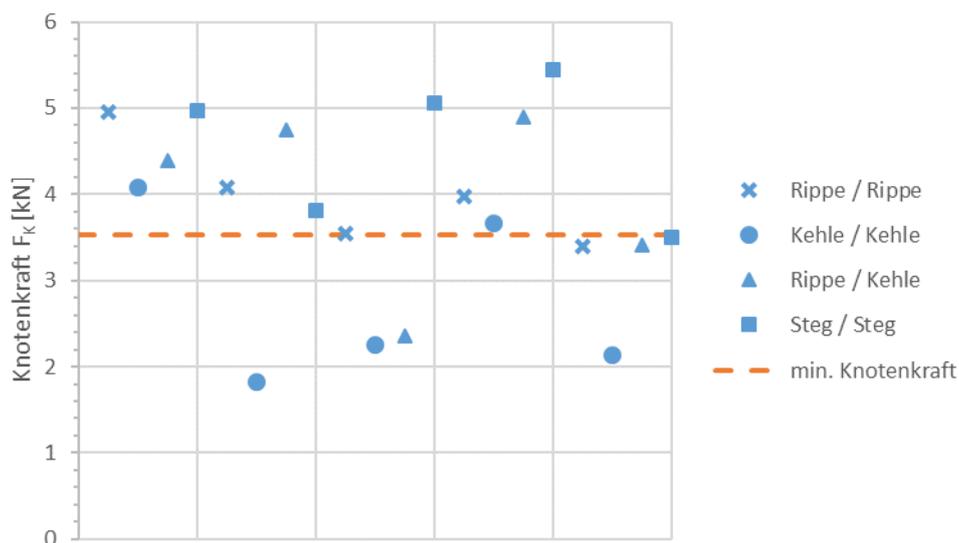


Abbildung 36: Variante 3 - Knotenkraften, Stabdurchmesser 6 mm

Die Abbildung 36 zeigt die erreichten Knotenkraften im Vergleich zur Mindestknotenkraft (orangefarbene Linie) nach DIN 488-4 für den Stabdurchmesser 6 mm. Während des Schweißvorgangs weisen die Stabkombinationen unterschiedliche Orientierungen auf. Die Orientierung ergibt sich aus der Geometrie laut DIN 488-1 für 3-fach gerippte Stäbe [8].

Die Anzahl der geschweißten Proben je Orientierung beträgt 5. Für die einzelnen Proben liegt der Schweißstrom zwischen 2,9 und 3,4 kA (Mittelwert: 3,1 kA, Standardabweichung: $\pm 0,12$ kA). Auf Grund der konstruktiven Einfachheit der Elektrode ist keine exakte Bestimmung der Fügekraft möglich.

Die Grafik zeigt, dass die Orientierung keinen Einfluss auf die Knotenfestigkeit hat, da für unterschiedliche Staborientierungen ein frühzeitiges Versagen eintritt. Die Ausfallwahrscheinlichkeit beträgt 35 %. Es fällt auf, dass häufiger Proben des Typs Kehle/Kehle ausfallen. Es ist möglich, dass durch die zu geringe Fügekraft mehrere parallele Kontaktpunkte innerhalb der Schweißzone entstehen. Dadurch teilt sich der Stromfluss auf, der punktuelle Wärmeeintrag ist geringer. Die resultierende Verbindung der Bewehrungseisen ist schlechter und an Hand einer geringeren Knotenkraft zu erkennen.

Für Abbildung 37 ist der beschriebene Versuchsaufbau analog mit Stabeisen Durchmesser 8 mm und geänderten Parametern durchgeführt worden.

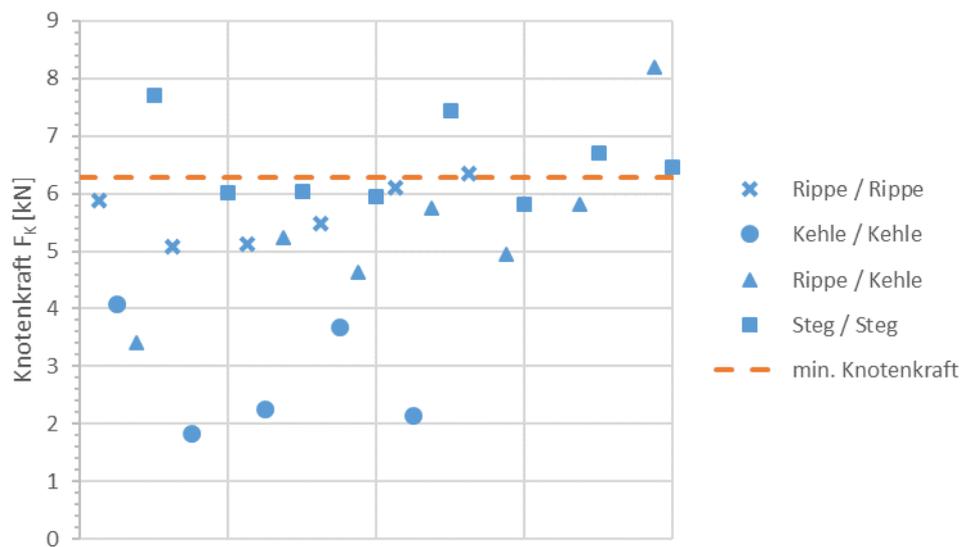
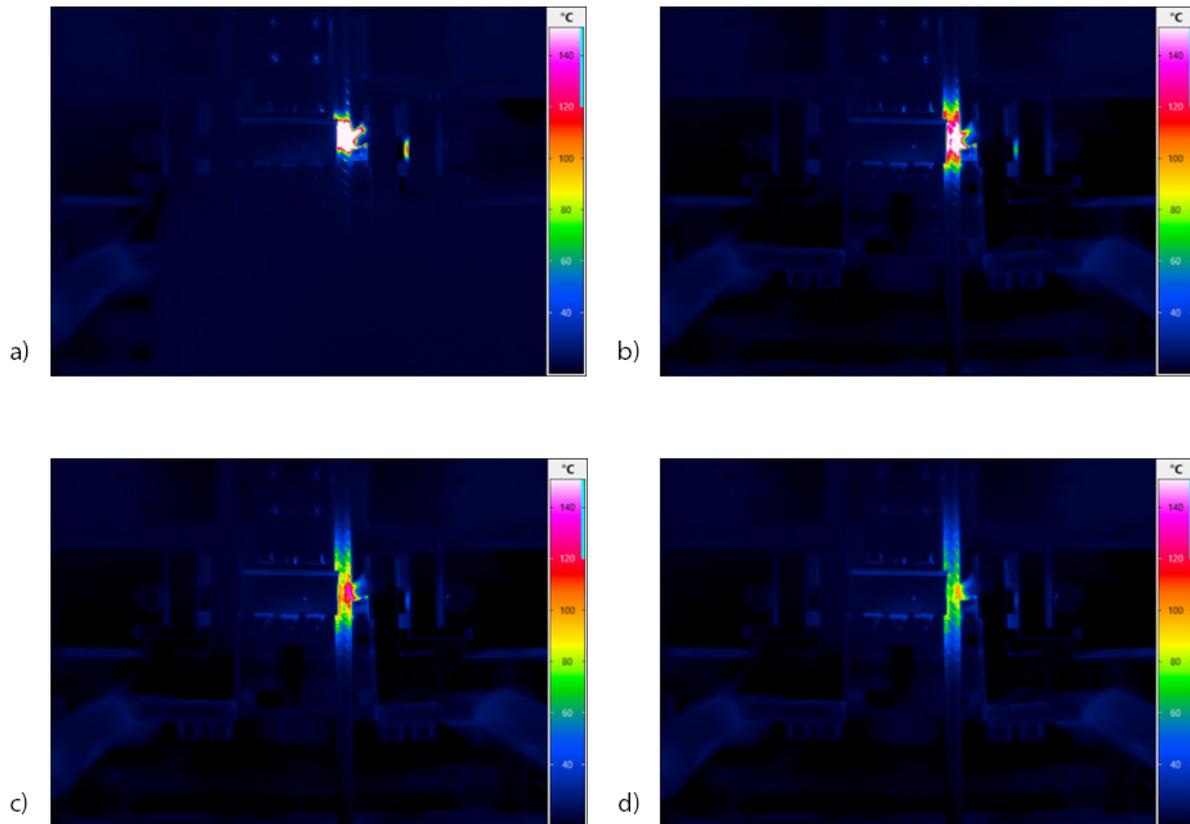


Abbildung 37: Variante 3 - Knotenkräfte, Stabdurchmesser 8 mm

Die Gesamtanzahl der Proben beträgt 27. Der Schweißstrom liegt im Bereich von 4,6 bis 5,6 kA (Mittelwert 5,3 kA, Standardabweichung: $\pm 0,3$ kA). Der Grafik ist zu entnehmen, dass wie bereits bei Abbildung 36 die Orientierung keinen Einfluss auf das Ergebnis hat. Die Ausfallwahrscheinlichkeit beträgt 66,67 %. Diese ist im Vergleich zu den Ergebnissen der Versuche mit 6 mm höher, da während der Versuche keine ausreichende Abkühlzeit der Proben berücksichtigt wurde. Infolge dessen, sind erwärmte Proben in der Zugmaschine auf den Versagensfall untersucht worden. Diese Erwärmung sorgte für eine Reduktion der Knotenfestigkeit und somit zu einem frühzeitigen Versagen der Proben. Grundlegend ist zu erkennen, dass ein Schweißvorgang unter Beton-3D-Druckbedingungen für Stabeisen mit dem Durchmesser 8 mm möglich ist.



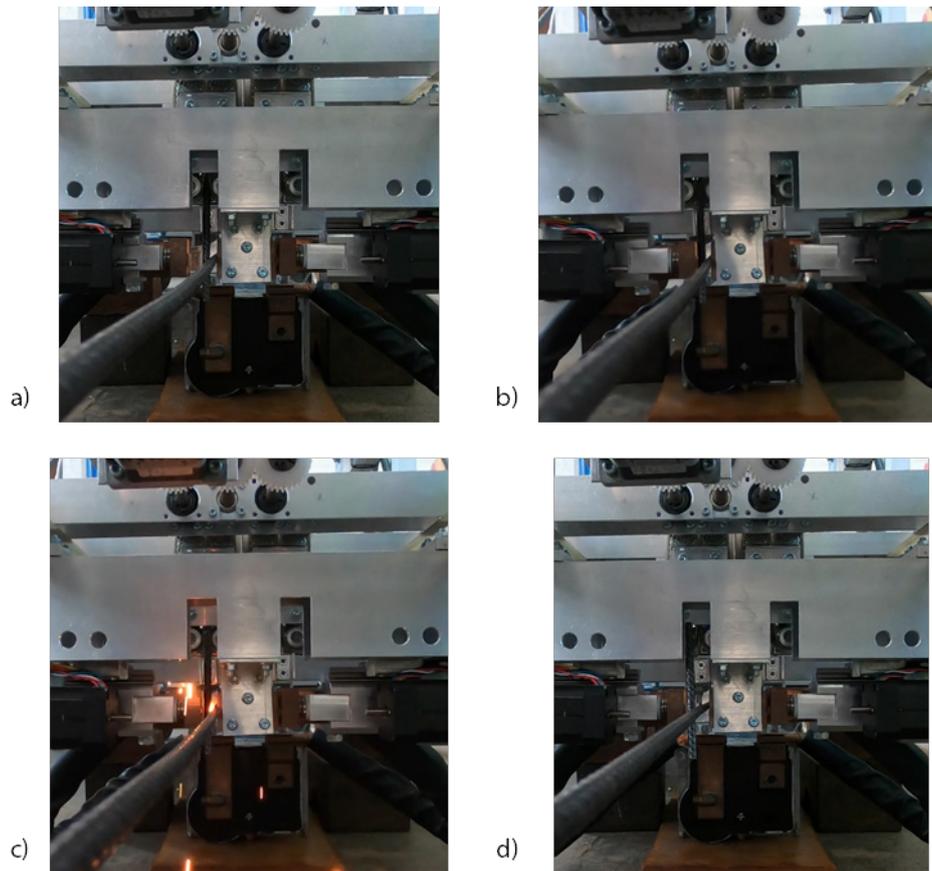
a) Zeitpunkt $t=1$ s; b) Zeitpunkt $t=5$ s; c) Zeitpunkt $t=10$ s; d) Zeitpunkt $t=15$ s

Abbildung 38: Variante 3 - Abkühlung der Schweißstelle; 8 mm

In Abbildung 38 ist der zeitliche Verlauf der Abkühlung einer Schweißung von 8 mm Stäben gezeigt. Die Temperatur wurde mittels Thermographie gemessen. Damit die empfindliche Optik nicht geschädigt wird, konnte der Schweißvorgang an sich nicht aufgezeichnet werden und die Aufnahme wurde bei 150 °C abgeschnitten. Die unterschiedlichen farblichen Verläufe entsprechen den gemessenen Oberflächentemperaturen laut Skala. Es ist zu erkennen, dass nur ein kleiner Bereich, etwa 50 mm, um die Schweißstelle herum eine starke Erwärmung erfährt und anschließend abkühlt, vergleiche Abbildung 15.

Mit einer Fahrgeschwindigkeit von 5 m/min beträgt die Zeit zwischen dem Setzen des Schweißpunktes und der Betonage 5,1 s, siehe Abbildung 33. Die Schmelztemperatur des Bewehrungsstahls ist ca. 1500 °C [37]. Innerhalb der Abkühlzeit muss der Stahl auf eine Temperatur kleiner 150 °C gebracht werden, damit nachträglich die Verbundfestigkeit nicht geschädigt wird, gemäß Abbildung 18. Für die Annahme eines linearen Abkühlungsverlaufes ohne Zusatzkühlung ergibt aus der Temperaturdifferenz eine theoretische Abkühlrate von 247 K/s. Zur Bewertung der Notwendigkeit und ggf. Auslegung der Kühleinheit sind weitere detaillierte Betrachtungen zum Temperaturverhalten, während und nach dem Schweißen, notwendig. Hierbei ist insbesondere der reale Energieeintrag von Bedeutung, da dieser festlegt, welcher Wärmestrom durch erzwungene Konvektion bereitgestellt werden muss.

Die Bildserie aus Abbildung 38 zeigt den automatisierten Prozessablauf des Schweißvorganges. Der Ablauf entspricht der Funktionsbeschreibung zur Abbildung 32. Der Blickwinkel ist von der Düse auf die Rückseite der Schweißzange.



a) Positionierte Bewehrungsseisen; b) Geschlossene Schweißzange;
c) Schweißvorgang mit Ausgleichbewegung d) Geöffnete Zange fährt zurück zum Startpunkt

Abbildung 39: Variante 3 - Automatisierter Prozessablauf Schweißvorgang

Wie bereits genannt, kann auch die Extrusion der Variante 3 mit Hilfe eines Rüttlers unterstützt werden. Ein entsprechender Versuchsaufbau ist in Abbildung 40 dargestellt. An der Rückseite der geschlitzten Düse ist ein Außenrüttler angebracht. Die Breite der 3 Austrittskanäle beträgt jeweils 35 mm. Die Gesamtbreite des Stranges ist 150 mm. Für Versuche wurde ein Beton mit dem Größtkorn 16 mm genutzt.



Abbildung 40: Variante 3 - Einsatz eines Rüttler bei verschiedenen Frequenzen

Die Druckergebnisse sind von links nach rechts mit einer schrittweisen Steigerung der Außenrüttlerfrequenz von 0; 20; 30; 40 und 50 Hz gedruckt worden. Die schmalen Kanäle erschweren die Extrusion, weshalb erst ab einem ausreichenden Vibrationseintrag von 30 HZ, das Material mit einer ausreichend guten Qualität des

Druckbildes abgelegt wird. Es ist ein gleichmäßiger Materialaustritt an den einzelnen Kanälen zu beobachten, wenn der Materialfluss einmal im Gang ist. Zudem ist zu erkennen, dass die optische Streifenbildung in Folge der geschlitzten Düse abnimmt.

Die Abbildung 41 zeigt die Betonage eines separat geschweißten Netzes. Dieses wurde mit der Anlage aus Abbildung 35 hergestellt. Die Stabdurchmesser betragen 8 mm. Dieses Vorgehen ist gewählt worden, da der Portalroboter nicht in der Lage ist Schweißanlage mit Transformator und Druckkopf mit Beton gemeinsam zu tragen.



Abbildung 41: Variante 3 - Druckprozess

Das aufgestellte Netz kann während der Betonage durch die Schlitze des Druckkopfes laufen. Diese Kanäle sorgen dafür, dass die Anschlussbewehrung nach der Betonage weiterhin frei von Beton ist, um weitere Schweißpunkte daran setzen zu können. Der Beton wird von oben in die zu drückende Schicht eingefüllt und die Einbringung mit Hilfe eines Rüttlers (40 Hz) unterstützt.

Das Druckergebnis zeigt, dass sowohl die horizontalen als auch vertikalen Bewehrungsseisen gut vom Beton umschlossen werden und es sich nur minimale Lücken bilden. Die Schichtoberfläche quillt am Schichtübergang etwas heraus, da die seitlichen Glättbleche nicht lang genug sind.

Ergebnisse des Instituts für baubetriebswesen (IBB)

Anforderungen

Die Bewehrungsintegration bei 3D-gedruckten Betonwänden stellt eine Weiterentwicklung des CONPrint-3D-Verfahrens dar. Damit das Verfahren zukünftig praxistauglich und wirtschaftlich sein kann, wurden zu Beginn Anforderungen an den Prozess sowie die zu druckenden Bauteile definiert. Anhand einschlägiger Normen und Regelwerke wurden die baukonstruktiven und bauverfahrenstechnischen Aspekte in die gemeinsame Anforderungsliste eingearbeitet. Die identifizierten Anforderungen beziehen sich auf die Mindestbetondeckung, die Arten der Bewehrung, die Mindestbewehrung in Bauteilen, die notwendigen Bewehrungsdurchmesser sowie die Verbindungsmöglichkeiten von Bewehrungsstahl. Somit konnte eine Grundlage für die weitere Entwicklung der drei im Projekt zu untersuchenden Bewehrungsintegrationsvarianten geschaffen werden.

Im nächsten Schritt wurden die baubetrieblichen Aspekte des Beton-3D-Drucks untersucht. Das Verfahren kann sich nur dann in der Praxis durchsetzen, wenn es aus wirtschaftlicher Sicht eine sinnvolle Alternative zu herkömmlichen Herstellverfahren darstellt. Aus diesem Grund wurden zuerst Aufwandswerte der konventionellen Ortbetonherstellung ermittelt. Ziel war es zu definieren, welche Fertigungszeiten mit dem Beton-3D-Druck erreicht werden müssen, um konkurrenzfähig zu sein. Um eine möglichst allgemeingültige Aussage treffen zu können, wurden dazu anhand von Datenbanken, der einschlägigen Literatur sowie Praxiserfahrungen Werte zu typischen Fertigungszeiten in Zeitstunden je m³ Wandbeton generiert, die in Abbildung 42 dargestellt sind.

Wandbreite [cm]		Fertigungszeit [h/m ³]		
Vorgang	Vorgangsdauer	20	24	30
Schalen	0,15 h/m ²	1,50	1,25	1,00
Bewehren	2,60 h/t	0,16	0,16	0,16
Betonieren	0,14 h/m ³	0,14	0,14	0,14
Fertigungszeit gesamt [h/m³]		1,80	1,55	1,30

Abbildung 42: Fertigungszeit Ortbetonherstellung (Schalen, Bewehren, Betonieren) in Abhängigkeit der Wandbreite

Die Ausarbeitung erfolgte dabei für mehrere Wandbreiten (20 cm, 24 cm, 30 cm). Es lässt sich ableiten, dass die Fertigungszeiten bei konventionellen Herstellungsverfahren für größere Wandbreiten pro m³ Wandvolumen geringer sind. Dies ist ein Aspekt, der bei der Entwicklung der Drucktechnologie berücksichtigt wurde, da die Druckgeschwindigkeit (Geschwindigkeit der Linearinterpolation in der XY-Ebene) unabhängig der Wandbreite ist. Die Druckleistung (Austragsmenge in m³ pro Zeiteinheit) ist jedoch in Abhängigkeit der Wandbreite einzustellen. Es wurde in vorlaufenden Forschungsprojekten eine durchschnittliche sinnvolle Druckgeschwindigkeit des CONPrint3D®-Verfahrens (ohne Bewehrungsintegration) von 80 mm/s ermittelt. Die Düsenabmessungen betragen dabei 150 mm x 50 mm. Dies entspricht einer theoretischen Druckleistung von 2,16 m³/h (= 0,46 h/m³).

Aufgrund der Komplexität der in dem Projekt gegenständlichen drei Bewehrungsintegrationsvarianten sind eine Vielzahl zusätzlicher Arbeitsschritte umzusetzen. In Abstimmung mit dem Projektbegleitenden Ausschuss wurde deshalb die Druckleistung im ersten Schritt auf etwa ein Viertel reduziert. Als Zielgröße für den praktischen Anwendungsfall mit Zustellbewegungen und Nebenzeiten wurde eine Fertigungsgesamtzeit von 2 h/m³ für eine Wandbreite von 24 cm definiert. Dieser Wert entspricht circa 25 % der Druckleistung ohne Bewehrungsintegration (25 % von 2,16 m³/h entspricht ca. 1,85 h/m³). Durch die zukünftig angedachte Nutzung als automatisiertes Verfahren im 24/7-Betrieb wird trotz der reduzierten Druckleistung (2 h/m³) eine

höhere Tagesleistung (in 24 h) gegenüber der konventionellen Fertigung erwartet. Um dies zu überprüfen, wurde nachfolgend untersucht, welche Tagesleistungen beim Beton-3D-Druck (B3D) möglich wären. Im Ergebnis konnte ausgearbeitet werden, dass selbst mit der konservativen Druckleistung von 2 h/m^3 schon ab einer Druckdauer von 12 h/d eine höhere Tagesleistung im Vergleich zur konventionellen Herstellung erbracht werden kann. Weiterhin wurden die Auswirkungen aus einer zu erwartenden Optimierung der Aufwandswerte mit kürzeren Herstellungszeiten untersucht (siehe Abbildung 43).

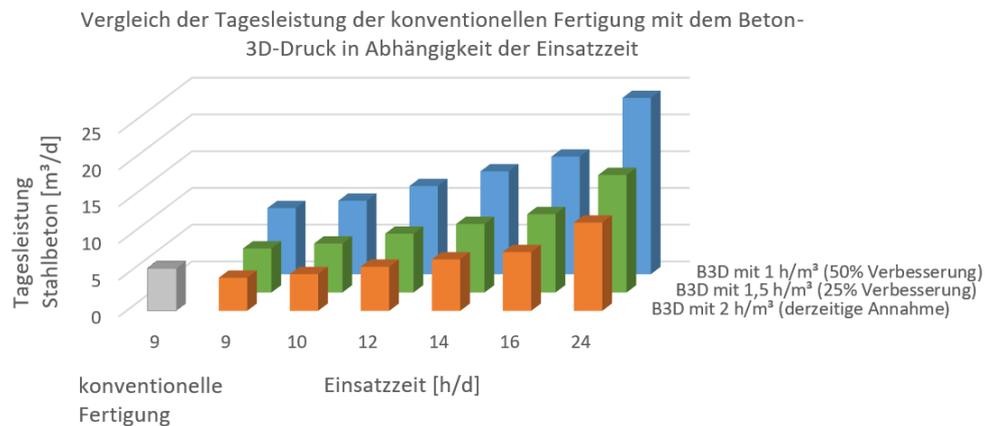


Abbildung 43: Tagesleistung Betondruck bei unterschiedlichen Druckereinsatzzeiten (9 bis 24 h/d)

Ein weiterer wichtiger Punkt bei der baubetrieblichen Betrachtung ist die Anzahl der zu erwartenden Lohnstunden je Kubikmeter gedruckten Betons. Diese haben einen direkten Einfluss auf die Herstellkosten und damit die Wirtschaftlichkeit eines Verfahrens. Aus diesem Grund erfolgte auf Basis der ausgearbeiteten Aufwandswerte eine Gegenüberstellung der Lohnstunden unterschiedlicher Herstellungsverfahren. Ausgangspunkt bei der Ermittlung der Anzahl an Lohnstunden beim Beton-3D-Druck ist die Herstellung mit zwei Arbeitskräften. Aufgrund der Automatisierung des Verfahrens ist gegebenenfalls auch weniger Personal notwendig. Die erzielten Ergebnisse sind in Abbildung 44 dargestellt. Grundlage für die Betrachtung war die Herstellung einer Etage eines Referenzgebäudes mit ca. 600 m^2 Wandfläche und einer Wandstärke von 24 cm. Im Ergebnis der Untersuchungen kann festgestellt werden, dass die Fertigungszeiten der drei Verfahren sich nur geringfügig unterscheiden, der Beton-3D-Druck (Vollwanddruck) jedoch eine deutlich geringere Anzahl an Lohnstunden je hergestellter Wandfläche und damit deutlich geringere Herstellkosten im Vergleich zu konventionellen Wandbauverfahren erfordert.

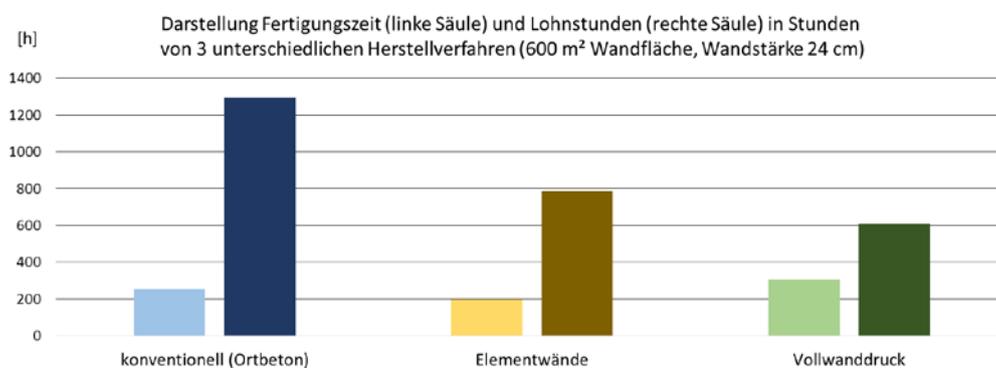


Abbildung 44: Darstellung Fertigungszeit und Lohnstunden anhand eines Beispielobjekts

Prozessfluss und Nutzwertanalyse

Im Rahmen eines weiteren Arbeitspaketes erfolgte die Ausarbeitung eines Prozessflussablaufes für den Beton-3D-Druck mit Bewehrungsintegration. Dabei sollte der gesamte Prozess, beginnend von der Planung des Objektes bis zur abschließenden Dokumentation, abgebildet werden. Dies ist notwendig, um insbesondere

den erforderlichen Daten- und Informationsfluss definieren zu können. Daraus können beispielsweise Schnittstellen zwischen dem 3D-BIM-Modell (Ausführungsplanung) und den folgenden Datenverarbeitungsprozessen (Slicing) für die Ansteuerung des Druckers festgelegt werden. Dazu wurde ein allgemeingültiger Prozessfluss erarbeitet (siehe Abbildung 45).

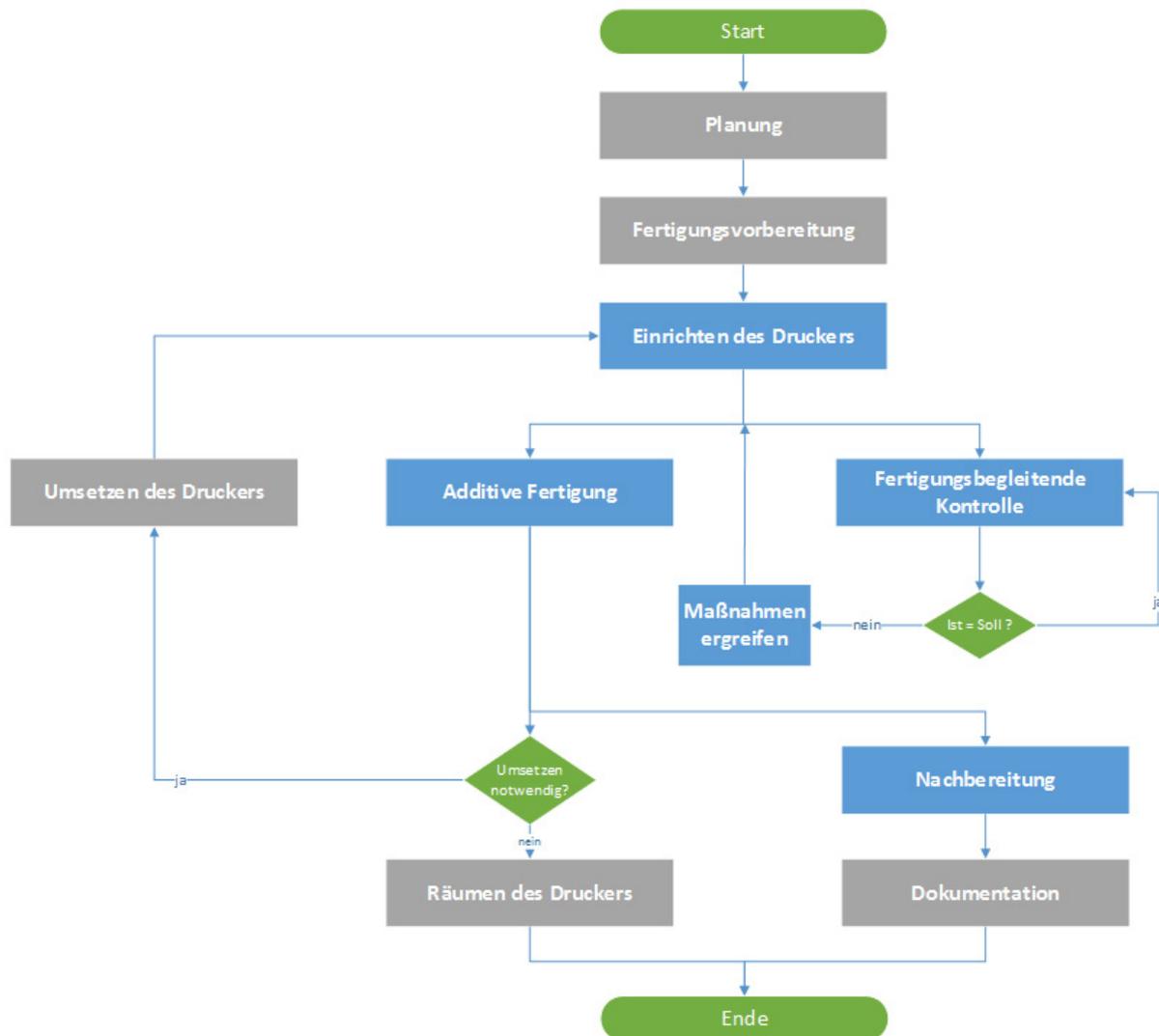


Abbildung 45: Prozessflussdiagramm - Beton-3D-Druck

Dieser dient dazu, die einzelnen Prozessschritte für den Beton-3D-Druck darzustellen und insbesondere notwendige Änderungen zu bestehenden Bauabläufen ableiten zu können. Weiterhin wird es für eine Überführung des Verfahrens in die Praxis zwingend erforderlich sein, standardisierte Abläufe und Schnittstellen zu definieren. Aufbauend auf der Entwicklung des allgemeingültigen Prozessflusses wurden in einem nächsten Schritt zuerst die Prozessschritte näher definiert, welche unabhängig von der gewählten oder notwendigen Bewehrungsintegration sind. Hierzu zählen die Einrichtung des Druckers, die fertigungsbegleitende Kontrolle sowie die Nachbereitung des Druckprozesses. Die Zielstellung der Entwicklung sah vor, alle notwendigen Randbedingungen in die einzelnen Prozessschritte aufzunehmen. Somit sollte gewährleistet werden, dass alle notwendigen Informationen und Abläufe identifiziert werden, die für die spätere Baustellenanwendung notwendig sind. Anhand dieser können spätere Nutzer des Beton-3D-Drucks frühzeitig ableiten, welche Leistungen im Vergleich zur konventionellen Herstellung geändert werden müssen. Am Beispiel des Prozessschrittes „Einrichten Drucker“ konnten die zusätzlichen Schritte „Gründung

Drucker“, „Anfahrt und Aufbau Drucker“ sowie die notwendige „Kalibrierung“ abgeleitet werden (vgl. Abbildung 46).

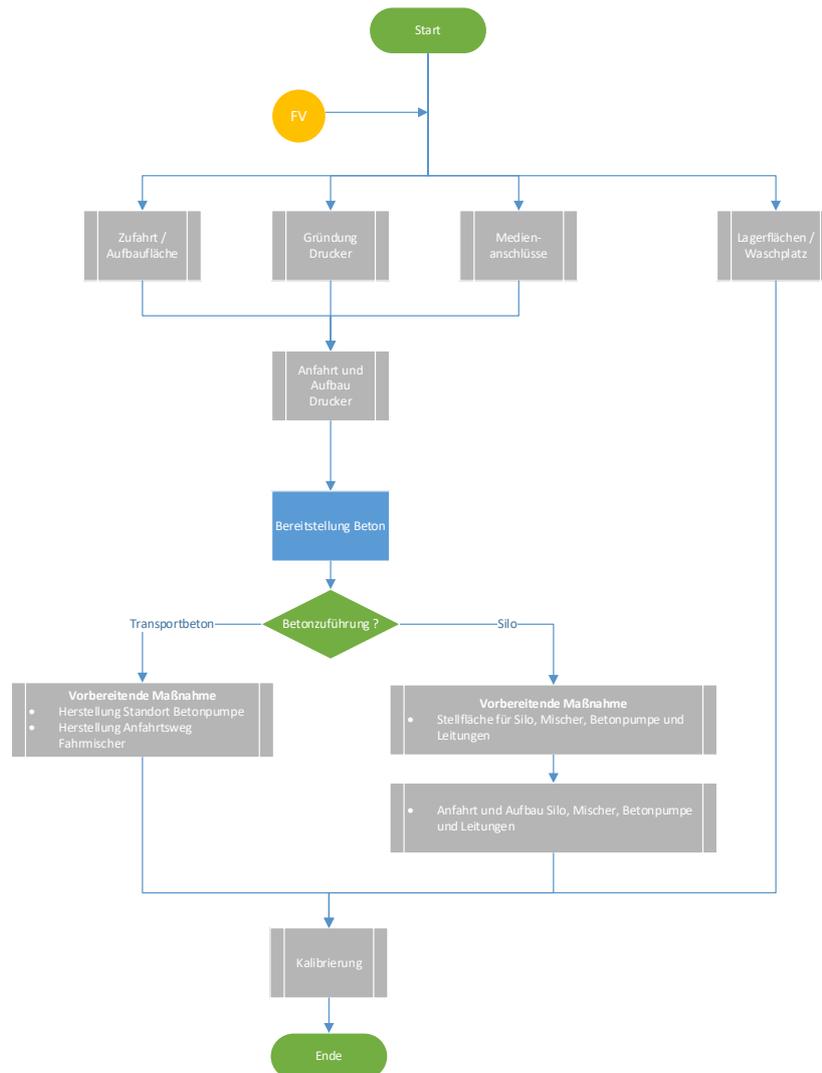


Abbildung 46: Prozessflussdiagramm - Einrichten des Druckers

Aufbauend auf der Beschreibung der grundlegenden Prozessschritte wurden für die Ausführung der drei im Forschungsprojekt gegenständlichen Varianten entsprechende Abläufe entwickelt. Die einzelnen Teilprozesse der Variante 2 sind in Abbildung 47 dargestellt.

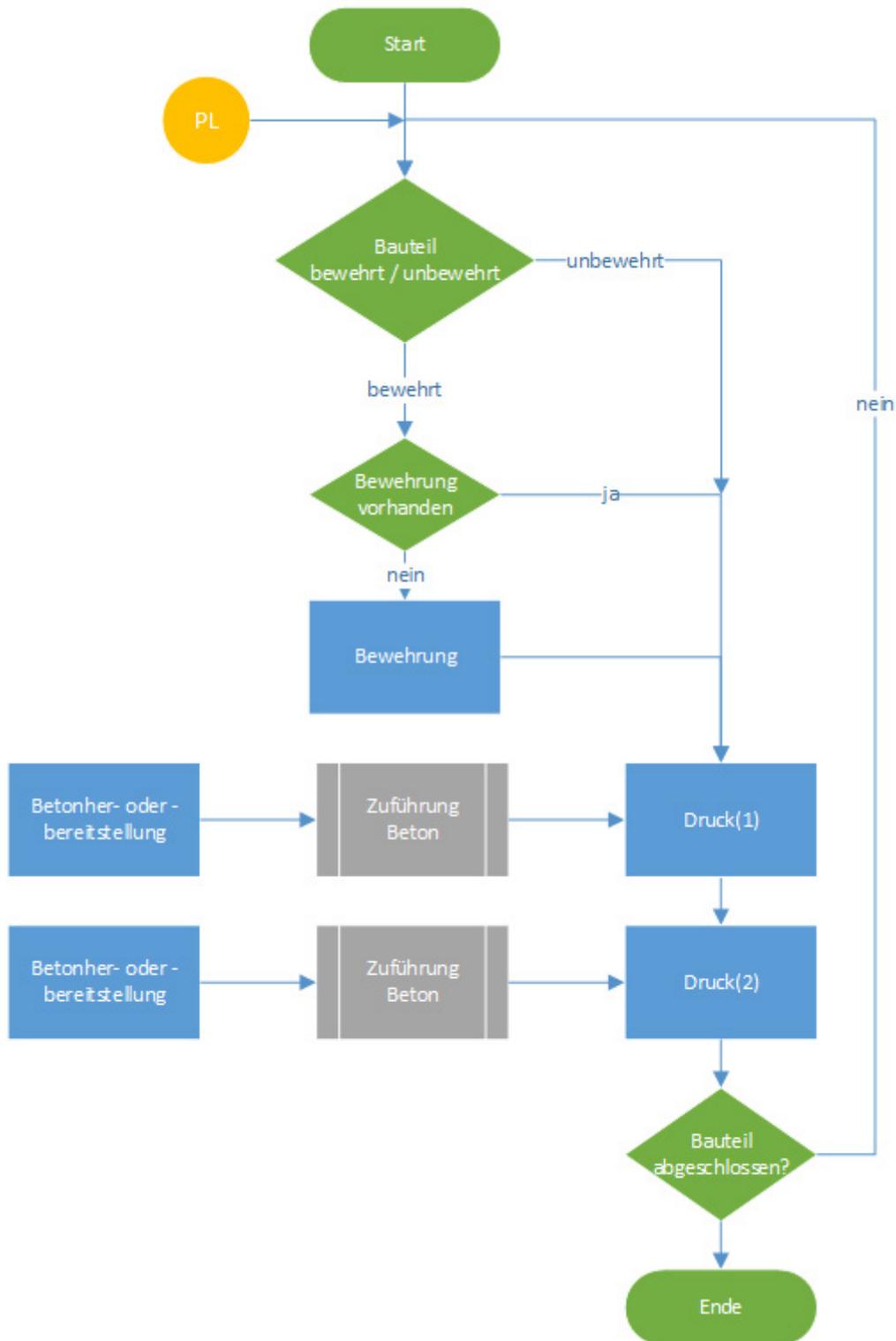


Abbildung 47: Variante 2 - Prozessflussdiagramm

Dabei stand die modulare Einfügbarkeit in den übergeordneten Fertigungsprozess im Vordergrund. Somit kann je nach gewählter oder notwendiger Bewehrungsintegrationsvariante der jeweilige Prozessablauf genutzt werden. Dies gewährleistet, dass die vor- und nachgelagerten Prozessschritte identisch ablaufen und alle dafür notwendigen Informationen zur Verfügung stehen. Besonders mit Hinblick auf eine spätere Überführung in Normen und Regelwerke stellt dies eine wichtige Grundlage dar.

Im Rahmen eines weiteren Arbeitspaketes führt das IBB eine Nutzwertanalyse auf Basis der vorgenannten Prozessflussdiagramme für die einzelnen Integrationsvarianten durch. Hierzu wurden einleitend Hauptkriterien und deren Wichtigkeit für den späteren Einsatz definiert. Darauf folgend wurden diese in Unterkriterien untergliedert, um eine detaillierte Bewertung zu ermöglichen und alle notwendigen Parameter bei der Herstellung zu berücksichtigen. Anhand der Bewertungskriterien wurden für jede Integrationsvariante Attribute hinterlegt, die im Nachgang mit einem durchgängigen Punktesystem bewertet wurden. Ziel der Nutzwertanalyse ist es, eine praxisnahe Hilfestellung für die Bestimmung der Vorteilhaftigkeit der einzelnen Varianten zu geben. Im Ergebnis kann die beste Variante für einen konkreten Anwendungsfall gefunden werden. Der Aufbau der Nutzwertanalyse zielt auf eine möglichst objektive Bewertung der Integrationsverfahren ab. Der grundlegende Struktur der Nutzwertanalyse ist in Abbildung 48 beispielhaft am Hauptkriterium „Druckpfad“ dargestellt.

Zeile	Hauptkriterien	Unterkriterien	[Variante 1]	[Variante 2]	[Variante 3]	Wichtigkeit	Wichtungsfaktor				301	351	362
							Bewertung	anhand	Unterkriterien				
6	Druckpfad	mögliche Cold Joints	3	2	1	hoch	4	1	2	3	4	8	12
7		Anzahl Befahrung	3	2	1		4	1	2	3	4	8	12
8		Layerzeiten	gering	mittel	hoch		4	3	2	1	12	8	4
9		Fluglinien	hoch	mittel	gering		4	1	2	3	4	8	12
10		Druckgeschwindigkeit	hoch	mittel	gering		4	3	2	1	12	8	4
11		Ausbringmenge	wechseln	einheitlich	einheitlich		4	1	3	3	4	12	12
12		Ausrichtung Druckkopf	wechseln	einheitlich	einheitlich		4	1	3	3	4	12	12
13		Druckrichtung	wechseln	einheitlich	einheitlich		4	1	3	3	4	12	12

Abbildung 48: Nutzwertanalyse (Auszug).

Zum Zeitpunkt der Erstellung der Nutzwertanalyse wurde ermittelt, dass die Bewehrungsintegrations-Variante 1 den geringsten Nutzwert im Vergleich zu den anderen Varianten bietet. Der größte Nutzwert kann mit Variante 3 erzielt werden. Diese Variante wies aber noch den größten Forschungsbedarf auf und konnte im damaligen Entwicklungsstand nicht realisiert werden. Die im Punkteranking der Nutzwertanalyse nur knapp hinter Variante 3 liegende Variante 2 ist hingegen mit dem damaligen Entwicklungsstand umsetzbar gewesen. Im Zuge der weiteren Projektbearbeitung konnte das Ergebnis dieser Analyse bestätigt werden.

Versuchsdurchführung

Neben der Definition der zu erreichenden baubetrieblichen Grenzwerte (bspw. Fertigungszeiten) sowie der Beschreibung des Prozessflusses war ein wichtiger Kernpunkt des Forschungsprojektes, die erzielten Erkenntnisse anhand von Demonstratoren zu validieren. Anhand dieser sollte überprüft werden, ob die Prozessabläufe und angesetzten Ausführungszeiten in der Praxis erreicht werden können. Ein weiterer Schwerpunkt in der Versuchsdurchführung war die Identifikation von möglichen Optimierungspotenzialen sowie die Bewertung für die spätere baupraktische Anwendung.

Im Fokus der im gegenständlichen Arbeitspaket durchgeführten Experimente standen die Varianten 1 und 2. Die Versuche zur Variante 3 bezogen sich dahingehend auf die technische Umsetzbarkeit einzelner Teilprozesse (automatisiertes Verbinden von Bewehrungsstäben und Bedrucken von Bewehrungsstäben).

Variante 1 - Aufgesetzte Bewehrungsmatte

Für die experimentelle Untersuchung zur Variante 1 sollte ein Demonstrator mit folgenden Parametern hergestellt werden:

Tabelle 4: Variante 1 - Bauteilgeometrie Druckversuch

Bauteillänge	80 cm
Schichtbreite Kernwand	10 cm
Schichthöhe	5 cm

Die Schichtbreite der Kernwand wurde dabei bewusst mit 10 cm angesetzt. Hintergrund dieser Festlegung ist, dass die Breite der Kernwand mit Änderung des Druckkopfes skalierbar ist, eine breitere Kernwand für die gegenständliche Untersuchung keinen Mehrwert bietet und somit Material eingespart werden konnte. Die Parameter für die Bewehrung sind in Tabelle 5 aufgeführt. Diese entsprechen baupraktischen Ansätzen und wurden im Vorfeld mit dem Projektbegleitenden Ausschussabgestimmt.

Tabelle 5: Variante 1 - Bewehrung Druckversuch

Durchmesser Bewehrungsstäbe	10 mm
Länge Querstäbe	16 cm
Abstand Querstäbe	24 cm
Stababstand Bewehrungsmatte	15 cm

Der prinzipielle Durchführung des Experiments ist in Abbildung 50 und Abbildung 52 dargestellt. Zu Beginn wird die Kernwand schichtenweise hergestellt. Im Zuge dessen werden die Querstäbe im vorher festgelegten Abstand eingelegt und im Nachgang überdruckt. Anschließend erfolgt das Anhängen der Bewehrungsmatte sowie das seitliche Bedrücken.

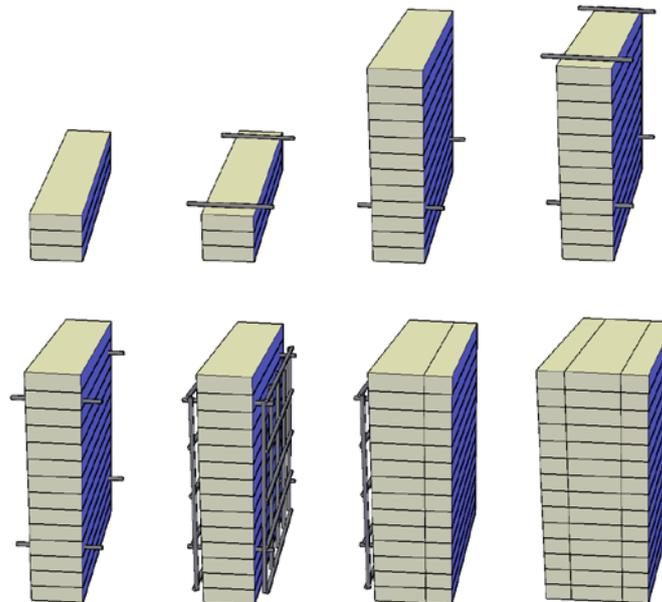


Abbildung 49: Variante 1 - prinzipieller Versuchsaufbau

Um im Zuge der Versuchsdurchführung möglichst viele verschiedene Eingangsparameter überprüfen zu können, wurde der Prüfkörper in zwei Bereiche unterteilt. Somit sollte untersucht werden, inwiefern die Anzahl der Auflagerpunkte Einfluss auf die Lagesicherheit der nachträglich angehängten Bewehrungsmatte hat (siehe Abbildung 50 mittlere Darstellung). Darüber hinaus wurde die Bewehrungsmatte auf einer Seite mit Draht an

die Querstäbe verbunden und auf der anderen Seite nur aufgelegt. Dadurch konnten in Summe vier Prüfbereiche in einem Druckversuch erzeugt werden. Ziel der Varianz der Aufhängung war es, Rückschlüsse für die spätere Anwendbarkeit der Variante 1 zu erzielen. Neben den benannten Untersuchungsparametern wurden noch folgende Variablen bei der Herstellung des Prüfkörpers umgesetzt:

- Druck mit Rütteltechnik und ohne
- Zeitabstand zwischen den zu druckenden Schichten
- Anstellwinkel des Druckkopfes beim seitlichen Bedrucken
- Anliegen der horizontalen oder vertikalen Stäbe der Bewehrungsmatten

Die Druckgeschwindigkeiten wurde für die Kernwand auf 80 mm/s und für das seitliche Bedrucken auf 50 mm/s festgelegt. Die niedrigere Druckgeschwindigkeit für die Seiten resultierte daraus, dass vorherige Versuche gezeigt hatten, dass somit ein besserer Umschluss der Bewehrung erzielt werden kann. Die folgenden Bilder zeigen die Versuchsdurchführung (siehe Abbildung 52).



Abbildung 50: Variante 1 - Versuchsdurchführung



Abbildung 51: Variante 1 - fertiggestellter Probekörper

Im Ergebnis des Experiments konnte der auf Abbildung 51 abgebildete Demonstrator gedruckt werden. Anhand der Versuchsdurchführung konnte nachgewiesen werden, dass im experimentellen Maßstab die notwendigen Druckzeiten erreicht werden können. Weiterhin ergab die Auswertung des Experiments folgende bauverfahrenstechnische Erkenntnisse, die besonders für die spätere Anwendung der Variante 1 entscheidend sind:

- Beim seitlichen Bedrücken mit Rütteltechnik kann ein besserer Verbund zwischen Beton und Bewehrung erzeugt werden.
- Die Bewehrungsmatte verbleibt auch beim reinen Auflegen an der vorgesehenen Lage.
- Es besteht keine Notwendigkeit die Bewehrungsmatte auf jeden horizontalen Stab aufzulegen.
- Für den vollflächigen Umschluss der Bewehrungsmatte ist das Anliegen der vertikalen Stäbe der Bewehrungsmatte besser.
- Eine Erhöhung der Druckgeschwindigkeit für die Kernwand und die seitlichen Schalen ist möglich.

Neben der Identifikation von Optimierungspotenzialen war die Ableitung von Handlungsempfehlungen für die einzelnen Bewehrungsintegrationsvarianten ein Kernpunkt der Bearbeitung. Insbesondere die Einordnung in die baupraktische Anwendung sollte hierbei im Vordergrund stehen. Die Variante 1 eignet sich aufgrund des prinzipiellen Aufbaus insbesondere zur Rissbreitenbegrenzung bei druckbeanspruchten Wänden. Somit kann die Lebensdauer von derartigen Betonbauteilen erhöht werden. Ein weiteres Handlungsfeld kann in der Sanierung von vertikalen Stahlbetonbauteilen gesehen werden, welche durch Betonabplatzungen und die Freilegung der Bewehrung Schäden aufweisen. Auf Grundlage dieser Annahme wurde der Probekörper in einem weiterführenden Experiment fertiggestellt. Hierbei stand besonders im Fokus, wie sich der Verbund zwischen gedruckten und ausgehärteten Beton darstellt. Die erzielten Ergebnisse des Versuchs sind in Abbildung 52 dargestellt.

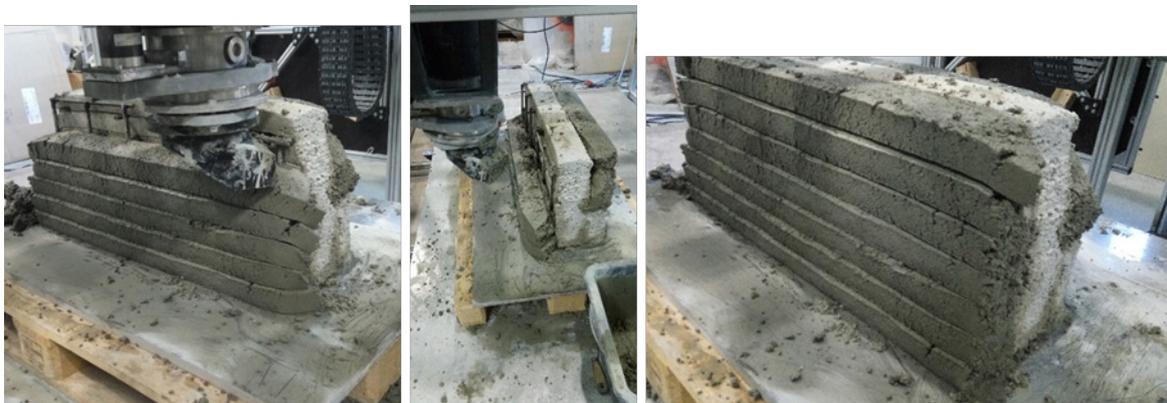


Abbildung 52: Variante 1 - Fertigstellung Demonstrator

Grundlegend konnte nachgewiesen werden, dass ein nachträgliches Bedrücken von bestehenden Betonbauteilen möglich ist. Inwiefern sich ein kraftschlüssiger Verbund einstellt, soll im Nachgang durch Untersuchungen am Demonstrator überprüft werden. Welche Rückschlüsse auf die Herstellung sowie mögliche Anpassungen an Beton und Verfahren sich danach ergeben, kann zum aktuellen Zeitpunktes noch nicht abschließend geklärt werden.

Variante 2 - Umdruckter Bewehrungskorb

Die Zielstellung für den Druckversuch der Variante 2 war es, einen Demonstrator mit folgenden Parametern herzustellen:

Tabelle 6: Variante 2 - Bauteilgeometrie Druckversuch

Bauteillänge	100 cm
Wandbreite	20 cm
Schichthöhe	5 cm

Die Kenngrößen für den zu bedruckenden Bewehrungskorb sind in Tabelle 7 aufgeführt.

Tabelle 7: Variante 2 - Bewehrung Druckversuch

Durchmesser Bewehrungsstäbe	10 mm
Höhe Bewehrungskorb	40 cm
Tiefe Bewehrungskorb	10 cm
Stababstand Bewehrungsmatte	15 cm

Die Wandbreite von 20 cm ergibt sich dabei aus der Tiefe des Bewehrungskorbes, dem doppelten Durchmesser der Bewehrung sowie der angesetzten Betondeckung von jeweils 4 cm. Der Ansatz für die Variante 2 sieht vor, einen im Vorfeld aufgestellten Bewehrungskorb von beiden Seiten im Wechsel zu bedrücken. Die prinzipielle Durchführung ist in Abbildung 53 dargestellt und zeigt, wie der schrittweise Aufbau eines Stahlbetonbauteils bis zur endgültigen Bauteilhöhe angedacht ist.

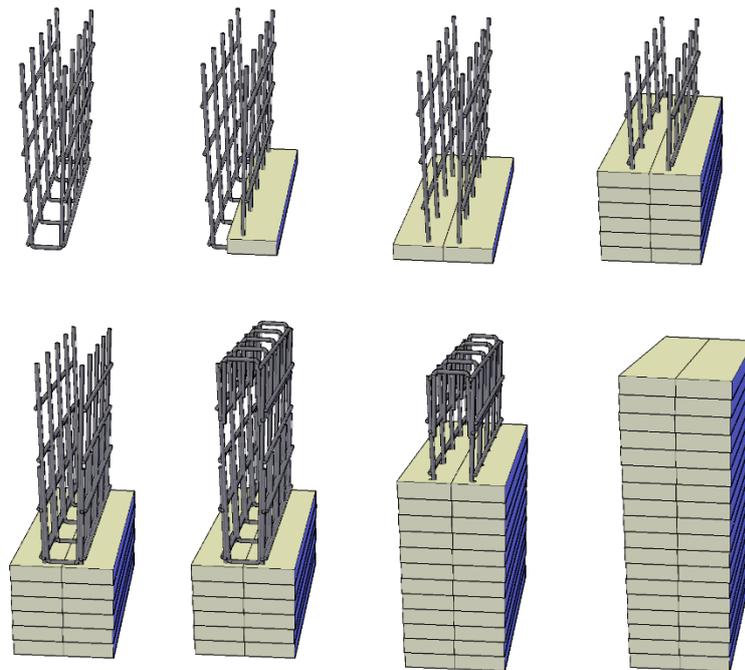


Abbildung 53: Variante 2 - Versuchsaufbau

In der Versuchsvorbereitung hat man sich entschieden, von der prinzipiellen Durchführung abzuweichen. Der Hintergrund hierfür war, dass weitere bauverfahrenstechnische Einflussparameter für die Variante 2 untersucht werden sollten, die Einfluss auf die spätere Baustellennutzung haben. Die wesentlichen Aspekte des Verfahrensansatzes sind das seitliche Ausbringen des Betons, der Betonfluss innerhalb des Bauteils, die Umschließung der Bewehrung sowie der Verbund der seitlichen Schichten. Die ersten Rückschlüsse auf das seitliche Ausbringen sowie den Verbund zwischen Bewehrung und Beton konnten schon mit der Erstellung des Demonstrators zur Variante 1 gezogen werden. Aus diesem Grund wurde das Hauptaugenmerk des gegenständlichen Experiments auf den gezielten Betonfluss innerhalb des Bauteils gelegt. Dieser hat direkten Einfluss darauf, wie viel Beton pro Seite extrudiert werden muss, um das spätere Bauteil ohne Hohlräume herzustellen. Daher erfolgte abweichend vom angedachten Verfahrensansatzes kein wechselseitiges Bedrücken des Bewehrungskorbes, sondern es wurden mehrere Schichten von einer Seite aufeinander gedrückt. Weiterhin erfolgte eine Einteilung des Bewehrungskorbs in zwei Bereiche (mit und ohne Maschendrahteinlage, vgl. Abbildung 54).



Abbildung 54: Variante 2 - Bewehrungskorb

Im Ergebnis konnte gezeigt werden, dass ein einseitiges Bedrucken mit der Variante 2 grundsätzlich möglich ist (Abbildung 55). Dies bietet mit Hinblick auf die spätere Praxisnutzung und die Generierung des Druckpfades den Vorteil, dass der Drucker nicht in jeder Schicht die Bauteilseite wechseln muss. Dadurch lassen sich gegebenenfalls zusätzliche Zustellbewegungen des Druckkopfes minimieren, was zu einer Beschleunigung der Herstellungszeit führt.



Abbildung 55: Variante 2 - einseitiges Bedrucken

Weiterhin konnte nachgewiesen werden, dass sich der Betonfluss im Bereich des eingelegten Maschendrahtes besser kontrollieren lässt und sich eine gleichmäßigere Verteilung des Betons einstellt (Abbildung 56 linke Darstellung). Im Vergleich dazu übertrat der Beton im Bereich ohne Maschendraht die Bauteilmitte (Abbildung 56 rechte Darstellung). Im Ergebnis führt dies dazu, dass keine planmäßige Lage der Verbundzone hergestellt werden kann. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass es beim Bedrucken der gegenüberliegenden Seite zu Aufwölbungen kommt, was sich gegebenenfalls negativ auf das spätere Bauteil auswirkt.



Abbildung 56: Variante 2 - Betonfluss

Mit Fertigstellung des Demonstrators konnte insbesondere die verschobene Verbundzone nachgewiesen werden (Abbildung 57 linke Darstellung). Für die Praxisanwendungen ergeben sich dadurch mehrere Problematiken. Beim Bedrücken der zweiten Seite muss permanent eine Anpassung der Betonmenge beim Extrudieren erfolgen, um zum einen ein Aufwölben zu vermeiden und zum anderen sicherzustellen, dass keine Hohlräume entstehen. Obwohl davon ausgegangen wird, dass zukünftig durch Einsatz von entsprechender Sensorik eine Automatisierung möglich ist, stellt dies einen nachteiligen Aspekt beim Drucken dar. Weiterhin hat sich gezeigt, dass die Verbundzone zum Teil im Bereich der gegenüberliegenden Bewehrungslage liegt. Eine negative Auswirkung auf die Verbindung zwischen Bewehrung und Beton lässt dadurch nicht ausschließen.



Abbildung 57: Variante 2 - Fertigstellung Demonstrator

Basierend auf der Herstellung des Demonstrators konnten folgende bauverfahrenstechnische Erkenntnisse abgeleitet werden, die besonders für die spätere Baustellenanwendung der Variante 2 entscheidend sind:

- Beim seitlichen Bedrücken mit Rütteltechnik kann ein besserer Verbund zwischen Bewehrung und Beton erzeugt werden.
- Das Einlegen eines Maschendrahtes ermöglicht einen gezielteren Betonfluss.
- Bei einem Anstellwinkel des Druckkopfes von 45° ist die Betondeckung entsprechend DIN EN 1992-1 (EC2) herstellbar.
- Die ermittelten Druckzeiten für die Variante 2 können erreicht werden. Eine Erhöhung der Druckgeschwindigkeit scheint nach aktuellem Stand möglich.

Die gewonnenen Erkenntnisse innerhalb des Forschungsprojektes und des abschließenden Demonstrators haben gezeigt, dass sich der Ansatz der Variante 2 für die Herstellung von monolithischen vertikalen Stahlbetonwänden eignet. Die eingesetzten Bewehrungskörbe entsprechen der gültigen Normungen und können daher die auftretenden Lasten in den Bauteilen analog zu konventionellen Herstellungsmethoden aufnehmen. Zu beachten ist hierbei, dass sich die Abläufe des Bewehrungseinbaus ändern müssen, da die Bewehrungskörbe nicht an einer bestehenden Schalung befestigt werden kann. Darüber hinaus sind zusätzliche Maschendrahte oder Netze in der Bauteilmitte einzulegen, um eine planmäßige Verbundzone innerhalb des Bauteils zu gewährleisten. Die dadurch resultierende Erhöhung der Kosten wird jedoch als gering eingeschätzt.

Variante 3 - Synchroner Bewehrungseinbau

Die Variante 3 weist den höchsten Automatisierungsgrad der im Forschungsprojekt gegenständlichen Bewehrungsintegrationsansätze auf. Aus diesem Grund ist der Entwicklungsaufwand im Vergleich zu den Varianten 1 und 2 am größten. Die durchgeführten Experimente bezogen sich daher auf Teilprozesse des Verfahrens, der automatisierten Verbindung von Bewehrungsstäben und dem vertikalen Bedrucken der Bewehrungseisen (Vergleich Abschnitt Professur Baumaschinen). Grundlegend ist der konstruierte Schweißroboter in der Lage, die einzelnen Bewehrungseisen in dem notwendigen Zeitfenster konstruktiv miteinander zu verbinden. Ebenfalls konnte anhand mehrerer Versuche gezeigt werden, dass der für die Variante 3 neu entwickelte, geschlitzte Druckkopf das hergestellte Bewehrungsgeflecht bedrucken kann (Abbildung 41) und sich ein ausreichender Verbund zwischen Beton und Bewehrung eingestellt hat. Aus bauverfahrenstechnischer bzw. baubetrieblicher Sicht ist eine Bewertung der Praxistauglichkeit zum jetzigen Zeitpunkt jedoch noch nicht vollends möglich. Der aktuelle Stand der Entwicklung lässt zwar erste Rückschlüsse zu, dass die Variante 3 die für eine wirtschaftliche Nutzung notwendigen Druckzeiten erreichen könnte. Zu beachten ist hierbei aber, dass es bisher keine kombinierten Versuche mit der Erstellung des Bewehrungsgeflechtes und dem nachlaufenden Bedrucken gab. Darüber hinaus werden mit dem Verfahrensansatz zwar vertikale Bewehrungsstrukturen erzeugt, diese sind aber nach aktueller Normenlage nur als konstruktive Verbindungen (keine durchgehende Bewehrung) einzuordnen. Eine Baustellenanwendung ist daher zum aktuellen Zeitpunkt nicht möglich.

Die durchgeführten Versuche zeigen jedoch das Potenzial des Ansatzes, zukünftig eine vollautomatisierte Herstellung von monolithischen Stahlbetonwänden mit dem CONPrint3D®-Verfahren zu ermöglichen. Hierzu müssen jedoch weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten folgen. Dabei sollte insbesondere die Kombination der automatisierten Herstellung der Bewehrung mit dem Drucken des Betons stehen. Weiterhin sind Lösungsansätze zu entwickeln, wie mit Hilfe des Schweißroboters durchgehende vertikale Bewehrungsstrukturen erzeugt werden, die die auftretenden Kräfte in den Bauteilen entsprechend den statischen Vorgaben aufnehmen können.

Aufwandswerte Variante 1 und Variante 2

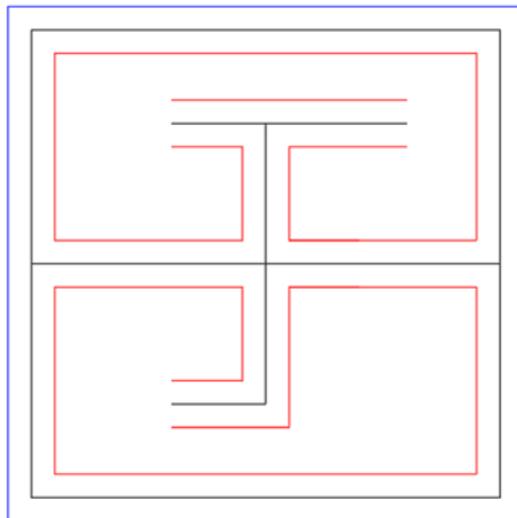
Für Vorbetrachtungen zur anfallenden Druckzeit ist die Kenntnis der genauen Länge des Druckpfades bedeutsam. Gerade bei Druckvorgängen, bei denen die herzustellende Wand durch mehrere Befahrungen in einer Ebene erfolgt (Kernwand, innere Schicht, äußere Schicht), kann die Ermittlung des exakten Druckpfades aufwändig sein. Alternativ zur aufwändigen konstruktiven Ableitung der Verfahrensbahnen mittels eines CAD-Programms aus einer vorhandenen Grundrisszeichnung heraus, kann folgender mathematischer Ansatz gewählt werden:

$$Länge_{I+A} = 2 \cdot Länge_K - 2 \cdot Abstand_{K-A} \cdot (Anzahl_I + Anzahl_T + 4 \cdot Anzahl_K)$$

<i>Länge_{I+A}</i>	<i>Summe der inneren und äußeren Bahn</i>
<i>Länge_K</i>	<i>Gesamtlänge der Kernwand</i>
<i>Abstand_{K-A}</i>	<i>Abstand der Mittelpunktsbahnen Kernwand zu innere od. äußere Bahn</i>
<i>Anzahl_I</i>	<i>Anzahl der Wandenden</i>
<i>Anzahl_T</i>	<i>Anzahl der Wand-T-Stöße</i>
<i>Anzahl_K</i>	<i>Anzahl der Wandkreuzungen</i>

Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass die inneren und äußeren Bahnen den gleichen Abstand zu Mittelpunktsbahn der Kernwand besitzen.

Berechnungsbeispiel:



■ äußere Bahn

■ innere Bahn

■ Kernwand

}

Länge_{I+A} = ?

Länge_K = 6300 mm

Anzahl_I = 3

Anzahl_T = 3

Anzahl_K = 1

Abstand_{K-A} = 50 mm

Länge_{I+A} = 2 · 6300 mm - 2 · 50 mm · (3+3+4 · 1)

Länge_{I+A} = 11.600 mm

[Länge_{I+A} in dem CAD-Modell ermittelt: 11.600]

Grundsätzlich liegt die Summe der inneren und äußeren Bahn im Bereich des Doppelten der Kernwand. Der Gesamtverfahrweg des Druckkopfes berechnet sich wie folgt:

$$\text{Gesamtverfahrweg} = \text{Länge}_K + \text{Länge}_{I+A}$$

Die Untersuchung der Druckzeiten erfolgte anhand des Grundrissplanes des digiCON²-Beispielgebäudes (

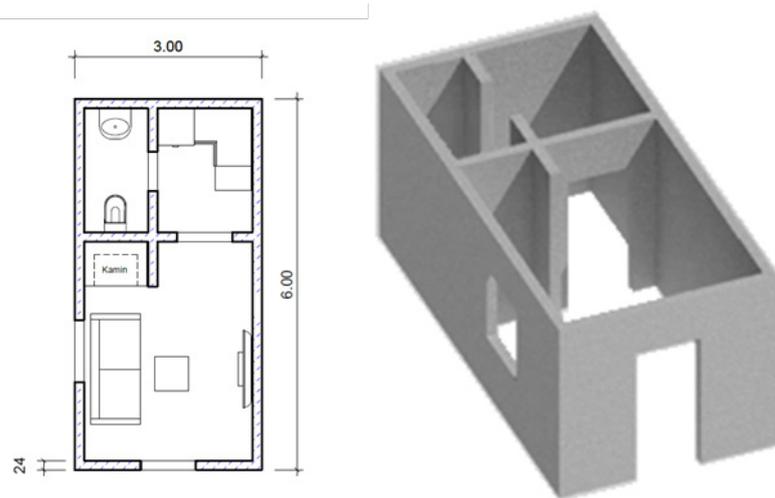


Abbildung 58). Die Wahl des Grundrisses resultierte daraus, dass dieser am TU eigenen Portalroboter abgefahren werden konnte. Somit können die simulierten Druckgeschwindigkeiten real validiert werden.

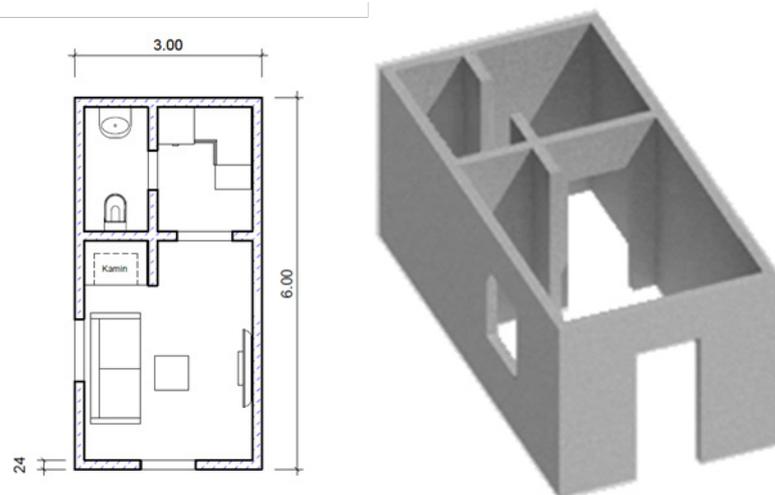


Abbildung 58: Beispielgebäude digiCON²

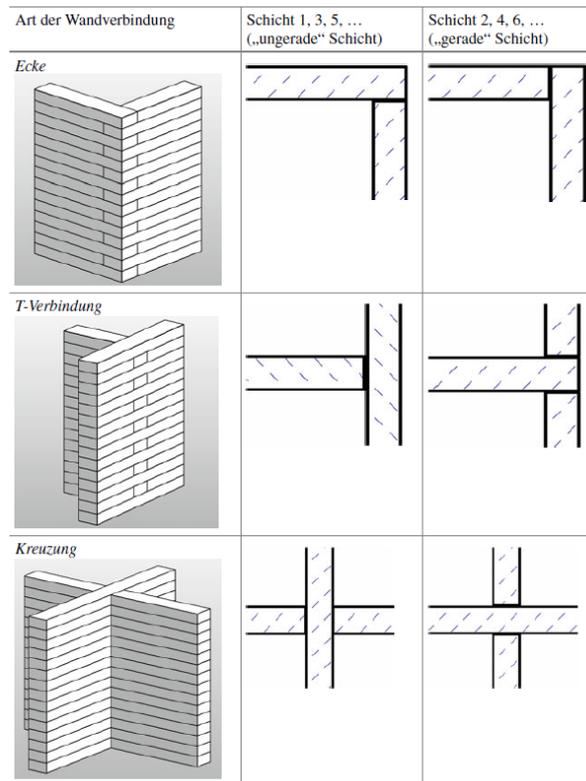


Abbildung 59: Verzahnung durch alternierende Schichtanordnung

Abbildung 59 verdeutlicht [22].

Für die Varianten 1 und 2 wurden unterschiedliche Zeiten pro Wandschicht ermittelt. Dies resultiert einerseits aus der Anzahl an Befahrungen pro Wandschicht (drei bei Variante 1 und zwei bei Variante 2), als auch an den unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten, die zwischen Kernwand und Außenschicht variieren. Die unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten sind das Resultat praktischer Untersuchungen. Mit ihnen und der gewählten Betonzusammensetzung konnten die besten Ergebnisse erzielt werden.

Bei Variante 1 beträgt die Herstellungszeit einer 5cm hohen Schicht, bestehend aus Kernbahn und 2 Außenschichten, 19,98 Minuten. Darin enthalten sind alle An- und Zustell- sowie die eigentlichen Druckbewegungen. Nicht enthalten sind die Zeiten der benötigten manuellen Eingriffe zur Bewehrungsintegration. Nach aktuellem Kenntnisstand wird für die Variante jedoch angenommen, dass diese parallel zum Druckprozess durchgeführt werden können und somit keine oder nur eine geringfügige Auswirkung auf die Herstellungszeit hat.

Das beidseitige Bedrucken eines Bewehrungskorbes bei Variante 2 dauert bei dem dargestellten Beispielgrundriss 14,85 Minuten für eine 5cm hohe Schicht. Diese Zeit umfasst ebenfalls nur die reine Druckaktivität. Zeiten zum Aufstellen und befestigen der Bewehrungskörbe sind darin nicht enthalten. Die Zeiten zur Bewehrungsintegration müssen extra betrachtet werden, weil die Bewehrung beispielsweise auch parallel zur Hauptnutzungszeit des Druckers integriert werden könnte. Auch das Einbringen der Bewehrung in der Nebenzeit, z.B. bei Reinigungsvorgängen, ist denkbar. Im Optimalfall kann der Druckvorgang so geplant werden, dass der Drucker für die Verrichtung von Nebenprozessen in eine vordefinierte Parkposition gefahren wird, währenddessen Tätigkeiten zur Bewehrungsintegration durchgeführt werden.

Die Ausführungszeit zur Erstellung des digiCON²-Beispielgebäudes (1 Etage, 3m Wandhöhe) beträgt bei Variante 1 ca. 20 Stunden. Das Betonvolumen des Beispielgebäudes beträgt ca. 14 m³. Der Materialdurchsatz

(Druckleistung) bei Variante 1 beträgt dadurch $0,70 \text{ m}^3/\text{h}$ respektive beträgt die Druckzeit für einen Kubikmeter Beton 1,43 h.

Die Ausführungszeit bei Variante 2 beträgt ca. 15 Stunden, was einer Druckleistung von $0,94 \text{ m}^3/\text{h}$ entspricht. Die Druckzeit für einen Kubikmeter Beton beträgt bei Variante 2 demnach 1,06 h.

Kalkulatorischer Verfahrensvergleich

Zum Abschluss des Projektes sollten die erzielten Ergebnisse aus baubetrieblicher Sicht eingeordnet sowie die Wirtschaftlichkeit der angestrebten Bewehrungsintegrationsvarianten überprüft werden. Hierzu ist es notwendig, belastbare Aufwandswerte für die Ausführungszeiten sowie den Kosten für den eingesetzten Beton zu ermitteln.

Auf Grundlage der vom Institut für Baustoffe entwickelten Betonrezepturen wurden daher zu Beginn die Kosten für den eingesetzten Beton ermittelt. Die Kostenansätze, welche in Tabelle 8 enthalten sind, beruhen hierbei sowohl auf realen Einkaufspreisen sowie Ansätzen verschiedener Lieferanten und können daher als kostensicher eingestuft werden.

Auf dieser Grundlage wurden im nächsten Schritt die kalkulatorischen Verfahrensvergleiche durchgeführt. Anhand dieser sollten die Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt mit der konventionellen Ortbetonherstellung verglichen werden. Dazu war es einleitend notwendig, die Aufwandswerte sowie Kostenansätze für die Kalkulation zu ermitteln. Diese wurde anhand des Beispielobjekts aus Abbildung 44 (Wandfläche 600 m^2 und Wandstärke 24 cm) berechnet und haben die Eingangswerte aus Tabelle 9: Eingangswerte Kalkulation für Verfahrensvergleich Tabelle 9 ergeben.

Tabelle 8: Materialpreis für Beton

Komponente	Masse [kg/m^3]	€/t	€
CEM II/C-M (S-LL)	464	170,00 €	78,88 €
Quarzsand BCS 413	136,5	40,00 €	5,46 €
Sand 0/2	516,4	11,00 €	5,68 €
Kies 2/4	286,6	17,50 €	5,02 €
Kies 4/8	266,5	16,50 €	4,40 €
Kies 8/16	415,1	21,00 €	8,72 €
Wasser	208,8	0,50 €	0,10 €
Summe:	2293,9		108,25 €

Tabelle 9: Eingangswerte Kalkulation für Verfahrensvergleich

Position	Konventionelle Herstellung	Beton-3D-Druck
Kostenansätze		
Lohn Facharbeiter	40 €/h	50 €/h
Lohn Ingenieur	-	70 €/h
Vorhaltekosten Schalung	7,44 €/m ²	-
Materialpreis Bewehrung		738,07 €/t
Materialpreis Beton	108,35 €/m ³	108,35 €/m ³
Arbeitsgerüst		0,51 €/m ²
Kosten Kran	5,10 €/m ²	-
Kosten Beton-3D-Drucker	-	55,42 €/m ³
Aufwandswerte		
Schalung	0,76 h/m ²	-
Bewehrung einbauen	15 h/t	-
Beton einbauen	0,7 h/m ³	-
Facharbeiter Beton-3D-Druck	-	0,36 h/m ²
Geräteleiter (Ingenieur) Beton-3D-Drucker	-	0,36 h/m ²

Tabelle 10: Kosten für 1 m² Stahlbeton (Wandstärke 24 cm) – Ortbetonherstellung

Position	Preis pro m ²
Vorhaltung Schalungsmaterial	14,87 €
Material Betonstabstahl	10,63 €
Material Beton	25,98 €
Lohn Schalung stellen inkl. Ausschalen und Reinigen	60,49 €
Lohn Bewehrung einbauen	8,99 €
Lohn Beton einbauen	6,72 €
Arbeitsgerüst	0,51 €
Kran	5,10 €
Summe	133,29 €

Tabelle 11: Kosten für 1 m² Stahlbeton (Wandstärke 24 cm) - Beton-3D-Druck (2 h/m³)

Position	Preis pro m ²
Material Beton	25,98 €
Material Betonstabstahl	10,63 €
Lohn Facharbeiter Beton-3D-Druck	24,00 €
Lohn Geräteführer (Ingenieur) Beton-3D-Drucker	33,60 €
Beton-3D-Drucker	13,30 €
Arbeitsgerüst	0,51 €
<u>Summe</u>	<u>108,02 €</u>

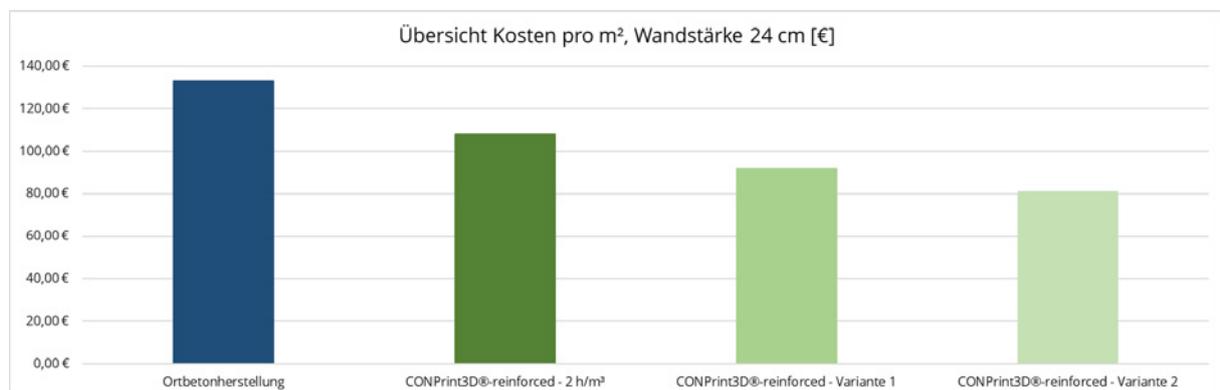
Im nächsten Schritt wurden die Zeitansätze als Grundlage für die Kalkulation angenommen, welche für die Varianten 1 (1,43 h/m³) und 2 (1,06 h/m³) simuliert und experimentell nachgewiesen werden konnten. Die kürzeren Ausführungszeiten führen folgerichtig dazu, dass sich die Kosten für 1 m² weiter reduzieren (siehe Tabelle 12), da sich die Lohnkostenanteile für den Facharbeiter sowie des Geräteführers verringern.

Tabelle 12: Kosten für 1 m² Stahlbeton (Wandstärke 24 cm) - Beton-3D-Druck (1,43 h/m³)

Position	Preis pro m ²
Material Beton	25,98 €
Material Betonstabstahl	10,63 €
Lohn Facharbeiter	17,16 €
Lohn Geräteführer (Ingenieur)	24,02 €
Beton-3D-Drucker	13,30 €
Arbeitsgerüst	0,51 €
Summe	91,60 €

Position	Preis pro m ²
Material Beton	25,98 €
Material Betonstabstahl	10,63 €
Lohn Facharbeiter	12,72 €
Lohn Geräteführer (Ingenieur)	17,81 €
Beton-3D-Drucker	13,30 €
Arbeitsgerüst	0,51 €
Summe	80,95 €

Abbildung 60 entnommen werden.



Hierbei ist zu beachten, dass es noch zu einer Erhöhung der Ansätze kommen kann, wenn die Bewehrungsintegration nicht parallel zum Druckvorgang erfolgen kann. Dies würde zu einer Verringerung der Druckleistung und demnach zu einer Erhöhung der Kostenansätze führen. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Kosten pro m² weiterhin unter denen der konventionellen Ortbetonherstellung liegen.

Baustellenumgebung

Die für die Kalkulation und Ermittlung der Aufwandswerte zugrundeliegenden Versuche wurden im Labor, unter idealen Bedingungen, durchgeführt. Die entwickelten Verfahren sollen jedoch zukünftig nicht nur in geschützter Atmosphäre zur Anwendung kommen, sondern auch auf der Baustelle. Dabei wirken eine Vielzahl von Umwelteinflüssen auf die Maschinenteknik, den Beton sowie den gesamten Herstellungsprozess ein, die aktuell noch nicht in die Betrachtung eingeflossen sind. Inwiefern sich diese also auf die Kosten und Herstellungszeiten auswirken, kann zum aktuellen Zeitpunkt des Projektes nicht abschließend geklärt werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass im Vergleich zu konventionellen Herstellungsverfahren, zusätzliche Schutzmaßnahmen notwendig sein werden (bspw. Einhausung des Druckbereiches).

Es ist daher sinnvoll, die entwickelten Ansätze unter realen Bedingungen zu erproben. Somit könnten Rückschlüsse gezogen werden, inwiefern Einwirkungen aus der Umwelt den Beton-3D-Druck beeinflussen und welche daraus resultierenden Maßnahmen notwendig sind, um die Wirtschaftlichkeit und die Qualität der erstellten Bauteile sicher zu stellen.

Fazit

Forschungsboutput

Im Forschungsprojekt konnte gezeigt werden, dass die additive Füllung eines vorgefertigten Bewehrungskorbs sowie das simultane Herstellen eines Bewehrungsnetzes sinnvolle Weiterentwicklungen für den Beton-3D-Druck sind. Dank einer Materialentwicklung mit dem Fokus auf den Einsatz grober Gesteinskörnung und eine hohe Packungsdichte, konnte der Bindemittelbedarf reduziert werden, was sich sowohl positiv auf die Wirtschaftlichkeit als auch der ökologischen Qualität auswirkt. Außerdem erfüllt das Material alle Normvorgaben.

Die Variante 1 im Sinne der extrusionsbasierten Applikation einer Betondeckung auf eine Kernwand wurde als nicht zielführend identifiziert. Es ist nicht gelungen den Betonfluss derart zu lenken, dass die Bewehrung umschlossen und eine vollflächige Verbindung zur Kernwand sichergestellt wird. Zudem ist die Bewehrungsführung auf zweidimensionale Anordnungen begrenzt. Sollte ein Anwendungsfall nach einer derartigen Technologie verlangen, scheint das Zurückgreifen auf die bestehende und genormte Spritzbetontechnologie als aussichtsreicher.

Alle Teilprozesse sind so ausgelegt, dass sie automatisiert oder automatisierbar sind, sodass der additive Stahlbetonbau ohne unfallträchtige Mensch-Maschine-Interaktionen im Baufeld auskommt. Darüber hinaus kann die notwendige ArbeitnehmerInnenzahl auf der Baustelle sowie unfallfallanfällige Arbeiten (bspw. das Verlegen von Bewehrung) reduziert werden. Dies wirkt sich wiederum positiv auf den Arbeitsschutz sowie die Anzahl von Arbeitsunfällen aus.

Der CONPrint3D-Druckkopf wurde in seiner Düsengeometrie an den Bewehrungseinbau angepasst und um einen Rüttelmotor ergänzt, der den Betonfluss insbesondere bei steifer Konsistenz unterstützt. Gezeigt wurde außerdem, dass der kurze Zeitabstand zwischen dem Schweißen und dem Betonieren den Bewehrungsverbund nicht signifikant beeinträchtigt. Die Verbundfestigkeit kann jedoch durch eine Vibrationsanregung am Bewehrungsstab stark verbessert werden.

Ebenfalls konnte gezeigt werden, dass die untersuchten Bewehrungsintegrationsvarianten zukünftig eine wirtschaftliche Alternative zu konventionellen Herstellungsmethoden darstellen können. Die Automatisierung von Prozessen auf der Baustelle führt zukünftig zu einer Verringerung der Lohnstunden, die für die Herstellung von Stahlbetonwänden benötigt wird.

Voraussichtlicher Mehrwert und Verwendbarkeit der Ergebnisse

Mit Abschluss des Forschungsprojektes steht eine Betonrezeptur zur Verfügung, die alle Normvorgaben berücksichtigt, ein Größtkorn von 16 mm besitzt und mit der CONPrint3D-Technologie druckbar ist. Sie kommt mit weit weniger Bindemittel aus, als die meisten anderen und ist dadurch günstiger. Dank der Normkonformität können Betonhersteller nach geringfügiger Anpassung an die lokal verfügbaren Gesteinskörnungen ein 3D-druckbaren Beton ohne weitere Nachweisführung anbieten.

Darüber hinaus wurde gezeigt, dass der Bewehrungsverbund ohne herkömmliche Verdichtungsverfahren sichergestellt werden kann, indem die Bewehrung im Moment des Betonkontakts mit leichter Vibration angeregt wird. Hieraus ergeben sich Entwicklungs- und Anwendungsperspektiven, die mit vertretbarem Aufwand zur Marktreife gebracht werden können.

Nützlich für weitere Forschung und Entwicklung zur Bewehrungsintegration in den Beton-3D-Druck ist die parametrische 3D-Vorlage für Hüllrohre für additiv erzeugte Auszugprobekörper.

Die erstellte Funktionsstruktur des Stoffflusses zeigt die minimal notwendigen Teilfunktionen bei der Bewehrungsintegration von Stahl in Beton-3D-gedruckte Bauteile. Diese abgeleiteten detaillierten Prozessschritte sind unabhängig von den Varianten. Die abstrahierte Darstellung bietet dem

Maschinenentwickler eigene Lösungen zu konstruieren oder die hier vorgeschlagenen Lösungen des morphologischen Kastens zu nutzen.

Die Bewehrungsintegrationsvariante 2 kann als praktikable Methode des additiven Stahlbetonbaus identifiziert werden. Sie hat eine niedrige Markteinführungsschwelle, da der Bewehrungsbau mit dem aktuellen Stand der Technik erfolgen kann und die Methode auch mit kommerziell verfügbaren Drucksystemen anwendbar ist.

Der Entwicklungsstand zur Variante 3 stellt eine vielversprechende Entwicklungsplattform für den automatisierten und prozessintegrierten Bewehrungsbau dar.

Die abgeleiteten Prozess- und Informationsflüsse können zur Planung von Beton-3D-Druckprozessen unter Baustellenbedingungen genutzt werden. Dies unterstützt den Planungsprozess und bietet die Möglichkeit einzelne Schritte individuell zu planen und umzusetzen. Der modulare Aufbau verringert somit die Markteintrittsbarriere. Unternehmen können entsprechend bisheriger Fachkenntnisse in bestimmten Teilbereichen (Planung, Ausführung, Maschinensteuerung, etc.) die notwendigen Anpassungen für die Nutzung des Beton-3D-Drucks im Vergleich zur konventionellen Herstellung nachvollziehen und sind somit nicht daran gebunden, den kompletten Prozess des Beton-3D-Drucks umzusetzen zu müssen.

Die im Zuge des Forschungsprojektes berechneten und in Laborversuchen nachgewiesenen Kosten- und Leistungsansätze für die Bewehrungsvarianten 1 und 2 können als Grundlage für weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten genutzt werden.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schweißelektrode und Bewehrungsverbundzone des Meshmould-Verfahrens.....	11
Abbildung 2: Variante 1 - Prinzipskizze in der Draufsicht.....	12
Abbildung 3: Variante 2 - Prinzipskizze in der Draufsicht.....	12
Abbildung 4: Variante 3 - Prinzipskizze in der Draufsicht.....	13
Abbildung 5: Arbeitsplan.....	14
Abbildung 6: Variante 1 - Kragarmmodell für die mechanischen Belastungen an die Deckbeton der Stärke s16	
Abbildung 7: Zeitliche Druckfestigkeitsentwicklung.....	18
Abbildung 8: Versuchsaufbau zum 3D-Drucken von Stabauszugprobekörpern.....	19
Abbildung 9: Ermittelte Verbundfestigkeiten.....	19
Abbildung 10: Stabeinzugcharakteristik an Proben mit Bewehrungsstäben in der Fuge oder im Filament....	20
Abbildung 11: Längsschnitte mit horizontaler Bewehrungslage; 10 mm Betonstahl.....	20
Abbildung 12: Gespaltener Auszugprobekörper mit 3D-gedrucktem Hüllrohr aus Kunststoff.....	21
Abbildung 13: Verbundfestigkeit bei verschiedenen Verdichtungsverfahren.....	21
Abbildung 14: Gespaltene Auszugprobe mit Vibration am Stab.....	22
Abbildung 15: Thermogramm einer T-Verbindung von 8 mm-Bewehrungsstahl 10 s nach dem Schweißen.	23
Abbildung 16: Abkühlverlauf der Schweißstelle.....	23
Abbildung 17: Oberflächentemperatur nach dem Schweißen über die Stablänge und die Abkühlzeit.....	24
Abbildung 18: Zusammenhang von Stabtemperatur und Verbundfestigkeit.....	25
Abbildung 19: Allgemeine Maschinenstruktur [11]; [20].....	27
Abbildung 20: Funktionsstruktur - Black-Box-Modell - Gesamtfunktion.....	29
Abbildung 21: Funktionsstruktur - Grey-Box-Modell - Stofffluss.....	30
Abbildung 22: Morphologischer Kasten.....	31
Abbildung 23: Variante 3: Konzepte zur Herstellung von Bewehrungsnetzen [26].....	32
Abbildung 24: Beeinflussung des Fließmaßes durch Vibration [32]; [34].....	33
Abbildung 25: Variante 1 - Funktionsbeschreibung [27].....	34
Abbildung 26: Variante 1 - Einbau Queranker.....	34
Abbildung 27: Variante 1 - Druckrichtungen und Düsenstellung beim Betonüberdeckungsdruck [26]; [27]..	35
Abbildung 28: Variante 2 - Funktionsbeschreibung.....	35
Abbildung 29: Variante 2 - Fugenbildung in Wandmitte.....	36
Abbildung 30: Variante 2 - Vibration an der Düse.....	37
Abbildung 31: Variante 2 - Düsenrichtung horizontal; 60 °; Rüttler 50 Hz.....	38
Abbildung 32: Variante 2 - Mehrfache Anstellwinkel der Austrittsöffnung.....	38
Abbildung 33: Variante 3 - Funktionsbeschreibung [27].....	39

Abbildung 34: Variante 3 - Ertragbare Knotenkraft der Schweißpunkte bei minimaler Fügekraft, Stabdurchmesser 6 mm [27].....	39
Abbildung 35: Variante 3 - Versuchsaufbau Schweißzange.....	40
Abbildung 36: Variante 3 - Knotenkräfte, Stabdurchmesser 6 mm.....	41
Abbildung 37: Variante 3 - Knotenkräfte, Stabdurchmesser 8 mm.....	42
Abbildung 38: Variante 3 - Abkühlung der Schweißstelle; 8 mm.....	43
Abbildung 39: Variante 3 - Automatisierter Prozessablauf Schweißvorgang.....	44
Abbildung 40: Variante 3 - Einsatz eines Rüttler bei verschiedenen Frequenzen.....	44
Abbildung 41: Variante 3 - Druckprozess.....	45
Abbildung 42: Fertigungszeit Ortbetonherstellung (Schalen, Bewehren, Betonieren) in Abhängigkeit der Wandbreite.....	46
Abbildung 43: Tagesleistung Betondruck bei unterschiedlichen Druckereinsatzzeiten (9 bis 24 h/d).....	47
Abbildung 44: Darstellung Fertigungszeit und Lohnstunden anhand eines Beispielobjekts.....	47
Abbildung 45: Prozessflussdiagramm - Beton-3D-Druck.....	48
Abbildung 46: Prozessflussdiagramm - Einrichten des Druckers.....	49
Abbildung 47: Variante 2 - Prozessflussdiagramm.....	50
Abbildung 48: Nutzwertanalyse (Auszug).....	51
Abbildung 49: Variante 1 - prinzipieller Versuchsaufbau.....	52
Abbildung 50: Variante 1 - Versuchsdurchführung.....	53
Abbildung 51: Variante 1 - fertiggestellter Probekörper.....	53
Abbildung 52: Variante 1 - Fertigstellung Demonstrator.....	54
Abbildung 53: Variante 2 - Versuchsaufbau.....	55
Abbildung 54: Variante 2 - Bewehrungskorb.....	56
Abbildung 55: Variante 2 - einseitiges Bedrucken.....	56
Abbildung 56: Variante 2 - Betonfluss.....	56
Abbildung 57: Variante 2 - Fertigstellung Demonstrator.....	57
Abbildung 58: Beispielgebäude digiCON ²	60
Abbildung 59: Verzahnung durch alternierende Schichtanordnung.....	61
Abbildung 60: Übersicht Kosten pro m ² -Wand.....	65

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Basisrezeptur des 3D-druckbaren Normalbetons.....	15
Tabelle 2: Angepasste Rezeptur mit 8 mm Größtkorn.....	16
Tabelle 3: Variante 2 - Beeinflussung der Stranggeometrie durch Rüttler.....	37
Tabelle 4: Variante 1 - Bauteilgeometrie Druckversuch.....	52
Tabelle 5: Variante 1 - Bewehrung Druckversuch.....	52
Tabelle 6: Variante 2 - Bauteilgeometrie Druckversuch.....	54
Tabelle 7: Variante 2 - Bewehrung Druckversuch.....	55
Tabelle 8: Materialpreis für Beton.....	62
Tabelle 9: Eingangswerte Kalkulation für Verfahrenvergleich.....	63
Tabelle 10: Kosten für 1 m ² Stahlbeton (Wandstärke 24 cm) – Ortbetonherstellung.....	63
Tabelle 11: Kosten für 1 m ² Stahlbeton (Wandstärke 24 cm) - Beton-3D-Druck (2 h/m ³).....	64
Tabelle 12: Kosten für 1 m ² Stahlbeton (Wandstärke 24 cm) - Beton-3D-Druck (1,43 h/m ³).....	65
Tabelle 13: Kosten für 1 m ² Stahlbeton (Wandstärke 24 cm) - Beton-3D-Druck (1,06 h/m ³).....	65
Tabelle 14: Anforderungsliste (vollständig).....	75

Literaturverzeichnis

- [1] ANDREASEN, A. H. M. ; ANDERSEN, J.: Über die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten). In: *Kolloid-Zeitschrift* Bd. 50 (1930), Nr. 3, S. 217–228
- [2] BAZ, BILAL ; AOUAD, GEORGES ; KHALIL, NOURA ; REMOND, SÉBASTIEN: Inter-layer reinforcement of 3D printed concrete elements. In: *Asian Journal of Civil Engineering* Bd. 22 (2021), Nr. 2, S. 341–349
- [3] BEITZ, WOLFGANG ; PAHL, GERHARD ; BEYER, CHRISTIANE ; BRONNHUBER, THOMAS ; DILGER, KLAUS ; ERK, PATRICK ; FELDHUSEN, JÖRG ; GAUB, HEINZ ; U. A. ; FELDHUSEN, J. ; GROTE, K.-H. (Hrsg.): *Pahl/Beitz Konstruktionslehre - Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. 8. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer, 2013 — ISBN 978-3-642-29568-3
- [4] BOS, F. P. ; MENNA, C. ; PRADENA, M. ; KREIGER, E. ; DA SILVA, W. R. LEAL ; REHMAN, A. U. ; WEGER, D. ; WOLFS, R. J. M. ; U. A.: The realities of additively manufactured concrete structures in practice. In: *Cement and Concrete Research* Bd. 156 (2022), Nr. 2, S. 1–14
- [5] BOS, FREEK ; AHMED, ZEESHAN ; JUTINOV, EVGENIY ; SALET, THEO: Experimental Exploration of Metal Cable as Reinforcement in 3D Printed Concrete. In: *Materials* Bd. 10 (2017), Nr. 11, S. 1–22
- [6] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN 66025-1 Programmaufbau numerisch gesteuerter Maschinen - Teil 1: Allgemeines* : Beuth Verlag, 1983
- [7] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN 66025-2 Programmaufbau numerisch gesteuerter Maschinen Teil 2: Wegbedingungen und Zusatzfunktionen* : Beuth Verlag, 1988
- [8] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN 488-1 Betonstahl - Teil 1: Stahlsorten, Eigenschaften, Kennzeichnung* : Beuth Verlag, 2009
- [9] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN 488-4 Betonstahl - Betonstahlmatten* : Beuth Verlag, 2009
- [10] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN EN 1992-1-1 Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau* : Beuth Verlag, 2011
- [11] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN EN 12350-2 Prüfung von Frischbeton - Teil 2: Setzmaß* : Beuth Verlag, 2019
- [12] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN EN 12350-5 Prüfung von Frischbeton - Teil 5: Ausbreitmaß* : Beuth Verlag, 2019
- [13] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN EN 12350-10: Prüfung von Frischbeton - Teil 10: Selbstverdichtender Beton - L-Kasten-Versuch* : Beuth Verlag, 2019
- [14] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN EN ISO 15630-2 Stähle für die Bewehrung und das Vorspannen von Beton - Prüfverfahren - Teil 2: Geschweißte Matten und Gitterträger* : Beuth Verlag, 2019
- [15] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN 8580 Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung* : Beuth Verlag, 2020
- [16] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *DIN 1045-2 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1* : Beuth Verlag, 2022
- [17] GENEIDY, OMAR ; KUMARJI, SUJAY ; DUBOR, ALEXANDRE ; SOLLAZZO, ALDO: Simultaneous Reinforcement of concrete while 3D printing. In: *Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*. Eindhoven : Springer International Publishing, 2020 — ISBN 978-3-030-49915-0, S. 895–905
- [18] HACK, NORMAN PETER: *Mesh Mould - A robotically fabricated structural stay-in-place formwork system*. Zürich, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Dissertation, 2018

- [19] HESSER, J. A.: *Bewertung zementgebundener Baustoffe für extrusionsbasierte generative Bauverfahren hinsichtlich der Hochbaubetonnormung*. Dresden, Technische Universität Dresden, Bachelorarbeit, 2021
- [20] KIRCHNER, J.: *Mehrkriterielle Optimierung von Parallelkinematiken*. Chemnitz, Technische Universität Chemnitz, Dissertation, 2001
- [21] KRASSENSTEIN, BRIAN: *Architect Plans to 3D Print a 2-story Home in Minnesota Using a Homemade Cement Printer*. URL <https://3dprint.com/2471/3d-printed-home-in-minnesota/>. - abgerufen am 2021-02-24
- [22] KRAUSE, MARTIN: *Baubetriebliche Optimierung des vollwandigen Beton-3D-Drucks*. Dresden, Technische Universität Dresden, Dissertation, 2020
- [23] MECHTCHERINE, VIKTOR ; MICHEL, ALBERT ; LIEBSCHER, MARCO ; SCHMEIER, TOBIAS: Extrusion-Based Additive Manufacturing with Carbon Reinforced Concrete: Concept and Feasibility Study. In: *Materials* Bd. 13 (2020), Nr. 11, S. 1–16
- [24] MECHTCHERINE, VIKTOR ; NERELLA, VENKATESH NAIDU ; KASTEN, KNUT: Testing pumpability of concrete using Sliding Pipe Rheometer. In: *Construction and Building Materials* Bd. 53 (2014), Nr. 1, S. 312–323
- [25] MECHTCHERINE, VIKTOR ; NERELLA, VENKATESH NAIDU ; WILL, FRANK ; NÄTHER, MATHIAS ; OTTO, JENS ; KRAUSE, MARTIN: Large-scale digital concrete construction – CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D-printing. In: *Automation in Construction* Bd. 107 (2019), Nr. 1, S. 1–16
- [26] MECHTCHERINE, VIKTOR ; TAUBERT, MARKUS ; MÜLLER, STEFFEN ; WILL, FRANK ; STORCH, FLORIAN ; PLASCHNICK, PAUL ; OTTO, JENS ; MAIWALD, PATRICK: 3D-gedruckte monolithische Stahlbetonwände im CONPrint3D-reinforced Verfahren. In: *Beton- und Stahlbetonbau* Bd. 117 (2022), Nr. 3, S. 1–10
- [27] NERELLA, VENKATESH NAIDU ; NÄTHER, MATHIAS ; KRAUSE, MARTIN ; SCHACH, RAINER: CONPrint3D: Beton-3D-Druck als Ersatz für den Mauerwerksbau. In: *ingenieur.de - Jobbörse und Nachrichtenportal für Ingenieure* Bd. 92 (2017), Nr. 9, S. 355–363
- [28] NEW CHINA TV: *World's first 3D-printed house that can withstand 8.0-magnitude quake*. URL https://www.youtube.com/watch?v=OloOc21_u80. - abgerufen am 2019-03-06
- [29] OTTO, JENS ; KORTMANN, JAN ; KRAUSE, MARTIN: Wirtschaftliche Perspektiven von Beton-3D-Druckverfahren. In: *Beton- und Stahlbetonbau* Bd. 115 (2020), Nr. 8, S. 586–597
- [30] PERROT, A. ; JACQUET, Y. ; RANGEARD, D. ; COURTEILLE, E. ; SONEBI, M.: Nailing of Layers: A Promising Way to Reinforce Concrete 3D Printing Structures. In: *Materials* Bd. 13 (2020), Nr. 7, S. 1–13
- [31] SCOTCHMER, NIGEL: The Other Resistance Process: Cross Wire Welding. In: *Welding Journal* Bd. 86 (2007), Nr. 12, S. 36–39
- [32] STORCH, FLORIAN: Beton-3D-Druck - Neues Anwendungsfeld für Autobetonpumpen. In: *Tagungsband Praxis Transportbeton 2022*. Berlin, 2022
- [33] STORCH, FLORIAN ; NERELLA, VENKATESH NAIDU ; WILL, FRANK ; MECHTCHERINE, VIKTOR ; KRENZER, KNUT ; SIMON, MARTIN: Printhead for large-scale, extrusion-based additive manufacturing with coarse aggregate concrete. In: *CPT worldwide* Bd. 2 (2020), Nr. 4, S. 16–21
- [34] STORCH, FLORIAN ; PLASCHNICK, PAUL ; WILL, FRANK: CONPrint3D-Aktuelle Entwicklungsschwerpunkte beim Beton-3D-Druck. In: *Tagungsband 9. Fachtagung Baumaschinentechnik 2022*. Dresden, 2022
- [35] TAUBERT, MARKUS ; MECHTCHERINE, VIKTOR: 3D-druckbarer Normalbeton mit grober Gesteinskörnung. In: *Beiträge zum 61. Forschungskolloquium mit 9. Jahrestagung des DAfStb*. Dresden : TU Dresden, 2022, S. 145–150
- [36] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E.V. ; VERBAND DER ELEKTROTECHNIK, ELEKTRONIK UND INFORMATIONSTECHNIK E.V.: *VDI/VDE 2206: Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme*: Beuth Verlag, 2021
- [37] VOLKOVA, OLENA: *Mathematische Modellierung und experimentelle Untersuchung der Schnellerstarrung von Stählen*. Freiberg, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Dissertation, 2002

- [38] WÄCHTER, HUBERT ; BIEHL, JENS: Betondruck mit simultanen Einbringen von Bewehrungselementen. In: *25. Internationale IFF-Fachtagung | IAB-Wissenschaftstage 2018*. Weimar, 2018, S. 72–73
- [39] WANGLER, TIMOTHY: Digital Concrete: A Review. In: *Cement and Concrete Research* Bd. 123 (2019), Nr. 1

Anlagen

A Anforderungsliste

Die Tabelle 14 enthält die vollständige Anforderungsliste. Eine Legende der verwendeten Symbole befindet sich am Ende der Tabelle.

Tabelle 14: Anforderungsliste (vollständig)

ID	Priorität	Beschreibung	Quelle	Verantwortlicher
1. Geometrie				
1.1 Gebäudeelemente und Wandeigenschaften				
1101	WA	Es ist der Druck von geraden Wänden möglich.		PBM
1102	FF	Die Grenzabweichung der gedruckten Wand für das Längenmaß beträgt ± 10 mm bis ± 20 mm.	DIN 18202	PBM
1103	FF	Die Grenzabweichung der gedruckten Wand für die Winkeligkeit beträgt 6 mm bis 16 mm.	DIN 18202	PBM
1104	FF	Die Grenzabweichung der gedruckten Wand für die Ebenheit beträgt 5 bis 15 mm.	DIN 18202	PBM
1.2 Betonschicht				
1201	WA	Die Betonschicht ist als Vollprofil (Profildruck) auszuführen.		PBM
1202	WA	Der Endzustand des Schichtquerschnittes soll rechteckig sein.		PBM
1203	MF	Die maximale Schichtbreite beträgt 150 mm.		PBM
1204	MF	Die maximale Schichthöhe beträgt 50 mm.		PBM
1205	WA	Die Oberflächengüte der gedruckten Wand soll Sichtbetonklasse SB2 entsprechen.		PBM
1206	WA	Es sind scharfkantige, rechtwinkelige Schichtabschlüsse (Anfang / Ende) herzustellen mit einer Wand-Oberflächengüte entsprechend Sichtbetonklasse SB2.		PBM
2. Baustoffe				
2.1 Beton				
2101	WB	Der Beton kann für alle Expositionsklassen eingesetzt werden.		IfB
2102	RF	Eine mit etablierten Betonbauweisen vergleichbare Dauerhaftigkeit wird durch die Minimierung der Rissbildung sichergestellt.	Antragsthese 3.3 b) ii)	IfB

2103	MF	Die Betondruckfestigkeit genügt mindestens der Druckfestigkeitsklasse C20/25.	Antragsthese 3.3 b) ii)	IfB
2104	WA	Der Verbundwerkstoff zeichnet sich durch überdurchschnittliche Nachhaltigkeit aus.		IfB
2105	WA	Die Baustoffkomposition berücksichtigt alle relevanten Normen und Regelwerke.	Antragsthese 3.3 b) i)	IfB
2106	WA	Die Ausgangsstoffe enthalten keine Bestandteile, die Bewehrungskorrosion verursachen oder die Betondauerhaftigkeit beeinträchtigen.	EN 206, S. 29	IfB
2.1.1 Gesteinskörnung				
21101	FF	Die Kornform ist rund oder gebrochen.		PBM
21102	FM	Das Größtkorn beträgt mindestens 8 mm.		IfB
21103	FR	Es wird eine hohe Packungsdichte angestrebt.		IfB
21104	WB	Die Sieblinie ist möglichst kontinuierlich.		IfB
21105	FF	Die Standardsieblinien nach DIN 1045-2 werden eingehalten.	DIN 1045-2, S. 57	IfB
21106	MF	Die Maximalmehlkorngehalte nach DIN 1045-2 werden eingehalten.	DIN 1045-2, S. 53	IfB
2.1.2 Bindemittel				
21201	WC	Die eingesetzten Zemente erfüllen die Anforderungen aller Expositionsclassen.	vgl. DIN 1045-2, S. 49 f.	IfB
21202	MF	Die Mindestzementgehalte nach DIN 1045-2 werden eingehalten.	vgl. DIN 1045-2, S. 53	IfB
21203	MF	Die Mindestzementgehaltanforderungen aus Expositionsclassen werden berücksichtigt.	vgl. EN 206, S. 83	IfB
21204	RF	Der Zementgehalt ist aus ökologischen Gründen minimiert.		IfB
21205	RF	Der Klinkergehalt im Zement ist aus ökologischen Gründen minimiert.		IfB
21206	WC	Wegen fraglicher Verfügbarkeit wird auf Flugasche verzichtet.		IfB
21207	MF	Ist Silicastaub Hauptbestandteil des Zements ist der Masseanteil der Flugasche auf maximal 15% zu begrenzen.	DIN 1045-2, S. 25	IfB
21208	FF	Die expositionsclassenabhängigen W/Z-Werte werden eingehalten.	EN 206, S. 83	IfB
2.1.3 Zusatzstoffe und -mittel				
21301	FF	Wassermengen in Zusatzmitteln über 3 l/m ³ sind auf den W/Z-Wert anzurechnen.	EN 206, S. 35	IfB

21302	MF	Zusatzmittel werden nur bis zu 50 g/kg _{Zement} zugegeben.	EN 206, S. 35	IfB
2.1.4 Rheologie/Frischbetoneigenschaften				
21401	RF	Der Frischbeton ist störungsfrei und mit geringem Energieaufwand pumpbar.		IfB
21402	RF	Der Frischbeton ist störungsfrei und mit geringem Energieaufwand extrudierbar.		IfB
21403	FF	Der Beton ist nach dem Verlassen der Düse formstabil.		IfB
21404	RF	Der Frischbeton weist eine hohe Entmischungsstabilität auf.	EN 206, S. 30	IfB
21405	MF	Das Ausbreitmaß ist größer als 340 mm.	EN 206, S. 91	IfB
21406	MF	Das Setzmaß ist größer 10 mm.	EN 206, S. 91	IfB
21407	RF	Der Beton verfügt über eine möglichst hohe statische Fließgrenze.		IfB
21408	RF	Die plastische Fließgrenze ist möglichst niedrig.		IfB
21409	RF	Der Beton besitzt eine hohe Strukturaufbaurate.		IfB
21410	MF	Der Beton hat eine Verarbeitungszeit von mindestens zwei Stunden.		IfB
2.1.5 Verbundeigenschaften				
21501	RF	Der Beton umschließt die Bewehrung möglichst vollständig.		IfB
21502	WA	Der Bewehrungsverbund entspricht den Annahmen der Hochbaubemessungsnormung.		IfB
21503	RF	Die Scherfestigkeit der Schichtverbundfugen ist möglichst groß.		IfB
2.2 Bewehrung				
2.2.1 Bewehrungsstruktur (Geometrie)				
22101	WA	Es ist horizontale Bewehrung einzubringen. (in Richtung der Wandlänge)	DIN 1992-1	PBM
22102	WA	Es ist vertikale Bewehrung einzubringen. (in Richtung der Wandhöhe)	DIN 1992-1	PBM
22103	WC	Es ist Querbewehrung einzubringen. (in Richtung der Wandbreite)		PBM
22104	MF	Die horizontale Bewehrung muss je Reihe einen minimalen Querschnitt von 1,5 cm ² /m nach aufweisen.	DIN EN 1992-1 (9.6)	PBM

22105	MF	Die vertikale Bewehrung muss je Reihe einen minimalen Querschnitt von 2,25 cm ² /m nach DIN EN 1992-1 aufweisen.	DIN EN 1992-1 (9.6)	PBM
22106	MF	Der Bewehrungsgrad beträgt für tragende Wände zwischen 40 und 70 kg/m ³ .		IBB
22107	MF	Der maximale Bewehrungsgrad (auch in Stoßbereichen) beträgt 9 %.	Euro Code 2	IBB
22108	FF	Die Betondeckung ist $c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}$.	DIN 1992-1 (4.4.1)	IBB
22109	MF	In Abhängigkeit der Expositionsklasse ist Dauerhaftigkeitsanforderung für $c_{min,dur}$ (mm).	DIN 1992-1 (Tabelle 4.4N)	IBB
2.2.2 Art der Bewehrung (Material)				
22201	WA	Die Stahlbewehrung ist normgerecht herzustellen.		IfB; IBB; PBM
22202	FF	Die Bewehrung ist aus dem Werkstoff B500B (1.0439) nach DIN 488-1.	DIN 488-1	PBM
22203	WA	Die Bewehrungselemente haben zwei Reihen Schrägrippen und keine Längsrippen gemäß DIN 488-2.	DIN 488-2	PBM
22204	FF	Die Stabdurchmesser beträgt 10 mm.	DIN 488-2	IfB; IBB; PBM
22205	WA	Das gelieferte Bewehrungsgeflecht ist ein-, zwei- oder dreidimensional.	DIN 488-2	IBB
22206	WA	Die Qualität der Bewehrung ist für den Einbau geeignet.		PBM
2.2.3 Bewehrungseinbau (Montage)				
22301	MF	Die minimale Übergreifungslängen bei Stößen beträgt 15*Stabdurchmesser oder 20 cm.	DIN 1992-1 (8.7.3)	IBB; PBM
22302	MF	Der minimale Stababstand von Betonstahl beträgt k_1 *Stabdurchmesser oder $d_g + k_2$ mm oder 20 mm.	DIN 1992-1 (NA zu 8.2)	IBB
22303	MF	Der geringste Abstand zwischen zwei fixen (Ein-)Bauteilen muss mindestens 5 mm größer sein als das Größtkorn.	Zement-Merkblatt B2	IBB
22304	MF	Der minimale Biegerollendurchmesser für Stabdurchmesser kleiner 20 mm beträgt 4*Stabdurchmesser.	DIN 1992-1	IBB; PBM
22305	MF	Der minimale Biegerollendurchmesser für Stabdurchmesser größer bzw. gleich 20 mm beträgt 7*Stabdurchmesser.	DIN 1992-1	IBB; PBM
22306	WB	Es sind Abstandshalter für die Lagesicherheit zu verwenden.		IBB

22307	WB	Die Abstandshalter müssen mit der Bewehrung verbunden werden.		IBB
22308	WB	Es ist kein Bewehrungsanschluss an Fertigteile (bspw. Fundamente, Decken, Stürze,...) notwendig.		IBB; PBM
2.2.4 Verbindung der Bewehrung (Fertigung)				
22401	MF	Der Mindestabstand zu Biegungen ist 4*Stabdurchmesser vom Biegungsende (bspw. für Schweißstellen).	DIN ISO 17660; DIN 1992-1 8.3	IBB
22402	MF	Die Knotenscherkraft von statisch relevanten Verbindungen beträgt mindestens 0,25*Streckgrenze (des Bewehrungsmaterials)*Querschnittsfläche (des Bewehrungsdrahtes).	DIN 488-4	IBB
22403	MF	Beim Eisenflechten ist jeder Stab mit mindestens 2 Stellen zu fixieren.		IBB
22404	FF	Bei Schraubverbindungen ist die Muffenstärke 1,7*Stabdurchmesser.		IBB
2.2.5 Baubetriebliche Parameter (Gebrauch / Kosten)				
22501	MF	Die maximal anfallenden Lohnstunden betragen 7,56 h/m ³ für eine bewehrte Betonwand. (umfasst die Arbeitsschritte Schalen, Bewehren und Betonieren)		IBB
22502	MF	Die maximale Fertigungszeit beträgt 2 h/m ³ .		IBB
22503	MF	Der maximale Personalbedarf beträgt 5 Personen. (umfasst die Arbeitsschritte Bewehren und Betonieren; Schalen entfällt)		IBB
3. Teilsysteme der Maschine				
3.1 Drucker (Portal)				
3.1.1 Kinematik				
31101	MF	Die Fahrgeschwindigkeit des Portales beträgt maximal 200 mm/s.		PBM
3.2 Druckkopf (allgemein)				
3.2.1 Kräfte				
32101	FF	Der Druckkopf muss gegen den 2-fachen geodätischen Druck dicht sein.		PBM
32102	FF	Die Druckfestigkeit soll 2 bar Überdruck betragen.		PBM
3.2.2 Energie				

32201	WA	Der Druckkopf wird passiv durch den Raum geschleppt bei der Bewegung.		PBM
32202	WB	Es sind elektrische Antriebe zu bevorzugen.		PBM
3.2.3 Konstruktionsmaterialien				
32301	WB	Bauteile die mit Beton in Kontakt sind, sind aus dem Material X5Cr-Ni18-10 zu fertigen.		PBM
3.2.4 Sicherheit				
32401	MF	Die Schutzklasse des Druckkopfes ist IP65 oder höher.	DIN EN 60529	PBM
3.2.5. Montage				
32501	WB	Der Druckkopf muss einfach montierbar sein.		PBM
32502	WB	Es ist eine werkzeuglose Montage und Demontage im täglichen Betrieb möglich.		PBM
32503	MF	Die Montage und Demontage ist von maximal 2 Personen durchführbar.		PBM
32504	WB	Die elektrische Verbindung erfolgt mit Industriesteckern der Firma "Harting".		PBM
3.2.6 Instandhaltung				
32601	WA	Der Druckkopf ist einfach zu reinigen.		PBM
3.3 Extrusionseinheit				
3.3.1 Geometrie				
33101	WA	Die Extrusionseinheit ist über dem Formungssystem angeordnet.		PBM
33102	RF	Die Extrusionseinheit soll kompakt sein.		PBM
3.3.2 Kinematik				
33201	WA	Das Förderprinzip entspricht einem Schneckenextruder.		PBM
33202	FF	Die Extruderdrehzahl beträgt 0 bis 240 U/min.		PBM
33203	WA	Die Vorzugsrichtung der Betonförderung aus dem Extruder ist vertikal.		PBM
3.3.3 Kräfte				
33301	MF	Die maximale Masse der Extrusionseinheit beträgt 120 kg.		PBM
33302	MF	Das maximale Volumen des Betonreservoirs beträgt 60 l.		PBM
3.3.4 Konstruktionsmaterialien				
33401	WB	Die Materialien müssen abrasionsfest sein.		PBM
3.3.5 Gebrauch				

33501	RF	Der Extruder soll geräuscharm arbeiten.		PBM
3.4 Düse / Leitungssystem				
3.4.1 Geometrie				
34101	RF	Die Förderstrecke innerhalb des Druckkopfes soll so kurz wie möglich sein.		PBM
34102	FF	Die Betonfördermenge beträgt 0 bis 5 m ³ /h.		PBM
34103	MF	Der Mindestdurchmesser / -breite von Förderelementen im Inneren ist 5-mal Korngröße.		PBM
34104	WA	Es sind Toträume zu vermeiden.		PBM
34105	RF	Innerhalb der Förderleitung sind sanfte / weiche Geometrieübergänge anzustrebn.		PBM
34106	MF	Die minimale Anzahl an Austrittsöffnungen ist 1.		PBM
34107	WB	Der Austrittsquerschnitt der Düse ist rechteckig.		PBM
3.4.2 Kräfte				
34201	RF	Die Strömungskräfte sollen gering sein.		PBM
3.4.3 Energie				
34301	WA	An der Austrittsdüse (Formgeber) wird ein kontinuierlicher Betonvolumenstrom bereitgestellt.		PBM
3.5 Verschlussystem				
3.5.1 Geometrie				
35101	RF	Im geöffneten Zustand ist der Platzbedarf gering.		PBM
3.5.2 Kinematik				
35201	RF	Die Verschlusszeit ist gering.		PBM
3.5.3 Kräfte				
35301	RF	Die bewegte Masse des Verschlusselementes ist gering.		PBM
3.6 Formungssystem				
3.6.1 Geometrie				
36101	MF	Die maximalen Abmessungen des Feinpositionierungssystem sind 700 x 700 x 700 mm (Länge x Breite x Höhe).		PBM
36102	RF	Das Formungssystem soll kompakt gebaut sein.		PBM
3.6.2 Kinematik				

36201	WB	Die Schichtbreite soll automatisch verstellbar sein.		PBM
36202	WB	Die Schichthöhe soll automatisch verstellbar sein.		PBM
36203	RF	Die Bewegungsgeschwindigkeiten sollen hoch sein.		PBM
3.6.3 Kräfte				
36301	MF	Die maximale Eigenmasse des Formungssystems beträgt 40 kg.		PBM
36302	RF	Die Kräfte zur Betonformung sollen so gering wie möglich sein.		PBM
36303	WB	Die Formgebungskraft wirkt drückend auf den Beton.		PBM
36304	WB	Die Formgebungskraft wirkt kontinuierlich auf den Beton.		PBM
36305	RF	Die Systemsteifigkeit des Formungssystems soll hoch sein.		PBM
3.6.4 Energie				
36401	RF	Die Reibkräfte zwischen Beton und Schalung sollen gering sein.		PBM
36402	WB	Die eingestellten Schichtabmessungen sollen energielos gehalten werden.		PBM
3.6.5 Fertigung				
36501	WA	Der Formgeber darf mit der Bewehrung nicht kollidieren.		PBM
36502	WA	Der Formgeber unterstützt den Bewehrungsauschluss mit Beton.		PBM
3.6.6 Instandhaltung				
36601	MF	Die minimale Lebensdauer von Austauschteilen beträgt einen Arbeitstag, d.h. 8 Stunden.		PBM
3.7 Bewehrungsintegrationsmodul (allgemein)				
3.7.1 Geometrie				
37101	WA	Das Bewehrungsintegrationsmodul ist vor dem Formungssystem angeordnet.		PBM
37102	MF	Das Bewehrungsintegrationsmodul soll nicht größer als 700 x 700 x 700 mm (Länge x Breite x Höhe) sein.		PBM
37103	RF	Das Bewehrungsintegrationsmodul soll kompakt sein.		PBM

3.7.2 Kinematik				
37201	RF	Die Bewegungsgeschwindigkeiten sollen hoch sein.		PBM
3.7.3 Kräfte				
37301	MF	Die maximale Eigenmasse des Bewehrungsintegrationsmoduls beträgt 40 kg (ohne die Masse von Bewehrungselementen im Magazin).		PBM
37302	RF	Die Kräfte zum Bewehrungseinbau sollen gering sein.		PBM
37303	RF	Die Systemsteifigkeit des Bewehrungsintegrationsmoduls soll hoch sein.		PBM
3.7.4 Montage				
37401	WB	Es ist ein modularer Aufbau des Bewehrungsintegrationsmodul zu berücksichtigen.		PBM
37402	WB	Das Bewehrungsintegrationsmodul muss einfach montierbar sein.		PBM
37403	WC	Es ist eine werkzeuglose Montage und Demontage im täglichen Betrieb möglich.		PBM
37404	MF	Die Montage und Demontage ist von maximal 2 Personen durchführbar.		PBM
37405	WB	Die Anbindungen zu weiteren Maschinenstrukturen sind mit Schnellwechslern auszuführen.		PBM
37406	WB	Die elektrische Verbindung erfolgt mit Industriesteckern der Firma "Harting".		PBM
3.7.5 Instandhaltung				
37501	WA	Das Bewehrungsintegrationsmodul ist einfach zu reinigen.		PBM
37502	MF	Die minimale Lebensdauer von Austauschteilen beträgt einen Arbeitstag, d.h. 8 Stunden.		PBM
3.8 Bewehrungsintegrationsmodul - Bewehrungszufuhr				
3.8.1 Kinematik				
38101	WA	Es ist ein Magazin für Bewehrungselemente auf dem Druckkopf zu vermeiden, d.h. Bewehrungselemente sollen von extern zugeführt werden.		PBM
38102	WA	Die Bewehrungszufuhr ist ein kontinuierlicher Prozess.		PBM

3.8.2 Kräfte				
38201	MF	Die maximale Masse des Magazins für Bewehrungselemente beträgt 50 kg.		PBM
3.8.3 Fertigung				
38301	WB	Bei der Zufuhr soll die Bewehrung wenige Arbeitsschritte erfahren.		PBM
38302	WA	Das Hin- und Zurückbiegen (Biegewechsel) der Bewehrung ist zu vermeiden.	DIN EN 1992-1, 8.3	PBM
3.8.4 Gebrauch				
38401	WA	Im Magazin befinden sich einbaufertige Bewehrungselemente.		PBM
38402	MF	Die Befüllung des Magazines ist von maximal 5 Personen durchführbar.		PBM
38403	WB	Die Befüllung des Magazines ist während des Druckprozesses möglich.		PBM
3.9 Bewehrungsintegrationsmodul - Bewehrungsanpassung				
3.9.1 Kinematik				
39101	MF	Es sind die minimalen Biegeradien nach DIN 1992-1 einzuhalten.		PBM
3.9.2 Kräfte				
39201	RF	Die Kräfte zur Anpassung der Bewehrung sollen gering sein.		PBM
3.9.3 Fertigung				
39301	WB	Bei der Zufuhr soll die Bewehrung wenige Arbeitsschritte erfahren.		PBM
39302	WA	Das Hin- und Zurückbiegen (Biegewechsel) der Bewehrung ist zu vermeiden.	DIN EN 1992-1, 8.3	PBM
39303	WB	Zur Bewehrungsanpassung sind Trennverfahren (Fertigungstechnik) der Gruppe "Zerteilen" zu bevorzugen.	DIN 8588	PBM
39304	RF	Bei der Anpassung von Bewehrungselementen ist der thermische Energieeintrag gering zu halten.		PBM
3.10 Bewehrungsintegrationsmodul – Bewehrungsfügung				
3.10.1 Kinematik				
31010 1	RF	Der Fügevorgang von statisch relevanten Knotenverbindungen soll so schnell wie möglich sein.		PBM
3.10.2 Kräfte				

31020 1	RF	Die Kräfte zum Fügen von Bewehrungselementen sollen gering sein.		PBM
3.10.3 Fertigung				
31030 1	WA	Es sind statisch relevante Fügstellen von aktuell zu setzender horizontaler und vertikaler Bewehrung herstellbar.		PBM
31030 2	WA	Es sind statisch relevante Fügstellen von bereits gesetzter und von aktuell zu setzender horizontaler und vertikaler Bewehrung herstellbar.		PBM
31030 3	WC	Es sind statisch relevante Fügstellen von unveränderten Anschlussbewehrungen (bspw. in Fundamenten; Decken; Stürzen) und von aktuell zu setzender horizontaler und vertikaler Bewehrung herstellbar.		PBM
31030 4	WB	Der Einbauprozess von Bewehrungselementen ist kontinuierlich.		PBM
31030 5	WB	Es ist manuelle Bewehrungsfügung zu vermeiden.		PBM
3.11 Bewehrungsintegrationsmodul - Bewehrungseinbau				
3.11.1 Kinematik				
31110 1	RF	Es sind Bewegungen an bereits gesetzter Bewehrung gering zu halten.		PBM
3.11.2 Kräfte				
31120 1	RF	Es sind Kräfteeinwirkungen auf bereits gesetzte Bewehrungselemente gering zu halten.		PBM
3.11.2 Fertigung				
31120 1	WA	Die Bewehrung muss während des Betoniervorganges in ihrer Lage gesichert sein.		PBM
31120 2	WB	Die Lagesicherung sollte ohne externe Hilfsmittel sichergestellt sein.		PBM
31120 3	WB	Es ist manueller Bewehrungseinbau zu vermeiden.		PBM
4. Bauprozess (Randbedingungen)				
4.1 Wirtschaftlichkeit (Kosten)				
4101	WC	Das Bauprodukt und der Bauprozess sind bereits im Forschungsstadium kostenneutral, wie traditionelle Bauweisen.	Antragsbegründung 3.4	IBB
4102	WA	Bauprodukt und Bauprozess muss aus wirtschaftlicher Sicht konkurrenzfähig sein.	Antragsthese 3.3 b) iii)	IBB

Legende:**FF** Festforderung**MF** Mindestforderung**RF** Richtungsforderung**IfB** Institut für Baustoffe**IBB** Institut für Baubetriebswesen**PBM** Professur für Baumaschinen**WA** Wunsch hoher Priorität**WB** Wunsch mittlerer Priorität**WC** Wunsch geringer Priorität

B Ergebnistransfer

Erfolgte Veröffentlichungen

Seit Projektbeginn haben die Forschungseinrichtungen sechs Projekttreffen mit Vertretern des Projektbegleitenden Ausschuss durchgeführt. Diesem berichteten sie jeweils ausführlich über die gewonnenen Erkenntnisse und ließen das konstruktive Feedback in den weiteren Projektverlauf einfließen.

Am 3. November 2021 veranstalteten die drei Forschungseinrichtungen gemeinsam das 3. Deutsche Industrieseminar, eine eintägige Onlineveranstaltung mit Kurzvorträgen aus Forschung und Praxis des Beton-3D-Drucks. Prof. Mechtcherine, Prof. Will und Prof. Otto thematisierten in ihren Vorträgen Aspekte der Bewehrungsintegration und stützten sich dabei auf frühe Ergebnisse der Projektbearbeitung. Im Anschluss wurden die Aufzeichnungen ohne Zugangsbeschränkung auf YouTube veröffentlicht:

[YouTube-Playlist: 3. Deutsches Industrieseminar](#)

Am 24. November 2022 wurde die Veranstaltungsreihe durch die vierte Ausgabe des Deutschen Industrieseminars fortgeführt, wobei Fragestellungen der Bewehrungsintegration in einzelnen Präsentationen thematisiert wurden. Die Veröffentlichung der Beiträge ist für März 2023 vorgesehen.

Weiterhin veröffentlichten die Forschungseinrichtungen gemeinsam einen Artikel in der Fachzeitschrift Beton und Stahlbetonbau, in welchem sie die Bewehrungsintegrationsverfahren der Fachöffentlichkeit vorstellten und Lösungsstrategien präsentierten:

[3D-gedruckte monolithische Stahlbetonwände im CONPrint3D-reinforced Verfahren](#)

Im Rahmen der 19. Projektetage der Bauforschung vom 22. bis 24. März 2022 stellte die TU Dresden den aktuellen Arbeitsstand vor und stellte diesen zur Diskussion. Es erfolgte ein reger Austausch mit anderen Forschenden und interessierten Fachleuten. Der Link zum öffentlichen Vortrag lautet:

[CONPrint3D-reinforced - Bewehrungsintegration in 3D-gedruckte Betonbauteile](#)

Zusammen mit diesem Abschlussbericht werden Forschungsergebnisse wie die Anforderungsliste, Betonrezepturen und Mischungsentwürfe, Konstruktionsdetails von Maschinenkomponenten sowie ermittelte Prozesskennzahlen und Kalkulationsansätze veröffentlicht, die es anderen Forschenden sowie der Baupraxis ermöglichen und erleichtern, auf dem Wissensstand aufzubauen und ihn in Baustellenanwendungen zu überführen.

Im Rahmen der Fachtagung Praxis Transportbeton 2022 in Berlin vom 13.-15. September 2022 stellte die Professur für Baumaschinen ausgewählte Projekteinhalte zur Nutzung der Rütteltechnik vor. Das Publikum setzte sich aus Mitgliedern des „Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V.“ zusammen. Im Anschluss ist den Tagungsteilnehmern der Inhalt zur Verfügung gestellt worden.

Zur 9. Fachtagung Baumaschinentechnik in Dresden vom 29.-30. September 2022 stellte die Professur den aktuellen Erkenntnisstand einem breiten Publikum der Baumaschinenhersteller vor. Dies umfasste neben einem Fachvortrag auch die Vorführung von Teilsystemen der Prototypen. Im Anschluss sind die Ergebnisse den Tagungsteilnehmern in einem Band zur Verfügung gestellt worden.

Geplante Veröffentlichungen

Das Institut für Baustoffe arbeitet zusammen mit dem Institut für Massivbau der RWTH Aachen an einem englischsprachigen Fachaufsatz zum Zusammenhang des Schichtverbunds und des Bewehrungs- zu Matrix-Verbunds auf das globale Tragverhalten bewehrter, 3D-gedruckter Bauteile.

Das Institut für Baustoffe und die Professur für Baumaschinen fassen derzeit die Versuchsergebnisse für Wirkung von Vibrationsanregung im 3D-Druck-Prozess und auf den Bewehrungsverbund zu einem englischsprachigen Fachaufsatz zusammen.

Die Professur für Baumaschinen erarbeitet aktuell einen englischsprachigen Aufsatz zum detaillierten Entwicklungsprozess der einzelnen Subsysteme der Variante 3 - Synchroner Bewehrungseinbau.

In Vorbereitung befindet sich eine Veröffentlichung zum Einfluss der Bewehrungstemperatur während des Betonkontakts auf die Verbundfestigkeit.

Weiterhin planen die am Projekt beteiligten Forschungseinrichtungen einen englischsprachigen Aufsatz, um die Forschungsergebnisse des Verfahrensvergleichs der Fachwelt zugänglich zu machen.