

3D-Druck von Stahlbeton

Entwicklung praxisorientierter Methoden für den 3D-Druck des Verbundwerkstoffs Stahlbeton

BBSR-
Online-Publikation
71/2024

von

Prof. Dr.-Ing. Martin Claßen

Prof. Dr.-Ing. Uwe Reisgen

Dr.-Ing. Sisi Zhang

Jan Ungermann

Konrad Mäde

Mirco Olesch



3D-Druck von Stahlbeton

Entwicklung praxisorientierter Methoden für den 3D-Druck
des Verbundwerkstoffs Stahlbeton

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: 10.08.18.7-21.23

Projektlaufzeit: 01.2022 bis 01.2024

IMPRESSUM

Herausgeber

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

Fachbetreuer

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

Autorinnen und Autoren

RWTH Aachen University, Lehrstuhl und Institut für Massivbau (IMB)
Prof. Martin Claßen (Projektleitung)
mclassen@imb.rwth-aachen.de

Dr.-Ing. Sisi Zhang
szhang@imb.rwth-aachen.de

Jan Ungermann, M. Sc.
jungermann@imb.rwth-aachen.de

RWTH Aachen University, Lehrstuhl und Institut für Schweiß- und Fügetechnik (ISF)
Prof. Uwe Reisgen (Projektleitung)

Konrad Mäde, M. Sc.
konrad.maede@isf.rwth-aachen.de

Mirco Olesch, M. Sc.
mirco.olesch@isf.rwth-aachen.de

Redaktion

RWTH Aachen University, Lehrstuhl und Institut für Massivbau (IMB)
Martin Claßen
Jan Ungermann

Stand

März 2024

Gestaltung

RWTH Aachen University, Lehrstuhl und Institut für Massivbau (IMB)
Martin Claßen
Jan Ungermann

Bildnachweis

Titelbild: Sisi Zhang
Alle weiteren Bilder: Sisi Zhang

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

Claßen, Martin; Reisgen, Uwe; Zhang, Sisi; Ungermann, Jan; Mäde, Konrad; Olesch, Mirco, 2024: 3D-Druck von Stahlbeton: Entwicklung praxisorientierter Methoden für den 3D-Druck des Verbundwerkstoffs Stahlbeton. BBSR-Online-Publikation 71/2024, Bonn.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Claßen

Dr.-Ing. Sisi Zhang

Mies-van-der-Rohe-Str. 1
52074 Aachen
GERMANY

Telefon: +49 241 80-25170

imb@imb.rwth-aachen.de
www.imb.rwth-aachen.de

Bericht

Institutsbericht-Nr. 498/2024

des Instituts für Massivbau der RWTH Aachen

- Gegenstand: *„Entwicklung praxisorientierter Methoden für den 3D-Druck des Verbundwerkstoffs Stahlbeton“*
- Auftraggeber: Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung
53179 Bonn
Deichmanns Aue 31-37
- Forschende Stellen: ¹⁾ RWTH Aachen University, Lehrstuhl und Institut für Massivbau (IMB), Mies-van-der-Rohe-Straße 1, 52074 Aachen
²⁾ RWTH Aachen University, Lehrstuhl und Institut für Schweiß- und Fügetechnik (ISF), Pontstraße 49, 52062 Aachen
- erstattet von: Univ.- Prof. Dr.-Ing. Martin Claßen ¹⁾
Univ.- Prof. Dr.-Ing. Uwe Reisgen ²⁾
Dr.-Ing. Sisi Zhang ¹⁾
Jan Ungermann, M.Sc. ¹⁾
Konrad Mäde, M.Sc. ²⁾
Mirco Olesch, M.Sc. ²⁾
- Datum: Aachen, den 04.03.2024
- Projekt-Nr. IMB: F-2020-020

Dieser Bericht umfasst 139 Seiten Text.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Kurzfassung	III
Abstract	V
1 Einführung	1
1.1 Veranlassung	1
1.2 Zielsetzung	1
2 Grundlagen und Stand der Technik	3
2.1 Begrifflichkeiten	3
2.2 Additive Fertigungsverfahren	3
2.2.1 Überblick	3
2.2.2 Extrusionsverfahren	4
2.2.3 Systeme zur automatisierten Fertigung	5
2.3 Additive Fertigung von Beton	5
2.3.1 Betontechnologische Anforderungen	5
2.3.2 Druckköpfe für die Betonextrusion	6
2.3.3 Qualitätskontrolle	12
2.4 Schweißverfahren	13
2.5 Bewehrungsintegration	17
2.5.1 Anforderungen an den Betonstahl	17
2.5.2 Überblick der Verfahren zur Bewehrungsintegration	18
2.5.3 Analyse der verschiedenen Verfahren	21
2.5.4 Anforderungen an ein praxistaugliches Verfahren	23
2.5.5 Additive Manufacturing of Reinforced Concrete (AMoRC)-Verfahren	24
3 Entwicklung von Druckkopf und Schweißeinrichtung	26
3.1 Überblick Infrastruktur	26
3.1.1 Mischpumpensystem	26
3.1.2 Roboter	27
3.1.3 Schweißgerät	28
3.2 Entwicklung des Druckkopfes für den Stahlbetondruckprozess	29
3.2.1 Konzeptvorschläge und Prototypen	29
3.2.2 Entwicklung der variablen Gabeldüse	30
3.3 Entwicklung der Pistole für Bolzenschweißen	33
3.3.1 Pistolenentwicklung	34
3.3.2 Implementierung des Schweißprozesses	39
4 Experimentelle Untersuchungen zum Tragverhalten	41
4.1 Materialiencharakterisierung des 3D-gedruckten Betons	41
4.1.1 Grundlagen	41
4.1.2 Ausgangsmaterialien	46
4.1.3 Versuchsprogramme	47
4.1.4 Herstellung der Prüfkörper	47
4.1.5 Versuchsaufbau	49

4.1.6	Versuchsergebnisse	51
4.1.7	Fazit	54
4.2	Materialiencharakterisierung der geschweißten Stahlbewehrung	56
4.2.1	Verwendeter Werkstoff B500, OES, Oberfläche, Sauerstoff	56
4.2.2	Sichtprüfung von Schweißergebnissen	60
4.2.3	Metallographische Untersuchung der Schweißverbindung (Makro, Härte)	61
4.2.4	Zugversuche an Schweißverbindungen	63
4.3	Verbundverhalten zwischen Bewehrung und 3D-gedrucktem Beton	66
4.3.1	Grundlagen der Verbundprüfung	66
4.3.2	Stand der Technik – Verbund von Bewehrung in gedrucktem Beton	74
4.3.3	Ausgangsmaterialien	74
4.3.4	Versuchsprogramm	79
4.3.5	Herstellung der Prüfkörper	83
4.3.6	Versuchsaufbau	88
4.3.7	Versuchsergebnisse	88
4.3.8	Fazit	103
4.4	Querkraftverhalten von 3D-gedruckten Stahlbetonbalken	105
4.4.1	Versuchsprogramm	105
4.4.2	Herstellung der Prüfkörper	106
4.4.3	Versuchsaufbau und Messtechnik	110
4.4.4	Versuchsergebnisse	111
4.4.5	Fazit	125
4.5	Biegeverhalten von 3D-gedruckten Stahlbetonbalken	126
4.5.1	Ausgangsmaterialien	126
4.5.2	Versuchsprogramm	127
4.5.3	Herstellung der Prüfkörper	127
4.5.4	Versuchsaufbau und Messtechnik	128
4.5.5	Versuchsergebnisse	128
5	Prototypische Implementierung des AMoRC-Verfahrens	131
5.1	Allgemeines	131
5.2	Digitale Planung eines Demonstrators und Programmierung	131
5.3	Abmessungen und Aufbau des Demonstrators	132
5.4	Mockup und prototypische Prozessimplementierung	133
6	Zusammenfassung und Ausblick	137
7	Literaturverzeichnis	140
8	Abbildungsverzeichnis	150
9	Tabellenverzeichnis	154
Anhang		155

Kurzfassung

Die unterdurchschnittliche Entwicklung der Produktivität stellt die Baubranche zusammen mit dem demografisch bedingten Fachkräftemangel und dem steigenden Bedarf an Neubauten vor enorme Herausforderungen. Einen wichtigen Beitrag zur Entschärfung dieser Problematik kann die digitale Bauproduktion von Gebäudestrukturen mit neuartigen additiven Fertigungsverfahren leisten. Erste Pilotuntersuchungen zum 3D-Druck von Beton wurden – auch im Rahmen der Forschungsförderung Zukunft Bau – bereits erfolgreich durchgeführt und belegen die grundsätzliche Machbarkeit und das hohe Potenzial dieser Technologie. Die mit bisherigen Verfahren herstellbaren unbewehrten Betonbauteile sind allerdings nur in seltenen Fällen für den Einsatz in realen Bauwerken geeignet, da sie spröde versagen und unzureichende Tragfähigkeiten aufweisen.

Bisher ist weitestgehend ungeklärt, wie die für praxisrelevante Anwendungen erforderliche Betonstahlbewehrung in den Betondruckprozess integriert werden kann. Lösungsvorschläge für das Einbringen von Bewehrung sind bisher überwiegend konzeptioneller Natur, nur rudimentär erforscht und bleiben deutlich hinter den konkreten Ansätzen für das Drucken von unbewehrtem Beton zurück.

Die Entwicklung eines praxistauglichen Konzeptes zur Bewehrungsintegration in den Druckprozess ist folglich unabdingbar. Hier setzt das vorliegende vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung geförderte Forschungsprojekt an und beschäftigt sich mit der Entwicklung neuer Methoden für den 3D-Druck von bewehrtem Beton sowie mit der grundlegenden Untersuchung und Beschreibung des Tragverhaltens gedruckter Stahlbetonstrukturen. Grundlage für die im Projekt verfolgten Schritte der Prozessentwicklung bildet hierbei das „Additive Manufacturing of Reinforced Concrete“ (AMoRC)-Verfahren, das von den Antragstellern konzeptioniert wurde.

Der vorliegende Forschungsbericht stellt die wesentlichen Erkenntnisse und Forschungsergebnisse des Projektes zusammen.

In Kapitel 1 erfolgt eine grundlegende Einführung in die untersuchte Thematik. Kapitel 2 stellt den Stand der Technik im Hinblick auf additive Fertigungsverfahren im Bauwesen und die schweißtechnischen Grundlagen zusammen, um aufbauend hierauf geeignete Stahl- und Betondruckprozesse zu identifizieren, die im Projekt weiter zu erforschen sind.

Kapitel 3 beschreibt die Entwicklung eines neuartigen Druckkopfes für die Betonablage bei Bewehrungsintegration sowie die Bereitstellung einer innovativen Schweißeinrichtung für das Fügen von Bewehrungssegmenten.

Kapitel 4 beinhaltet die Ergebnisse experimenteller Untersuchungen zum Tragverhalten 3D-gedruckter Beton- und Stahlbetonbauteile. Neben der Charakterisierung des Materialverhaltens von 3D-gedrucktem unbewehrtem Beton und geschweißter Bewehrung, wird das Verbundverhalten der Bewehrung in additiv gefertigtem Beton, das Querkrafttragverhalten von gedruckten Stahlbetonbalken mit und ohne Querkraftbewehrung sowie das Biegetragverhalten von additiv gefertigten Stahlbetonbalken erforscht.

In Kapitel 5 werden die in Kapitel 3 entwickelten Fertigungsprozesse miteinander kombiniert und zusammengeführt. Das AMoRC-Verfahren wird erstmals prototypisch implementiert, um die grundlegende Umsetzbarkeit der additiven Fertigung des Verbundwerkstoffs Stahlbeton zu zeigen.

Kapitel 6 beinhaltet eine Zusammenfassung und einen Ausblick.

Die Resultate dieses erfolgreichen Forschungsprojektes stellen einen wesentlichen Erkenntnisgewinn dar und belegen die grundsätzliche Realisierbarkeit von Stahlbetonbauteilen mittels additiver Fertigungsverfahren. Es bedarf allerdings weiterer grundlegender Forschung, um die entwickelten neuartigen Verfahren zur Praxisreife zu führen.

Abstract

The below-average development of productivity, together with the demographically induced shortage of skilled workers and the increasing demand for new buildings, poses enormous challenges for the construction industry. Digital fabrication of building structures using innovative additive manufacturing processes can make an important contribution to alleviating this problem. Initial pilot studies on the 3D printing of concrete have already been successfully carried out - also as part of the Zukunft Bau research funding program - and demonstrate the fundamental feasibility and high potential of this technology. However, the unreinforced concrete components that can be produced using existing methods are only rarely suitable for use in real buildings, as they fail brittle and have insufficient load-bearing capacities.

It is still largely unclear how the reinforcing steel required for practical applications can be integrated into the concrete printing process. Proposed solutions for the integration of reinforcement have so far been mainly conceptual in nature, have only been rudimentarily researched and lag well behind the current approaches for printing unreinforced concrete.

The development of a practical concept for integrating reinforcement into the printing process is therefore essential. This is where the present research project, funded by the Federal Institute for Research on Building, Urban Affairs and Spatial Development at the Federal Office for Building and Regional Planning, comes in and deals with the development of new methods for the 3D printing of reinforced concrete as well as with the fundamental investigation and description of the load-bearing behavior of printed reinforced concrete structures. The basis for the process development steps pursued in the project is the "Additive Manufacturing of Reinforced Concrete" (AMoRC) process, which was conceptualized by the applicants.

This research report summarizes the key findings and research results of the project.

Chapter 1 provides a basic introduction to the topic under investigation. Chapter 2 summarizes the state of the art with regard to additive manufacturing processes in the construction industry and the basic principles of welding technology in order to identify suitable steel and concrete printing processes to be further researched in the project.

Chapter 3 describes the development of a new type of print head for concrete placement during reinforcement integration and the provision of an innovative welding device for joining reinforcement segments.

Chapter 4 contains the results of experimental investigations into the load-bearing behavior of 3D-printed concrete and reinforced concrete components. In addition to the characterization of the material behavior of 3D-printed unreinforced concrete and welded reinforcement, the bond behavior of the reinforcement in additively manufactured concrete, the shear load-bearing behavior of printed reinforced concrete beams with and without shear reinforcement and the structural bending behavior of additively manufactured reinforced concrete beams are investigated.

In Chapter 5, the manufacturing processes developed in Chapter 3 are combined and brought together. The AMoRC process is implemented as a prototype for the first time in order to demonstrate the fundamental feasibility of additive manufacturing of the composite material reinforced concrete.

Chapter 6 contains a summary and an outlook.

The results of this successful research project represent a significant gain in knowledge and demonstrate the fundamental feasibility of fabricating reinforced concrete components using additive manufacturing processes. However, further fundamental research is required to bring the new processes developed to practical maturity.

1 Einführung

1.1 Veranlassung

Das Baugewerbe stellt mit rund zwei Millionen Beschäftigten [Rei19] und einem Anteil von 10,9 % des BIP zwar einen der bedeutendsten Wirtschaftssektoren in Deutschland dar [Hau21], jedoch hat sich die Produktivität im Vergleich zu anderen Branchen nur unterdurchschnittlich entwickelt [Ber19; Hau21]. Dem seit Jahren steigenden Hochbauvolumen [Gor21] und der stabilen Wohnnachfrage [Hel15] stehen derzeit ausgeschöpfte Kapazitäten des Baugewerbes [Bun18] gegenüber, die in Verbindung mit dem zu erwartenden Fachkräftemangel infolge des demografischen Wandels kritisch zu betrachten sind [Hau21]. Dies ist auf den geringen Innovationsgrad und die überwiegend konventionellen Herstellungsverfahren im Bauwesen zurückzuführen, die einen hohen Personal- und Zeitaufwand erfordern. Zukünftig sind radikale Veränderungen des Bauwesens zur Vermeidung von Kapazitätsengpässen erforderlich. Hier kommt digitalen Gesamtprozessen und neuen Bauverfahren eine Schlüsselrolle zu. Neben modularen Bauweisen können additive Fertigungsverfahren für Beton, der aufgrund der einfachen Herstellung bei hoher Leistungsfähigkeit der weltweit mit Abstand wichtigste Baustoff ist, einen signifikanten Beitrag leisten.

Das in Deutschland von PERI umgesetzte Projekt eines 3D-gedruckten Wohnhaus [Per24] unterstreicht eindrucksvoll die grundsätzliche Anwendbarkeit automatisierter Bauverfahren und die enormen Möglichkeiten zur Produktivitätssteigerung. Allerdings reichen die bisher verfolgten additiven Fertigungskonzepte für unbewehrte Betonbauteile in vielen Fällen nicht aus, um die in realen Bauwerken auftretenden Beanspruchungen zuverlässig abzutragen. Ein automatisiertes Herstellungsverfahren für Stahlbeton fehlt hingegen, was den weiteren Forschungsbedarf verdeutlicht. Erste Ansätze [Kho04] sind zwar vielsprechend, allerdings wird die Bewehrung oftmals händisch eingefügt oder nur zwischen den Lagen automatisiert abgelegt. Für das Tragverhalten ist jedoch insbesondere die Bewehrung senkrecht zur Extrusionsrichtung von wesentlicher Bedeutung. Zur Entfaltung des immensen Potentials neuer Bauverfahren im Stahlbetonbau sind dringend digitale und praxistaugliche Konzepte erforderlich, die umfassende händische Arbeiten vermeiden und zum anderen die Qualität (Tragfähig- & Dauerhaftigkeit, Verbund usw.) der Strukturen sicherstellen.

Die in diesem Projekt entwickelten Methoden bilden eine erste Grundlage, um die bisher getrennten, arbeits- und kostenintensiven Arbeitsschritte des Bewehrens, Schalens und Betonierens durch einen kombinierten Gesamtprozess zu ersetzen. Auch geometrisch komplexe Strukturen können so ressourceneffizient und effektiv ohne Schalung gestaltet werden. Die Verwendung flächendeckend und kostengünstig verfügbarer Materialien fördert das Potential additiver Fertigungsverfahren im Stahlbetonbau und wird die Bauart in Zukunft prägen. Neben dem signifikanten Beitrag zur Weiterentwicklung der digitalen Prozess- und Wertschöpfungskette adressiert das Projekt mit der Senkung von Bau- und Lebenszykluskosten und der Etablierung klima- und umweltfreundlicher Bauweisen wesentliche Herausforderungen der Baubranche.

1.2 Zielsetzung

Die grundlegende Erforschung von Prinzipien zur Realisierung neuer 3D-Druckverfahren für Stahlbeton ist Gegenstand des vorliegenden Forschungsberichtes. Die Analyse des Standes der Forschung zeigt, dass die Bewehrungsintegration in 3D-gedruckte Betonelemente eine

kritische Herausforderung darstellt, für die es bisher noch keine zufriedenstellenden Lösungen gibt. In diesem Projekt wurden daher neuartige, an praktischen Anforderungen orientierte additive Fertigungsmethoden für Stahlbeton völlig neu konzipiert und grundlegend erforscht. Beispielfür die Realisierbarkeit solcher Methoden sei das an der RWTH Aachen entwickelte AMoRC-Verfahren [Cla20a; Cla20c] genannt, bei dem konfektionierte Betonstabstähle abschnittsweise mit einem Schweißverfahren zu einem dreidimensionalen Bewehrungsnetz gefügt und simultan mit einem Beton-Extrusionsprozess umdruckt werden. Das Projekt hat die grundlegende Entwicklung und prototypische Umsetzung dieses Verfahrens zum Ziel.

Neben der Entwicklung neuartiger 3D-Druckprozesse für Stahlbeton wurden die mechanischen Eigenschaften des gedruckten Betons (z.B. Fugen zwischen gedruckten Betonschichten), des Bewehrungsstahls sowie des gedruckten Verbundwerkstoffs charakterisiert. Die beteiligten Institute brachten hierbei ihre Expertise zum Beton-3D-Druck (IMB) sowie zum Stahl-3D-Druck und Bewehrungsstahlschweißen (ISF) ein. Die hochkomplexe und bisher nicht erforschte Kombination beider Prozesse war Bestandteil dieses Vorhabens und wurde prototypisch umgesetzt.

2 Grundlagen und Stand der Technik

2.1 Begrifflichkeiten

Die Entwicklung neuer Fertigungsverfahren ist ein dynamisches Umfeld, in dem fortlaufend neue Verfahren entstehen und eine Vielzahl von Bezeichnungen für die verschiedenen Ansätze verwendet werden. Um die für dieses Projekt relevanten Verfahren darzulegen, folgt zunächst eine Einordnung und Begriffserklärung. [DIN8580:2003-09] unterteilt die unterschiedlichen Varianten von Fertigungsverfahren in insgesamt sechs Hauptgruppen und mehrere Untergruppen. Die Hauptgruppen definieren die Art des Zusammenhalts der Teile, also ob ein Körper geschaffen, umgeformt, vermindert oder vermehrt wird. Die Hauptgruppe 1 ('Urformen'), zu der das für den Betonbau übliche Gussverfahren gehört, sowie Hauptgruppe 4 ('Fügen') definieren Fertigungsverfahren, bei denen Bauteile im Ganzen oder schichtweise hergestellt werden. Für die schichtweisen Herstellungsverfahren wird heute vielfach der Begriff '3D-Druck' genutzt. Die passendere Bezeichnung lautet jedoch 'Additive Fertigungsverfahren' (im Englischen: 'Additive Manufacturing') und ist unter Richtlinie VDI 3405 als Norm definiert [Kra21].

2.2 Additive Fertigungsverfahren

2.2.1 Überblick

Bei additiven Herstellprozessen wird ein dreidimensionales, virtuelles Objekt automatisiert in mehrere, zweidimensionale Schichten zerlegt und bei der Ausführung des Fertigungsprozesses schichtweise aufgebaut. Die Schichten werden in der x-y Ebene erstellt, wobei die Schichtdicke in der Regel konstant gehalten wird. Die dritte Dimension entsteht folglich durch das Schichtbauprinzip, weshalb diese Herstellungsart auch als '2,5 D-Verfahren' bezeichnet wird [Kra21].

Eine weitere Unterteilung der Druckverfahren ist nötig, um den Vorgang möglichst genau zu definieren. Insgesamt gibt es 7 Arten von additiven Verfahren, welche in 2 Oberkategorien, die sog. 'selektive Festigung' und 'anlagernde Verfahren', unterteilt werden [Kra21]. In Tabelle 2.1 sind die jeweiligen additiven Verfahren zusammengestellt. In diesem Projekt werden Betonbauteile behandelt, die mittels Extrusion hergestellt werden.

Tabelle 2.1: Unterteilung additiver Fertigungsverfahren [Kra21]

	Additive Verfahrensfamilie	Druckprinzip	Ausgangsstoff
Selektive Festigung	Stereolithographie	-Polymerisieren	Fotosensible Kunststoffe, v. a. Kunstharze
	Sintern	- Aufschmelzen im Pulverbett - Erstarrung	Kunststoffe, Minerale, Metalle in Pulverform
	Three Dimensional Printing (3DP)	- Einspritzen eines Binders auf ein Pulverbett - Erhärtung	Formsand, Metall- und Keramikpulver, Kunststoffpulver
	Aerosol-Drucken	- Sprühverneblung (Aerosolbildung) - präzises Aufbringen - Verdampfung und Verfestigung	Substrate aus nahezu allen Materialien
Anlagernde Verfahren	Extrusion	- Aufschmelzen (wenn erforderlich), - Ausbringen und Aufeinanderschichten - Erstarrung / Erhärtung	Thermoplastische Kunststoffe Pastöse Werkstoffe, z. B. Beton
	Schicht-Laminat-Verfahren	- Folien oder Platten konturieren - Fügen (i. d. R. Kleben)	Papiere, Kunststoffe, Metalle, Keramiken in Folienform
	Laser Chemical Vapor Deposition (LCVD)	- Chemisches Oxidieren über Laserenergie	- Aluminiumhaltiges Gas

2.2.2 Extrusionsverfahren

Beim Extrusionsverfahren wird ein vorgemischtes Material durch eine formgebende Öffnung (Düse) gepresst. Dieser Herstellungsprozess wird vor allem in der Kunststoffverarbeitung genutzt, da ein Produkt in beliebiger Länge gedruckt werden kann und vor allem in der Serienproduktion genutzt wird [Gil05].

Tabelle 2.2: Filamentkategorien [Pla22]

Kategorie	Filamentbreite [mm]
Feinfilamentablage	≤10
Mittelfilamentablage	≤50
Grobfilamentablage (Vollwandiger Betondruck)	≤100

Die Anwendung im Bauwesen erfolgt analog zur Kunststoffindustrie, jedoch handelt es sich beim Material z. B. um Beton. Dieser wird außerhalb gemischt und mittels einer Extruderschnecke zum Mundstück geleitet. Hier entsteht positionsgenau ein extrudiertes Filament. Ne-

ben der Verwendung ortsfester Mundstücke (z.B. [Bos23; Kal23]) kann das Mundstück an einen beweglichen Roboterarm montiert und entlang des vordefinierten Druckpfads verfahren werden, um einen Auftrag schichtweise zu realisieren. Die Abmessungen des Filaments haben einen maßgeblichen Einfluss auf die Druckauflösung [Pla22] und werden in die in Tabelle 2.2 dargestellten drei Kategorien eingeteilt. Um ein fehlerfreies und hochwertiges Bauteil herzustellen, müssen vor allem die Betoneigenschaften optimal abgestimmt werden, was in Kapitel 2.3 detailliert erläutert wird.

2.2.3 Systeme zur automatisierten Fertigung

Abhängig vom geplanten Projekt und Fertigungsverfahren ist die Wahl eines automatisierten Systems nötig, um den Druckkopf während des Drucks zu führen. Aufgrund der zügig voranschreitenden Entwicklung gibt es mittlerweile eine Vielzahl von Systemen, welche im Bereich der additiven Betonfertigung genutzt werden können. Insgesamt kann man vier grundlegende Kategorien unterscheiden [Pla22]. Diese umfassen stationäre Fertigungsanlagen [Kra21; Pla22] [WAS], Faltarmsysteme [Pla22], Knickarmroboter [CyB] und weitere Lösungen (z. B. Aerial AM [Zha22]) sind in Bild 2.1 dargestellt.

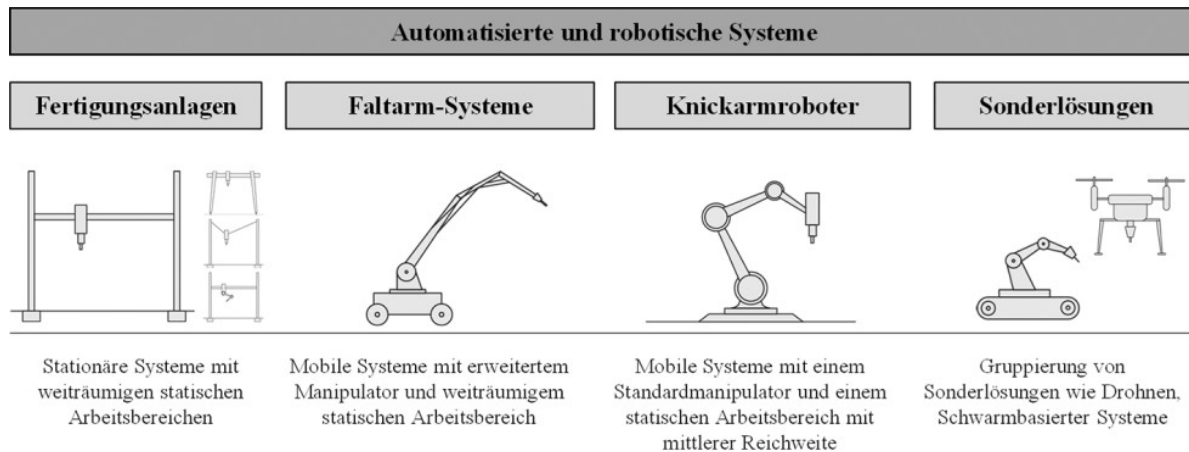


Bild 2.1: Automatisierte und robotische Systeme [Pla22]

2.3 Additive Fertigung von Beton

2.3.1 Betontechnologische Anforderungen

Der wesentliche Vorteil additiver Fertigungsprozesse gegenüber klassischen Beton-Gussverfahren ist die freie Formgebung, für die keine Schalung benötigt wird. Die Anforderungen an Formstabilität und Festigkeit an das Druckmaterial während des Druckprozesses wird maßgeblich durch die rheologischen Parameter Thixotropie, Fließspannung und Viskosität beschrieben. Der Druckprozess gliedert sich grundsätzlich in drei konsekutive Phasen [Wol18b]:

1. Vor dem Auftragen („pre-deposition stage“)
2. Während des Auftragens („in-print stage“)
3. Nach dem Druckvorgang („after printing“)

Pre-deposition stage bezeichnet die Phase vor der Extrusion, in der sich der Beton noch im „System“, d. h. im fließfähigen Zustand zwischen Pumpe, Schlauch und Druckkopf. Hier ist folglich die Pumpbarkeit des Frischbetons zu gewährleisten. Auf der einen Seite darf es zur nahtlosen Förderung von Frischbeton bis zur Düse nicht zu Verstopfungen in Schnecke,

Schlauch oder Düse kommen, was maßgeblich durch die Viskosität und Fließspannung beeinflusst wird. Auf der anderen Seite ist eine Entmischung des Materials zu verhindern, was in der Regel auf unzureichendes Mischen vor dem Pumpen zurückzuführen ist.

Post-deposition/ in-print stage bezieht sich auf die Phase der Extrusion des Betons. Der geförderte Frischbeton soll während des Extrusionsprozesses eine stabile Konsistenz aufweisen, damit das Filament die gewünschte Form behält. Hierbei stellt die Reibung im Schlauch eine zusätzliche Herausforderung dar, die zu veränderten rheologischen Eigenschaften führen [Jan18; Moh21]. Dies ist zum einen auf die während des Pumpvorgangs entstehende Schmier-schicht (eng.: lubrication layer LL) zwischen Schlauch und dem fließenden Material zurückzuführen, die die Förderfähigkeit im Drucksystem durch eine verringerte Reibung verbessert. Zum anderen kommt es zum Temperaturanstieg des Betons durch die Reibung zwischen Beton und Schlauch, was wiederum zur Abnahme der Viskosität führt.

Die sich gegenseitig wirkenden Effekte führen zu teilweise widersprüchlichen Beobachtungen in der Literatur. Hierbei wurde beispielsweise von unterschiedlichen w/z -Verhältnissen (Wasser/Zement) im Laufe des Pumpvorgangs berichtet [Fey16; Kwo16]. Die gedruckten Filamente sollen einerseits schnellstmöglich formstabil sein und andererseits „frisch“ genug, damit ein guter Verbund der unterschiedlichen Schichten möglich ist. Hierzu darf der Hydratisierungsprozess noch nicht so weit fortgeschritten sein, dass „kalte Fugen“ entstehen. Eine zu flüssige Konsistenz kann jedoch zu ungewollten Verformungen führen [Wol18b]. Hierbei kommt dem Zeitabstand zwischen der Ablage aufeinander folgender Schichten eine zentrale Bedeutung zu. Einen Anhaltspunkt liefert die Formel zur Berechnung des kritischen Zeitintervalls in [Ner20]. In [Kra21] sind mehrere Ansätze zusammengestellt, die die kraftschlüssige Verbündung unterschiedlicher Druckabschnitte ermöglichen.

After printing stage beschreibt die Phase nach dem Druckprozess, in der sich der Beton idealerweise in einem ausgehärteten Zustand befindet. Der Verzicht auf Schalungen als Hauptvorteil beim 3D-Betondruck führt jedoch auch zum Wegfall der Barriere zwischen aushärtendem Beton und der Umwelt. Die exponierte Oberfläche ist folglich größer als beim Gussverfahren, was in Kombination mit den für 3DCP-Mörteln niedrigen w/z -Verhältnissen die Wahrscheinlichkeit von Schwindrissen erheblich erhöht. Daher werden in verschiedenen Studien Zusatzmittel zur Reduzierung der Schwinddehnungen [Bus18] eingesetzt.

Folglich sind die Anforderungen an den Frischbeton komplex: Zu Beginn soll das Material mischbar und pumpbar sein, sodass eine geringe Fließspannung präferiert wird. Sobald das Material jedoch die Düse verlässt, soll es schnellstmöglich aushärten, um eine stabile Grundlage für die folgenden Schichten zu bilden. Andererseits muss die Aushärtung jedoch verzögert werden, sodass zur ausreichenden Verbundtragfähigkeit ein Auftreten von kalten Fugen vermieden wird.

2.3.2 Druckköpfe für die Betonextrusion

Der Druckkopf dient dazu, den flüssigen Beton präzise und kontrolliert auf das Druckbett aufzutragen. Er wird auch als Extrudermundstück bezeichnet und besteht aus einer Düse, die ggfs. durch zusätzliche Komponenten ergänzt werden. Die Wahl des passenden Druckkopfes ist elementar für einen erfolgreichen 3D-Betondruckprozess. Die unterschiedlichen Varianten von Düsen und weiterer Komponenten werden im Folgenden erläutert.

Düse

Die Form und Abmessungen der Düse bestimmen die Filamentabmessungen und haben Einfluss auf die mögliche Förderrate. Die Düse muss an die Fördermengen angepasst sein, da es andernfalls zu erhöhter Reibung und resultierender Temperatursteigerung kommen kann. Eine größere Düse ermöglicht eine hohe Druckgeschwindigkeit, jedoch kann sie die Ablage komplexerer Umriss erschweren, für die eine kleine Düse zu präferieren ist [Wol19]. Zur Verhinderung von Verstopfungen ist die Düse an die Viskosität des Betons anzupassen [Rei22].

In den bisher durchgeführten Untersuchungen wurden rechteckige und runde Düsen verwendet. Die genauen Düsenabmessungen werden in den Studien meist nicht genannt, sodass eine Analyse erschwert wird.

Runde Düsenöffnung: Einer der Vorteile bei Verwendung von runden gegenüber rechteckigen Düsenöffnungen ist, dass komplexere Umriss und gekrümmte Druckpfade ohne Drehung des Druckkopfes realisiert werden können, wodurch es nicht zu Verdrehungen des Schlauches kommen kann.

In [Rei22] wurden numerische Simulationen zum Einfluss verschiedener Düsenradien bei gleicher Fördermenge durchgeführt. Bei größerem Radius sinkt die Abrundung der Filamentoberfläche und der Filamentquerschnitt wird rechteckiger. Bei Verringerung des Radius der Düse wird das Filament breiter und runder.

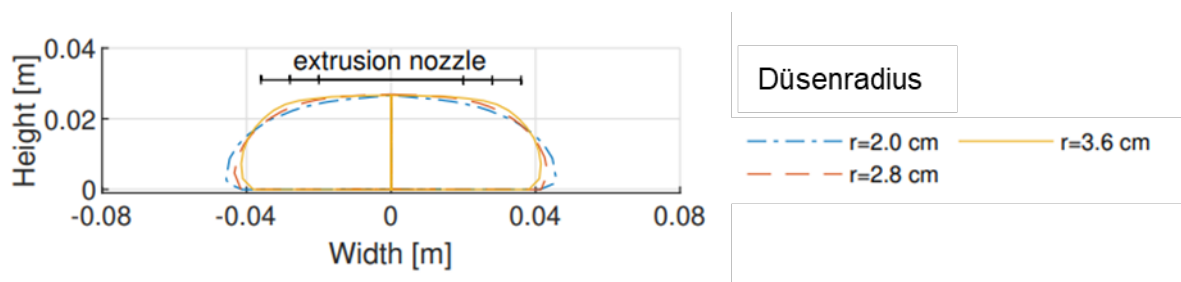


Bild 2.2: Filamentabmessung in Abhängigkeit des Düsenradius [Rei22]

Rechteckige Düsenöffnung: Bei rechteckigen Düsenöffnungen muss die Düse immer senkrecht zum Druckpfad gerichtet sein. Dies kann sich bei komplexeren Umrissen als schwierig herausstellen. Die Seitenflächenverarbeitung des erstellten Körpers ist jedoch besser als bei runden Düsenöffnungen [Sha19], sodass eine insgesamt gleichmäßigere Oberflächenqualität erzielt werden kann.

Methoden der Filamentablage

Es gibt insgesamt zwei Varianten zur Extrusion des Filaments sowie die Möglichkeit zur Kombination beider Systeme [Wol19]. Die Down-flow- und Back-flow-Düse sind in Bild 2.3 (a) und Bild 2.4 dargestellt. Die Kombination der Varianten zeigt Bild 2.3 (b) (Back-and down-flow-Düse).

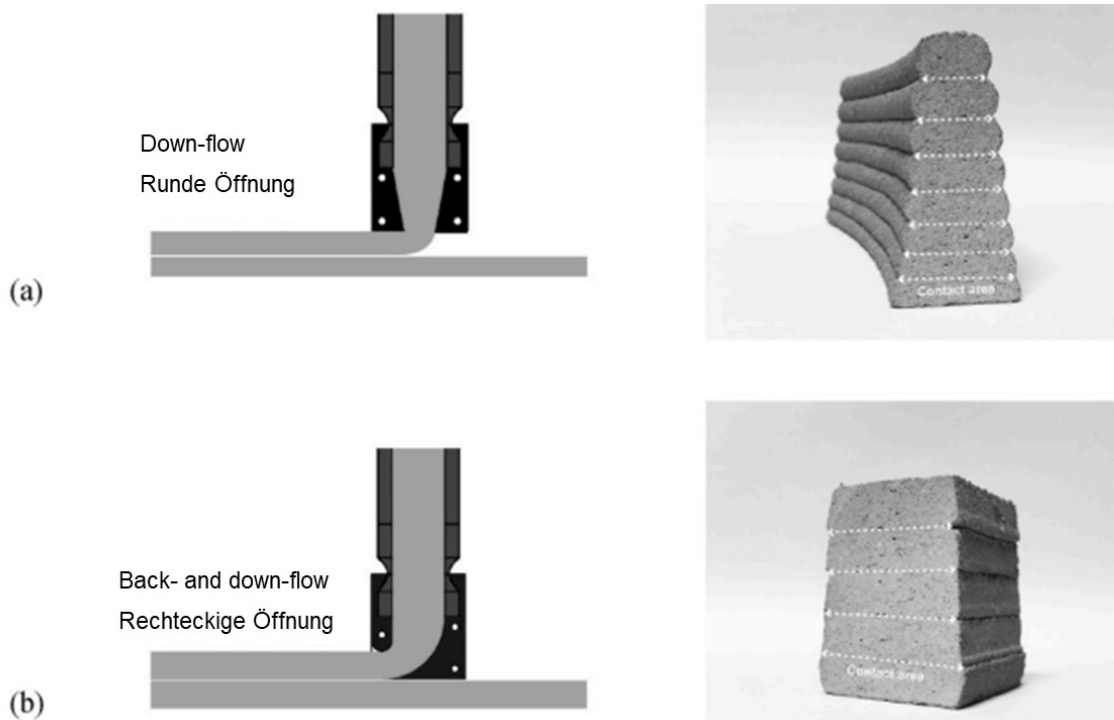


Bild 2.3: Darstellung unterschiedlicher Methoden zur Filamentablage [Che22]

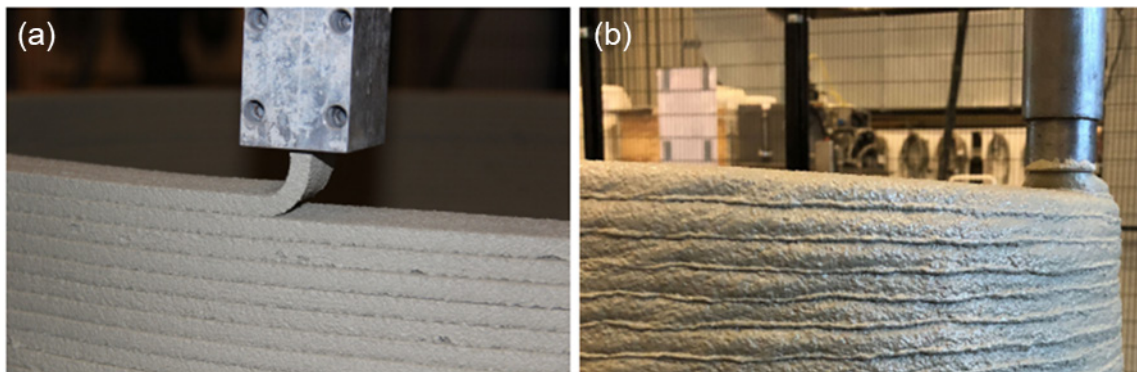


Bild 2.4: Down-flow-Düse (a) ohne, und (b) mit Scheren [Wol19]

Die Wahl der Düsenvariante bestimmt folglich, ob es einen Abstand zwischen Düse und Druckplatte, respektiv bereits positioniertem Filament gibt. Ebenfalls variiert die Kontaktfläche unter den einzelnen Schichten bei der Down-flow-Düse [Che22]. Hierzu muss man aber erwähnen, dass dies potenziell auch auf die rheologischen Eigenschaften des Frischbetons zurückzuführen ist. Der Abstand der Düse zu der geplanten Druckplatte hat einen erheblichen Einfluss auf beispielsweise den Verbund zwischen den Filamenten [Rei22].

Down-flow Variante: Bei der Down-flow Variante wird das Filament mit einem zuvor festgelegten Abstand auf die unterliegende Schicht extrudiert. Hierbei kann weiter zwischen Extrusion mit (Bild 2.4 (a)) und ohne Scheren (Bild 2.4 (b)) des Materials unterschieden werden. Bei der erstgenannten Variante wird das geförderte Material nicht geschert, wodurch die Form des Filaments durch die Düsenabmessung vorgegeben wird. Das Filament ist insgesamt steifer, wodurch ein hoher Förderdruck notwendig ist jedoch eine verbesserte geometrische Kontrolle ermöglicht wird [Wol19]. Bei der zweiten Variante wird das Material beim Extrusionsvorgang durch die Verengung in der Düse geschert, Die finale Form des Filaments wird durch die Scherkraft und das Eigengewicht des Filaments bestimmt [Wol19].

Hierbei muss das untere Filament sowohl das Eigengewicht der neuen Schicht als auch die von der Düse erzeugte Auftragskraft tragen. Diese Kraft kann um ein Vielfaches höher sein als die Kraft des Eigengewichtes und ist somit in der Prozessplanung zu berücksichtigen. Überschreitet die Belastungskombination die Fließgrenze der unteren Schicht, ist ein Materialversagen dieser zu erwarten [Rei22]. In [Rei22] werden die von der Düse verursachten Kräfte bei geringem Düsenabstand auf die bereits gedruckten Schichten genauer analysiert.

Back-flow Variante: Bei der Back-flow-Variante wird das Filament praktisch horizontal abgelegt, wodurch das Filament kontinuierlicher extrudiert wird. Zudem erfolgt die Filamentablage nahezu kraftlos, sodass lediglich das Filamenteigengewicht von den bereits platzierten Filamenten aufzunehmen ist. Diese Variante wurde beispielsweise an der TU Eindhoven verwendet, um ein Stahlseil in die Filamentablage zu integrieren (genauere Erläuterung in Kapitel 2.4). Laut [Wol19] konnten die einzelnen Schichten aufgrund unzureichender Anbindung per Hand gelöst werden.

Back-and down-flow-Variante: Ein Nachteil der back-flow-Variante ist der potenziell schlechtere Verbund aufgrund des fehlenden Anpressdrucks von der von der Düse. Zudem ist die Einhaltung des genauen Abstands zwischen Düse und oberster Filamentlage einzuhalten, was sich ab einer gewissen Schichtanzahl als schwierig erweisen kann. In [Wol19] wurden daraufhin die beiden Varianten kombiniert und eine Hybriddüse entworfen, um die oben genannten Vorteile zu kombinieren.

Die resultierende Back-and down-flow Variante ist eine Kombination aus beiden oben genannten Ausführungsvarianten. Bei der Back-and down-flow Variante wird das Filament, ähnlich wie bei der Back-flow-Düse, auf das unterliegende Filament aufgelegt. Der Vorteil ist, dass die Kontaktfläche zwischen den Filamenten größer ist als bei der Down-flow-Variante, wodurch der Prüfkörper während des Druckprozesses stabiler ist. Ebenfalls sind schnellere Fördergeschwindigkeiten möglich.

Optionale Komponenten am Druckkopf

Der Druckkopf kann bspw. durch nachfolgende Komponenten optional erweitert werden:

Verschlussystem: An der TU Dresden wurde ein Verschlussystem für den Druckkopf entwickelt, das die Herstellung von Öffnungen und Wandecken ermöglichen soll (Bild 2.5). Das Ziel ist eine präzisere Extrusion, sowie die Veränderung des Düsenquerschnitts während des Druckvorgangs [Mec19]. Aus der Druckkopfergänzung ergeben sich jedoch zusätzliche Anforderungen an den Frischbeton: Das Material kann nur mit geringem Pumpendruck gefördert werden und erfordert hochfließfesten thixotropen Beton [Mec19]. Diese Bedingungen schränken die Anwendung bei Großprojekten auf der Baustelle ein [Mec19].

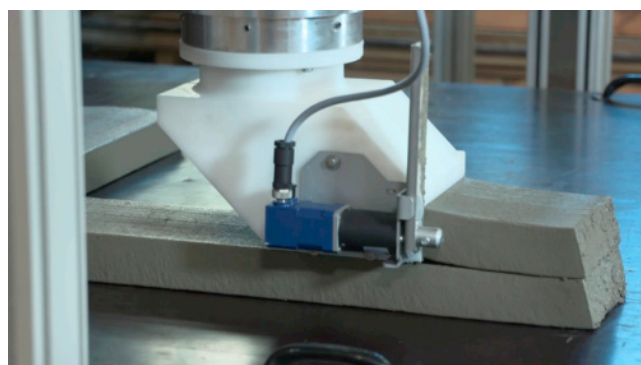


Bild 2.5: Druckkopf mit Schließmechanismus [Mec19]

Kamera: In [Kaz19] hat die USC in Los Angeles eine Methode zum Prüfen der Extrusionsqualität auf Basis von Bildverarbeitung vorgestellt (Bild 2.5). Eine Logitech 720p Kamera wurde mit einem Abstand von 40 cm zur Druckfläche am Druckkopf befestigt. Mithilfe eines Algorithmus werden die gesammelten Daten analysiert, um zu beurteilen, ob die gewünschte Fördermenge vorliegt. Darauf aufbauend kann die Drehzahl der Pumpe je nach Bedarf entsprechend angepasst werden. Diese Ergänzung des Druckkopfes bietet also die Möglichkeit einer Echtzeit-Qualitätskontrolle und einer automatisierten Anpassung des Materialbedarfs.

Distanzsensor: An der TU Eindhoven wurde ein Sensor zur Abstandsmessung zwischen Düse und Druckfläche entwickelt (Bild 2.6). Der Sensor leitet die gemessenen Daten an die Steuereinheit weiter. Darauf aufbauend kann die Positionierung des Roboters automatisch angepasst werden. Zur Verhinderung übermäßiger Vibrationen erfolgt die Anpassung über die Berechnung der Durchschnittshöhe [Wol18a].



Bild 2.6: Druck auf unebene Druckfläche mithilfe eines Distanzsensors [Wol18a]

Die vielversprechenden Resultate des Abstandssensors lassen eine Ausweitung der Verwendung von Echtzeit-Messgerät erwarten. Messungen physikalischer und chemischer Bedingungen bieten das Potential zur konstanten Einhaltung hoher Druckqualitäten (Messung der Betontemperatur, Oberflächenfeuchtigkeit und Umgebungsluftfeuchtigkeit) [Wol18a].

Zufuhr für Beschleuniger im Druckkopf: Um die bereits zuvor genannten Widersprüche der Frischbetoneigenschaften zu überwinden und eine schnelle Erhärtung nach dem Extrusionsvorgang zu ermöglichen, wird üblicherweise Beschleuniger hinzugegeben. Da das Beimischen von Beschleunigern im Mischpumpensystem zu Verstopfungen des Schlauches führen kann, wurden bereits Systeme entwickelt, die die Zufuhr von Beschleunigern im Druckkopf erlauben. Zum einen kann hierzu ein dynamischer Mischer im Druckkopf integriert werden, alternativ kann das sogenannte Twin-Pipe-Pumpensystem zu Anwendung kommen. Letzteres besteht aus einer Mischeinheit und zwei separaten Pumpen. Während des Druckvorgangs wird eine zementbasierte Mischung (ohne Beschleuniger) und eine kalksteinbasierte Mischung (mit einem hohen Anteil an Beschleuniger) gefördert und im Druckkopf gemischt. Durch das schnelle Erhärten ist das Drucken von geneigten Spannbetontträger (etwa 20 Grad) möglich [Oom22].

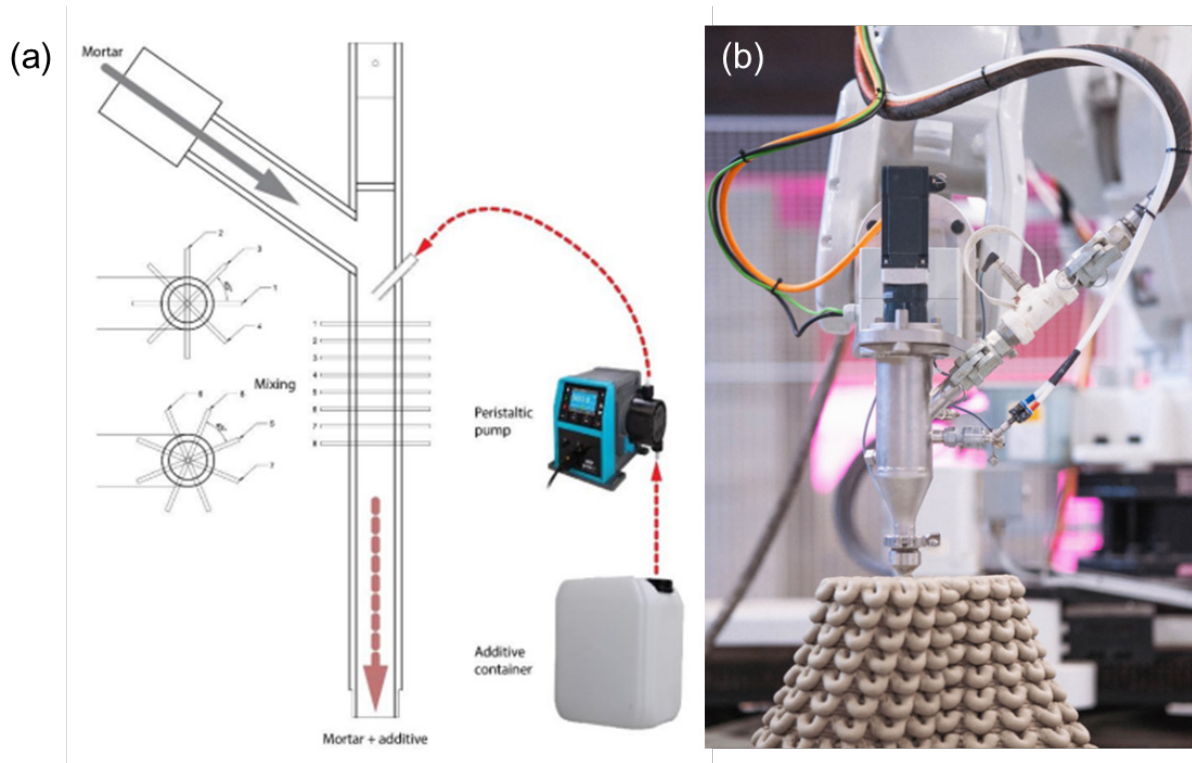


Bild 2.7: Druckkopf mit Beschleunigerzufuhr von dynamischem Mixer (a) [van19a]; (b) [Fir22]

Die Firma Vertico hat einen Druckkopf entwickelt, der kurz vor der Düse Beschleuniger dem geförderten Frischbeton beimischt. Dies ermöglicht komplett neue Freiheiten im Entwurf, wie zum Beispiel Auskragungen von bis zu 60 Grad, da das Material innerhalb von wenigen Sekunden aushärtet. Die Steuerung des Druckkopfes läuft über ein "centralised Human Machine Interface (HMI)", welcher mit der Multimix Mai Pumpe kombiniert werden kann [Dru22; Fir22]. Ebenfalls sind mehrere Drucksensoren, Temperaturmesser und Luftfeuchtigkeitssensoren in den Druckkopf verbaut, welche in Echtzeit ausgelesen werden können [Dru22]. Hohe Fördermengen können jedoch eine Anwendungsgrenze für solche Art von Druckköpfen darstellen [Mec19].



Bild 2.8: Funktionsweise eines statischen Mischelementes (Querschnitt links ohne Mischelement, rechts nach Einbau des Elementes) [van19a]

Oberflächennachbearbeitung: Der Entfall von Schalungen beim 3D-Betondruck bringt unebene Seitenflächen und deutlich erkennbare Schichtmuster an der Bauteiloberfläche mit sich.

In [Kho04] wurde deswegen vorgeschlagen eine oder zwei Spachteln am Druckkopf mitzuführen, um Seitenflächen nach der Extrusion zu glätten. In [Kho04] sind diese Spachtel dank eines integrierten Kontrollsystems steuerbar, wodurch eine freigestaltbare Oberfläche möglich ist.

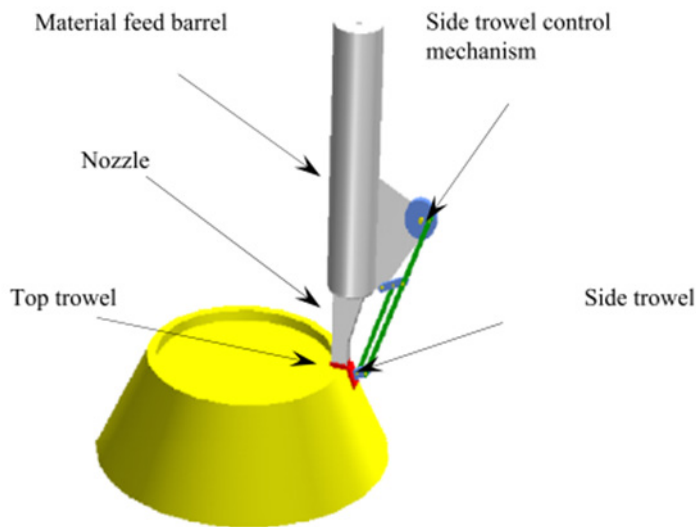


Bild 2.9: Druckkopf mit integriertem verstellbarem Spachtel [Kho04]

2.3.3 Qualitätskontrolle

Die Charakterisierung der Eigenschaften des Frischbetons spielt für die Qualität des herzustellenden Bauteils eine entscheidende Rolle, da die rheologischen Eigenschaften des Betons Auswirkungen auf verschiedene Aspekte haben (bspw. Fördermenge und Düsenquerschnitt). Die zur Überprüfung der rheologischen Eigenschaften geeigneten Prüfverfahren sind in Tabelle 2.3 aufgeführt.

Tabelle 2.3: Unterschiedliche Charakterisierungsmöglichkeiten für Frischbeton

Rheometer	Beton wird unter Scherbelastung getestet. Es wird in der Regel eine vorgegebene Scherrate oder Schubspannung aufgebracht und die resultierende Verformung des Betons gemessen. [Mec21]
Extrusionsversuch (Reguliertes Fließen)	Das Material wird durch eine Düse gedrückt und die erforderliche Kraft sowie Extrusionsgeschwindigkeit wird gemessen. Hieraus kann eine Fließkurve erstellt werden [Mec21]
Schwerkraft-induziertes freies Fließen	Methoden wie das Setzfließmaß sind bereits gängige Testarten, bei der die Ausbreitung des Frischbetons unter Eigengewicht gemessen wird. Eine ähnliche Vorgehensweise des oben beschriebenen Extrusionsversuchs wird bei dem Trichterauslaufzeitverfahren angewendet. Dabei wird die Durchlaufzeit des Frischbetons durch einen Trichter gemessen. Ein weiteres Prüfverfahren ist der Ausbreitversuch. Auf einem Ausbreittisch wird eine Form platziert und mit Beton gefüllt. Dieser wird dann mit einer Kelle verdichtet und später 15-mal bis zum Anschlag gehoben und ruckartig fallen gelassen. Danach wird die Ausbreitung des Betons gemessen und dadurch die Konsistenz bestimmt. [DIN EN 12350-5:2019-09]

Um die zeitabhängigen, rheologischen Eigenschaften zu prüfen, eignen sich unter anderem folgende Prüfverfahren in Tabelle 2.4.

Tabelle 2.4: Unterschiedliche Prüfverfahren zur Messung der rheologischen Eigenschaften

Einaxialer Druckversuch	Beim Druckversuch wird der frische Beton durch eine Platte vertikal belastet und die vertikale und die horizontale Ausdehnung werden gemessen. Hieraus kann ein Spannungs-Dehnungsdiagramm des Frischbetons erstellt werden. [DIN18136:2003-11]
Ultraschall	Mithilfe von Ultraschall ist es möglich, den Erstarrungs- und Erhärtungsprozess des Betons kontinuierlich zu messen. Dabei wird die Ultraschallgeschwindigkeit im Prüfkörper gemessen, wodurch, zerstörungsfrei, die Veränderung des E-Moduls aufgezeichnet werden kann. [DINEN12504-4:2021-10]
Penetrationsversuch	Beim Penetrationsversuch wird der Widerstand gemessen, der beim Eindringen einer Nadel in den Beton entsteht. Dabei wird die Kraft in Abhängigkeit der Eindringtiefe gemessen, um Schlussfolgerungen über die Robustheit des Betons zu treffen. [DINEN480-2:2006-11]

2.4 Schweißverfahren

Das Lichtbogenbolzenschweißen mit Hubzündung ist ein Schmelzschweißverfahren mit einem elektrischen Lichtbogen als Wärmequelle, das sich von anderen Lichtbogenverfahren unterscheidet und speziell für Anwendungen zum Fügen von Halbzeugen in zylindrischer Form entwickelt wurde. Traditionell wird dieses Verfahren zum stoffschlüssigen Aufbringen von Bolzen auf ein ebenes Substrat verwendet. Dazu wird der Bolzen, der mit dem Werkstück verschweißt werden soll, in die Schweißpistole eingespannt. Zu Beginn des Prozesses muss ein elektrischer Kontakt zwischen den beiden Fügepartnern hergestellt werden. Während zwischen dem Bolzen in der Pistole und dem Werkstück eine Spannung angelegt wird, erfolgt eine Anhebung des Bolzens gegenüber dem Werkstück. Durch die Ionisierung des Gases entsteht ein Lichtbogen. Das bedeutet, dass die Luft in unmittelbarer Nähe des Bolzens elektrisch leitfähig wird, da die Elektronen in der Luft durch die angelegte Spannung beschleunigt werden. Sobald der Lichtbogen brennt, bilden Bolzen und Werkstück ein Schmelzbad. Nach einer Schweißzeit t_w wird der Bolzen durch die Hubbewegung in einer definierten schnellen Bewegung auf das Werkstück gepresst. Dabei verkürzt sich der Lichtbogen und der Schweißstrom wird abgeschaltet. Dieser Vorgang bewirkt, dass sich die Schmelzen miteinander verbinden und somit nach dem Erstarren eine stoffschlüssige Verbindung zwischen Bolzen und Werkstück entsteht [Tri14].

Die beschriebenen Prozessschritte lassen sich durch Einstellung an der verwendeten Stromquelle und der Bolzenschweißpistole auf die vorliegende Schweißaufgabe anpassen. Die Parameter für das Bolzenschweißen und ihre Wirkung sind in Tabelle 2.5 dargelegt.

Tabelle 2.5: Beeinflussung der Schweißfehler durch Einstellparameter

Parameter	Einheit	Energieeinbringung	Schmelzbadgröße	Einschnürung	Porenbildung	Schweißwulst
Schweißstrom	A	+	+	-	-	+
Schweißzeit	ms	+	+	-	-	+
Dämpfung		O	O	+	O	+
Abhub	mm	+	+	+	O	+
Überstand	mm	O	O	+	-	+
Verunreinigung		O	O	-	+	O
Schutzgas	l/min	O	O	+	+	O
Positionierung		O	+	+	+	+

Das Lichtbogenbolzenschweißen mit Hubzündung eignet sich besonders für Anwendungen, bei denen eine schnelle, präzise und saubere Schweißverbindung von bolzenförmigen Halbzeugen erforderlich ist. Durch die spezielle Zündmethode und die Kontrolle des Bolzenabstandes ermöglicht dieses Verfahren grundsätzlich eine hohe Schweißnahtqualität und Wiederholbarkeit der Schweißungen, was es zu einer beliebten Wahl macht.

Ein wichtiger Grund für die Wahl des Bolzenschweißens für den in Kapitel 2.4 beschriebenen Anwendungsfall ist die im Allgemeinen geringe Empfindlichkeit gegenüber Verunreinigungen wie metallische Oxide und nichtmetallische oder organische Verbindungen in der Fügezone. In der Regel ist ein guter elektrischer Kontakt zwischen den Fügepartnern ausreichend, um die Schweißung durchzuführen. Durch die hohen elektrischen Ströme, die je nach Bolzendurchmesser im kA-Bereich liegen, führen der Lichtbogendruck und der durch die Temperaturerhöhung schlagartig ansteigende Gasdruck in der Fügezone dazu, dass etwaige Verunreinigungen aus der Fügezone verdrängt werden und in der Schweißwulst verbleiben. Diese Eigenschaft ist ein wesentlicher Vorteil des Bolzenschweißens für seine Anwendung im Baustellenumfeld. Die bei der beschriebenen Anwendung sicherlich nicht auszuschließende Verunreinigung der Fügezone mit mineralischen und/oder organischen Stoffen wie Beton, Schmierfett, Öl usw. kann damit in ihrer Bedeutung reduziert werden. Für diesen „Reinigungseffekt“ ist eine mit dem Bolzendurchmesser zunehmende Schweißzeit erforderlich. Übliche Schweißzeiten für den Beispielbolzendurchmesser liegen im Bereich von 400-750 ms, sofern die Bolzen auf ein Blech geschweißt werden. Für Bolzen mit einem Durchmesser von 19 mm kann die erforderliche Schweißzeit bei genannten Verunreinigungen in der Fügezone sinnvoll auf 1,5 s verlängert werden. Diese verlängerte Schweißzeit geht mit einem erhöhten Wärmeeintrag in den Werkstoff einher. Die verlängerte Schweißzeit hat wiederum signifikanten Einfluss auf die Morphologie der erzeugten Schweißverbindung und damit auch auf die mechanischen Eigen-

schaften. Auf die Wechselwirkung zwischen Schweißzeit, Schmelzbadbeherrschung und mechanischen Kennwerten der Fügeverbindung wird daher in Kapitel 4.2 ausführlich eingegangen.

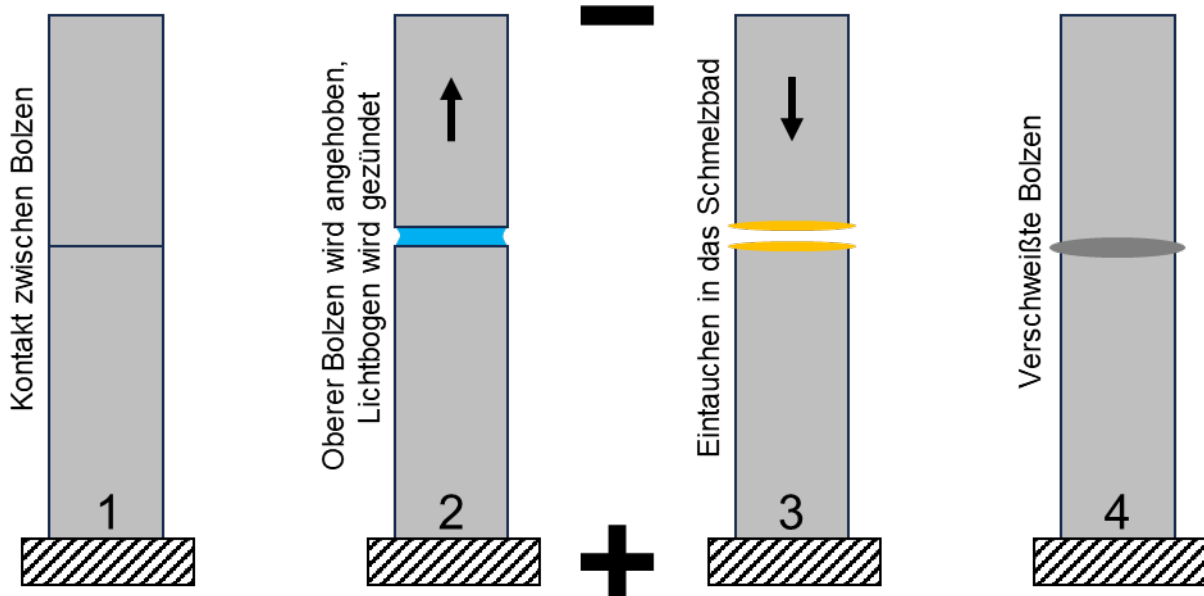


Bild 2.10: Schematische Funktionsweise des Lichtbogenbolzenschweißens mit Hubzündung beim Schweißen von Bolzen auf Bolzen

Der Ablauf einer Schweißung mit dem beschriebenen Schweißverfahren ist in Bild 2.10 dargestellt. Im ersten Schritt müssen die zu verschweißenden Bolzen mit elektrischem Kontakt aufeinander liegen. Sobald dieser Fall eingetreten ist, kann der Zündvorgang (Schritt 2) gestartet werden. Dabei werden die Bolzen auseinandergedrückt, während eine Spannung anliegt. Durch den fließenden Schweißstrom wird ein Lichtbogen gezündet, welcher die Enden der Bolzen aufschmilzt (Schritt 3). Nach der eingestellten Schweißzeit werden die Bolzen wieder zusammengedrückt, wodurch eine stoffschlüssige Verbindung entsteht. Dabei wird der Lichtbogen ausgeschaltet. Die Schmelze wird beim Zusammenführen nach Außen gedrückt. Dadurch entsteht eine Schweißwulst, welche im Schritt 4 zu erkennen ist.

Die beabsichtigte Anwendung des Fügens von Bolzen auf Bolzen stellt einige Anforderungen an den Prozess, die vom herkömmlichen Prozessablauf und -aufbau abweichen. Für die geplante Anwendung muss Bolzen auf Bolzen geschweißt werden. Schon leichte Winkelabweichungen oder minimaler Versatz der zu fügenden Bolzen zueinander führen im Gesamtprozess zu unerwünschten Gestaltabweichungen. Eine wiederholgenaue und präzise Positionierung der Fügepartner sowie eine gute Justierbarkeit sind für den gegebenen Anwendungsfall zusätzliche Anforderungen an die eingesetzte Bolzenschweißpistole.

Weiterhin ist die Auswahl des Betonstahls als zu fügendes Material aufgrund der chemischen Zusammensetzung und der daraus resultierenden Eigenschaften unter Wärmeeinfluss zu berücksichtigen. Auf die Herausforderungen zu dieser Thematik wird in Kapitel 4.2 genauer eingegangen.

Die Anforderungen an Schweißverbindungen, die durch Lichtbogenbolzenschweißen mit Hubzündung und Schutzgas hergestellt werden, sind in DIN EN ISO 14555 zusammengefasst. Obwohl die vorliegende Fügeaufgabe nicht im Umfang der DIN EN ISO 14555 enthalten ist, wurde bei der Entwicklung des Schweißverfahrens die Prüfung der hergestellten Verbindun-

gen auf die Anforderungen der Norm ausgerichtet. Für die mechanische Prüfung einer Bolzenschweißverbindung sieht die Norm einen Biegeversuch für die anwendungsnahe Prüfung vor. Dabei ist das Versagenskriterium das Abbrechen oder eine Rissbildung bei einem Biege-
winkel α von 60° . Wie in Bild 2.11 zu sehen wird hierbei geprüft, ob die hergestellte Fügezone einer Biegung zwischen den Fügepartnern von 60° standhält, ohne zu versagen. Insbesondere Schweißparameter mit Kerben und unvollständiger Anbindung können so schnell erkannt werden.

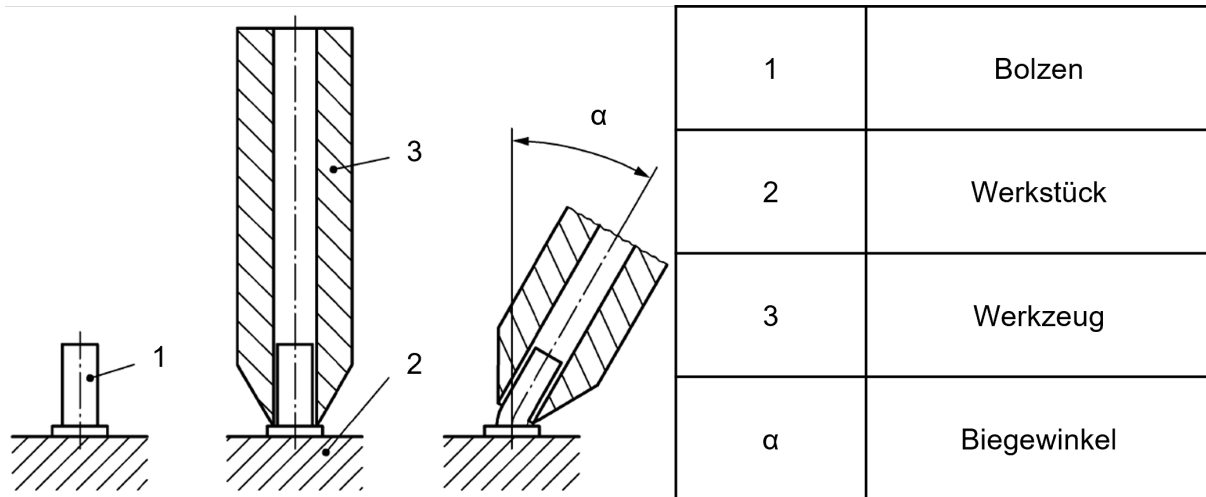


Bild 2.11: Beispiel für Biegeprüfung [DIN17]– Bild 2

Ist ein Parameterraum gefunden, der den Anforderungen des Biegeversuchs genügt, werden weitergehende Untersuchungen durchgeführt. Für die weitergehende mechanische Charakterisierung wird der Zugversuch, wie in Bild 2.12, an Bolzenschweißverbindungen nach DIN EN ISO 14555 eingesetzt. Hierbei wird die hergestellte Schweißverbindung mit einer konstanten Abzugsgeschwindigkeit bis zum Versagen belastet. Um die Anforderungen der ISO 3834-2 zu erfüllen, ist ein Versagen im Grundwerkstoff erforderlich. Es ist zu beachten, dass im Gegensatz zur Zielsetzung der DIN EN ISO 14555 in der hier angestrebten Anwendung ein Schweißwulst nicht erwünscht ist. Eine geometrische Festigkeitssteigerung, die das Versagen aus der Fügezone in den Grundwerkstoff verlagern könnte, wird dadurch erschwert und damit auch die Erfüllung der Anforderungen der ISO 3834-2. Die beschriebenen metallphysikalischen Vorgänge führen auch zu einer Festigkeitssteigerung in der Fügezone. Diese Festigkeitssteigerung kann bei geeigneter Parameterwahl dazu führen, dass die Anforderungen der ISO 3834-2 trotz fehlender Nahtüberhöhung erfüllt werden. Eine mit der Festigkeitssteigerung einhergehende Verringerung der Bruchdehnung wurde nicht weiter untersucht.

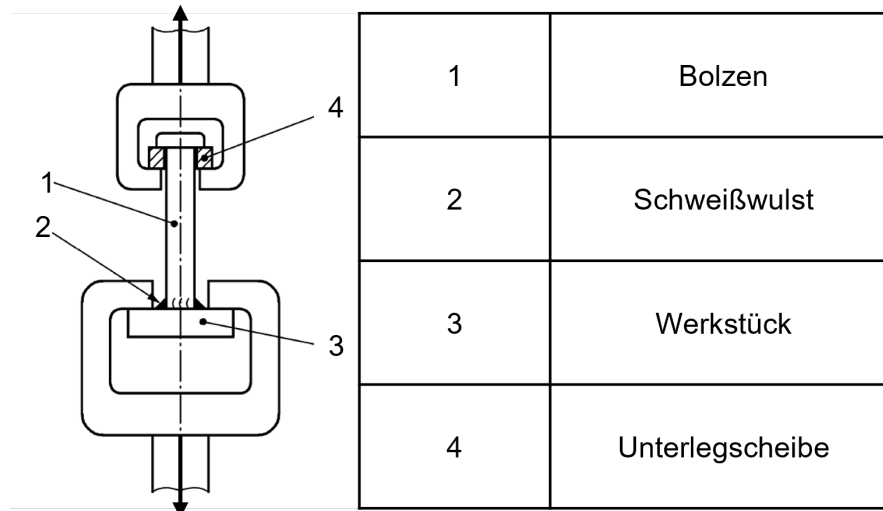


Bild 2.12: Beispiel für Zugversuch [DIN17]– Bild 4]

2.5 Bewehrungsintegration

Die mit den in Abschnitt 2.3 vorgestellten Beton-3D-Druckverfahren herstellbaren unbewehrten Betonbauteile sind nur in seltenen Fällen für den Einsatz in realen Bauwerken geeignet, da sie spröde versagen und unzureichende Tragfähigkeiten aufweisen. Eine wirkliche Alternative zu bisherigen Bauweisen lässt sich hiermit nur erzielen, wenn gleichzeitig geeignete Konzepte zur Bewehrungsintegration verfügbar sind.

Beton besitzt eine von der Zusammensetzung abhängige hohe Druckfestigkeit, jedoch nur eine geringe Zugfestigkeit, die in der Regel ein Zehntel der Druckfestigkeit nicht übersteigt. Außerdem streut die Zugfestigkeit mitunter stark, weshalb sie in der Regel in der Bemessung tragender Bauteile nicht angesetzt wird [Asp18; Zil10].

Das Einlegen von Stahlbewehrung oder vorgespannter Spannglieder in Beton bildet den Verbundwerkstoff Stahlbeton bzw. Spannbeton, der das Bauwesen revolutioniert hat. Die Bewehrung ist für die Tragfähigkeit von Stahlbetonkonstruktionen unerlässlich: der eingebettete Betonstahl übernimmt nach der Rissbildung die freiwerdende Betonzugkraft. Hierdurch kann die Tragfähigkeit von Stahl- und Spannbetonbauteilen gegenüber unbewehrtem Beton vervielfacht werden, es ergibt sich ein duktileres Bauteiltragverhalten und zudem kann durch ausreichende Mindestbewehrung eine Rissbreitenbeschränkung und gleichmäßigere Rissverteilung [Asp18; Llo20] erzielt werden. Neben Stahlbewehrungen kommt in bestimmten Fällen zudem nichtmetallische Bewehrung zum Einsatz. Diese hat vor allem den Vorteil der Korrosionsbeständigkeit und weist gleichzeitig ein geringeres Eigengewicht auf [Asp18].

Die bestehende Bewehrungstechnik und Ansätze zu ihrer Bemessung werden seit mehr als einem Jahrhundert erforscht und optimiert, weswegen Sie – nach Ansicht der Autoren - auch als Grundlage für den 3D-Stahlbetondruck herangezogen werden sollten.

2.5.1 Anforderungen an den Betonstahl

Der zur Bewehrung von Betonbauteilen verwendete Betonstahl muss folgende Eigenschaften erfüllen:

- ausreichende Festigkeitseigenschaften, einschließlich Dauer- und Kriechfestigkeit
- Günstige Verbundeigenschaften, spezifische Rippung

- Beständigkeit gegen Spannungsrissskorrosion
- ausreichende Schweißseignung
- gute mechanische Bearbeitbarkeit

Diese Anforderungen werden durch die Forderung nach einem Mindeststreckgrenzenverhältnis von $R_m/R_e = 1,08$ und einer Gesamtdehnung größer 5,0% ergänzt. Nach DIN 488-1 kann der Werkstoff verschiedene Herstellungsschritte durchlaufen, um die Anforderungen zu erfüllen. Nachfolgend sind verschiedene Herstellungswege aufgeführt:

- warmgewalzt, ohne Nachbehandlung
- warmgewalzt und aus der Walzhitze vergütet
- warmgewalzt und kaltgezogen
- kaltverformt (durch Ziehen oder Kaltwalzen)

Die verschiedenen Herstellungswege führen zu unterschiedlichen Rückständen auf der Oberfläche des gefertigten Betonstahlstabes. Diese sind zulässig, müssen aber bei der Wahl eines geeigneten Schweißverfahrens berücksichtigt werden. Als Werkstoff für die Bewehrung wird im weiteren Verlauf der nach DIN EN 10027-1 als B500B bezeichnete Betonstahl verwendet. Für die adaptive Anpassung der Verbindungseigenschaften werden die folgenden 100 mm langen Bolzen verwendet:

- DIN 488 B500B 8,0
- DIN 488 B500B 10,0
- DIN 488 B500B 12,0

2.5.2 Überblick der Verfahren zur Bewehrungsintegration

Bisher ist weitestgehend ungeklärt, wie die für praxisrelevante Anwendungen erforderliche Stahlbewehrung in den Betondruckprozess integriert werden kann. Lösungsvorschläge für das Einbringen von Bewehrung sind bisher überwiegend konzeptioneller Natur, nur rudimentär erforscht und bleiben deutlich hinter den konkreten Ansätzen für das Drucken von unbewehrtem Beton zurück. Die bisher bekannten Verfahren können wie folgt klassifiziert werden:

- Bewehrung wird vor dem Druckvorgang platziert;
- Gleichzeitiges Einbringen/Erzeugen von Bewehrung während des Druckvorgangs;
- Bewehrung wird nach dem Druckvorgang integriert.

Die genauen Vorgehensweisen der jeweiligen Ansätze werden im Folgenden genauer erläutert. Eine Übersicht über ausgewählte Verfahren gibt Bild 2.13.

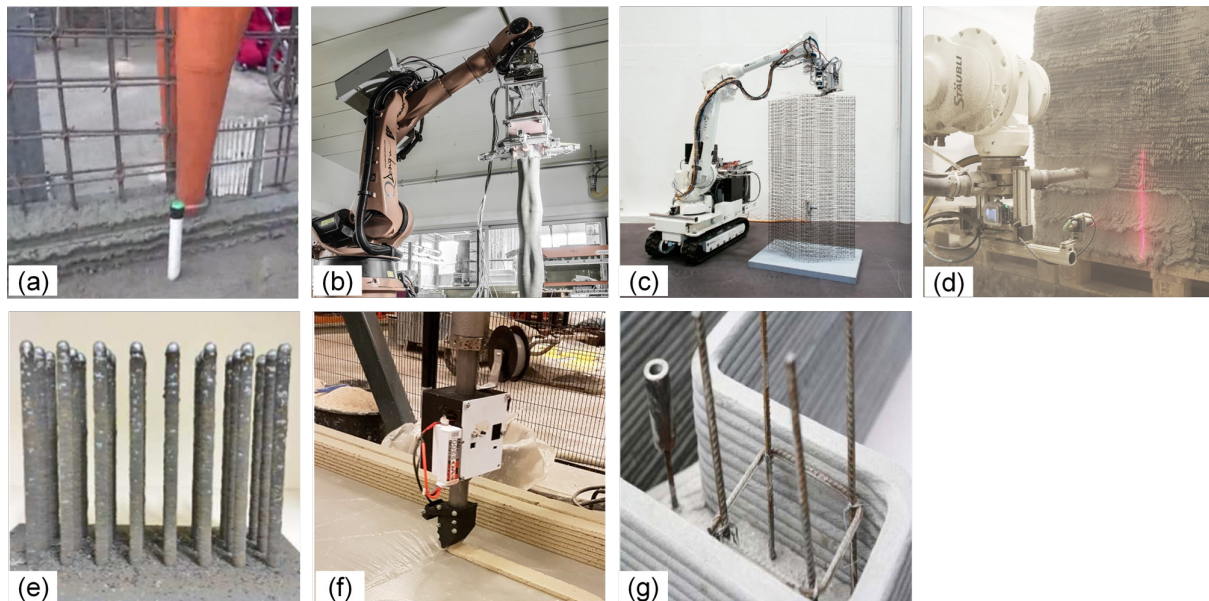


Bild 2.13: Übersicht der Verfahren zur Bewehrungsintegration: (a) Umdruck der Bewehrung mit Gabeldüse (HuaShang Tengda Ltd.), (b) Smart Dynamic Casting (ETH Zürich, Schweiz), (c) Mesh Mould Verfahren (ETH Zürich, Schweiz), (d) Shotcrete 3D Printing SC3dP (TU Braunschweig, Deutschland), (e) Multiarm-Drucken von Stahlbewehrung und Beton (TU Dresden), (f) Stahlseilintegration im Betonfilament (TU Eindhoven, Niederlande), (g) Contour Crafting mit nachträglich installierter Bewehrung

(1) Bewehrungsintegration vor dem Druck

Umdruck der Bewehrung mit Gabeldüse (HuaShang Tengda Ltd.)

Die Firma HuaShang Tengda Ltd. aus China hat ein Verfahren entwickelt, das die Herstellung von wandartigen Betonbauteilen mit horizontaler und vertikaler Bewehrung ermöglicht. Zunächst werden dazu Bewehrungsmatten vertikal aufgerichtet und mit einer Gabeldüse wird Frischbeton von beiden Seiten der Bewehrungsmatte platziert, um diese zu umschließen. Mithilfe dieses Verfahrens wurde 2016 innerhalb 45 Tagen ein 400m² großes Wohngebäude gedruckt. Die Wände hatten eine Dicke von 25cm [Mec18b].

Smart Dynamic Casting (ETH Zürich, Schweiz)

An der ETH Zürich wurde das sogenannte Smart Dynamic Casting Verfahren entwickelt, bei dem eine Gleitschalung zum Einsatz kommt. Diese Schalung ist deutlich kleiner als das herzustellende Objekt und wird mittels Roboter gesteuert. Die Herstellung von vertikalen Stützen und Säulen erfolgt zunächst durch die manuelle Platzierung der Bewehrung (meistens in Form von Bewehrungskörben). Später wird die Schalung kontinuierlich mit Frischbeton gefüllt und automatisch in die Höhe gezogen. Die genaue Geometrie der Schalung kann während des Druckes angepasst und verdreht werden. Die Herstellungsgeschwindigkeit ist abhängig von der Erhärtungsdauer des Frischbetons [Mec18a; Mec18b].

Mesh Mould Verfahren (ETH Zürich, Schweiz)

Das Fertigungsverfahren namens Mesh Mould wurde an der ETH-Zürich entwickelt. Der Herstellungsvorgang zeichnet sich durch folgende Schritte aus: Zunächst wird eine dichte Bewehrungsstruktur aus Stahlstäben (aktuell Ø6mm und Ø4,5mm) mithilfe einer Robotereinheit zusammengeschweißt. Das doppelseitig hergestellte Bewehrungsnetz dient anschließend als verlorene Schalung und wird mit Faserbeton befüllt. Die Verwendung von Faserbeton reduziert

das Ausfließen des Betons aus dem Bewehrungsnetz. Im Gegensatz zu extrusionsbasierten Verfahren, wird beim Mesh-Mould-Verfahren der Beton konventionell gegossen, wodurch das Problem der Schichtung minimiert wird. Zuletzt wird noch eine abschließende Deckschicht auf das Objekt aufgetragen [Asp18].

(2) Bewehrungsintegration während des Drucks

Shotcrete 3D Printing SC3dP (TU Braunschweig, Deutschland)

Das Shotcrete 3D Printing ist ein additives Fertigungsverfahren, das an der TU Braunschweig entwickelt wurde. Hierbei wird zunächst ein unbewehrtes Bauteil mithilfe eines robotisch gesteuerten Spritzbetonauftragprozesses additiv hergestellt. Durch die hohe kinematische Energie, die der Spritzbeton durch die Druckluft erhält, entsteht eine gute Verbindung zwischen den einzelnen Schichten. Zudem sind schnelle Auftragungsraten möglich [Klo20]. Während einer Druckpause wird die erforderliche Quer- und Längsbewehrung händisch integriert. Als nächster Prozessschritt erfolgt das Auftragen einer vier Zentimeter dicken Deckschicht. Abschließend wird die Oberfläche mithilfe einer rotierenden Stahlscheibe geglättet, um ein ansprechendes Erscheinungsbild zu erzielen [Klo20].

Multiarm-Drucken von Stahlbewehrung und Beton (TU Dresden)

Im Gegensatz zur Verwendung vorinstallierter bzw. händisch im Prozess hinzugefügter Bewehrungsstrukturen, die vom Betondrucker umdrückt werden, wurde die gleichzeitige additive Fertigung der Bewehrung an der TU Dresden vorgeschlagen [Mec18a; Mec18b]. Das sog. formgebende Lichtbogenschweißen (engl. Wire arc additive manufacturing - WAAM) mit einem MSG-Prozess ermöglicht es, die Bewehrung inkrementell herzustellen. Vergleichbare Ansätze wurden in einem Forschungsprojekt zum Pin-Schweißen für Stahl-Beton-Verbundkonstruktionen an der RWTH Aachen verwendet [Cla15] und kommen auch beim Druck reiner Stahlkonstruktionen bereits zum Einsatz [Bre17]

Stacheldrahtintegration (Pennsylvania State University, Amerika)

An der Pennsylvania State University wurden 2022 Versuche durchgeführt, bei denen während des Druckprozesses Stacheldraht als Bewehrung integriert wurde [Hoj22]. Während des Balkenherstellungsprozesses wurde zunächst die erste Betonschicht gedruckt. Anschließend wurde der Stacheldraht positioniert (zu Beginn des Projektes händisch, später ist eine automatisierte Positionierung geplant), bevor dieser dann von der folgenden Betonschicht überdeckt wurde. Darüber hinaus wurden in unterschiedlichen Versuchsreihen Prüfkörper mit mehreren Bewehrungslagen erstellt. Die Automatisierung dieses Prozesses bedarf noch weiterer Forschung [Hoj22]. Anders als bei Verwendung von Stabbewehrung, deren Formgebung aufgrund der Biegesteifigkeit des Bewehrungsmaterials eingeschränkt ist, lassen sich mit biegeweichen Bewehrungen (wie Stacheldraht) einfach komplexe Druckpfade und Bauteilformen realisieren.

Stahlseilintegration im Betonfilament (TU Eindhoven, Niederlande)

Die Stahlseilintegration erfolgt auf ähnliche Weise, wie die zuvor beschriebene Integration des Stacheldrahtes an der PSU. Allerdings hat die TU Eindhoven bereits einen Druckkopf entwickelt, der eine direkte Integration des Stahlseiles in den Betonextrusionsprozess ermöglicht. Der Druckkopf ist mit einer Spule ausgestattet. Während der Roboterkopf die Filamente extrudiert, wird das Stahlseil mit Hilfe eines kleinen Servomotors automatisch und kontinuierlich im Filament platziert. Eine nahtlose Integration in den Druckprozess wurde dadurch ermöglicht.

Einer der Hauptvorteile ist, dass keine Unterbrechung der Extrusion notwendig ist, um die Bewehrung zu platzieren [Bos18]. Zur Auswertung der Prüfkörper wurden sowohl Pull-out Tests und Biegeversuche durchgeführt. Hierbei ist hervorzuheben, dass es bei einer Vielzahl von Prüfkörpern zu Verbundversagen zwischen Stahlseil und Beton auftrat. Dieses Versagensmuster wurde bei [Hoj22] durch die Verwendung von Stacheldraht verhindert.

(3) Bewehrungsintegration nach dem Druck

Contour Crafting mit nachträglich installierter Bewehrung

Bei Contour Crafting handelt es sich um ein extrusionsbasiertes Betondruckverfahren, das 2004 an der University of Southern California entwickelt wurde und zu den Pionierverfahren des 3D-Betondruckes zählt. Mehrere Forschungsprojekte bauen hierauf auf. Die äußere Kontur des Bauteils wird gedruckt und dient als verlorene Schalung. In einem zweiten Schritt erfolgt nachträgliche Bewehrungsintegration sowie Verfüllung der gedruckten Schalung mit Frischbeton [Cla20a].

In [Ass20] wird ein Verfahren vorgeschlagen, das ähnlich zum Contour Crafting abläuft, jedoch keinen großmaßstäblichen Verguss mit Beton erfordert, sondern die Installation von Bewehrung innerhalb kleiner Aussparungen vorsieht. Hierbei wird das fertige Bauteil aus mehreren einzelnen Modulen aufgebaut.

Zunächst wurden Würfel mit den Abmessungen $24 \times 24 \text{ cm}^2$ und Bewehrungsaussparungen gedruckt, die später zur Platzierung der Längsbewehrung dienen. Zusätzlich wurden nach jeweils der zweiten, fünften und achten Schicht händisch Bügel eingelegt [Ass20].

Nach dem Aushärten werden die Module mithilfe von hochfestem Epoxidharz zu einem 96 cm langen Balken zusammengeklebt und in einem dritten Arbeitsschritt die Längsbewehrung in die vorgesehenen Öffnungen geführt und mit Mörtel vergossen [Ass20].

An der Ghent University (Belgien) wurde 2022 ein ähnliches Vorgehen vorgestellt. Bei der Herstellung einer Brückenstruktur wurde die äußere Schale der Brücke gedruckt. Später wurde die Schalung mit selbstverdichtendem Beton und manuell integrierter Bewehrung ergänzt. Zudem wurden Spannglieder verwendet, die ebenfalls nach dem Druckprozess integriert wurden. Neben dem Einsatz von Spannstahl ist der verwendete Druckkopf mit Beschleunigerzufuhr eine weitere Besonderheit dieses Projektes [Oom22].

2.5.3 Analyse der verschiedenen Verfahren

Die vorgeschlagenen Konzepte in Bild 2.13 (a) –(g) zeigen die Bandbreite möglicher Fertigungsmethoden auf und unterscheiden sich sowohl hinsichtlich des erzielbaren Automatisierungsgrads und der Praxisreife mitunter deutlich. Das Contour-Crafting mit nachträglichem Bewehren und Ausbetonieren (Bild 2.13, g) kann hinsichtlich des Automatisierungsgrads allenfalls als kurzfristige Übergangslösung verstanden werden. Der nachträgliche Einbau der (vertikalen) Bewehrung in die unbewehrte Bauteilkontur ist durch den begrenzten Arbeitsraum ausgesprochen aufwendig und arbeitsintensiv, zudem kann die zeitlich versetzte Herstellung von gedruckter Kontur und innerem Verguss zu Anbindungsproblemen führen. Trotzdem wurde das Verfahren bereits in verschiedenen praktischen Anwendungen zum Einsatz gebracht, u.a. von den Herstellern [Win14], [Api22] und [Cob17].

Das Umdrucken (Bild 2.13, a) bzw. Umspritzen (Bild 2.13, d) einer bereits im Vorfeld händisch installierten Bewehrung stellen prozesstechnisch deutlich günstigere Alternativen dar. Als Beispiel für die Umsetzung ist der für ebene Wandscheiben entwickelte Zweidüsendrucker von HuaShang Tengda Ltd. [Sco16b] zu nennen, der Bewehrungsmatten mit einer gabelförmigen Düse von zwei Seiten umdrückt. Nachteil dieser Technologie ist, dass die herstellbare Wandhöhe durch die Gabellänge der Druckdüse beschränkt ist und intensive händische Nachbearbeitung zur Erzielung einer adäquaten Oberflächenqualität benötigt wird. Eine höhere räumliche Gestaltungsflexibilität bietet dagegen das Umschließen der Bewehrung mit Spritzbeton, das an der Universität Braunschweig entwickelt wurde [Klo19; Lin19]. Eine Herausforderung besteht darin, die vorinstallierte Bewehrung so zu umspritzen, dass Verschattungseffekte vermieden werden, die zu einer Fehlstellenbildung in der Nähe der Bewehrung führen können. Der Prozess zeichnet sich durch Effizienz und vielfältige Anwendungsmöglichkeiten aus [Klo20]. Bei beiden Verfahren (Bild 2.13, a und d) muss zudem die Bewehrungsstruktur bereits vor der Ablage des Betons konventionell (händisch) vorinstalliert werden.

Im Gegensatz zur Verwendung vorinstallierter Bewehrungsstrukturen, die vom Betondrucker umdrückt werden, sieht der in [Mec18b] vorgeschlagene und als paralleles „Multi-Arm Drucken von Beton und Bewehrung“ bezeichnete Prozess, die inkrementelle Herstellung der Bewehrung durch formgebendes Schweißen vor (Bild 2.13, e). Hierbei ist allerdings zu klären, wie die Druckprozesse für Stahl und Beton interagieren und wie die Ablage des Betons um die gedruckte Bewehrungsstruktur herum erfolgen kann. Zudem ist zu beachten, dass in einem derartigen Prozess durch den inkrementellen Aufbau der Bewehrung aus einzelnen Schweißpunkten erhebliche Energie für das vollständige Aufschmelzen des Stahls benötigt wird und der im Bewehrungsstab auftretende Wärmestau die Materialeigenschaften des Bewehrungsstahls beeinträchtigt. Das mutmaßlich größte Hindernis bei einer realmaßstäblichen Umsetzung dieses Verfahrens wäre allerdings die limitierte Abschmelzleistung des Schweißprozesses (ca. 1-4 kg/h), die den nachlaufenden Betondruckprozess massiv hemmen und verlangsamen würde.

Das Mesh Mould Verfahren [Hac14] erlaubt eine geringfügig schnellere Fertigung komplexgeformter Bewehrungskörper mithilfe eines Widerstandsschweiß-Roboters (Bild 2.13, c). Das Bewehrungsnetz wird hierbei so engmaschig ausgeführt, dass es neben der Bewehrungsfunktion auch als Schalung dienen kann, in die der Beton konventionell im Gießverfahren eingefüllt wird. Durch die Lage der Bewehrung an der Bauteiloberfläche können allerdings die aus Korrosionsschutzgründen erforderlichen Betondeckungen ebenso wenig realisiert werden wie eine hohe Oberflächenqualität und ausreichender Verbund zwischen Stahl und Beton.

Erste Konzepte zur Entwicklung kombinierter Druckköpfe für Bewehrung und Beton sehen das simultane Einlegen/Abwickeln textiler oder metallischer, fadenförmiger Bewehrungselemente von Spulen im Druckkopf vor [Bos18]. Die sog. Online-Bewehrungsintegration im Betonfilament (Bild 2.13, f) erlaubt eine hervorragende Dauerhaftigkeit der Bewehrung, weil die flexiblen Bewehrungselemente dem extrudierten Betonfilament noch im Druckkopf zugeführt werden. Eine weitere Verbesserung der Verbundqualität verspricht eine mineralische Tränkung von Carbonfäden unmittelbar vor ihrer Integration in das Betonfilament [Mec20]. Allerdings ist bei derartigen Verfahren lediglich eine eindimensionale Bewehrungsführung möglich, die die Fugen zwischen verschiedenen Betonlagen nicht kreuzt. Die Fuge – als wesentliche Schwachstelle des Bauteils – ist bei diesen Ansätzen folglich unbewehrt. Zur Bewehrung flächiger Bauteile wird daher das kreuzweise Ablegen von bewehrten Betonfilamenten (z.B. horizontal-vertikal) erforscht [Mec20]. Zudem beschränken sich bisherige Ansätze auf das Bewehren mit

einem festgelegten Bewehrungsfadendurchmesser, der während des Prozesses nicht variiert werden kann.

Die Analyse des Stands der Forschung zeigt, dass einige der vorgeschlagenen Konzepte nur in Kombination mit umfassenden (händischen) Arbeitsschritten realisierbar sind. Andere Ansätze sind noch nicht vollständig entwickelt, nicht in großem Maßstab validiert, unter Baustellenbedingungen nicht realistisch durchführbar oder vernachlässigen wesentliche Anforderungen an die Beschaffenheit des gedruckten Bauteils (z.B. Kontinuität der Bewehrung über Fugen hinweg, Verbund, Dauerhaftigkeit). Die Entwicklung praxistauglicher Druckverfahren für den Verbundwerkstoff Stahlbeton ist daher dringend geboten.

2.5.4 Anforderungen an ein praxistaugliches Verfahren

Der Verbundwerkstoff Stahlbeton ist der mit weitem Abstand meistgenutzte Baustoff der Welt. Trotz der enormen ökonomischen Bedeutung der Stahlbetonbauweise fehlen praxistaugliche Konzepte zur digitalen Fertigung, so dass Stahlbetonbauwerke bis heute nahezu vollständig konventionell (von Hand) gefertigt werden. Ziel des Projektes ist daher die Konzeptionierung eines Verfahrens, das die limitierenden Eigenschaften bisheriger automatisierter Verfahren im Hinblick auf den Herstellprozess und die Eigenschaften des gedruckten Bauteils behebt. Die wesentlichen Anforderungen und Zielgrößen des zu entwickelnden Verfahrens für den 3D-Druck von Stahlbeton sind in Tabelle 2.6 getrennt nach den Dimensionen Herstellprozess, Bauteiltragverhalten, Dauerhaftigkeit und Wirtschaftlichkeit zusammengestellt.

Tabelle 2.6: Anforderungen und Zielgrößen des 3D-Druckverfahrens von Stahlbeton

Dimension	Zielgröße/ Anforderung
Herstellprozess	Drucken von Stahlbeton aus einem Druckkopf oder mit getrennten aber simultan arbeitenden Einheiten für Bewehrung und Beton Vereinheitlichen/ Synchronisieren der Vorlaufgeschwindigkeiten von Bewehrungsherstellung und Betonextrusion Verwendung kostengünstiger, flächendeckend verfügbarer und umfassend erforschter Komponenten (Beton und Betonstahl) Großmaßstäbliche Umsetzbarkeit auf der Baustelle/ im Fertigteilwerk
Tragverhalten	Kontinuität der Bewehrung über gedruckte Fugen hinweg Geringer Energieeintrag beim (örtlichen) Aufschmelzen der Bewehrung, um Wärmebeeinträchtigung des Stahls zu minimieren Sicherstellung ausreichenden Verbundes zwischen Bewehrung und Beton Ausreichende Querkraft- und Biegetragfähigkeit
Dauerhaftigkeit	Ausreichende Betondeckung und Fehlstellenvermeidung zur Sicherung des Korrosionsschutzes der Bewehrung
Wirtschaftlichkeit	

Verwendung kostengünstiger und flächendeckend verfügbarer Baustoffe (Beton und Betonstahl), um bestehende Lieferketten der Bauindustrie nutzen zu können und Aufwand für Neuentwicklung zu reduzieren

Geringer Energieverbrauch (z.B. kein formgebendes Schweißen)

Geringer Materialeinsatz (z.B. durch wirtschaftlich-ausgelegte, lastangepasste Bewehrung)

2.5.5 Additive Manufacturing of Reinforced Concrete (AMoRC)-Verfahren

Das vorliegende Projekt basiert auf einem neuartigen Konzept eines 3D-Druckverfahrens für Stahlbeton, dem sog. Additive Manufacturing of Reinforced Concrete (AMoRC). Das AMoRC-Verfahren wurde erstmals in [Cla20a] vorgeschlagen und ist im Bild 2.14 visualisiert. Der ursprünglich konzipierte Prozess verwendet einen kombinierten Druckkopf, der eine schalungsfreie Ablage von Betonschichten ermöglicht und gleichzeitig eine schweißtechnische Fertigungseinheit für die Bewehrung vorsieht. Hierbei läuft die Schweißeinheit dem Betonextrusionsprozess voraus und stellt das räumliche Bewehrungsnetz aus vorkonfektionierten Bewehrungsstabsegmenten her. Der Beton wird so um die Bewehrungsstäbe abgelegt, dass diese wenige Zentimeter aus dem gedruckten Beton hervorragen. Hieran kann das Schweißgut in der nächsten Lage des Druckvorgangs unmittelbar angebunden werden. So lassen sich kraftschlüssig verbundene 2- bzw. 3-dimensionale Bewehrungsstrukturen über einzelne Betonlagen hinaus erzeugen und simultan mit Beton umdrucken.

Im Gegensatz zu Prozessen, die das formgebende Schweißen nutzen [Cla15; Mec18b], wird die Bewehrung im AMoRC-Verfahren nicht inkrementell mit dem Schweißbrenner aufgebaut, sondern aus segmentierten Bewehrungsstäben begrenzter Länge gefügt (Bild 2.14). Die Länge der angeschweißten Stabsegmente wird dabei an die gewünschte Betonschichtdicke und Betonextrusionsgeschwindigkeit angepasst. Durch das Fügen der Stabsegmente verkürzt sich die Zeit zur Herstellung der Bewehrung gegenüber dem formgebenden Schweißen drastisch, es wird deutlich weniger Energie verbraucht und durch den geringeren Wärmeeintrag werden erheblich bessere Materialeigenschaften des Bewehrungsstahls erzielt. Als Schweißprozesse an den Stoßstellen der Bewehrungsstücke soll das Lichtbogenbolzenschweißen eingesetzt werden (Bild 2.14). Durch den Einsatz unterschiedlich dicker Bewehrungsstäbe ist die Herstellung einer dem Kraftfluss bestmöglich angepassten (und dadurch sehr viel wirtschaftlicheren) Bewehrungsanordnung möglich. Zudem können Übergreifungsstöße der Bewehrung, die mögliche Schwachstellen im Bauwerk darstellen, durch die schweißtechnische Fügung vollständig vermieden werden. Während die Ablage der Betonfilamente parallel zu darunterliegenden Schichten erfolgt, können die Bewehrungsstücke an den aus dem Beton hervorstehenden Stabenden sowohl in horizontaler als auch vertikaler Richtung gefügt werden (Bild 2.14). Die Ablage des Betons um die Bewehrung herum wird mit einem Betondruckkopf durchgeführt, der aus gabelförmig angeordneten Einzeldüsen besteht (Bild 2.14). Für jede zu umdruckende Bewehrungslage werden jeweils zwei Düsen benötigt.

Im Rahmen dieses Projektes wird das oben beschriebene Konzept des AMoRC-Verfahrens erstmals prototypisch implementiert und grundlegend weiterentwickelt.

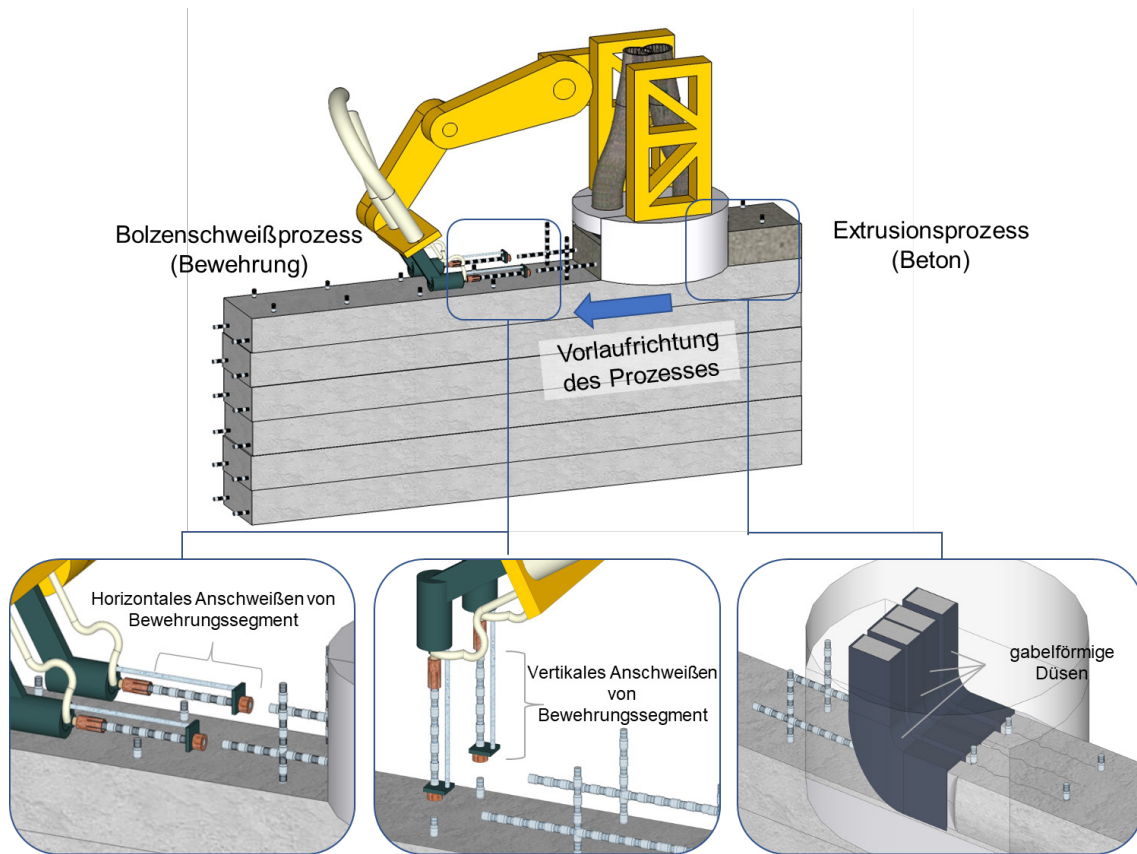


Bild 2.14: Visualisierung des AMoRC-Verfahrens [Cla20a]

3 Entwicklung von Druckkopf und Schweißeinrichtung

3.1 Überblick Infrastruktur

Im Labor des Instituts für Massivbau der RWTH Aachen wurde die in Bild 3.1 dargestellte Druckeinrichtung aufgebaut. Zwei 6-achsige KUKA-Roboter (KR 300 R2700-2 und KR 300 R2500 Ultra) wurden jeweils auf einer 5,5 m langen KUKA-Lineareinheit (KL 4000) mit einer KRC4-Steuerung installiert. Für einen konstanten Materialfluss wurde die Einrichtung um eine MAI@MULTIMIX-3D Betonmischpumpe mit einer Schlauchlänge von 15 m ergänzt. Am Ende des Schlauches ist ein Extruderwerkzeug (Düse) angebracht. Für das Zusammenfügen der segmentierten Bewehrungsstäbe wurde ein Schweißgerät beschafft. Zur gleichzeitigen Steuerung aller Geräte – der beiden Roboterarme, der Betonpumpe und des Schweißgeräts - wird eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) als übergeordnete Steuereinheit verwendet. Im vorliegenden Projekt wurden Pumpe und Schweißgerät teilweise manuell gesteuert, so dass nur der Druckpfad des Roboters mit der SPS programmiert wurde.

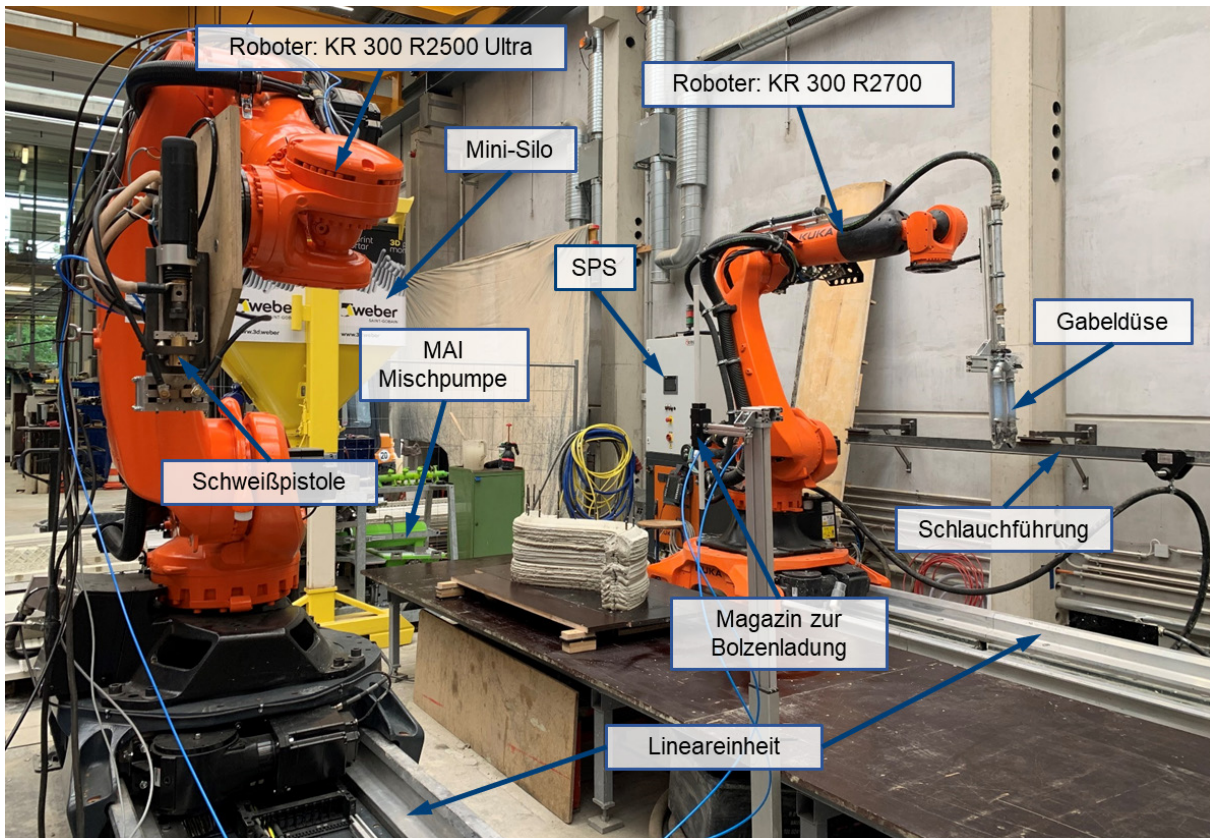


Bild 3.1: 3D-Stahlbeton-Druckeinrichtungen am Institut für Massivbau der RWTH Aachen

3.1.1 Mischpumpensystem

Eine Betonmischpumpe vereint die Funktionen einer Betonmischmaschine und einer Betonpumpe und ermöglicht es Beton zu mischen, zu transportieren und in gleichbleibender Qualität zum Druckkopf zu fördern. Während des Pumpvorgangs wird kontinuierlich Trockenmaterial in den Trichter der Maschine gegeben, entweder in Form von Sackware oder über ein Silo. Das Material wird dann mit der erforderlichen Wassermenge vermischt und als Frischbeton zum Druckkopf gepumpt.

Im Zuge dieses Projekts wurde zunächst die Betonmischpumpe Duo-mix 2000 der Firma m-tec benutzt. Später wurde auf die Multimix-3D Mischpumpe der Firma @MAI (Bild 3.2) gewechselt.

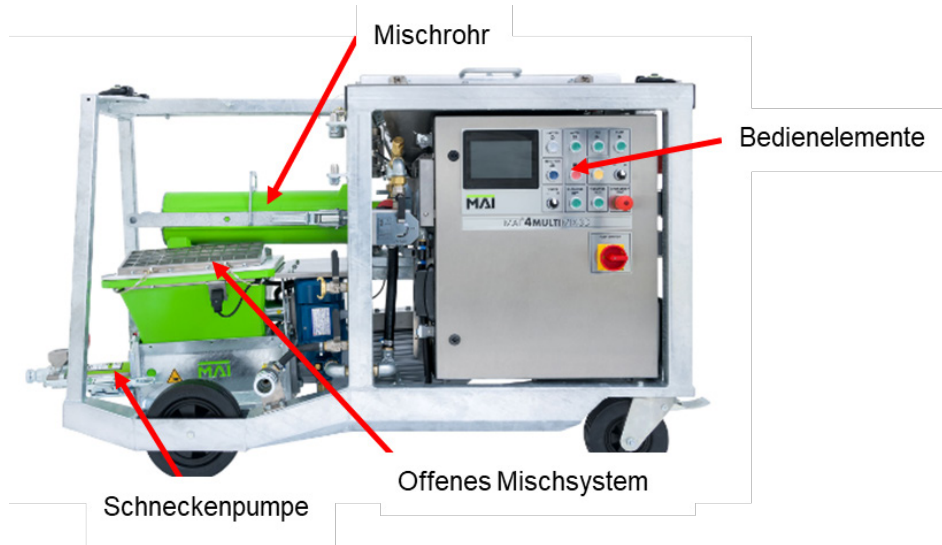


Bild 3.2: @MAI Multimix-3D Pumpe [MAI23]

Der Hersteller @Mai bietet unterschiedliche Schneckenpumpen an, welche sich jeweils in der Förderleistung unterscheiden. Im Anhang ist der jeweilige Standardbereich für die Schneckenpumpen in Abhängigkeit der Frequenz abzulesen. Im Zuge dieses Projekts wurde die *24L Schneckenpumpe* verwendet, welche laut Datenblatt eine Förderleistung von 2,5 bis 7,5 l/min leistet (25-80 Hz). Da während der Drucktermine die maximale Frequenz 80 Herz betrug, ergibt sich eine maximale Förderleistung von 7,5 l/min. Nach jedem Drucktermin wurde die Schnecke herausgeschraubt und mit Silikonspray eingesprüht, um eine Beschädigung durch ausgehärteten Restbeton zu verhindern.

3.1.2 Roboter

Im Vorlauf des Projekts wurde ein sechs-Achsen-Industrieroboter der Firma Kuka vom Typ KR 300 R2700-2 für Betondruck beschafft. Der Roboter hat laut Hersteller eine maximale Reichweite von 2701 mm und eine Nenntaglast von 300 kg. Im Massenschwerpunkt ist eine Traglast von bis zu 370 kg zugelassen. Die Positionswiederholgenauigkeit liegt bei $\pm 0,05\text{mm}$ und erfüllt damit die Vorgaben der ISO 9283 [KUK21]. Der Roboter ist auf einer 5,5 m langen Lineareinheit positioniert, wodurch die Reichweite zusätzlich erhöht wurde. Die Steuerung des Roboterkopfes erfolgt über die Kuka-Steuerung KRC4, an der die jeweils 7 Achsen auch einzeln gesteuert werden können. Ebenfalls kann der Roboter mithilfe der speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) bedient werden. Am Roboterkopf ist, wie in Bild 3.1 dargestellt, eine Halterung montiert, um die Druckdüse zu fixieren. Entlang des Roboterarms läuft der Schlauch, von der Pumpe kommend bis zum Roboterkopf. Dieser wird am Kopf mit einem Schnellverschluss, der auch bei Wasserleitungen verwendet wird, verbunden. An diesen Verschluss können die Düsen angeschlossen und dementsprechend schnell ausgetauscht werden.

Im Projekt wurde für die synchrone Ausführung des Schweißprozesses zusätzlich ein weiterer sechs-Achsen-Industrieroboter der Firma Kuka vom Typ KR 300 R2500 Ultra beschafft, der ebenfalls auf einer 5,5 m langen Lineareinheit positioniert ist. Der Roboter hat eine maximale

Reichweite von 2496 mm und Nenntaglast von 300 kg [KUK24]. Die Steuerung des Roboterkopfes erfolgt ebenfalls über die Kuka-Steuerung KRC4.

3.1.3 Schweißgerät

Für das Fügen der Bewehrungsstruktur mittels Lichtbogenbolzenschweißen mit Hubzündung wurde eine Stromquelle mit Inverter-Technologie verwendet. Das in Bild 3.3 dargestellte Gerät verfügt über die darin genannten technischen Randwerte. Hervorzuheben ist die frei einstellbare Schweißzeit von 1 ms – 1500 ms und die Möglichkeit, bei Bedarf Ströme bis 2100 A für den genannten Schweißzeitbereich stabil abrufen zu können. Für den vorliegenden Einsatz in einem vollmechanisierten oder sogar teilweise vollautomatisierten Fertigungsablauf steht zusätzlich eine Automatisierungsschnittstelle zur Verfügung, die eine Fernsteuerung des Schutzgasstromes sowie des Prozessstarts ermöglicht.

Eine Besonderheit des eingesetzten Gerätes liegt in der Prozessdokumentation. Bei geeigneter Schweißpistole kann mit Hilfe eines induktiven Wegaufnehmers in der Schweißpistole eine Information über den Abhub- und Eintauchweg erfasst werden. Diese Information wird dann als rudimentäres Schweißprotokoll am Gerät angezeigt. Diese Funktion erleichtert das Finden stabiler Prozessparameter erheblich. Zudem kann mit dieser Information eine Voreinschätzung getroffen werden, ob die Schweißung erfolgreich war.

Als Basis für die in Kapitel 2.4 beschriebenen Anpassungen an die vorliegende Fügeaufgabe dient die in Bild 3.3 dargestellte Bolzenschweißpistole. Das Gerät verfügt über die Möglichkeit Bolzen von 2 bis 22 mm zu verschweißen und kann somit problemlos im gesamten Leistungsbereich der verwendeten Schweißstromquelle eingesetzt werden. Direkt an der Pistole einstellende Schweißparameter sind der Abhub, der über eine mechanische Hubwegbegrenzung des Hubmagneten erfolgt, sowie die Dämpfung, also die Eintauchverzögerung, die über ein hydraulisches Dämpfungselement realisiert wird. Die konventionell verwendete Stativaufnahme für eine Bolzenführung kann zudem an unterschiedliche Bolzenabmessungen angepasst werden.



GD-22

Abhub: 0-6 mm
Bolzendurchmesser: 3-22 mm
Wegaufnehmer

Pro-I-2200

Schweißstrom: 100-2100 A
Schweißzeit: 1-1500 ms

Bild 3.3: Schweißpistole GD-22 und Inverter-Stromquelle Pro-I-2200 der Fa. Bolte [Quelle: www.bolte.gmbh, November 2023]

3.2 Entwicklung des Druckkopfes für den Stahlbetondruckprozess

Zur Umsetzung des Druckverfahrens von Stahlbeton ist eine geeignete Düse bzw. die Entwicklung eines Druckkopfes entscheidend, der einerseits Beton drücken und andererseits die Bewehrung mit Beton umschließen kann. Verschiedene Konzepte der Düse wurden mit Prototypen erprobt.

3.2.1 Konzeptvorschläge und Prototypen

Die in der Literatur am häufigsten benutzten Düsen weisen eine rechteckige oder runde Geometrie auf. Auf Betonfilamente abgelegte Bewehrungsstäbe können mit derartigen Düsen überdruckt werden, siehe Bild 3.4.

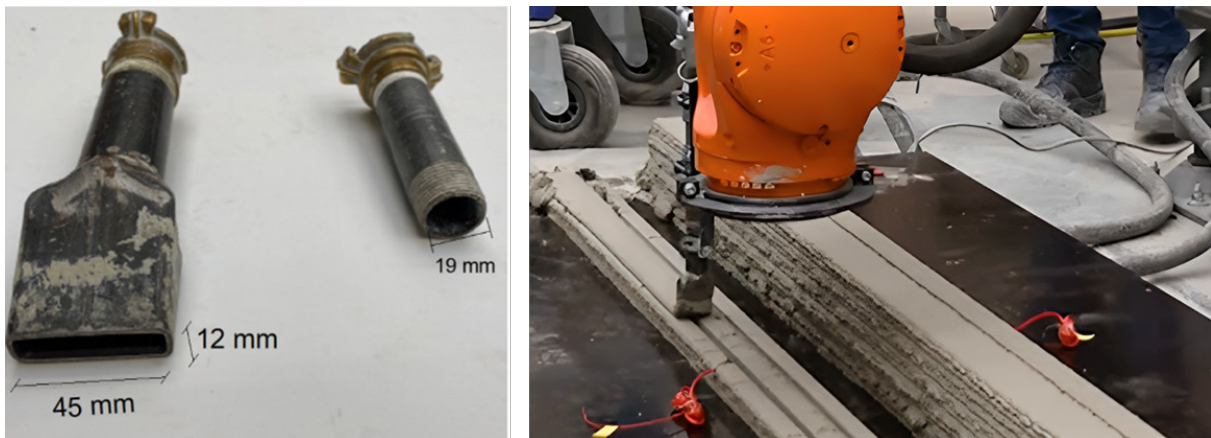


Bild 3.4: Rechteckige und runde Düse zur Bewehrungsintegration

Um eine bessere Einbindung parallel zur Extrusionsrichtung verlaufender Bewehrungsstäbe zu ermöglichen, wurde zudem ein alternativer Ansatz entwickelt. Hierfür wurde eine Düse konzipiert, die größere Abmessungen aufweist (Öffnung von 50 mm x 100 mm) und den Beton waagrecht nach außen führt. Der Bewehrungsstab kann durch eine Öffnung direkt während des Extrudierens in das Betonfilament integriert werden. In Bild 3.5 ist die Funktionsweise der Düse dargestellt. Der Bewehrungsstab wird mittig durch ein Rohr zugeführt, das etwa 10 cm vor dem Ende der rechteckigen Düse endet, wodurch sich der Beton innerhalb dieses Bereichs um den Bewehrungsstab formt, bevor der Stahlbeton die Düse verlässt.

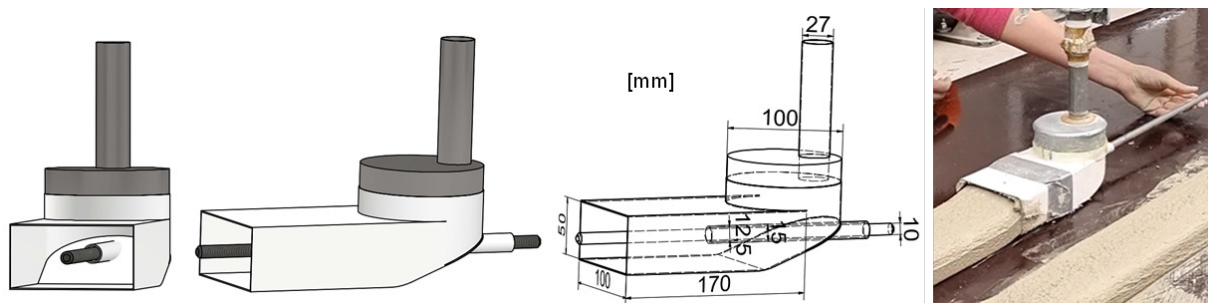


Bild 3.5: Darstellung des Düsenkonzepts für Längsbewehrungsintegration während des Betondrucks

Vorteilhaft an dieser Methode ist, dass durch die Abmaße der Düse vergleichsweise großformatige Betonschichten (z.B. mit Wandstärken >10 cm und Schichtdicken < 5cm) gedruckt werden können, so dass sich die Anzahl der Fugen gegenüber Verfahren mit kleineren Schicht-

tabmessungen im Bauteil reduziert. Zudem entstehen keine Fugen um den horizontalen Bewehrungsstab, so dass ein guter Verbund zwischen Bewehrungsstab und Beton erreicht wird. Nachteilig an dieser Methode ist die Integration der vertikalen Bewehrung bei der waagerechten Führung der Betonschichten („back-flow“). Bei einer Düse, die den Beton senkrecht nach unten drückt („down-flow“) und diesen sofort danach verlässt, werden die Betonschichten deutlich besser verdichtet, da ein höherer Druck auf die Schicht einwirkt. Zudem können mit dieser Methode vorzugsweise gerade Wände, jedoch keine komplexeren Geometrien, errichtet werden, da sie lediglich für die Integration geradliniger oder wenig gekrümmter Bewehrungsstäbe geeignet ist.

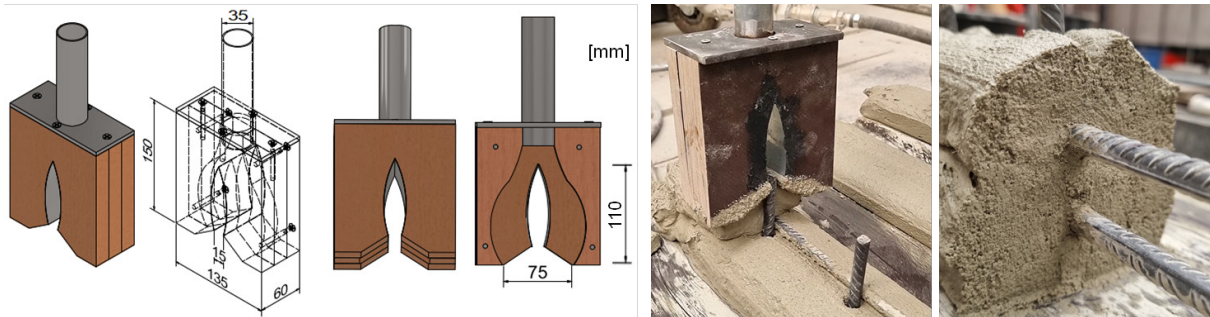


Bild 3.6: Darstellung des Gabeldüsenkonzepts zur Integration der Vertikal- und Längsbewehrung im 3D-Betondruck

Aus den vorangegangenen Nachteilen des zuvor beschriebenen Konzeptes wurde daher ein zweites Konzept, angelehnt an das AMoRC-Verfahren, geplant und getestet. Um über die vertikale Bewehrung hinweg zu fahren und dabei die Längsbewehrung zu umdrucken, benötigt der 3D-Betondrucker eine Gabeldüse. Eine beispielhafte Darstellung einer Gabeldüse zeigt Bild 3.6. Dadurch, dass der Beton die Düse senkrecht verlässt, baut sich mehr Druck auf als bei der back-flow-Methode. Folglich wird der Beton besser verdichtet, was die Anbindungsqualität der Fugen mutmaßlich verbessert. Der Spalt der Düse beträgt an seiner schmalsten Stelle 15 mm, sodass angelehnt an die Erkenntnisse aus vorhergegangenen Herstellversuchen [Cla20a] ein erfolgreiches Umdrucken von Bewehrungsstäben mit einem Durchmesser von 10 mm ohne Entstehung von Fehlstellen (Luft einschließen in den Beton) erwartet wird. Die Gabeltiefe der Düse lässt das Umdrucken von Bewehrungsstäben mit einer herausstehenden Höhe von ca. 10 cm zu. Mit einer Breite der Düsenöffnung von insgesamt 7,5 cm wird eine Betondeckung von ca. 3 cm je Seite sichergestellt.

3.2.2 Entwicklung der variablen Gabeldüse

Aus der obigen Beschreibung ist ersichtlich, dass das Konzept der Gabeldüse für die Anwendung im AMoRC-Verfahren grundsätzlich geeignet erscheint. Der vorgestellte Prototyp ist aufgrund des feststehenden Abstandes der Zwillingsdüsen jedoch nur für die Integration eines bestimmten Bewehrungsdurchmessers geeignet. In der Realität werden viele verschiedene Bewehrungsdurchmesser in einem Bauvorhaben eingesetzt, daher wird das Gabeldüsenkonzept mit variablen Düsenabständen vorgeschlagen, wobei der Abstand zwischen beider Zwillingsdüsen je nach Bedarf an die Größe des integrierten Bewehrungsstahls angepasst werden kann.

Umsetzung

Um den Abstand der beiden Düsen zu regulieren, wurde eine Konstruktion errichtet, die es ermöglicht, den Abstand mithilfe von zwei metallischen Abstandshaltern händisch einzustellen. In der Mitte des Düsenkopfs befindet sich ein verformbarer Schlauch, der das Einstellen des Düsenabstands erleichtert. Auf der Seite der Düse wurden zwei Seitenbleche hinzugefügt, um die gedruckte Oberfläche der Betonschichten zu glätten. Um sicherzustellen, dass ein guter Verbund zwischen den aus der Zwillingsdüse extrudierten Betonfilamenten und der vertikalen Bewehrung in der Mitte entsteht, wurde ein 45 Grad Eck an der Innenseite der Zwillingsdüse entfernt, um den Beton effektiver zur Mitte hin zu leiten, siehe Bild 3.7.

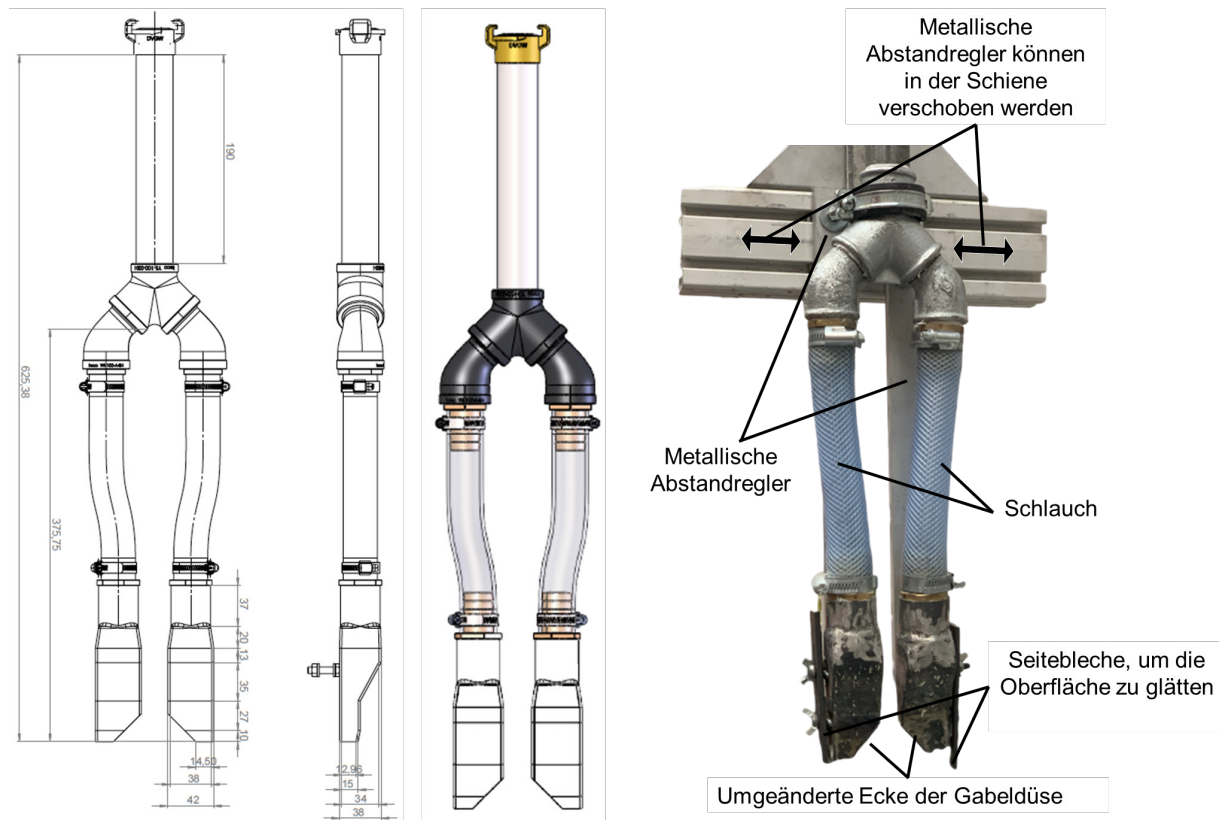


Bild 3.7: Prototype der variablen Gabeldüse mit optimierten Öffnungen

Die verwendete Düse besitzt eine „down-flow“-Strömungsrichtung. Die gedruckten Schichten sind breiter als die Düsenöffnung, damit sich die beiden gedruckten Filamente zur Mitte hin zu einer einzelnen Schicht zusammenbinden. In der ersten Schicht wird mehr Material gefördert, um den Raum zwischen der Zwillingsdüse und der Druckunterlage zu erstellen (Förderstufe 10, ca. 450 l/h, Tabelle 4.14). Jedoch verbinden sich die extrudierten Betonfilamente in der untersten Lage bei glatten Druckunterlagen (z.B. geölten Holzschalungen) nicht unmittelbar zu einer zusammenhängenden Schicht, siehe Bild 3.8 a), da die Reibung zwischen Betonfilament und Druckunterlage zu Beginn nicht ausreicht. Hierdurch wird das Filament eine Weile von der Düse mitgeschleppt, was zu einer unzureichenden Breite der Betonschicht führt. Sobald die gedruckte Betonschicht in stabilem Kontakt mit dem Boden ist, kann die erwartete Breite der Betonschicht realisiert werden, so dass sich beide Betonfilamente verbinden. Die entstandene Schicht wird durch den Auftrag der darauffolgenden Schicht weiter verdichtet, siehe Bild 3.8 b). Nach drei bis vier Schichten des Betondrucks (Schichthöhe von 10 mm) passt sich das Profil der extrudierten Betonfilamente dem Düsenprofil vollständig an, d.h. die

obere Kontur der Betonschicht stimmt mit der Geometrie der Gabeldüse überein, siehe Bild 3.8 c). Nachfolgend wird die Durchflussmenge des Betons konstant gehalten.

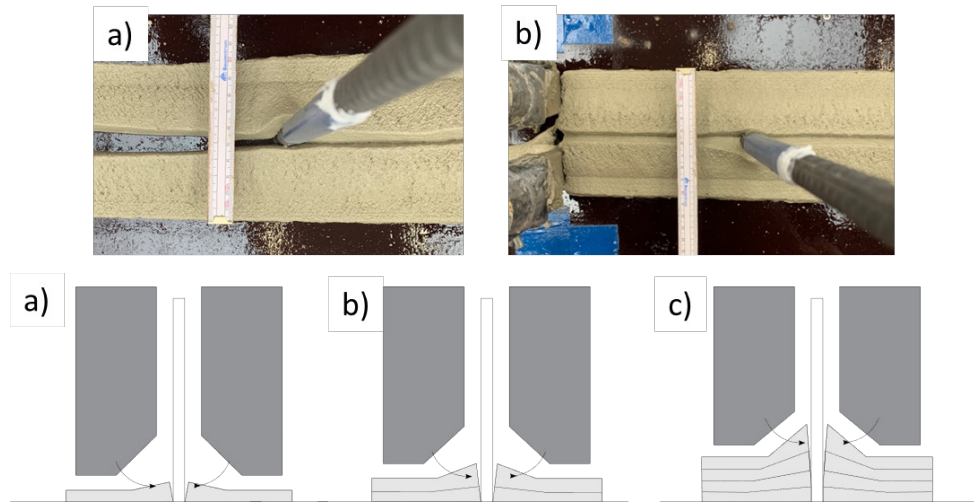


Bild 3.8: Stahlbetondruck mit variabler Gabeldüse: a) erste Betonschicht; b) zweite Betonschicht; c) stabiler Raum zwischen Zwillingsdüse und unterer Betonschicht

Die Verbundeigenschaften zwischen den mit diesem Druckkopf hergestellten Beton und Bewehrung werden im folgenden Kapitel 4.3 durch Ausziehversuche näher untersucht. Darüber hinaus wird die Leistungsfähigkeit der mit diesem Druckkopf hergestellten großformatigen Stahlbetonbalken durch Querkraft- und Biegeversuche in Kapitel 4.4 und 4.5 überprüft.

Erweiterungen

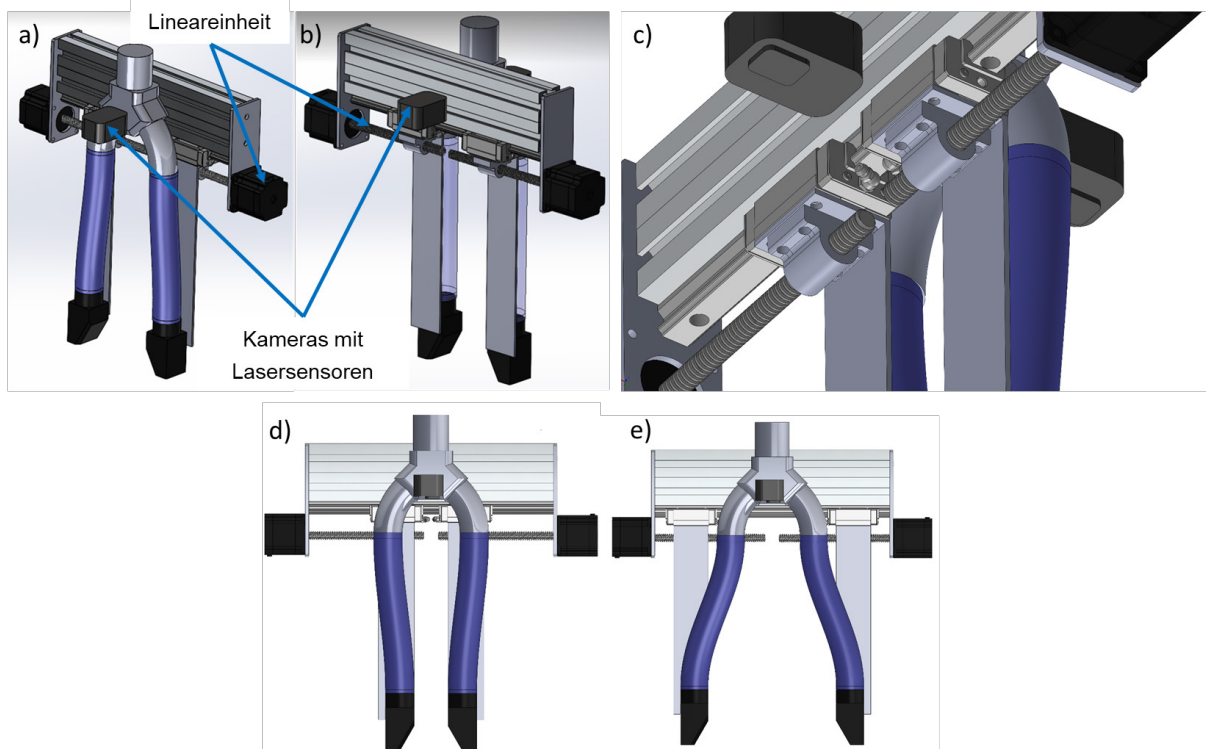


Bild 3.9: Präzise Abstandsregelung mithilfe der Lineareinheit und Sensorik: a) -b): Übersicht des Düsenkonzepts mit Kameras und Sensoren; c) Detaildarstellung der Schlitten der Lineareinheit; d) -e): Regelung des Düsenabstands

Der Düsenabstand der zuvor beschriebenen bzw. in diesem Projekt verwendeten Gabeldüse wurde manuell eingestellt. Um die Automatisierungsgrad des gesamten Druckprozesses zu erhöhen, soll der Düsenabstand zukünftig automatisch eingestellt werden. In Bild 3.9 ist das Konzept vorgestellt.

Anhand von Kameras, die die Extrusionsqualität kontinuierlich prüfen, können die Druckparameter bei Bedarf automatisch angepasst werden. Zudem sollen Distanzsensoren integriert werden. In Bild 3.9 c) wird die Funktionsweise der Lineareinheit veranschaulicht. Eine präzise Anpassung des Düsenabstands, auch während des Druckprozesses, soll hiermit ermöglicht werden. Falls Abweichungen im Bewehrungsgitter vorhanden sind, können die beiden Antriebsmotoren eine eventuelle Kollision des Druckkopfes mit der Bewehrung vermeiden. Zudem kann der Düsenabstand automatisch an eine potenzielle Querschnittsänderungen der Bewehrung angepasst werden. Zur Umsetzung dieser Erweiterungen sind weitere Forschungsanstrengungen erforderlich.

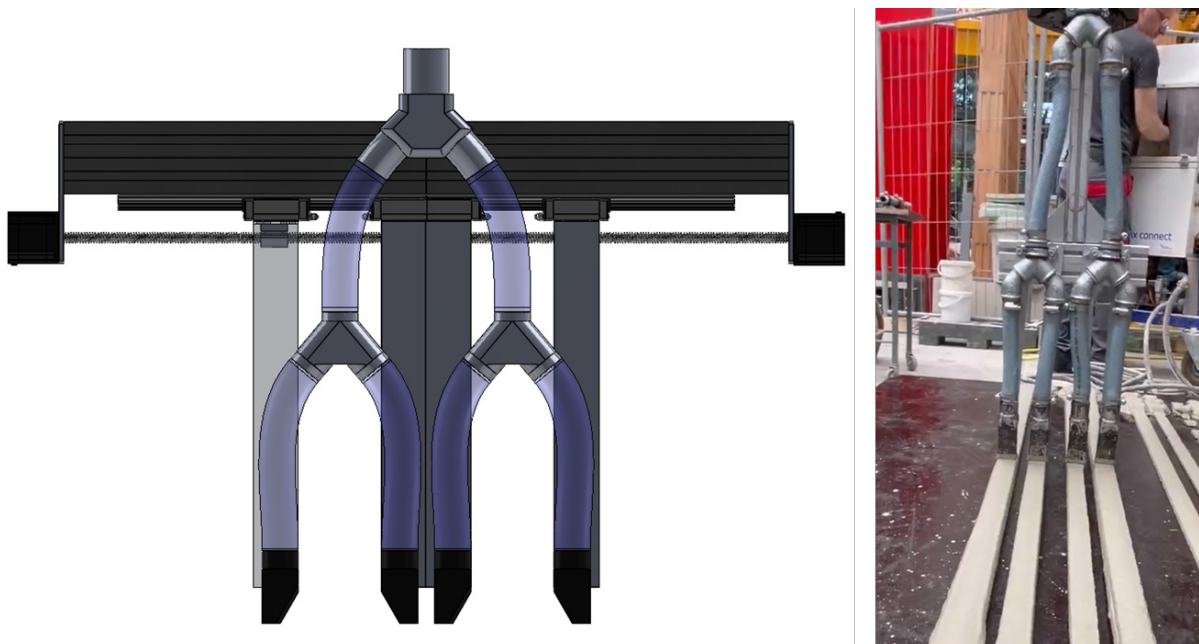


Bild 3.10: Druckkopf mit doppelten Gabelungen als Beispiel für die Düsenenerweiterung

Für Bauteile mit mehrlagigem Bewehrungsaufbau können Gabeldüsen mit einer höheren Anzahl von Einzeldüsen eingesetzt werden. Beispielhaft zeigt Bild 3.10 den Einsatz eines Druckkopfes mit vier Einzeldüsen, wodurch das gleichzeitige Umdrucken von zwei Querkraftbewehrungsreihe ermöglicht wird. Zur prototypischen Umsetzung wird in diesem Projekt zunächst der Fall einer einlagigen Bewehrung untersucht. Zukünftige Studien können die grundlegende Methode auf zwei oder mehr Gabelungen ausweiten.

3.3 Entwicklung der Pistole für Bolzenschweißen

Die in Bild 3.3 dargestellte Bolzenschweißpistole muss für den Einsatz in der vorliegenden Fügeaufgabe angepasst und erweitert werden. Die Entwicklung der Gerätetechnik von Pistole und Bolzenführung geht dabei Hand in Hand mit der Prozessentwicklung und Parameterfindung.

3.3.1 Pistolenentwicklung

Für das axiale Fügen von Bewehrungsstäben, wie in Bild 3.11 dargestellt, ist eine geeignete Vorrichtung erforderlich. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde mit der Entwicklung eines federbelasteten Zentriermechanismus begonnen. Diese ist in Bild 3.11 dargestellt. Hierbei wurde eine Prozesskammer auf dem vorhandenen Stativ der Bolzenschweißpistole befestigt und mit einer Schutzgaszuführung versehen. Der pistolenseitige Betonstahlbolzen wurde mit einer handelsüblichen Spannvorrichtung für Gewindebolzen gespannt, der andere Betonstahlbolzen wurde mit Hilfe von vier federnd gelagerten Kunststoffklemmen, die an der Prozesskammer befestigt wurden, zentriert geführt. Die Vorrichtung erfüllt die Anforderungen an die Schutzgasatmosphäre und die axiale Ausrichtung der Fügepartner. Es fehlt jedoch die Möglichkeit, das Stromrückführkabel am richtigen Bolzen zu befestigen. Kunststoffspannbanken erlauben keine Kontaktierung des Fügepartners innerhalb der Konstruktion. Außerdem ist es mit diesem ersten Prototyp sehr schwierig, den Bolzen auf der Pistolenseite einzuführen. Das kritischste Merkmal dieser ersten Entwicklung ist jedoch die nicht ausreichend steife Führung der Fügepartner. Die im Prozess entstehenden schmelzflüssigen Kontaktflächen gleiten im Schritt 3 (Bild 3.11) bis zum Erstarren der Schmelze erheblich auseinander. Dies führt zu einem erheblichen Versatz der Bolzenmittelachsen im Fügeergebnis. Alle weiteren Entwicklungen und Prototypen sind auf diese Problematik ausgerichtet, um eine ausreichend steife Positionierung zu gewährleisten.

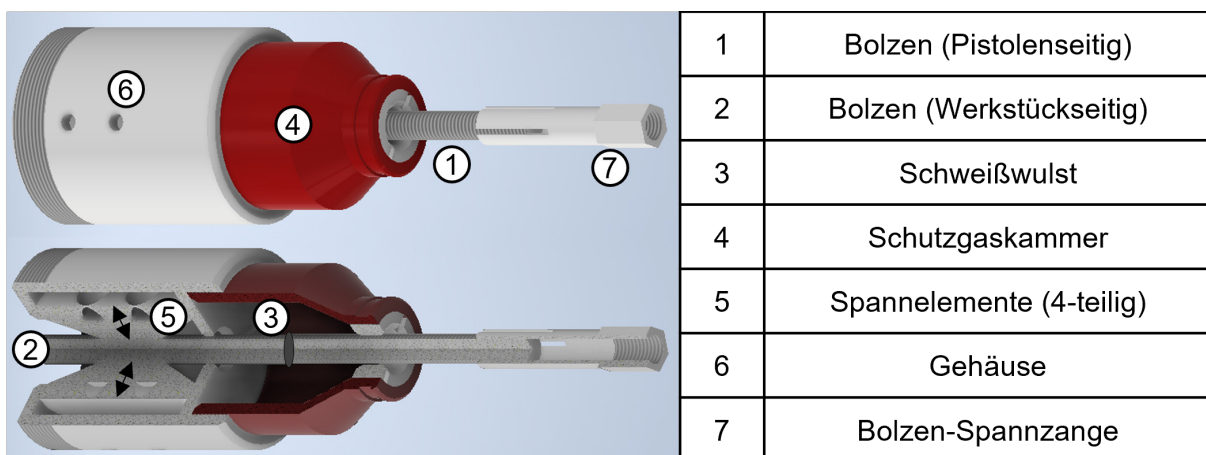


Bild 3.11: Erster Prototyp für das Schweißen von Bolzen auf Bolzen

Aufbauend auf den Erkenntnissen des ersten Prototyps und weiteren Untersuchungen wurde eine dem Abbreinstumpfschweißen entlehnte Vorrichtung entwickelt, die in Bild 3.12 dargestellt ist. Diese aus Baustahl gefertigte Konstruktion bietet neben einer höheren Steifigkeit und festeren Spannmöglichkeit auch die Möglichkeit der elektrischen Kontaktierung für den Fügeprozess. Als Prozesskammer wird eine modifizierte Schutzgasdüse mit betonseitiger Abdeckung verwendet, die für das Bolzenschweißen kommerziell vertrieben wird. Die Variante mit der Spanmechanik, welche auf einer Gewindestange als Loslager und einem 90° V-Winkel basiert, ermöglicht eine gute manuelle Zugänglichkeit. Die Fügepartner sind nach dem Spannen nicht mehr beweglich und der Fügeprozess ist reproduzierbar.

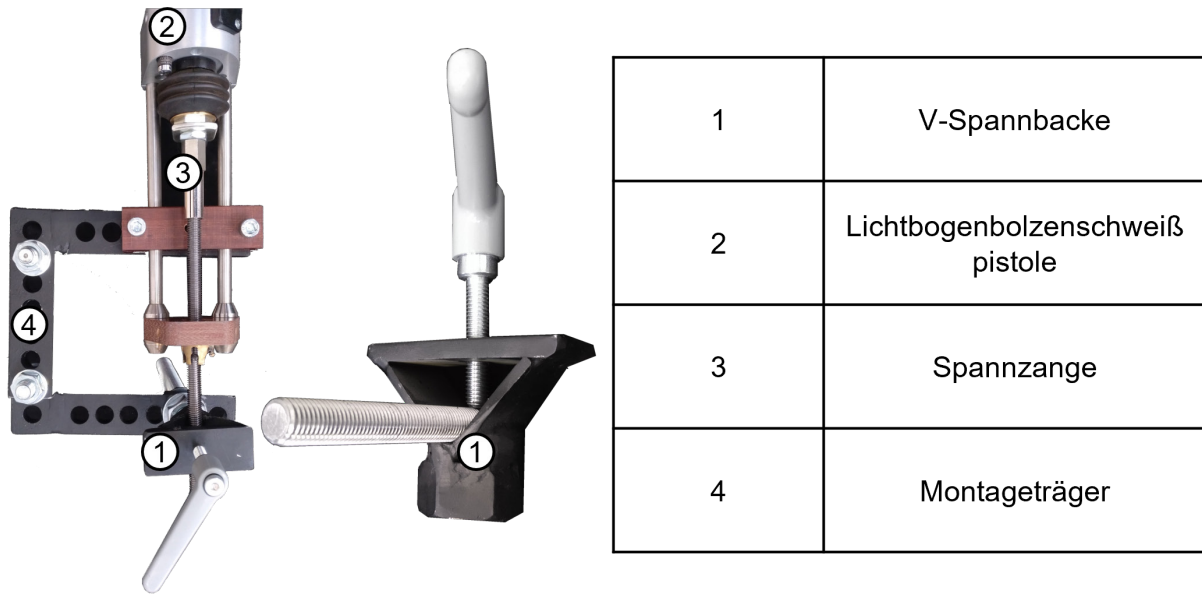


Bild 3.12: V-Spannbacke zum Schweißen von Bolzen auf Bolzen

Als kritische Randbedingung für die vorgestellte Spannmechanik wurden die zum Teil stark voneinander abweichenden Bolzengeometrien identifiziert. Die Methode des Abscherens der zum Teil mehrere Meter langen Betonstahl-Halbzeuge und deren Aufteilung in 100 mm lange Bolzen führt zu radialen Verformungen an den Bolzen, siehe Bild 3.13. Diese lippenförmigen Enden in Verbindung mit einer durch den Walzprozess der Rippe eingebrachten Unrundheit des Materials machen eine wiederholgenaue Positionierung dieses Materials in den gezeigten V-Spannbacken unmöglich. Zudem kommt, dass die Enden der Bolzen präpariert werden mussten, um wiederholgenaue Schweißungen zu produzieren. Als geeignete Vorbereitung hat sich eine im 140° Winkel geschliffene Spitze (3 und 4) und eine plane Gegenseite gezeigt. Der unbearbeitete Ausgangszustand der Bolzen (1 und 2) kommt durch das Trennen der Bolzen durch Abscheren zustande.

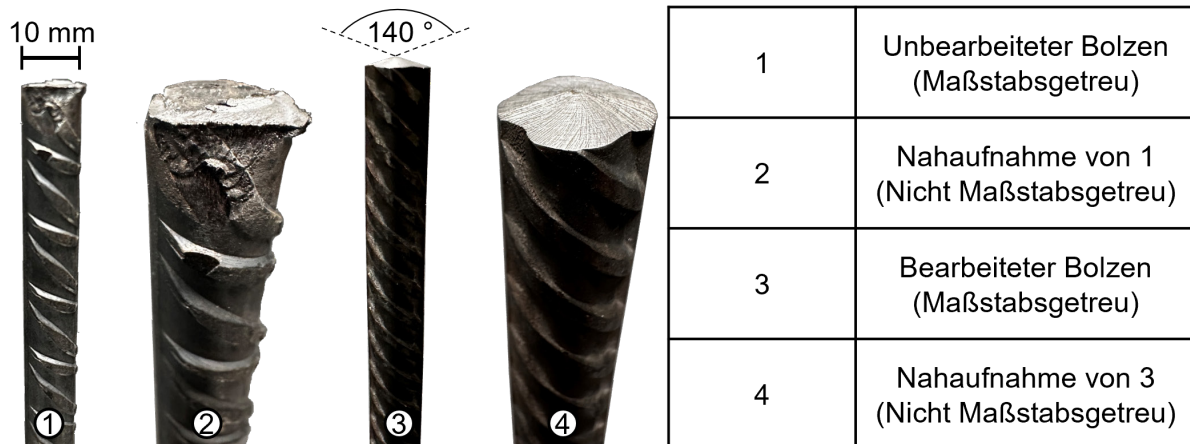


Bild 3.13: Beschaffenheit der Bolzen vor und nach der Bearbeitung

Als Folge dieser erheblichen Formabweichung der Bolzen von einem gleichmäßigen Zylinder ist eine vollständige radiale Einspannung und damit eine Zwangszentrierung erforderlich. Eine radiale Klemmung wird häufig in der spannenden Fertigung für rotierende Werkzeuge wie z. B. Fräsmaschinen verwendet. Ein Beispiel sind die sogenannten ER-Spannzangen. Diese in Bild 3.14 dargestellten Spannzangen ermöglichen mit Hilfe eines Hohlkegels eine gleichmäßige Verringerung der Spannöffnung bis zum zentrischen Spannfall. Die Bolzenspannung auf

der Pistolenseite wird in der nächsten Entwicklungsstufe, die ebenfalls in Bild 3.14 dargestellt ist, mit einer solchen ER-32 Spannzange realisiert. Die Spannelemente stehen in verschiedenen Durchmessern zur Verfügung. Aufgrund der unterschiedlichen Durchmesser der verwendeten Betonstahlbolzen wird immer eine im Nenndurchmesser größere Spannzange verwendet. So wird für 8 mm Bolzen eine 9 mm ER-32 Spannzange verwendet. Genauso wird für die Bolzendurchmesser von 10 und 12 mm vorgegangen.

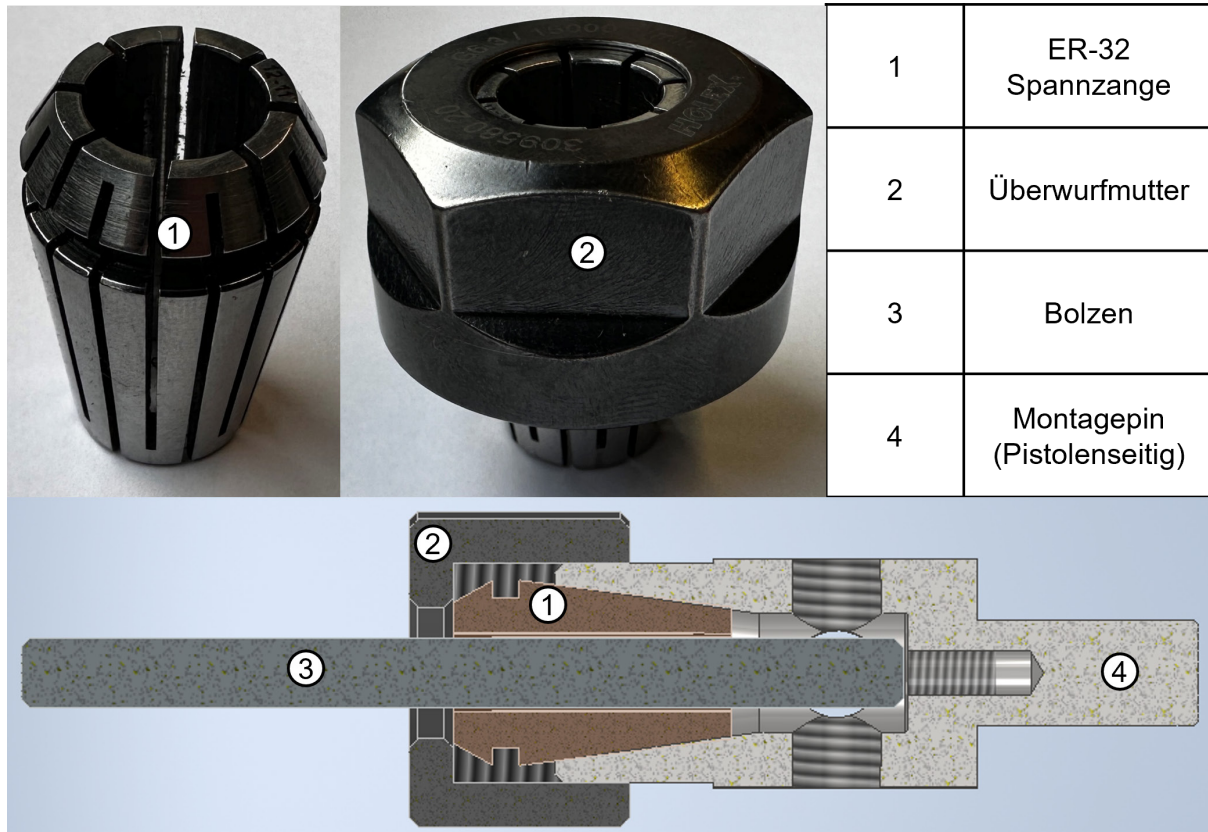


Bild 3.14: ER-32 Spannzange hier am Beispiel 12 bis 14 mm (oben rechts) und pistolenseitiges Spannelement (unten)

Die betonseitige Einspannung muss neben der absolut präzisen Positionierung, der elektrischen Kontaktierung auch ein problemloses Entfernen der Pistole vom gedruckten Bauteil gewährleisten. Diese Anforderung schließt auch den Einsatz der genannten ER-Spannzangen auf der Bauteilseite aufgrund des auftretenden Schweißwulstes aus. Die genannten Anforderungen an die betonseitige Einspannung sind nachfolgend kurz aufgeführt:

- Zentrisches Spannen von Betonstahlbolzen
- Unempfindlichkeit gegenüber unregelmäßiger Bolzengeometrie
- Elektrische Kontaktierung des Bolzens auf der Betonseite
- Ausreichende Öffnungsweite der Spannzange zum Greifen und Wiederfreigeben des Bolzens
- Hohe Positioniergenauigkeit und Steifigkeit

Die genannten Anforderungen widersprechen sich zum Teil explizit, weshalb ein zweiter Prototyp entwickelt werden musste. Die in Bild 3.15 dargestellte Mechanik erfüllt die aufgeführten Anforderungen und kann zusätzlich durch die Wahl einer geeigneten Drehmomentquelle über eine Ablaufsteuerung mechanisiert betrieben werden.

Die Mechanik in Bild 3.15 basiert auf einer Kraftübertragung durch ein Gewinde auf einen Kolben, die durch eine Formfräsung die beiden Greifer symmetrisch zusammenführt. Die große Öffnungsweite wird durch den Hebel der Greifbacken realisiert. Dieser mechanische Nachteil wird wiederum durch den Hebelvorteil des Gewindes relativiert. Insgesamt ist für die Betätigung des Mechanismus ein vergleichbares Drehmoment erforderlich wie für das einfache Spannen der V-Klemme.

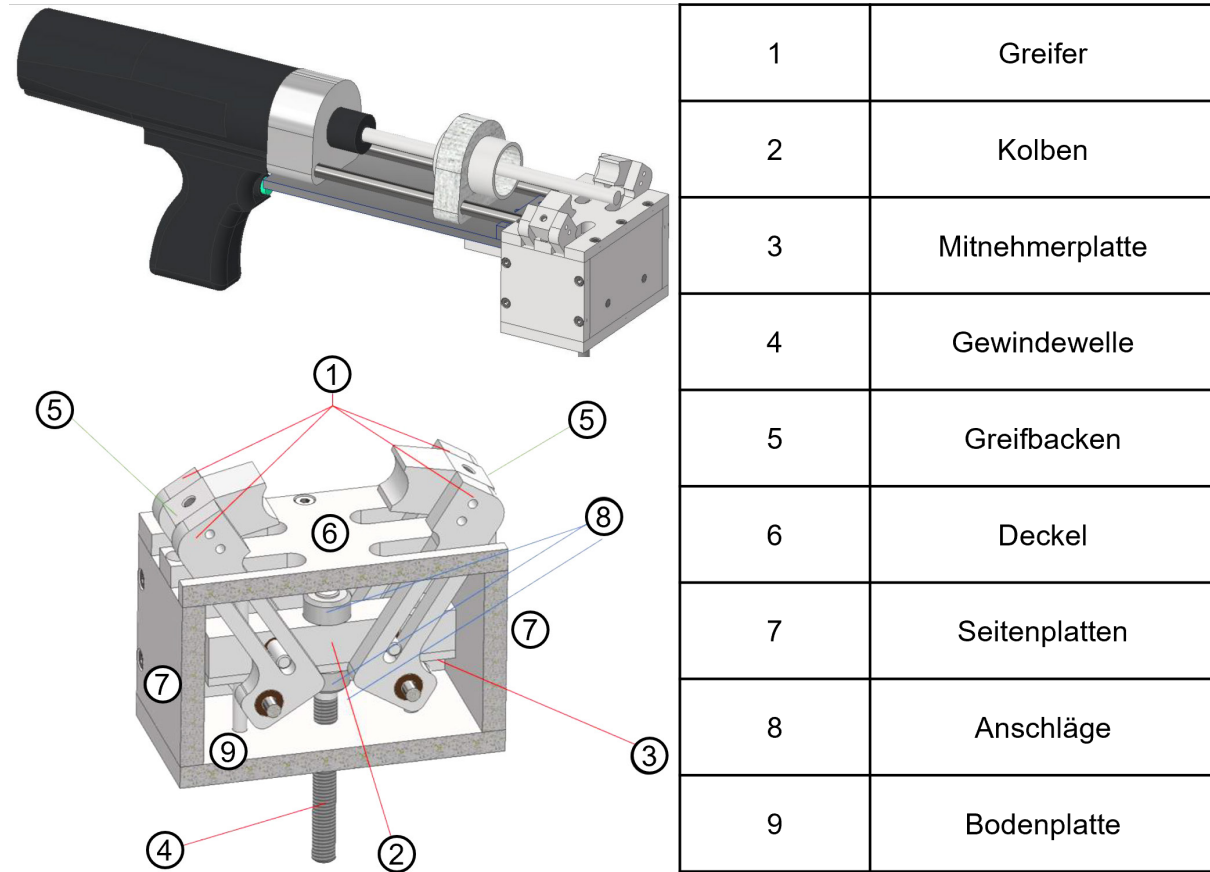


Bild 3.15: Mechanisierbare Greifmechanik an Lichtbogenbolzenschweißpistole (oben) und Detailansicht (unten)

Die beschriebenen Entwicklungsschritte bezogen sich bisher ausschließlich auf den Schweißprozess selbst und die dafür grundsätzlich notwendige Gerätetechnik. Die Verwendung in Kombination mit dem Beton-3D-Druck macht zusätzlich zu den genannten Anforderungen auch eine mechanisierte bzw. fernsteuerbare Bolzenzuführung und Einspannung notwendig. Die vorhandenen Systeme im Bereich des Lichtbogenbolzenschweißens werden verwendet, um in der automatisierten Fertigung Bolzen kontinuierlich zuzuführen. Nach Sichtung der vorhandenen Technologien und Anwendungen wurde anschließend die Variante Stückbeladung gewählt. Hierbei wird nach jedem Fügevorgang mit Hilfe des die Schweißpistole bewegenden Industrieroboters an eine feste Position gefahren und anschließend ein neuer Bolzen „nachgeladen“ (siehe Bild 3.16).

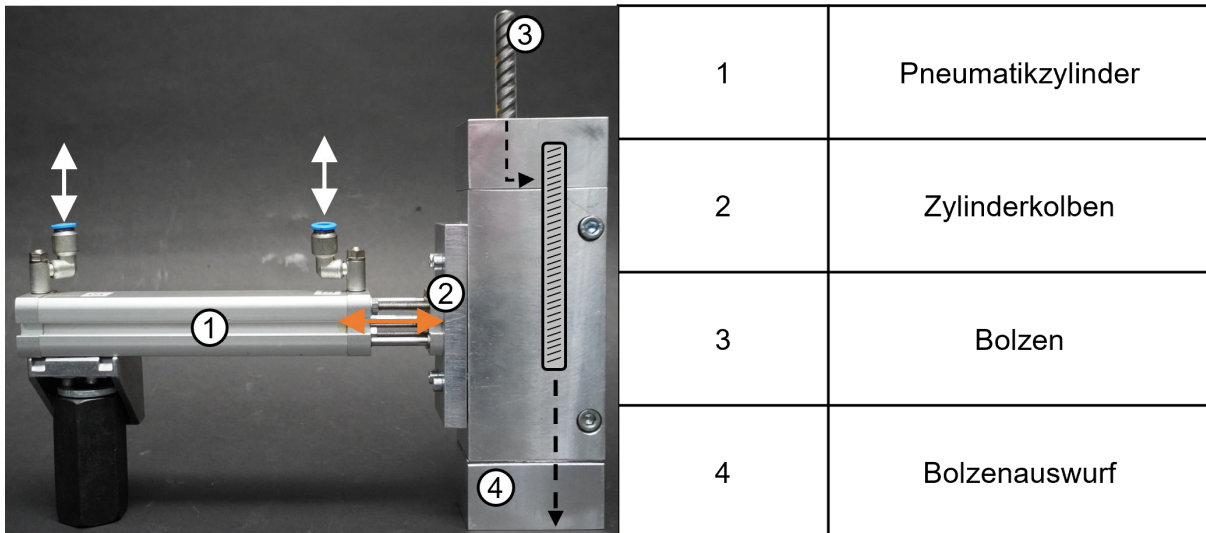


Bild 3.16: Aufbau des Magazins

Die Abgabe und das Einspannen des Bolzens erfolgen beim fertigen Prototyp mit Hilfe einer fernsteuerbaren elektrischen Mechanik. Nach Aufnahme eines neuen Bolzens wird mit Hilfe des Roboters ein zu verlängernder Bolzen angefahren und mit dem in Bild 3.15 dargestellten und beschriebenen Greifmechanismus aufgenommen und elektrisch kontaktiert.

Gleichzeitig wird der Bolzen durch den Spanmechanismus auf der Pistolenseite mit dem Bolzen auf der Betonseite ausgerichtet. Sobald die Position gefunden ist, wird der Greifmechanismus, ebenfalls pneumatisch ferngesteuert, betätigt. Sobald der Greifvorgang abgeschlossen ist, wird das Schutzgas in die Prozesskammer eingeleitet und der Prozess ferngesteuert gestartet. Nach 50 bis 500 ms, je nach Bolzendurchmesser, werden beide Greifmechanismen gelöst und die Pistole von der Fügestelle entfernt. Die Pistole wird wieder in den Bereich des Bolzenmagazins gefahren und erneut ferngesteuert beladen. Der Vorgang beginnt von neuem.

Bild 3.17 zeigt den fertigen Prototypen für das ferngesteuerte Zuführen, Spannen und Schweißen der Bolzen.

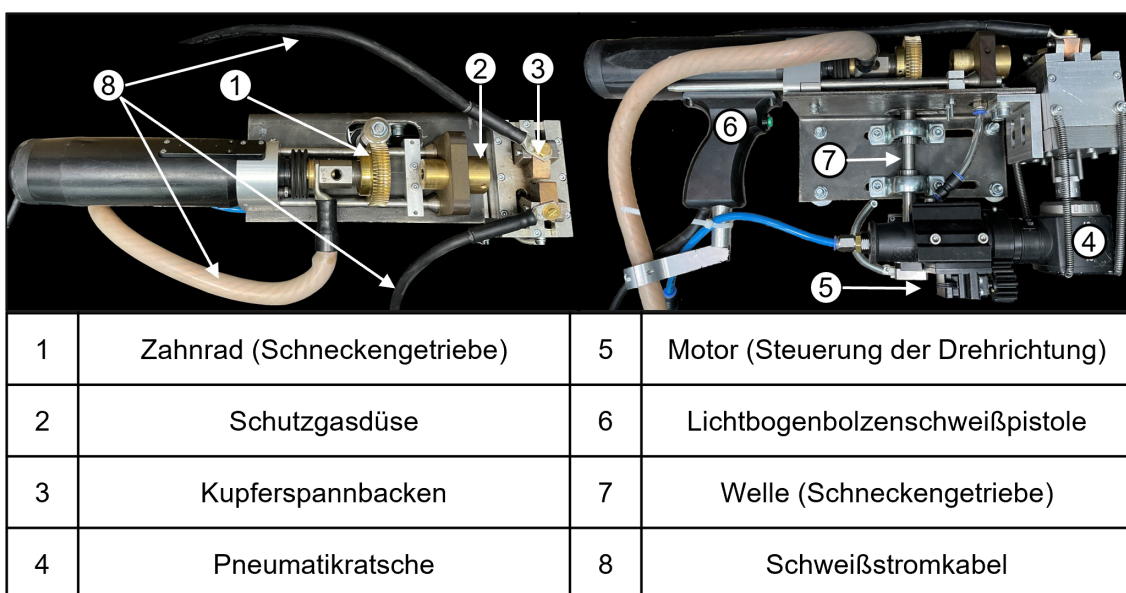


Bild 3.17: Lichtbogenbolzenschweißpistole mit finalem Aufbau zum Schweißen von Bolzen auf Bolzen

Die bereits beschriebene Einspannung auf der Pistolenseite wird über ein Schneckengetriebe und einen Schrittmotor betätigt. Bei der betonseitigen Einspannung handelt es sich um den in Bild 3.15 dargestellten und beschriebenen Mechanismus, der über die sichtbare Gewindestange betätigt wird. Diese wiederum wird durch einen pneumatischen Antrieb betätigt, der das erforderliche Drehmoment aufbringt.

3.3.2 Implementierung des Schweißprozesses

Für das Lichtbogenbolzenschweißen von Betonstahl muss ein Parameterfenster für die in Kapitel 2.4 dargestellten Prozessparameter gefunden werden. Dazu wird für jeden Bolzendurchmesser ein Versuchsrahmen wie in Bild 3.18 dargestellt erstellt. Für jeden Parameter werden mehrere Schweißungen (zwischen 3 und 5) durchgeführt. Nach einer ersten Sichtprüfung auf offensichtliche Verbindungsfehler wird ein Biegeversuch durchgeführt. Zusätzlich zu den genannten Parametern der Schweißstromquelle und der Schweißpistole wird die Bolzengeometrie, d.h. eine Spitzenform und eine definierte Bolzenoberseite, im Verlauf der Untersuchungen aufgenommen. Die Einstellung eines Bolzens mit 140° Spitze und einer ebenen betonseitigen Bolzenoberseite hat sich hierbei als bestmöglich erwiesen.

Die in der Bild 3.18 durch Kreise markierten Parameter wurden durch optische und Biegeprüfungen als gut befunden und anschließend durch einachsige Zugversuche und metallographische Untersuchungen weiter analysiert.

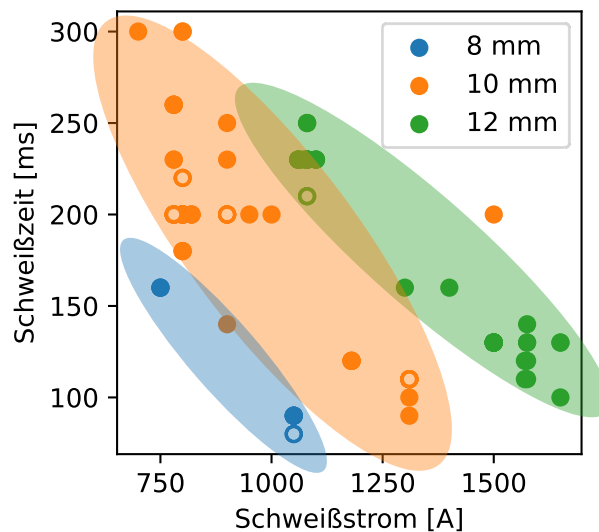


Bild 3.18: Übersicht der durchgeführten Schweißungen

Die Ergebnisse der Zugversuche (Kapitel 4.2.4) und die Erkenntnisse aus der metallographischen Untersuchung fließen in eine Anpassung der Prozessparameter ein. Die in Tabelle 3.1 dargestellten Prozessparameter stellen nach Auswertung der Versuche die bestmöglichen Parameter für die jeweiligen Durchmesser dar.

Dabei ist zu beachten, dass bei kleineren Bolzenquerschnitten geringfügige Abweichungen in der axialen Positionierung zu einer prozentual größeren Abweichung von der Sollgeometrie führen und damit auch einen größeren Einfluss auf den Prozess und das Fügeergebnis haben. Es hat sich gezeigt, dass das Prozessfenster für das Schweißen von 8 mm Bolzen deutlich kleiner ist als das für 10 mm Bolzen und dieses wiederum kleiner als das für 12 mm Bolzen.

Tabelle 3.1: Parameter mit erfolgreicher Schweißung

Durchmesser [mm]	8	10			12		
Variante	1	1	2	3	1	2	3
Schweißstrom [A]	1050	900	1180	1310	1080	1080	1570
Schweißzeit [ms]	80	200	120	110	210	230	110
Abhub [mm]	2,4	2,4	2,4	2,7	2,7	2,7	2,7
Schutzgasvolumenstrom [l/min]	18	13	18	15	20	15	15
1. Kopfform	Spitz (140 °)						
2. Kopfform	plan						
Dämpfungsgrad	entfernt						
Überstand [mm]	5-7						
Schutzgasmischung	ArC - 18						

4 Experimentelle Untersuchungen zum Tragverhalten

4.1 Materialiencharakterisierung des 3D-gedruckten Betons

4.1.1 Grundlagen

Neben den rheologischen Anforderungen, die 3D-gedruckte Materialien im frischen Zustand erfüllen müssen, weisen sie nach dem Aushärten andere Eigenschaften als konventioneller Beton auf. Insbesondere die anisotropen Eigenschaften sowie die Auswirkungen von Zeitintervallen im Druckprozess auf die mechanischen Eigenschaften wie beispielsweise Tragfähigkeit und Duktilität von Bauwerken sind von Bedeutung. Diese werden durch den geringeren Verbund der Fugen zwischen den gedruckten Betonschichten beeinflusst.

Anisotropes Materialverhalten

Grundsätzlich ist Beton ein anisotropes Material, weil er unterschiedliche mechanische Eigenschaften in verschiedenen Belastungsrichtungen aufweist. Die Anisotropie von Beton ist u.a. auf die Ausrichtung der Gesteinskörnung und die Art und Weise, wie er gegossen oder geformt wird zurückzuführen. Durch die schichtweise Ablage beim extrusionsbasierten 3D-Betondruck wird die dem Beton intrinsische Anisotropie durch zusätzlich orthotropes Materialverhalten überlagert. Orthotropie bezeichnet eine spezifische Form der Anisotropie in Materialien, bei der diese unterschiedliche physikalische Eigenschaften entlang dreier orthogonal zueinanderstehender Achsen haben [Meu21; Ner19; Pau18].

3D-gedruckte Betonbauteile zeigen infolge des Extrusionsprozesses unterschiedliche Festigkeiten, Steifigkeiten oder Dehnungen, je nachdem, ob sie parallel oder quer zur Richtung des Druckprozesses belastet werden. Für die Charakterisierung 3D-gedruckter Betonbauteile ist es wichtig, die durch das schichtweise Drucken entstehenden Beton-Beton-Verbundfugen und die daraus resultierende Anisotropie möglichst genau zu erfassen.

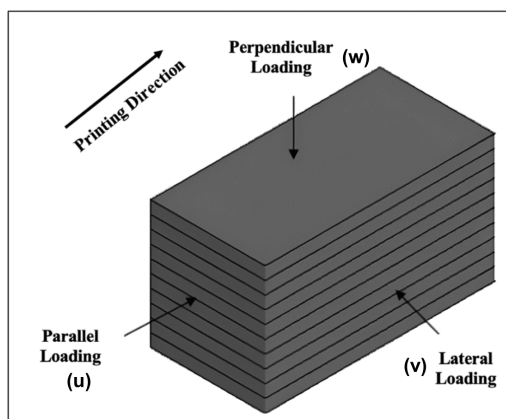


Bild 4.1: Belastungsrichtungen von 3D-gedruckten Proben [Sah23]

Die verfügbaren Forschungsarbeiten führen hierzu im Allgemeinen Versuche in bis zu 3 orthogonalen Richtungen durch. Es wurden verschiedene Definitionen für diese Richtungen verwendet. Bos et al. [Bos16] schlugen die Richtungsabhängigkeit beim Drucken als lokales Koordinatensystem vor, wobei u die Richtung des gedruckten Pfades, v die Senkrechte zur Druckrichtung in der Druckebene und w die Senkrechte zur Druckebene ist (Bild 4.1). Wenn Proben nicht in jeder orthogonalen Richtung gleich groß sind, z. B. wenn es sich um Balken handelt, ist die obige Definitionsreihe unvollständig. Daher hat RILEM TC ADC [Mec22] die Einführung einer erweiterten Version der Richtungsdefinition vorgeschlagen,

die in Bild 4.2 dargestellt ist.

Im Gegensatz zu konventionellem Beton [Ner19; Pau18] ist 3D-gedruckter Beton nicht nur anisotrop, sondern aufgrund der fehlenden Verdichtung nach dem Auftragen des Materials auch weniger homogen. So können beispielsweise Schwankungen des Volumendurchflusses

zur Bildung von Poren, zu einer lokalen Zunahme der Anisotropie und Inhomogenität und sogar zu Rissen oder Aufwölbungen in den Zwischenschichten führen. Diese lokalen Defekte können die mechanische Leistung [Dre20; Fen15] und die Dauerhaftigkeit der gedruckten Bauwerke [Wan19] erheblich beeinflussen und müssen daher während der Prüfung sorgfältig untersucht und bei der Konstruktion der Bauwerke berücksichtigt werden.

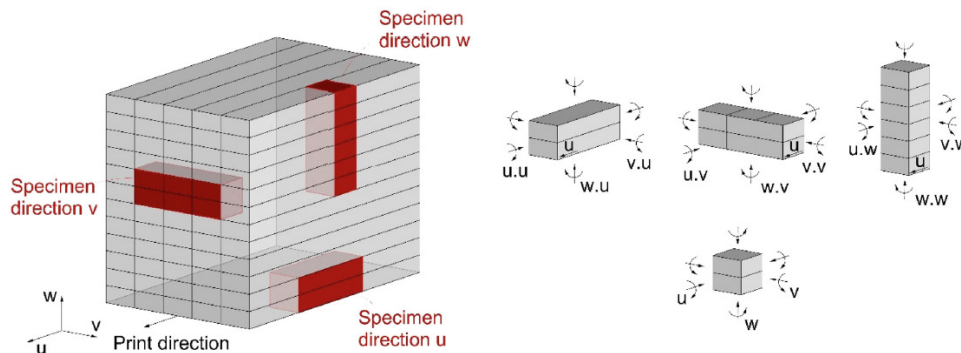


Bild 4.2: Definition der Orientierung und Belastungsrichtung der 3D-gedruckten Proben von RILEM TC ADC [Mec22]

Mechanische Prüfungen zur Bewertung anisotroper Eigenschaften wurden meistens in Form von Biegezug- und Druckversuchen durchgeführt [Din23; Fen15; Liu22]. Sanjayan et al. [San18] kamen zu dem Schluss, dass die Druckfestigkeit der Mischungen in Abhängigkeit von der Belastungsrichtung um 34 % und die Biegezugfestigkeit um 7 % variierte. Daher wurde davon ausgegangen, dass die Auswirkung der Belastungsrichtung auf die Druckfestigkeit des Probekörpers dominanter ist. Ma et al. [Ma19] berichteten ebenfalls, dass die durchschnittliche Druckfestigkeit von 3DPC-Proben im Vergleich zu herkömmlichem Beton bei lateraler (v-Richtung) und senkrechter (w-Richtung) Belastungen um 7,0 % bzw. 25 % abnahm. Rahul et al. [Rah19] zeigten, dass die Belastungsrichtung keinen signifikanten Einfluss auf die Druckfestigkeit von 3D-gedruckten Mischungen hat.

Darüber hinaus wurde hervorgehoben, dass die niedrigste Biegezugfestigkeit von 3DPC-Mischungen bei paralleler Belastung (u-Richtung) erreicht wurde. Dabei hängt die Biegezugfestigkeit von 3D-gedruckten Betonmischungen in hohem Maße von Parametern wie den Umgebungsbedingungen, den Materialbestandteilen und der Belastungsrichtung ab [Pan17]. Panda et al. [Pan17] untersuchten zudem die Biegetragfähigkeit für 3D-gedruckte Geopolymermischungen mit Faserzugabe und einer Faserlänge von 3 mm. Die Ergebnisse zeigten ähnliche Festigkeiten in senkrechte (w) und laterale (v-Richtung), während die geringste Biegezugfestigkeit in paralleler (u-Richtung) Richtung festgestellt wurde. Diese Erkenntnisse werden von Neralla et al. [Ner19] bestätigt. Dies ist auf die geringere Zugfestigkeit senkrecht zu den Betonfugen zurückzuführen. Obwohl kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Belastungsrichtung und der Biegezugfestigkeit der 3D-gedruckten Betonmischungen feststellbar war, konnte eine richtungsabhängige Biegezugfestigkeit von 3D-gedrucktem Beton festgestellt werden [Nem18; Wol19]. Eine Übersicht experimentell ermittelter Biegezugfestigkeiten aus der Literatur findet sich in Tabelle 4.1. Die Prüfkörperabmessungen betragen für die Biegeversuche zumeist 160 mm x 40 mm x 40 mm, variierten aber zwischen 120 mm x 40 mm x 40 mm und 250 x 30 x 25 mm. Alle Prüfkörper wurden mit 2 Lagen hergestellt und die Hälften anschließend für die Druckversuche genutzt.

Tabelle 4.1: Ausgewählte Biegezug- und Druckfestigkeit der 3D-gedruckten Bauteile in der Literatur

Quellen	Mischungen	Biegezugfestigkeit (MPa)			Druckfestigkeit (MPa)		
		w	u	v	w	u	v
Sanjayan et al. [San18]	Zementmörtel	7.7	-	7.1	14.5	10.8	19.5
Ma et al. [Ma19]	Zementmörtel mit Basaltfasern	6.51	3.34	5.03	29.8	39.6	37.0
Rahul et al. [Rah19]	Zementmörtel	12.0	6.0	11.0	62.0	59.0	60.0
Nerella et al. [Ner19]	Zementmörtel	9.97	3.05	10.0	64.5	78.0	72.7
Panda et al. [Pan17]	Geopolymer mit 1% Glasfaser	5.8	3.4	5.2	20.9	19.3	22.0
Wolfs et al. [Wol19]	Zementmörtel	4.29	3.68	4.70	28.51	29.19	29.19

Einfluss der Fugen

Die Zwischenschicht der gedruckten Strukturen stellt erwartungsgemäß das schwächste Element dar und wirkt sich maßgeblich auf die mechanische Leistung und Dauerhaftigkeit der gedruckten Elemente aus [Dre20; Pan17]. Unterschiedliche Einflussparameter auf die Verbundfestigkeit sind in Bild 4.3 dargestellt [Liu22].

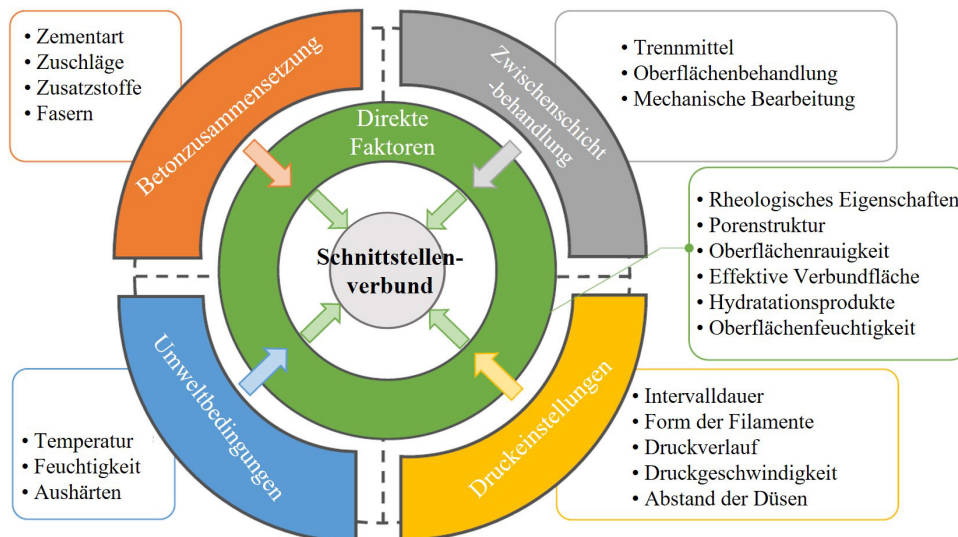


Bild 4.3: Einflussfaktoren auf die Verbundfestigkeit der 3D-gedruckten Betonfugen in Anlehnung [Liu22]

Eine der effektivsten Möglichkeiten zur Verbesserung der Verbundfestigkeit ist die Verwendung eines angemessenen Druckzeitintervalls [Bab21; Kri21], das durch die Geometrie der zu druckenden Bauteile und die Druckgeschwindigkeit beeinflusst wird [Le12; Mar19]. Generell wurde von verschiedenen Forschern festgestellt, dass die Zwischenschichthftung mit zunehmendem Druckintervall abnimmt [Pan18; Tay19]. Dies kann auf die Bildung „kalter“ Fugen

zurückgeführt werden [Şah23]. Mit zunehmendem Zeitintervall nimmt die C-S-H-Bildung zu, die Steifigkeit und Festigkeit der bereits aufgetragenen Schicht wachsen an, was zu einer geringeren Menge an interagierenden Verbindungsbereichen zu der nachfolgenden Schicht führt [Xu21]. Dennoch beobachteten einige Wissenschaftler auch Fälle, die den oben genannten Gesetzen widersprechen. Sanjayan et al. [San18] stellten fest, dass Proben mit einer Zwischenschichtdauer von 10 min und 30 min eine 47,7% höhere Verbundhaftung aufwiesen als Proben mit einer Zwischenschichtdauer von 20 min. Die Erklärung für dieses Phänomen war, dass die Verbundfestigkeit positiv mit der Oberflächenfeuchtigkeit korreliert. Diese war infolge von Verdunstungstrocknung nach 20 min minimal und nahm bei 30 min infolge von Betonbluten erneut zu, was zu höheren Verbundfestigkeiten führte. Chen et al. [Che20] berichteten, dass kurze Zeitintervalle (20 s-10 min) durch experimentelle und numerische Methoden keinen Einfluss auf die Verbundeigenschaften zeigen. Da die untere Schicht eine geringe Steifigkeit aufweist, könnte die Belastung die Ausrichtung der oberen Oberfläche der vorherigen Schicht verändern und so die interagierende Haftfläche vergrößern. Wie bereits erwähnt, kann das Druckzeitintervall nicht als unabhängiger Wert betrachtet werden, sondern muss zusammen mit anderen Prozessparametern berücksichtigt werden [Wol19]. In der Studie von Kalipçilar et al. [Kal16] wurde die Auswirkung der Variation des Zeitintervalls zwischen den Schichten auf den Karbonatisierungswiderstand von 3D-gedruckten Betonmischungen untersucht und mit herkömmlichen Betonmischungen verglichen. Zu diesem Zweck wurden die durchschnittlichen Karbonatisierungstiefen von konventionellem Beton und 3D-gedruckten Probekörpern mit einer Zeitintervall von 0 min, 10 min, 20 min und 30 min gemessen. Die Bilder der mit Phenolphthalein-Indikator gesprühten Mischungen sind in Bild 4.4 dargestellt.



Bild 4.4: Probe mit gesprühtem Phenolphthalein-Indikator [Kal16]

Neben der Bewertung der Auswirkung des Zeitintervalls zwischen den Druckschichten auf die Eigenschaften der Verbundfugen haben Wissenschaftler auch die Auswirkungen auf Druck-, Biege- und Zugfestigkeit untersucht, wie in Tabelle 4.2 dargestellt.

Tabelle 4.2: Auswirkungen des Druckzeitintervalls auf die mechanischen Eigenschaften

Quellen	Zeitintervall (min)	Verbundfestigkeit (MPa)	Biegezugfestigkeit (MPa)	Druckfestigkeit (MPa)	Zugfestigkeit (MPa)
Sanjayan et al. [San18]	10	0.65	7.1	13.0	
	20	0.34	7.4 v	16.0 w	-
	30	0.65	6.9	14.5	
Chen et al. [Che20]	0.33				3.4
	1	-	-	-	2.8 w
	10				2.6
Van Der Putten et al. [van19b]	0	5.0		61.0	
	10	2.1		52.0	
	30	1.8	-	39.5 w	-
	60	1.3		38.2	
Wolfs et al. [Wol19]	0.25		3.68		3.55
	60		3.51		3.45
	240	-	3.48 u	-	- u
	420		3.34		-
	1440		3.10		2.80
Luo et al. [Luo23]	0		15.94	27.7	
	60	-	13.23 u	24.3 v	-
	180		9.09	20.8	

Sanjayan et al. [San18] fanden heraus, dass sich die Biege- und Druckfestigkeit in lateraler (v) oder senkrechter (w) Richtung nicht signifikant verändert, wenn die Zeitintervalle 10, 20 oder 30 Minuten betragen. Van der Putten et al. [van19b] untersuchten die Auswirkung der Intervallzeit zwischen den Schichten (0, 10, 30 und 60 Minuten) von 3D-gedruckten Betonmischungen auf die Druckfestigkeit. Die Ergebnisse zeigten, dass der Widerstand des gedruckten Probekörpers gegen Verformungen, die durch das Gewicht der zweiten Schicht und den Extrusionsdruck verursacht wurden, mit zunehmender Zwischenschichtzeit höher war. Ähnliche Ergebnisse wurden von verschiedenen Forschern erzielt [Di13; Per16]. Wolfs et al. [Wan19] untersuchten die 7-Tage-Biegezugfestigkeit von 3D-gedruckten Betonmischungen. Es wurde festgestellt, dass bei einer Erhöhung des Zeitintervalls von 60 Minuten auf 24 Stunden die Biegezugfestigkeit in der parallelen Richtung um 11,7 % abnahm und die Zugfestigkeit in dieser Richtung um 21,1 % sank. Luo et al. [Luo23] untersuchten die Zwischenschicht-Zugfestigkeit von 3D-gedrucktem zementhaltigem Verbundmaterial in verschiedenen Richtungen. Die Ergebnisse zeigten, dass die Biegezugfestigkeit in der parallelen (u) Richtung und die Druckfestigkeit in der lateralen (v) Richtung mit zunehmender Druckzeit von 0 bis 180 Minuten signifikant abnahmen. Darüber hinaus wirkten der Fülleffekt und der hohe Feuchtigkeitsgehalt

der Zwischenschichtmittel den negativen Auswirkungen der Intervallzeit auf die Breite der Zwischenschicht entgegen, wodurch der Verbund zwischen den Schichten verbessert werden kann. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Zeitintervall bekanntermaßen einen komplexen Einfluss auf die Qualität des Zwischenschichtverbundes hat. Die Zugfestigkeit, die Druckfestigkeit und die Biegezugfestigkeit werden durch das Druckintervall beeinflusst. Daher wird der Einfluss des Zeitintervalls auf die Tragfähigkeit nachfolgend untersucht, um ausreichende Druckqualität des Betons sicherzustellen.

4.1.2 Ausgangsmaterialien

Im vorliegenden Projekt wurden zwei verschiedene Betone verwendet, die aufgrund ihres Größtkorns strenggenommen der Kategorie der Mörtel zuzuordnen sind: (a) ein selbst entwickelter druckfähiger Beton mit geringem Bindemittelgehalt und einem Größtkorndurchmesser von 2 mm (fortlaufend abgekürzt mit OWN) und (b) ein kommerzieller Druckbeton der Firma Saint-Gobain Weber (Beton fortlaufend bezeichnet als SGW) vom Typ 3D 145-2 mit einem Größtkorndurchmesser von 1 mm. Der Beton (a) basiert auf einer gemeinsamen Arbeit mit dem Institut für Baustoffe der TU Dresden. Um die Umweltbelastung zu verringern und die Dauerhaftigkeit zu verbessern, werden die hohen Anforderungen an das Frischbetonverhalten mit weniger Feinbestandteilen durch eine hohe Packungsdichte der Gesteinskörnung erreicht. Die Zusammensetzung des selbst entwickelten Betons ist in Tabelle 4.3 aufgeführt. Sie weist einen geringeren Bindemittelgehalt auf als die meisten veröffentlichten oder im Handel erhältlichen druckfähigen Materialien auf Zementbasis.

Tabelle 4.3: Zusammensetzung des selbst entwickelten Betons (OWN) (in kg/m³)

Zement CEMII/A-LL 42,5N	Mikrosilika	Quarzsand 0.063-0.25 (F38)	Quarzsand 0.1-0.5	Quarzsand 1-2	Wasser
566	11,3	355,2	590,6	472,4	259,8

Laut dem Produktdatenblatt von SGW für den Beton 3D 145-2 besteht dieser aus Portlandzement CEM I, Kalkstein, Fasern und Zuschlagstoffen bzw. Zusatzmitteln. Genauere Angaben zur Zusammensetzung der Mörtelmischung werden vom Hersteller nicht veröffentlicht. Die Rohdichte des Betons beträgt 2200 kg/m³ und die Druckfestigkeitsklasse bei einem Wasserzementwert (W/Z) von 0,55 wird mit C35/45 angegeben, vgl. Tabelle 4.4.

Tabelle 4.4: Technische Daten des Weber 3D 145-2 (SGW) [Sai19]

Bindemittel	Dichte [kg/m ³]	W/Z	Druckfestigkeit [N/mm ²]			Druckfestigkeitsklasse	Schwinden [mm/m]	Maximale Korngröße [mm]	Expositions- klasse	Verarbeit- barkeit Zeit [min]
			1 d	7 d	28 d					
CEM I	2200	<0,55	>18	>30	>45	C35/45	<1,5	1	X0, XC3, XD1, XF1, XA1	120

4.1.3 Versuchsprogramme

Es wurden Biegezug-, Druck-, Zug- und Scherversuche durchgeführt, um das Verhalten der 3D-gedruckten Betone zu charakterisieren. Aufgrund der Anisotropie des schichtweisen Materialaufbaus wurden die Orientierungen der Probekörper bei den Prüfungen für Biegezug- und Druckversuche berücksichtigt, siehe Bild 4.2. Für jede Variante wurden nach 28 Tagen 6 Ausrichtungen der Proben getestet, d. h. w.u., v.u., w.v., u.v., u.w. und v.w. Die Scher- und Zugversuche wurden zur Charakterisierung des Verbunds der Fugen zwischen den gedruckten Schichten verwendet. Daher wurde bei den Zug- und Scherversuchen nur eine Ausrichtung geprüft. Darüber hinaus wurden gegossene Prüfkörper mit dem gleichen Material als Referenz hergestellt. Tabelle 4.5 zeigt die Übersicht des Versuchsprogramms für den selbst entwickelten Beton (OWN) und den Weber 3D (SGW).

Tabelle 4.5: Versuchsmatrix zur Charakterisierung des 3D-gedruckten Beton

	Biegezugversuch		Druckversuch		Zugversuch		Scherversuche	
Ausrichtung →	w.u., v.u., w.v., u.v., u.w., v.w.				senkrecht		parallel	
Abmessung →	40x40x160 mm ³		40x40x40 mm ³		40x40x40 mm ³		Zylinder Ø30 mm	
	Versuchszahl							
Zeitintervall ↓	OWN	SGW	OWN	SGW	OWN	SGW	OWN	SGW
gegossen	3	3	6	6	3	3	3	3
0	18	18	36	36	3	3	3	3
10	18	-	36	-	3	-	3	-
30	18	-	36	-	3	-	3	-
60	18	18	36	36	3	3	3	3

4.1.4 Herstellung der Prüfkörper

Für die Materialcharakterisierung wurden zunächst unbewehrte Betonkörper gedruckt (Bild 4.5 (a)), aus denen anschließend die gewünschten Probekörper gesägt wurden. Die untersuchten Zeitintervalle betreffen lediglich die in Bauteilmitte angeordnete Schicht, um ein Versagen in dieser Schicht sicherzustellen. Aufgrund der Anisotropie des geschichteten Materialgefüges wurden auch die Orientierungen der Probekörper für die Prüfungen berücksichtigt (Bild 4.5 b): (1) u-Richtung: parallel zur Druckrichtung; (2) v-Richtung: rechtwinklig zur Druckrichtung; (3) w-Richtung: rechtwinklig zur Druckebene). Die Fugen mit Druckpause bzw. die Druckrichtung wurden entsprechend markiert (vgl. Bild 4.5 c)).

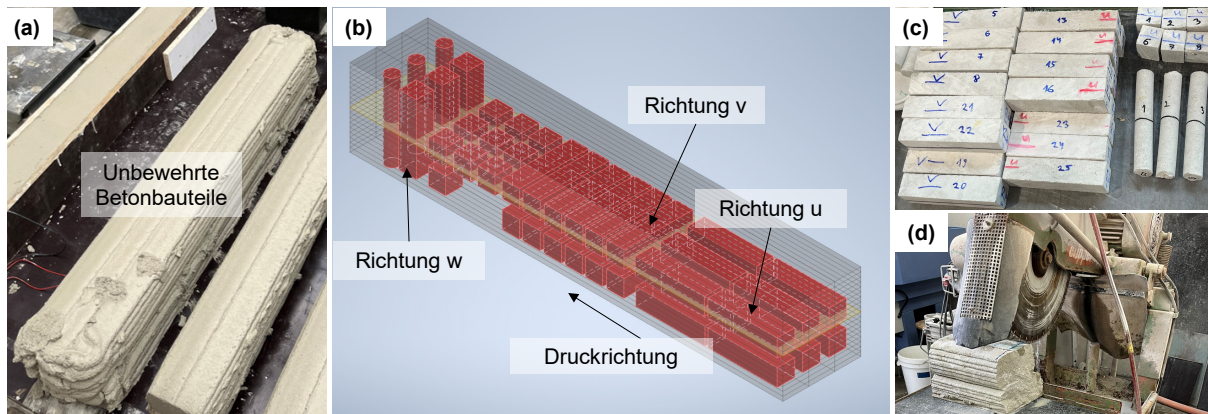


Bild 4.5: Herstellung der bewehrten Betonbauteile zur Materialcharakterisierung

Während die gesägten Proben direkt zur Durchführung der Biegezug-, Druck- und Zugversuche geeignet waren, mussten die Proben für die Scherversuche weiter aufbereitet werden. Zunächst wurden aus dem erhärteten gedruckten Betonteil mithilfe eines Hilti DD120 Diamantbohrgerätes und einem Diamant-Kernbohrer Bohrkern mit 30 mm Durchmesser entnommen. Die Bohrkern wurden orthogonal zur signifikanten Fuge entnommen. Um die Versuchskörper in der Testvorrichtung bestmöglich einspannen zu können, wurden die entnommenen Bohrkern anschließend in Stahlrohre einbetoniert. Dafür wurden 68 mm lange Stahlrohrstücke mit einem Außendurchmesser von 51 mm verwendet. Jeder Bohrkern wurde von beiden Seiten jeweils in ein Rohr einbetoniert, sodass sich mittig zwischen den Rohren eine 8 mm große Lücke bildete, in der sich die signifikante Fuge im Bohrkern befand. Zum Einbetonieren der Bohrkern in die Rohre wurde eine eigens entwickelte Konstruktion verwendet, siehe Bild 4.6.

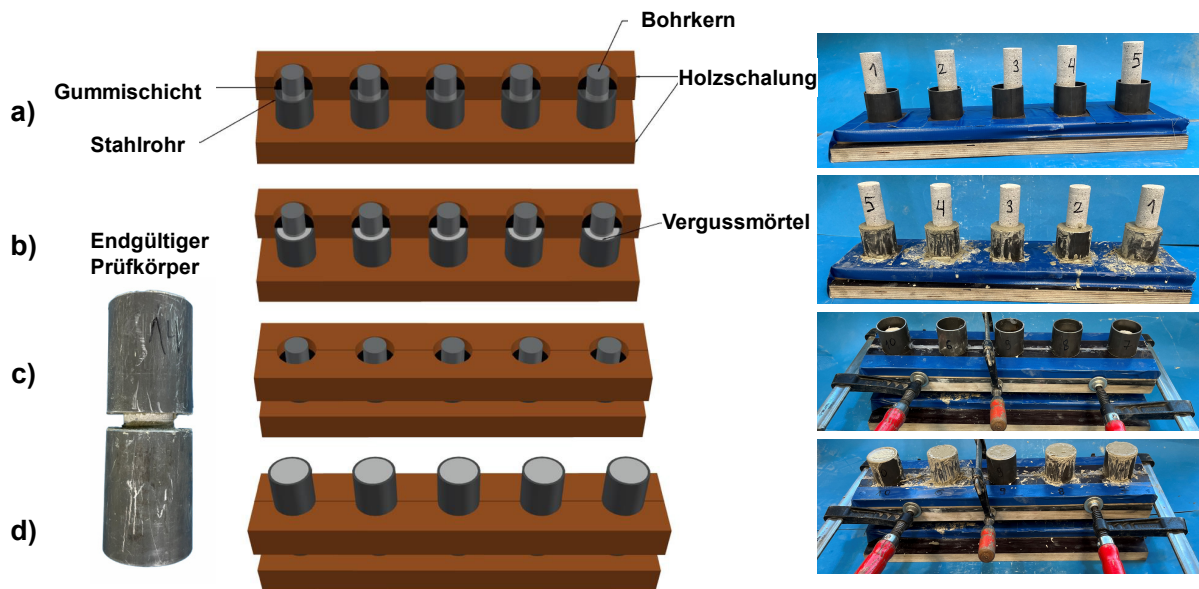


Bild 4.6: Schematische Darstellung zur Herstellung der Proben für die Scherversuche

Die Konstruktion bestand aus einem Holzbrett mit fünf runden Aussparungen mit einem Durchmesser von 51 mm und zwei Holzbauteilen mit jeweils fünf halbkreisförmigen Aussparungen des gleichen Durchmessers. In der Mitte der beiden Holzbauteile wurden zwei 4 mm dicke Gummimatten fixiert, die jeweils in der Mitte der Aussparungen eine kleinere halbkreisförmige Aussparung mit 29 mm Durchmesser besaßen.

Zum Präparieren der Proben wurden zunächst fünf der erwähnten Stahlrohrstücke in den Aussparungen des Holzbretts platziert, wobei der Durchmesser der Aussparungen dem Außendurchmesser der Rohre entsprach. Mit Hilfe von Abstandhaltern und einem der Holzbauteile wurden die einzubetonierenden Bohrkerne so in den Stahlrohren platziert, dass sich die Fuge etwa 4 mm über der Oberkante der Stahlrohre befand (vgl. Bild 4.6 a). Anschließend wurden die Rohrstücke mit HF10 Hochfestverguss-Mörtel der Firma Pagel vergossen (vgl. Bild 4.6 b). Durch Einfügen des zweiten Holzbauteils entstand oberhalb der bereits ausbetonierten Rohrstücke eine weitere Aussparung des gleichen Durchmessers der Rohre, aus der die durch die ausgesparten Gummimatten fixierten Bohrkerne herausstanden (vgl. Bild 4.6 c)). Die Gummimatte, deren Aussparungen den gleichen Durchmesser wie die Bohrkerne aufwies, bilden dabei einen Abstand von 8 mm zwischen den Rohren und hielten die signifikante Fuge frei von Mörtel. Zuletzt wurden fünf weitere Rohrstücke in den Aussparungen platziert und ausbetoniert (vgl. Bild 4.6 d).

4.1.5 Versuchsaufbau

Eine Übersicht der Versuchsaufbauten der Biegezug-, Druck-, Zug- und Scherversuche befindet sich in Bild 4.7. Die Biegezug- und Druckversuche wurden nach DIN EN 196-1 [DIN05b] durchgeführt. Dazu wurden die Prismen zunächst auf Biegung getestet und nach ihrem Versagen wurden die zwei entstandenen Prismenhälften wiederum jeweils auf Druck getestet. Bei den Druckversuchen wurden an der Ober- und Unterseite des Probekörpers zwei Metallplatten mit den Abmessungen 40 x 40 mm² verwendet, um eine gleichmäßige Lasteinleitung für alle Prismenhälften zu gewährleisten. Nachfolgend werden die Aufbauten der zentrischen Zugversuche und der Scherversuche vorgestellt.



Bild 4.7: Übersicht der Versuchsaufbauten zur Charakterisierung des 3D-gedruckten Betons mit Biegezug-, Druck-, Zug- und Scherversuche

Zugversuche

Zur direkten Bestimmung der Zugfestigkeit wurden einaxiale Zugversuche durchgeführt. Die Zugkrafteinleitung erfolgte über zwei an Ober- und Unterseite angeklebte Stahlstempel, an denen Gewindestangen zur Aufbringung der Zugkraft angebracht waren (siehe Bild 4.8). Der verwendete Klebstoff wurde in einem Verhältnis von 3:1 aus Epoxidharz und Härter hergestellt und musste einen Tag lang aushärten. Zwei IWA an Vorder- und Rückseite wurden zur Bestimmung der Längenänderung angebracht.

Proben, deren Filamente ohne Zeitversatz gedruckt wurden (Zeitintervall = 0 min), wurden in der Grenzschicht benachbarter Filamente zur Rissinitiierung eingekerbt, während dies bei

Proben mit längeren Zeitintervallen aufgrund der naturgemäß schwächeren Adhäsion nicht notwendig war, siehe Bild 4.8.

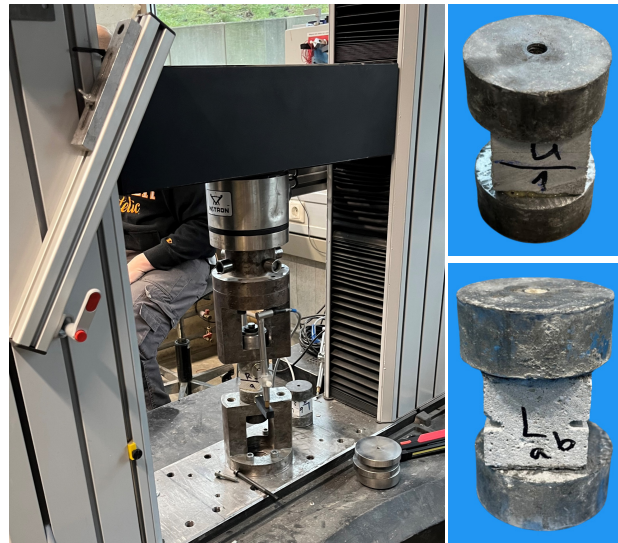


Bild 4.8: Versuchsaufbau des Zugversuchs der Betonfugen

Die verwendete Maschine für Zug- und Scherversuche war eine *Instron 5582* von *Hegewald & Peschke* ($F_{\max} = 100 \text{ kN}$). Die Versuche wurden weggesteuert mit einer Geschwindigkeit von $0,833 \mu\text{m/s}$ durchgeführt.

Scherversuche

Um die Scherfestigkeit der Betonfugen zwischen gedruckten Betonschichten zu ermitteln, wurde der in [Meu21] vorgestellte und am IMB entwickelte Scherversuchsaufbau verwendet.

Für die Versuche wurden Bohrkern senkrecht zu den Schichten aus dem gedruckten Filament mit einem Durchmesser von 30 mm entnommen. Der Aufbau des Prüfstands besteht aus zwei punktsymmetrisch zur Probe angeordneten Stahlrahmen, die in vertikaler Richtung zueinander verfahren werden können (siehe Bild 4.9). Der untere Teil ist am Boden der Testanlage befestigt, während der obere Teil an der Prüfmaschine angeschlossen ist und weggesteuert verfahren werden kann. Der horizontale Abstand zwischen den beiden Aufbauteilen wurde auf 8 mm. Die Probe wird in den Prüfstand eingelegt und durch halbkreisförmigen Stahlteile positioniert, die durch Schrauben in den Außenseiten beider Stahlrahmen gehalten sind. Diese Ausführung gewährleistet eine normalkraftfreie Lagerung der Probe. Als Prüfmaschine wurde ebenfalls die Instron 5582 verwendet. Um das Nachbruchverhalten genauer zu messen, wurde der Versuch weggesteuert mit einer Geschwindigkeit von $0,2 \mu\text{m/s}$ (entspricht $0,012 \text{ mm/min}$) durchgeführt. Die vertikale Relativverschiebung der Probekörperhälften wurde mit IWA gemessen.

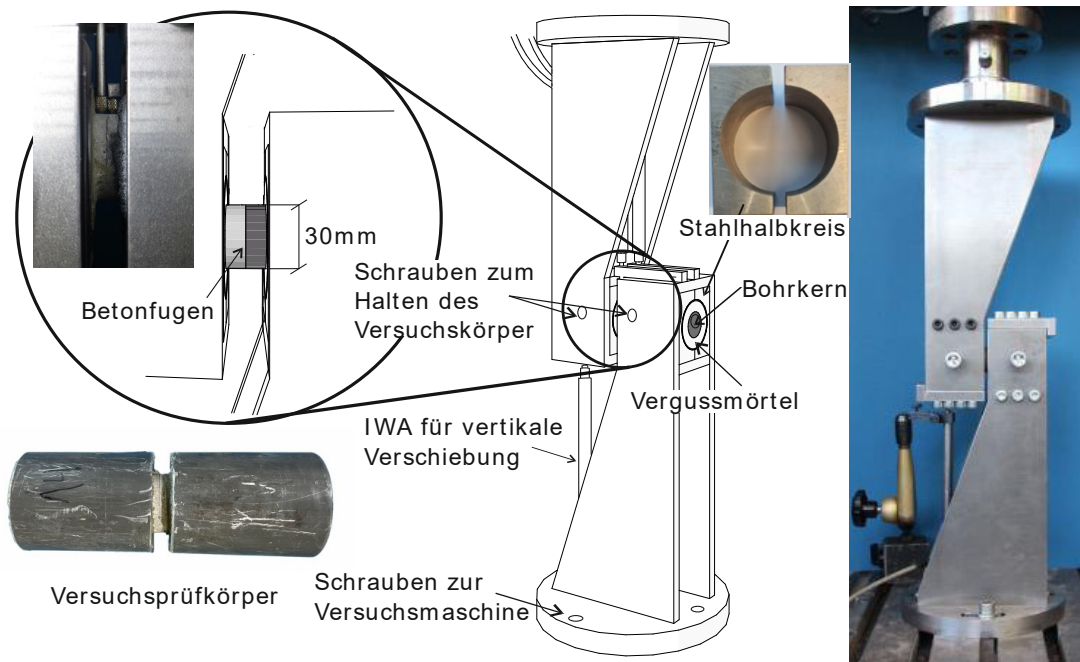


Bild 4.9: Aufbau des Scherversuchs

4.1.6 Versuchsergebnisse

Biegezugversuche

Ohne Zeitintervall beträgt die durchschnittliche Biegezugfestigkeit der kontinuierlich 3D-gedruckten Proben in allen Richtungen mit OWN und SGW etwa 75 % bzw. 80 % der Biegezugfestigkeit der gegossenen Referenzproben. Die Prüfkörper mit OWN zeigen in v-Richtung die höchste Biegezugfestigkeit (durchschnittlicher Wert von 6,73 MPa für w.v- und u.v-Richtungen ohne Zeitintervall), während die Probekörper mit SGW die höchste Biegezugfestigkeit in u-Richtung (6,53 MPa für w.u- und v.u-Richtungen) aufzeigten. Die niedrigste Biegezugfestigkeit lag für beide Betone in w-Richtung vor (OWN: 5,21 MPa, SGW: 4,40 MPa für u.w- und v.w-Richtungen, siehe Bild 4.10).

Wenn die Proben nach dem Verhältnis zwischen Verbundfugen und Belastungsrichtung eines typischen Wandquerschnittes kategorisiert werden, so gehören w.u- und w.v-Proben zu den senkrechten Belastungen, v.u- und u.v-Proben zu den lateralen Belastungen, und u.w- und v.w-Proben zu den parallelen Belastungen (d.h. gleich wie Prüfkörper in w-Richtung).

Bei den Versuchen ohne Zeitintervall zeigt sich eine höhere laterale Biegezugfestigkeit (v.u. & u.v.: 6,19 MPa) im Vergleich zur Festigkeit der senkrecht beanspruchten Probekörper (w.u. & w.v.: 5,90 MPa) für das eigene Material, während die Biegezugfestigkeit der parallel beanspruchten Probekörper am geringsten ist. Die mit SGW-Mörtel hergestellten Probekörper weisen dagegen die höchste Biegezugfestigkeit bei senkrechter Beanspruchung (6,51 MPa) und die geringste bei paralleler Beanspruchung auf. Dieses Ergebnis deckt sich auch mit den Erkenntnissen aus der Literatur, wonach bei Biegeversuchen die Prüfkörper mit parallelen Belastungsrichtungen die geringsten Biegezugfestigkeiten aufweisen, während die maximalen Biegezugfestigkeiten verschiedener Werkstoffe sowohl in der senkrechten als auch in der lateralen Belastungsrichtung liegen.

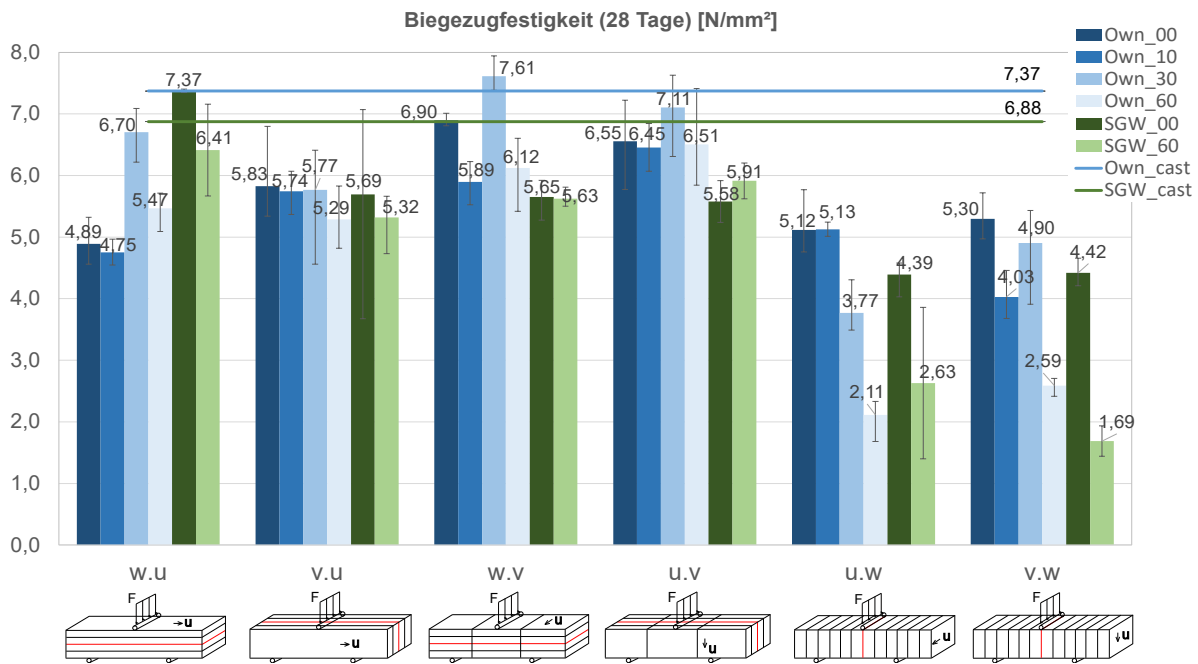


Bild 4.10: Biegezugfestigkeit der 3D-gedruckten Betonbauteile

Mit zunehmendem Zeitintervall nimmt die Biegezugfestigkeit bei Proben in w-Richtung (u.w- und v.w-Richtungen) mit paralleler Beanspruchung ab. Dieses Phänomen ist jedoch bei Proben in der u- und v-Richtungen, nicht erkennbar. Dies gilt gleichermaßen für die v.u- und u.v-Richtungen mit lateraler Beanspruchung. Es ist zu erkennen, dass die Biegezugfestigkeit mit zunehmenden Zeitintervallen in beide Richtungen tendenziell nicht abnimmt, sondern zunächst abnimmt, dann ansteigt und schließlich wieder abfällt. In der Literatur finden sich Beschreibungen von 3D-gedruckten Betonfugen, bei denen die Tragfähigkeiten infolge eines durch Bluten des Betons erhöhten Wasserangebotes in der Grenzschicht bei bestimmten höheren Zeitintervallen teilweise wieder zunimmt [Meu21]. Die Wirkung der Zeitintervalle auf die Probe in w-Richtung ist deutlich. Die Biegezugfestigkeit nimmt grundsätzlich mit zunehmender Zeit deutlich ab, weil die Zugspannungen direkt senkrecht auf die Zwischenschicht wirken und diese aufgrund ihrer geringeren Haftung nur geringe Zugspannungen aufnehmen kann.

Im Vergleich zu den Proben ohne Zeitintervall haben die Proben mit 60 Minuten Zeitintervall immer noch die maximale Biegezugfestigkeit in v-Richtung (6.31 MPa) und das Minimum in w-Richtung (2.35 MPa) für das eigene Material und das Maximum in u-Richtung (5.87 MPa) und das Minimum in w-Richtung (2.16 MPa) für das SGW-Material. Ein solch anisotropes Profil ist bei verschiedenen Zeitintervallen über die Richtungskategorien hinweg zu beobachten. In w-Richtung nimmt die Biegezugfestigkeit bei eigenem Material um 55% und bei SGW um 51% ab. Die Proben mit eigenem Material blieben allerdings in der u-Richtung im Wesentlichen unverändert und nahmen in der v-Richtung um 6% ab bei einem 60-minütigen Intervall, während die Proben mit SGW in der v-Richtung grundsätzlich unverändert waren und in der u-Richtung um 10% abnahmen.

Druckversuche

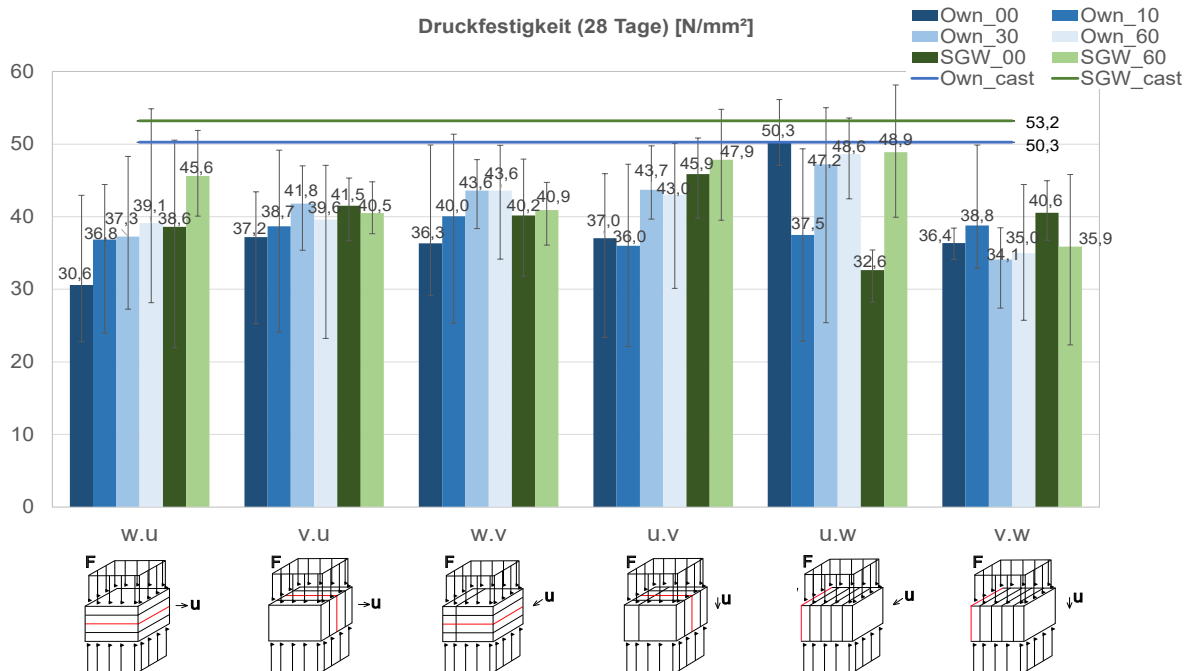


Bild 4.11: Druckfestigkeit der 3D-gedruckten Betonbauteile

Die Streuung der Ergebnisse der Druckversuche war im Vergleich zu den Biegezugversuchen deutlich größer, was durch zusätzliche Untersuchungen näher zu begründen ist. Hierbei kann kein einheitliches Profil der Anisotropie über die Richtungskategorien hinweg beobachtet werden (Bild 4.11). Ohne Zeitintervall beträgt die durchschnittliche Druckfestigkeit der kontinuierlich 3D-gedruckten Proben in alle Richtungen mit selbst entwickeltem Material und SGW etwa 76% bzw. 75% der Druckfestigkeit der gegossenen Proben. Wird die Belastungsrichtung in zwei Typen unterteilt: Betonfugen senkrecht zur Kraft (w.u und w.v-Richtungen) und parallel zur Kraft (v.u, u.v, u.w und v.w-Richtungen), so betragen die durchschnittlichen Druckfestigkeiten in der senkrechten Richtung ohne Zeitintervalle 33,5 MPa bzw. 39,4 MPa für das eigene Material und SGW, während die durchschnittlichen Druckfestigkeiten in der parallelen Richtung 40,22 MPa bzw. 40,14 MPa für das eigene Material und SGW betragen. Im Allgemeinen ist die Druckfestigkeit höher, wenn die Kraft parallel zu Betonfugen wirkt, als wenn die Kraft senkrecht zu Betonfugen wirkt. Werden die Proben mit Belastungen in u- und v-Richtung getrennt betrachtet, so liegen die Druckfestigkeiten der Prüfkörper mit Belastungen in u- und v-Richtung bei 43,65 MPa (u.v und u.w) bzw. 36,8 MPa (v.u und v.w) für das eigene Material. Im Gegensatz dazu betrug die Festigkeit der SGW-Proben 39,25 MPa in der u-Richtung und 41,05 MPa in der v-Richtung.

Die Probekörper in u.w- und v.w-Richtungen mit allen Zeitintervallen waren den Probekörpern ohne Zeitintervall (d.h. dem kontinuierlich gedruckten Beton) ähnlich, da die schwachen Betonfugen mit Zeitintervallen in Biegezugversuchen meistens gebrochen wurden und die beiden Prismenhälften nach Abschluss der Biegezugversuche für Druckversuche verwendet wurden. An den Proben insbesondere in v.w-Richtung ist zu erkennen, dass die Unterschiede in der Druckfestigkeit zwischen den Proben mit verschiedenen Zeitintervallen im Vergleich zu ihrer großen Streuung nicht signifikant sind. Daher werden bei der Betrachtung der Zeitintervalle die vier Richtungen w.u, v.u, w.v und u.v untersucht. Es wird deutlich, dass eine Zunahme des Zeitintervalls zu einem leichten Anstieg der Druckfestigkeit führt.

Zug- und Scherversuche

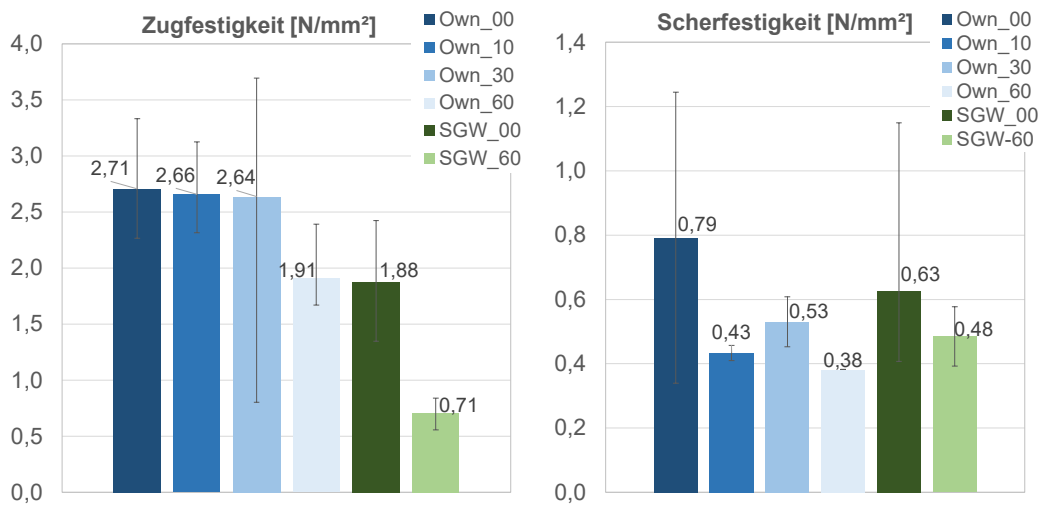


Bild 4.12: Zug- und Scherfestigkeiten der 3D-gedruckten Betonbauteile

Es ist festzustellen, dass sowohl die Zug- als auch die Scherfestigkeit der Betonfugen im Allgemeinen mit zunehmendem Zeitintervall abnehmen, siehe Bild 4.12. Die Zugfestigkeit der Verbundfugen mit eigenem Material blieb innerhalb eines Zeitintervalls von 30 Minuten nahezu konstant. Grundsätzlich weisen jedoch sowohl die Zug- als auch die Scherfestigkeiten große Streuungen auf. Dies ist auf die technisch schwierige Umsetzung der Prüfmethode zurückzuführen. Bei den Zugversuchen ist eine gleichmäßige Spannungsverteilung schwer zu erreichen, sodass bereits eine geringe Exzentrizität zu einer Verkipfung der Probe führt. Bei den Scherversuchen trat das Versagen nicht immer an der untersuchten Schnittstelle auf, was ebenfalls zu Abweichungen führte. Zudem führte das Bohren der Zylinder bei Proben mit einem Zeitintervall von 60 Minuten häufig zum vorzeitigen Versagen der schwachen Betonfuge. Neben der Ungenauigkeit beim Einbau haben folglich auch die Säge- und Bohrvorgänge einen Einfluss auf die Prüfergebnisse der Probekörper. Insbesondere im Hinblick auf die Durchführung von Scherversuchen ist eine zukünftige Weiterentwicklung der Prüfmethode erforderlich.

4.1.7 Fazit

Insgesamt sind die Richtungsabhängigkeiten des mechanischen Verhaltens und der Einfluss des Druckzeitintervalls deutlich geringer ausgeprägt, als dies in früheren Studien (z.B. [Meu21]) an 3D-gedrucktem Beton beobachtet wurde. Dies gilt grundlegend für alle hier untersuchten Charakterisierungsversuchstypen (Biegezug, Druck, zentrischer Zug, Schub) und für beide Mörtel (eigene Mischung und SGW-Material), was folglich auf die verbesserte Prozessqualität zurückzuführen ist. Auch die aufgetretenen Streuungen der Festigkeitswerte sind moderat. Zusammenfassend lässt sich daher festhalten, dass die für das Projekt ausgewählten Betonmischungsentwürfe sehr gut für die weiteren Untersuchungen geeignet sind. Nachfolgend sind die wesentlichen Erkenntnisse für die verschiedenen Festigkeiten zusammengefasst:

(1) Biegezugfestigkeit:

- *Herstellungsmethoden:* 3D-gedruckte Proben ohne Zeitintervall erreichen durchschnittlich ca. 78% der Biegezugfestigkeit der gegossenen Referenzproben.

- *Orientierungen der Proben:* Die Proben in w-Richtung (u.w- und v.w- Richtungen) erreichen die niedrigsten Biegezugfestigkeiten. Während die Proben mit eigenem Material die höchste Biegezugfestigkeit in v-Richtung (u.v- und w.v-Richtungen) aufwiesen, stellt sich diese für die Prüfkörper mit SGW in w.u.-Richtung ein, während die Tragfähigkeiten in v.u., w.v. und u.v.-Richtung nahezu konstant sind.
- *Belastungsrichtungen:* Werden die Proben nach dem Verhältnis zwischen Verbundfugen und Belastungsrichtung einer Wandprobe kategorisiert, wird die geringste Biegezugfestigkeit für die parallel beanspruchten Prüfkörper (u.w- und v.w-Richtungen) erreicht. Die Proben mit eigenem Material haben die größte Biegezugfestigkeit bei lateraler Beanspruchung (v.u- und u.v-Richtungen), während die Proben mit SGW die höchste Biegezugfestigkeit bei senkrechter Beanspruchung (w.u- und w.v-Richtungen) aufwiesen.
- *Zeitintervall:* Mit zunehmendem Zeitintervall nimmt die Biegezugfestigkeit bei Proben in w-Richtung (u.w- und v.w-Richtungen) mit paralleler Beanspruchung deutlich ab. Bei den anderen Richtungen ist kein klarer Trend erkennbar.

(2) Druckfestigkeit:

- Die Streuung der Ergebnisse der Druckversuche war im Vergleich zu den Biegezugversuchen deutlich größer.
- *Herstellungsmethoden:* Ohne Zeitintervall beträgt die durchschnittliche Druckfestigkeit der 3D-gedruckten Proben in alle Richtungen etwa 75% der Druckfestigkeit der gegossenen Proben.
- *Orientierungen der Proben:* Im Gegensatz zu den Biegeversuchen kann bei den Druckversuchen kein einheitliches Profil der Anisotropie über die Richtungskategorien hinweg beobachtet werden.
- *Belastungsrichtungen:* Im Allgemeinen ist die Druckfestigkeit mit beiden Materialien höher, wenn die Kraft parallel zu den Betonfugen (v.u, u.v, u.w und v.w-Richtungen) wirkt. Die Proben mit eigenem Material haben die höchste Druckfestigkeit bei Belastung in u-Richtung (u.v- und u.w-Richtungen), während die Proben mit SGW die höchste Druckfestigkeit bei Belastung in v-Richtung haben.
- *Zeitintervall:* bei der Betrachtung der Zeitintervalle in den vier Richtungen w.u, v.u, w.v und u.v wurde festgestellt, dass eine Zunahme des Zeitintervalls zu einem leichten Anstieg der Druckfestigkeit führt.

(3) Zug- und Scherfestigkeit der Verbundfugen:

- *Zeitintervall:* Sowohl die Zug- als auch die Scherfestigkeit der Betonfugen nehmen im Allgemeinen mit zunehmendem Zeitintervall ab.
- *Streuungen:* Sowohl die Zug- als auch die Scherfestigkeiten weisen große Streuungen auf.
- *Experimentelle Ungenauigkeiten:* Eine gleichmäßige Spannungsverteilung ist bei Zugversuchen oft schwer zu erreichen. Bei den Scherversuchen trat das Versagen hingegen nicht immer an der zu untersuchenden Sollbruchstelle auf. Auch die Säge- und Bohrvorgänge haben einen Einfluss auf die Prüfergebnisse der Probekörper.
- *Zukünftige Anpassungen:* Die Zug- und Scherversuche zur genaueren Untersuchung der Verbundfugen im 3D-Betondruck sollen in Zukunft weiter verbessert werden.

4.2 Materialiencharakterisierung der geschweißten Stahlbewehrung

4.2.1 Verwendeter Werkstoff B500, OES, Oberfläche, Sauerstoff

Tabelle 4.6: Chemische Zusammensetzung des verwendeten Materials (Probe) und Vergleichswerte für B500B und S235 in %

Material	C	P	S	N	Cu
B500B (Probe)	0,21	0,02	0,04	0,018	0,31
B500B (DIN 488-1)	≤ 0,22	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,012	≤ 0,6
S235 (DIN EN 10025-2)	≤ 0,17	≤ 0,03	≤ 0,03	≤ 0,012	≤ 0,55

Der Betonstahl B500B hat laut DIN 488-1 eine chemische Zusammensetzung, welche für hergestellten Betonstahl dieser Güte eingehalten werden muss. Zum Vergleich wurde in Tabelle 4.6 die chemische Zusammensetzung von einer Probe, welche für die Schweißversuche verwendet wurde und von der normgerechten Zusammensetzung dargestellt. Außerdem ist in der letzten Zeile ein einfacher, gut schweißbarer Baustahl mit seiner chemischen Zusammensetzung zu erkennen. Außer in der Konzentration des Stickstoffs entspricht der vorliegende Werkstoff also den Anforderungen der Norm. Was den Baustahl von dem Betonstahl in der Legierung unterscheidet, ist vor allem der geringere Kohlenstoffanteil, so wie geringere Grenzwerte für Phosphor und Schwefel. Durch geringere Mengen dieser Elemente ist ein unlegierter Stahl tendenziell besser schweißbar. Der höhere Kohlenstoffanteil kann beim Schweißen zu erheblicher Aufhärtung im Gefüge führen, was die Zähigkeit der Schweißnaht negativ beeinflussen kann. Phosphor kann die Kaltrissanfälligkeit erhöhen und Schwefel durch das Bilden von niedrig schmelzenden Sulfiden Heißrisse begünstigen.

Die genannte Zusammensetzung für den B500B Stahl führt bei Raumtemperatur ohne Wärmebehandlung im Lieferzustand zu einem ferritisch-perlitischen Gefüge. In Bild 4.13 ist ein Gefügebild des verwendeten Grundwerkstoffs dargestellt.

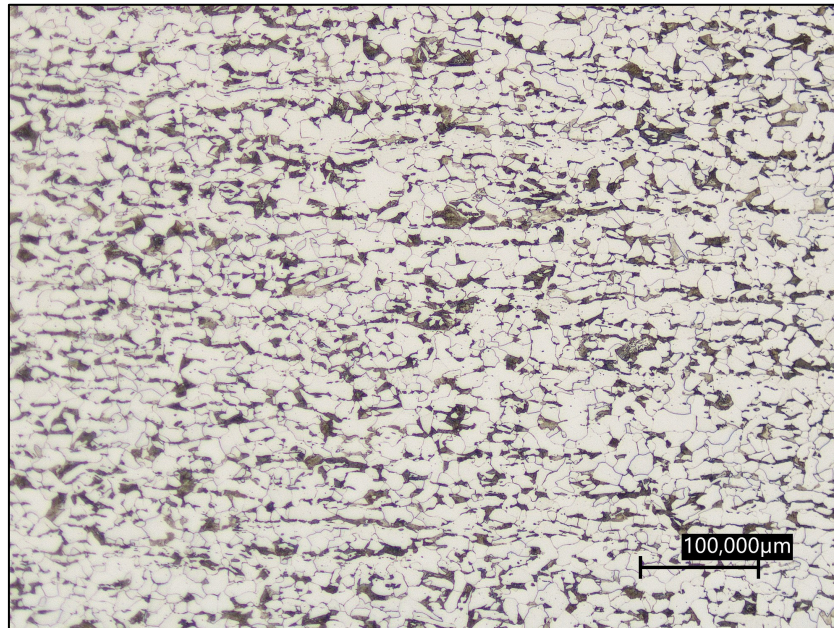


Bild 4.13: Gefügebild des Betonstahls B500B

Gut sichtbar ist die zwar gleichmäßige, aber höhere Konzentration von Kohlenstoff als das in Bild 4.14 dargestellte Gefügebild eines handelsüblichen Baustahls der Güte S235. Dieser auch sichtbare Unterschied in der Menge an Kohlenstoff führt als Folge der Wärmeeinbringung des Schweißprozesses zu einer Gefügeveränderung.

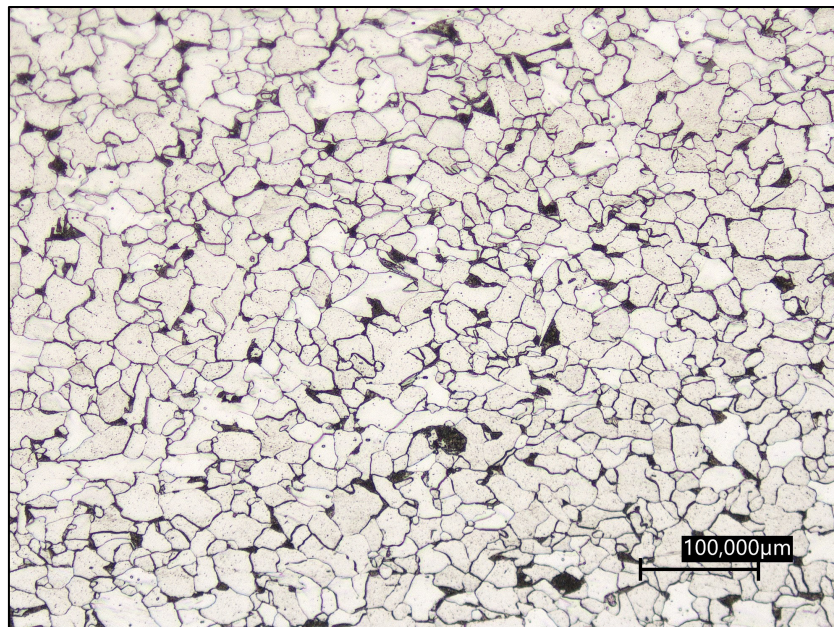


Bild 4.14: Gefügebild des Baustahls S235

Die Folge der rasanten Erwärmung und Abkühlung kann gut anhand des in Bild 4.15 dargestellten Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubildes nachvollzogen werden.

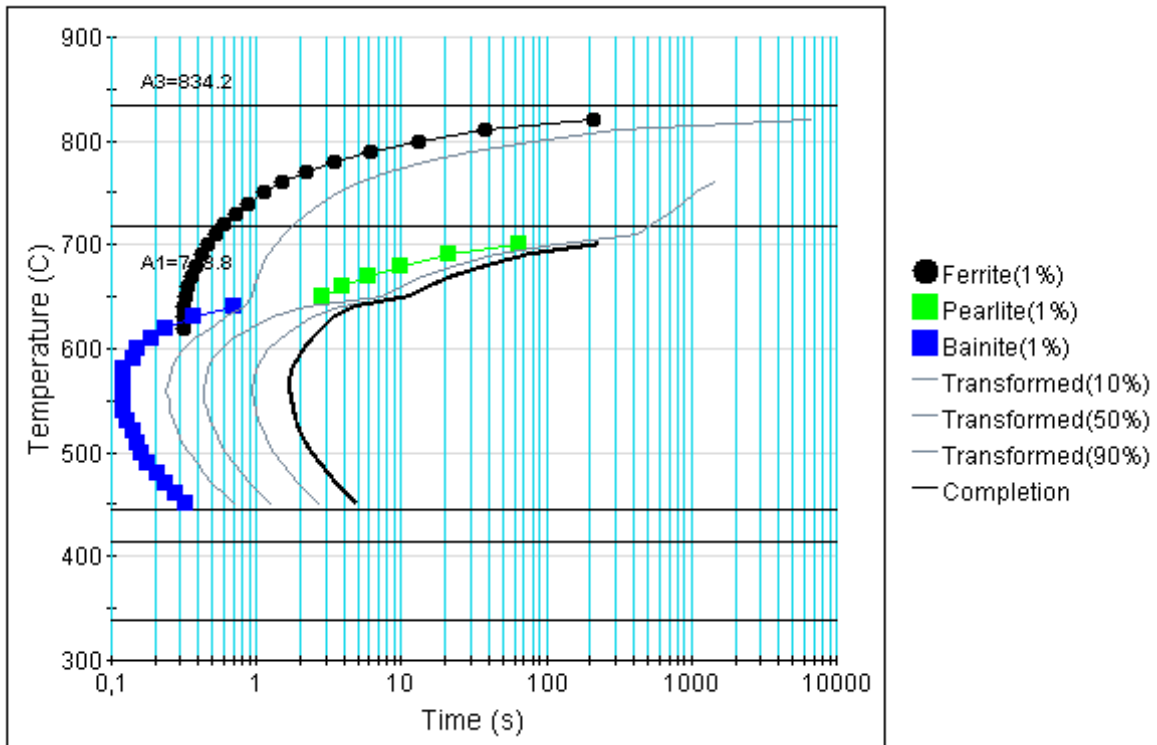


Bild 4.15: ZTU-Diagramm eines B500B Stahls erstellt mit JMatPro®

Aus dem berechneten ZTU-Diagramm ist zu erkennen, dass je nach Abkühlgeschwindigkeit ein teilweise bainitisch-martensitisches oder ferritisch-perlitisches Gefüge vorliegt. Da sich durch den sehr schnellen Schweißprozess ein starker Gradient im Werkstoff ausbildet, ist mit einer sehr harten Füge- und Wärmeeinflusszone zu rechnen. In der Nähe der Fügezone, im linken Bereich des ZTU-Diagramms, liegt ein vollständig bainitisch-martensitisches Gefüge vor. Die in Bild 4.16 (links) dargestellten Temperaturverläufe lassen darauf schließen, dass weiter entfernt von der Fügezone keine Wärmebehandlung stattgefunden hat.

Je nach Abstand zur Fügezone wird der Werkstoff unterschiedlich erwärmt. Um den Einfluss des Schweißprozesses auf die Temperatur in der Bewehrung zu untersuchen, wurden Untersuchungen mit Thermoelementen durchgeführt. Dazu wurden 4 Thermoelemente an zugänglichen Stellen des betonseitigen Bolzens angebracht. Die Thermoelemente wurden mittels Widerstandspunktschweißen direkt auf das Material aufgebracht, um einen möglichen schlechten Wärmeübergang zu vermeiden. Die Positionen sind in Bild 4.16 (rechts) dargestellt, jeweils mit einem Abstand von 25 mm zur Fügestelle für Position 1, 35 mm für Position 2, 45 mm für Position 3 und 55 mm für Position 4.

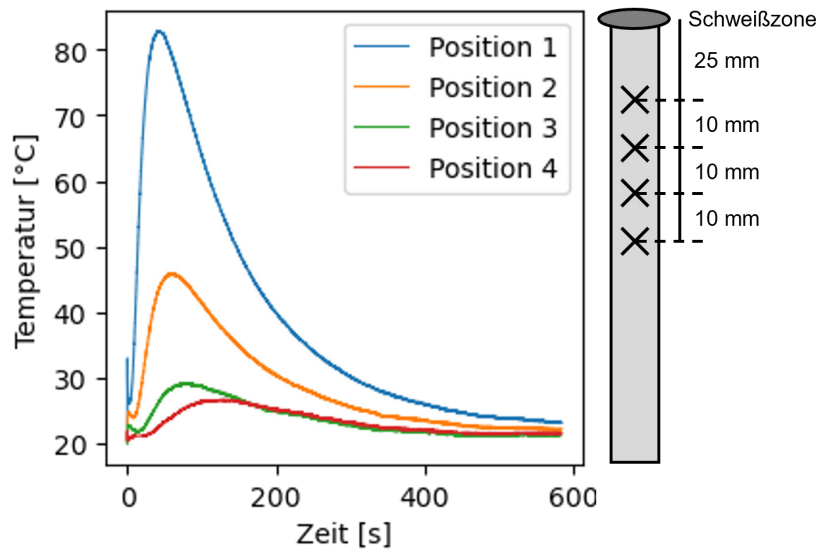


Bild 4.16: Temperaturverlauf im Bolzen bei einer Schweißung (links), Positionierung der Thermoelemente (rechts)

Die Folge der hohen Abkühlgeschwindigkeit im Bereich der Fügezone und der abweichenden, geringen Wärmebelastung im Bolzen abseits der Fügezone ist in dem in Bild 4.17 dargestellten Querschliff mit durchgeführten Härteprüfungen gut zu erkennen.

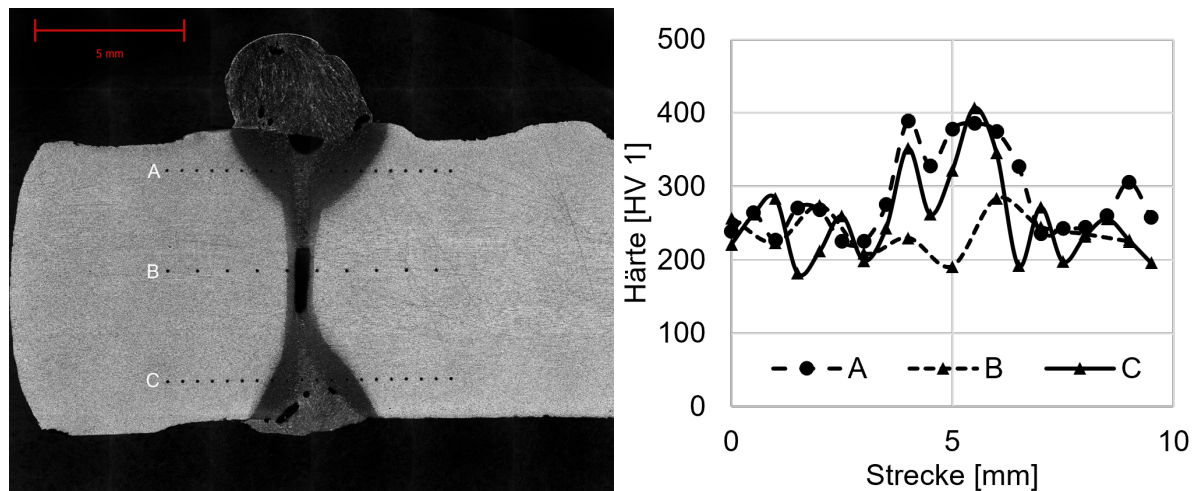


Bild 4.17: Härteprüfung nach Vickers für einen geschweißten 10 mm Bolzen, Übersicht (links), Ergebnisse (rechts)

Unabhängig von den offensichtlichen Bindefehlern sind die drei linearen Härteeindruck-Reihen im Querschliff gut zu erkennen. Die im linken Bild sichtbaren Punkte entsprechen den im Diagramm dargestellten Härteverläufen. Die Härte im Querschliff wurde mit dem Härteprüfverfahren nach Vickers bestimmt. Bei diesem Verfahren wird eine vierseitige Diamantpyramide mit einer definierten Kraft, in diesem Fall einer Kraft von 1 N, für eine definierte Zeit in den präparierten Querschliff eingedrückt. Nach dem Zurückziehen der Pyramide wird der hinterlassene Abdruck gemessen. Je größer der zurückbleibende Eindruck unter dem Mikroskop ist, desto geringer ist die Härte des Gefüges in diesem Bereich des Querschliffs. Im vorliegenden Fall wurde die Härte im Grundwerkstoff mit ca. 250 HV1 ermittelt. In der Fügezone steigt die Härte aufgrund der Wärmeeinwirkung und der raschen Abkühlung sowie der beschriebenen Gefü-

geumwandlungen auf Werte im Bereich von 400 HV1 an. Bei vielen technisch relevanten metallischen Werkstoffen kann die Härte mit Hilfe der Tabor-Beziehung innerhalb gewisser Grenzen in eine Festigkeit umgerechnet werden. So kann bei höherer Härte auch eine höhere Festigkeit angenommen werden.

Im Querschliff ist die in den Randbereichen deutlich ausgeprägte Wärmeeinflusszone gut zu erkennen. Diese Zone, die sich im Querschliff als dunkler Rand um das Schweißgut abzeichnet, ist im Diagramm der Bereich erhöhter Härte.

4.2.2 Sichtprüfung von Schweißergebnissen

Die in Bild 3.18 dargestellte Versuchsmatrix und die daraus resultierenden gefügten Bolzen werden unmittelbar nach dem Fügen optisch bewertet. Im Laufe der Parameterstudie sind einige Fügeergebnisse wiederholt aufgetreten. Einige Negativbeispiele sind in Bild 4.18 gezeigt.

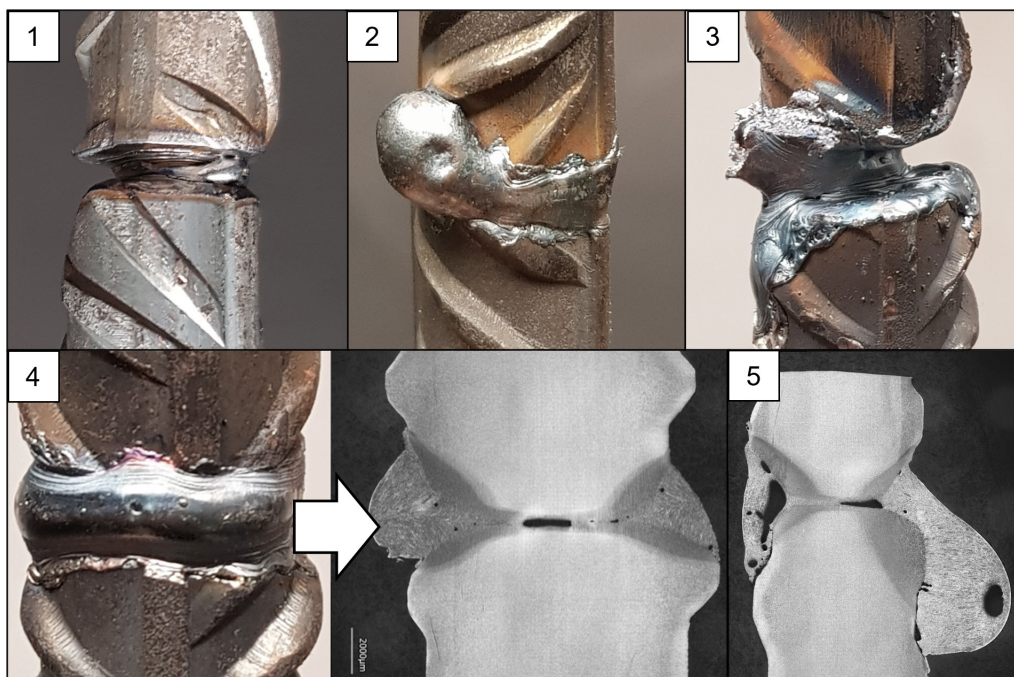


Bild 4.18: Typische Fehlerbilder für das Schweißen von Bolzen auf Bolzen mit dem Lichtbogenbolzenschweißverfahren

Die in Bild 1 dargestellte Schweißnaht zeigt zwar eine vollständige Anschmelzung der Fügepartner, es ist jedoch keine stoffschlüssige Verbindung entstanden. Gründe hierfür können zum einen eine zu kurze Schweißzeit sein, die aufgeschmolzenen Bereiche können nicht ineinanderfließen, es entsteht keine stoffschlüssige Verbindung. Zum anderen kann die Dämpfung der Pistole zu stark sein, d.h. die zwar aufgeschmolzenen Fügepartner haben durch die Dämpfung der Fügebewegung genügend Zeit, wieder zu erstarren. Ein weiterer Grund kann ein zu geringer Hub sein. Dadurch wird der Bereich in der Mitte der Bolzen unmittelbar nach Schweißbeginn von einem Schmelztropfen „überbrückt“ und der Lichtbogen bricht zusammen. Somit ist nicht genügend Schmelze und Energie im Prozess, um eine Verbindung zu ermöglichen.

Die in Bild 2 dargestellte Schweißung zeigt ein für die vorliegende Fügeaufgabe typisches Phänomen. Ein größerer Schmelztropfen sammelt sich außerhalb der Fügezone. Abgesehen

von einem möglichen Materialdefizit innerhalb der Fügezone und einer unter Umständen unerwünschten Anbindung an die Betonmatrix ist dieser optische Mangel für die Festigkeit der Fügeverbindung nicht ausschlaggebend.

Dagegen ist das in Bild 3 dargestellte Fügeergebnis für die Festigkeit entscheidend. Es handelt sich um eine Schweißung mit zu hoher Leistung. Hier ist der Schweißstrom zu hoch. Gut zu erkennen sind die Lichtbogenansatzpunkte seitlich am Bolzen. Der entstehende Lichtbogen hat durch den hohen Schweißstrom genügend Energie, um das Material lokal zu verdampfen und die Schmelze explosionsartig aus der Fügezone zu schleudern. Eine weitere Möglichkeit, zu viel Leistung in die Fügezone einzubringen, ist eine zu lange Schweißzeit. Das Ergebnis ist in der Regel ein nicht erfolgreich gefügtes Bolzenpaar. Bei einer zu langen Schweißzeit führt die kontinuierliche Energieeinbringung zu einem zu starken Aufschmelzen der Fügepartner. Der eingestellte Überstand reicht dann nicht mehr aus, um den Materialverlust durch Abschmelzen auszugleichen. Es entsteht keine Verbindung.

In Bild 4.18 unter Bild 4 ist ein gutes Ergebnis einer Schweißung dargestellt. Man kann gut die gleichmäßige Ausbildung der Schweißwulst erkennen. Auch Biegeversuche an vergleichbaren Proben haben teils zu guten Ergebnissen geführt. Bei Analyse in Querschliffen hat sich, trotz der sichtbar guten Schweißparameter, eine Ungänze in der Fügezone in der Mitte des Bolzens ergeben. Der Grund für die gute Nahtoptik und die Ungänze ist der gleiche. Es wird wenig Material aufgeschmolzen. Dieser geringe Grad der Aufschmelzung führt zum Ausbleiben von Tropfen oder Kerben. Gleichzeitig wird in der Kontaktfläche aber nicht genug schmelzflüssiges Material für eine Anbindung erzeugt, ein Bindefehler entsteht.

Die in Bild 5 dargestellte Schweißung zeigt ebenfalls ein in der äußeren optischen Bewertung als gut befundene Schweißung. Durch Bildung einer Kavität im Innern sind jedoch die mechanischen Eigenschaften nicht den Anforderungen genügend. Für einen Rückschluss und Verständnis von Nahtaussehen und der Verbindung zur Qualität der Schweißung sind metallographische Untersuchungen an Querschliffen der Fügeverbindungen notwendig.

4.2.3 Metallographische Untersuchung der Schweißverbindung (Makro, Härte)

An den gefügten Bolzen, deren Prozessparameter die Bauteilprüfung durch den in Kapitel 2.4 beschriebenen Biegeversuch bestanden haben, wurden anschließend lichtmikroskopische Untersuchungen und Bestimmungen der im Werkstoff vorhandenen lokalen Härte durchgeführt. Bild 4.19 zeigt in der Mitte beispielhaft einen metallographischen Querschliff. Gut zu erkennen sind die beiden Fügepartner, deren mit 3 gekennzeichnetes Gefüge dem Anlieferungszustand entspricht. Der mit 1 gekennzeichnete Gefügebereich ist der Teil des Bolzens, der zum Zeitpunkt des Schweißens aufgeschmolzen war. Bemerkenswert ist die starke Verjüngung dieses schmelzflüssigen Bereiches in Richtung Bolzenmitte, hier mit 4 gekennzeichnet. In diesem Bereich ist die Schmelze fast vollständig verdrängt. Gut zu erkennen ist im unteren Bereich auch der Schmelztropfen, der durch die wirkende Schwerkraft aus der Fügezone herausgezogen wird. Aufgrund dieses Schmelztropfens, der einen Großteil der im Lichtbogen aufgeschmolzenen Fügepartner enthält, ist die Fügezone im Verhältnis zum Bolzenquerschnitt sehr klein. Die Wärmeeinflusszone, die bei anderen Lichtbogenschweißverfahren wie dem MSG-Schweißen oft eine Ausdehnung in der Größenordnung des Schweißgutes hat, ist ebenfalls sehr klein. Die kleine Wärmeeinflusszone ist ein Hinweis auf den starken Temperaturgradienten, der zu einer lokalen Aufhärtung führt.

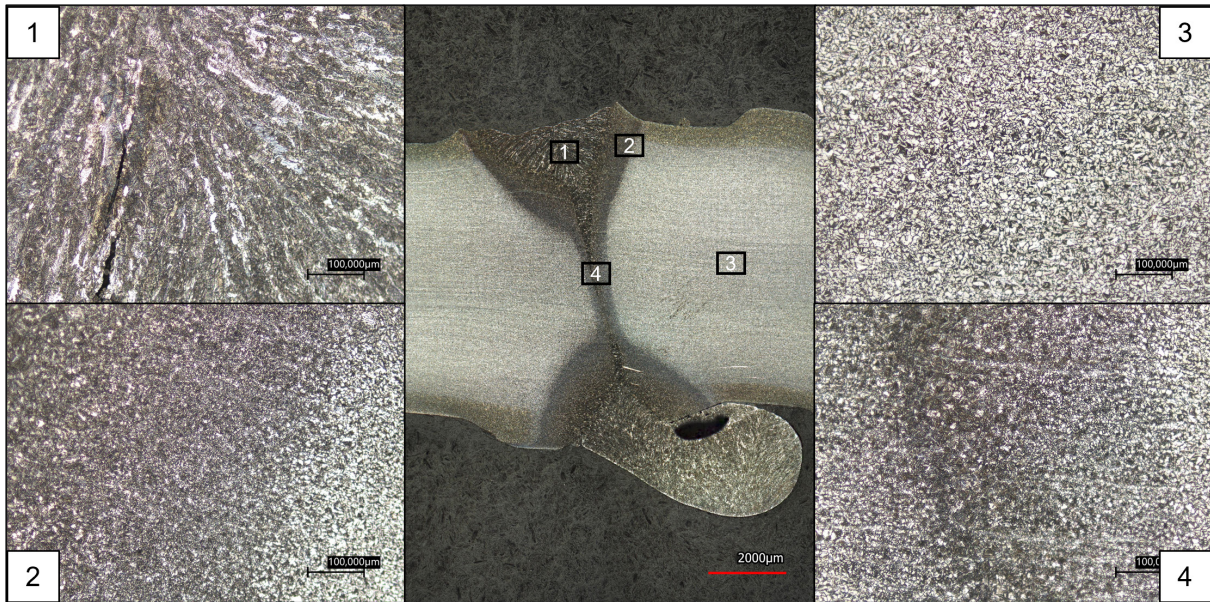


Bild 4.19: Gefügebilder der Schweißzone (links und rechts) mit Übersicht (Mitte) für einen 8 mm Bolzen

Im Gegensatz zu Bild 4.19 ist in Bild 4.20 kein Schmelztropfen in der Schliffebene zu erkennen. Die Morphologie der Fügezone ist vergleichbar mit der des 8 mm Bolzens. Im Schweißgut sind jedoch mehrere größere Poren und in Schliffbild 4 eine kleine Pore zu erkennen. Diese Poren können unterschiedliche Ursachen haben. Zum einen kann eine ungeeignete Wahl der Schutzgasmenge in der Prozesskammer eine Ursache sein, aber auch Verunreinigungen wie Oxide auf den zu fügenden Bolzen sind eine mögliche Ursache. Die auf den Bolzen immer vorhandene Walzhaut aus Eisenoxid ist hier ebenso zu nennen wie Flugrost auf geschliffenen Fügeflächen. Beide Bolzendurchmesser weisen das gewünschte ferritisch-perlitische Gefüge im Grundwerkstoff auf.

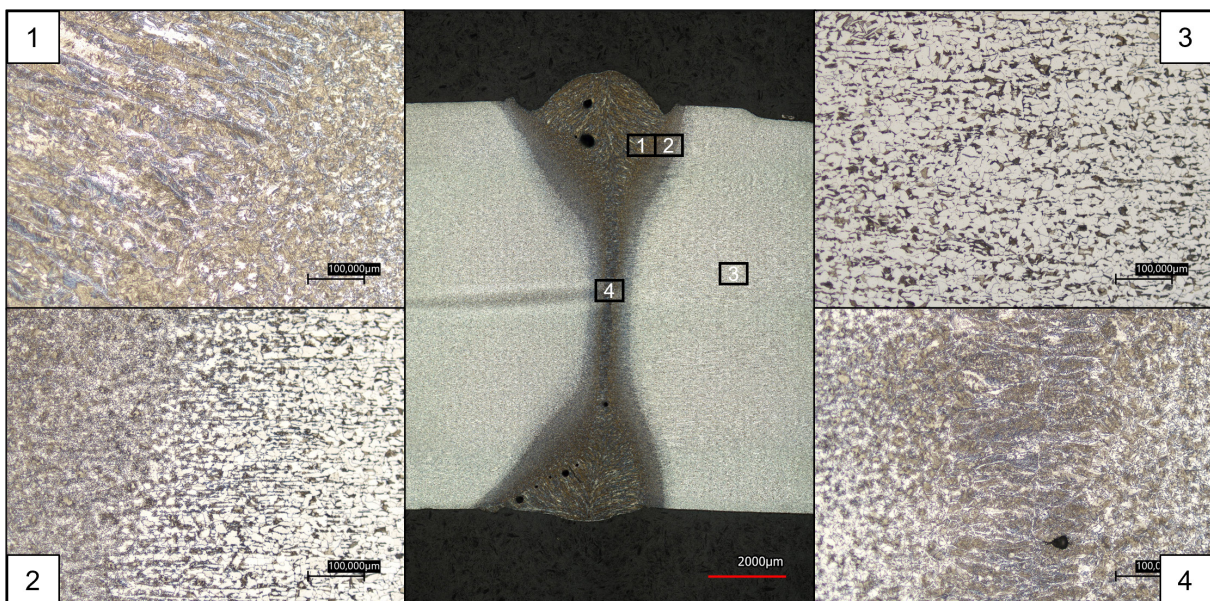


Bild 4.20: Gefügaufnahmen der Schweißzone (links und rechts) mit Übersicht (Mitte) für einen 10 mm Bolzen

In Bild 4.21 ist im Gegensatz zu den beiden bereits gezeigten Verbindungen keine vollständige Verbindung zu erkennen. Unterhalb der mit 4 gekennzeichneten Position ist ein Bindefehler

zu erkennen. Die im oberen und unteren Bereich zu gleichmäßig ausgebildete Nahtüberhöhung lässt keinen Rückschluss auf diesen vorliegenden Fehler zu. Neben dem Bindefehler ist auch im Bereich der Schmelzlinie mehrfach eine Porenbildung zu beobachten. Neben den Abweichungen in der Fügezone ist auch die von den anderen Bolzendurchmessern abweichende Gefügezusammensetzung der Randschicht des verwendeten Bolzens zu beobachten. Auch die Verteilung der perlitischen und ferritischen Gefügebestandteile ist unterschiedlich. Ursache für diese unterschiedlichen Lieferzustände können die in Kapitel 2.4 aufgeführten zulässigen Lieferzustände nach DIN 488 sein. Ein Einfluss auf das Fügeergebnis und die sich ausbildenden Gefüge kann aus den vorliegenden Erkenntnissen nicht abgeleitet werden.

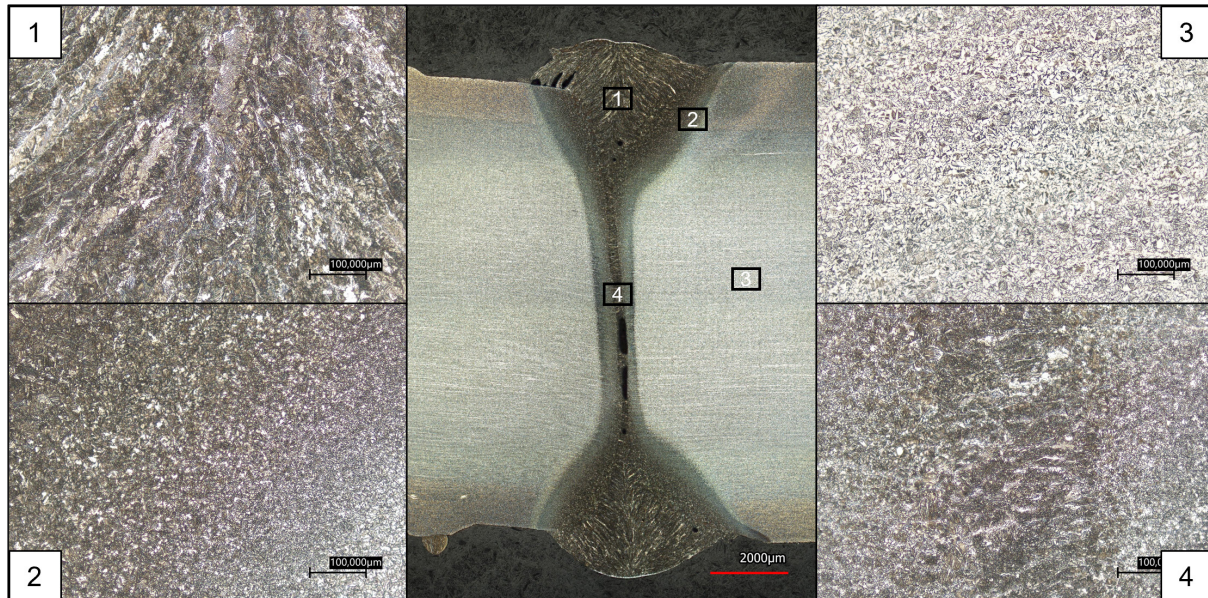


Bild 4.21: Gefügebildungen der Schweißzone (links und rechts) mit Übersicht (Mitte) für einen 12 mm Bolzen

Die gezeigten Aufnahmen von geschweißten Betonstahlbolzen sind jeweils repräsentativ für deren Durchmesser. Die dargestellten Fehler und Nahtformen hängen neben dem Bolzendurchmesser vor allem von der genauen Ausrichtung der Bolzen zueinander und den Schweißparametern ab. Die Morphologie der Fügezone, die Ausbildung einer breiteren Zone mit einem schmalen Steg, lässt sich teilweise aus dem Stromfluss im Bolzen und den daraus resultierenden Lichtbogenansatzpunkten ableiten. Im Vergleich zum MSG-Schweißen, bei dem ebenfalls ein zylindrischer Werkstoff mit einem elektrischen Lichtbogen in Kontakt gebracht wird, befindet sich der Lichtbogenansatzpunkt ebenfalls an der Außenflanke. Durch die erhöhte Stromdichte in diesen Bereichen schmilzt der Werkstoff in diesem Bereich stärker auf.

4.2.4 Zugversuche an Schweißverbindungen

Die Zugversuche an den geschweißten Bolzen wurden in Anlehnung an DIN EN ISO 6892-1 durchgeführt. Es wurde eine Einspannung für Rundzugproben ohne Gewinde verwendet. Die Prüfgeschwindigkeit betrug 10 mm/min. Die erreichten Prüfkraften wurden in Abhängigkeit vom Nennquerschnitt der verwendeten Betonstahlbolzen in Spannungen umgerechnet. Die Annahme eines dem Nennquerschnitt entsprechenden belasteten Querschnitts ermöglicht den Vergleich der verschiedenen Bolzendurchmesser und erlaubt eine Abschätzung der Vergleichbarkeit mit nicht verschweißten Bewehrungsstäben. In Bild 4.22 sind die Ergebnisse der Schweißversuche an Bolzen mit einem Durchmesser von 8 mm dargestellt.

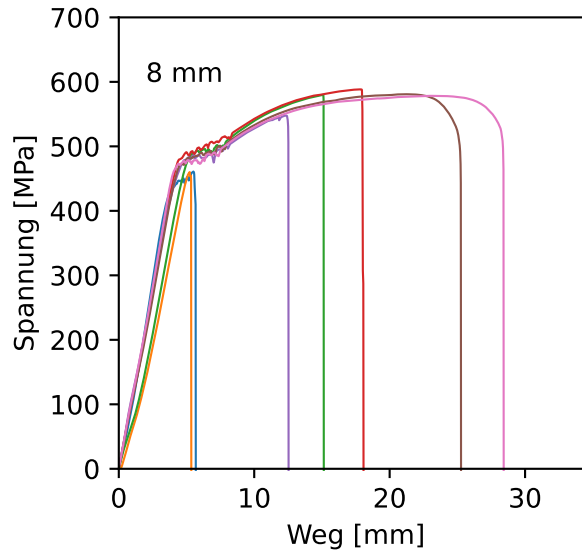


Bild 4.22: Zugversuche für verschweißte 8 mm Bolzen

Deutlich zu erkennen ist das nahezu einheitliche Erreichen der Streckgrenze. Unterschiede zeigen sich in der erreichten Bruchdehnung. Es können drei verschiedene Versagensmodi unterschieden werden. Zum einen ein Versagen der Fügezone im Bereich der Streckgrenze. Ursache hierfür ist meist eine unvollständige Anbindung, deren Ursachen in Kapitel 4.2.2 diskutiert werden. Bei vollständiger Anbindung und geometrischer Schwächung der Fügezone durch Versatz o.ä. wird die Streckgrenze überschritten und es kommt zum plastischen Fließen. Lokale Kerbwirkung in der Fügezone führt zum Versagen im Bereich von R_m . Bei Probekörpern mit gleichmäßiger Nahtoberfläche und vollständiger Anbindung wird eine ausreichende Verbindungsfestigkeit erreicht, so dass die in Kapitel 4.2.1 beschriebenen Verfestigungsmechanismen ausreichen, um ein Versagen im Grundwerkstoff zu gewährleisten.

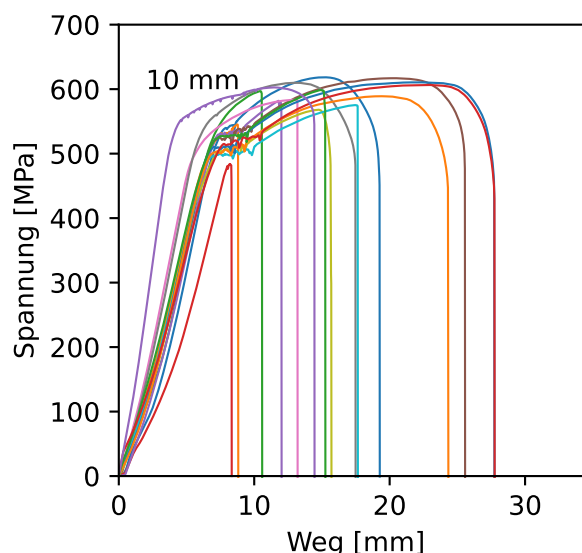


Bild 4.23: Zugversuche für verschweißte 10 mm Bolzen

Bild 4.23 zeigt die Ergebnisse der Zugversuche an Bolzen mit einem Durchmesser von 10 mm. Der Prüfumfang für die 10 mm Bolzen ist größer, so dass eine eindeutige Zuordnung zu den beschriebenen Versagensfällen schwieriger ist. Dennoch können die Erkenntnisse aus den

Versuchen mit 8 mm Bolzen übernommen werden. Zusätzlich nimmt der Einfluss der unvollständigen Verbindung mit zunehmendem Durchmesser zu, während der Versatz als Einflussfaktor mit zunehmendem Querschnitt abnimmt. Da die geprüften Bolzen unabhängig vom verwendeten Durchmesser alle eine Länge von 100 mm haben, ist der Maschinenweg bei Versagen im Grundwerkstoff zwischen den Versuchsreihen gleich.

Bild 4.24 zeigt die Zugversuchsergebnisse für Bolzen mit einem Durchmesser von 12 mm. Aufgrund der größeren Masse kann das Material mehr Wärme aus der Fügezone abführen, was zu einer noch stärkeren Neigung zu unvollständigem Verbund führt als bei Bolzen mit einem Durchmesser von 10 mm.

Das Ergebnis ist eine äußerlich einwandfrei aussehende Fügezone und auch eine Schweißverbindung, die aufgrund der gut ausgebildeten Nahtoberflächengeometrie den Biegeversuch besteht. Der geringe Verbindungsquerschnitt wird erst im Zugversuch sichtbar. Die breit gestreuten Bruchdehnungen von Werten kleiner $R_{p0,2}$ bis zur Grundwerkstoffbruchdehnung sind die Folge.

Insgesamt ist zu beachten, dass die dargestellten Zugversuchsergebnisse jeweils alle durchgeführten Zugversuche für den jeweiligen Durchmesser darstellen und somit auch mit unterschiedlichen Parametern geschweißt wurden. Diese Zusammenstellung erlaubt jedoch eine gute Abschätzung des Potenzials des Fügeverfahrens.

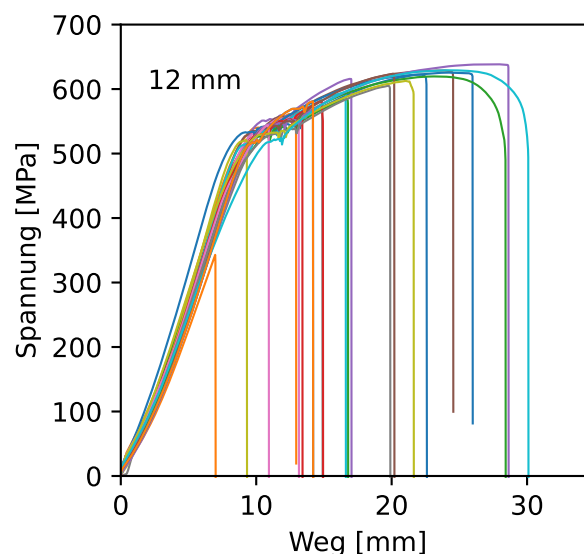


Bild 4.24: Zugversuche für verschweißte 12 mm Bolzen

4.3 Verbundverhalten zwischen Bewehrung und 3D-gedrucktem Beton

4.3.1 Grundlagen der Verbundprüfung

Wirkungsweise Verbundmechanismus

Die Verbundwirkung lässt sich nach LEONHARDT [Leo57] in drei Arten einteilen: Haftverbund, Reibungsverbund und Scherverbund. Bild 4.25 zeigt die verschiedenen Verbundkräfte in der Kontaktfläche zwischen der Bewehrung und dem Beton.

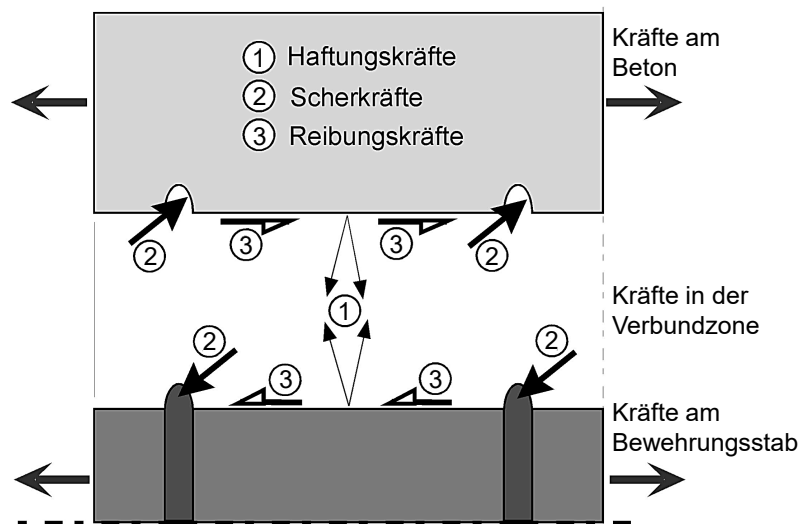


Bild 4.25: Schematische Darstellung der Kraftübertragung zwischen gerippter Bewehrung und Beton [Let06]

Der Haftverbund beschreibt die Haftung des Bindemittels Zement. Diese Verbundwirkung beruht auf Adhäsion und folglich der Klebewirkung zwischen dem Zementstein und dem Bewehrungsstahl bzw. ihrer Kontaktfläche. Sie ist maßgeblich von der Oberflächenrauheit bzw. Sauberkeit des Bewehrungsstabs und der Erhärtung des Betons abhängig, da die Klebewirkung auf das Hineinwachsen des Zementgels in die raue Stahloberfläche zurückzuführen ist [Sch98]. Schon bei kleinsten Relativverschiebungen bzw. Schlupf erreicht der Haftverbund seinen Maximalwert und versagt. Aus diesem Grund spielt er zumeist eine untergeordnete Rolle und kann für eine sichere Verbundtragwirkung nicht herangezogen werden [Bül08]. Scher- und Reibungsverbund werden hingegen erst beim Auftreten von Schlupf aktiviert [Alv98]. Der Reibungsverbund beruht auf der Reibung zwischen Beton und Stahl und ist von dessen Oberflächenrauheit abhängig. Er setzt meist schon bei kleinen Relativverschiebungen ein und bleibt bis zum Versagen des Bauteils bestehen. Einwirkender Querdruck, der durch äußere Lasten oder durch Schwindvorgänge entstehen kann, erhöht den Reibungsverbund [Heg19; Let06].

Bei glatten Bewehrungsstäben besteht der Verbund hauptsächlich aus den zwei zuvor beschriebenen Verbundarten. Um hohe Verbundeigenschaften zu erzielen, ist jedoch der Scherverbund ausschlaggebend, der nur bei profilierten bzw. gerippten betonierten Stahlstäben ausgeprägt ist. Der Scherverbund stellt die wirksamste Verbundwirkung und damit auch die maßgebende Kraftübertragungsart bei fortschreitendem Schlupf dar. Er beschreibt den Verbund infolge der mechanischen Verzahnung der Stahlrippen des Bewehrungsstahls mit dem Beton, wodurch ein Scherwiderstand aufgebaut werden kann. Dieser kann ebenfalls durch Querdruck

verstärkt werden [Let06]. Durch die Zugkraft, mit der am Bewehrungsstab gezogen wird, entstehen geneigte Druckkräfte (Bild 4.26). Diese von den Stahlrippen ausgehenden, geneigten Druckspannungen erzeugen jeweils Ringzugspannungen im umgebenden Beton. Dadurch entstehen schon bei niedrigen Verbundspannungen im Beton senkrecht zum Stab innere Mikrorisse, auch Sekundärrisse genannt. Mit wachsender Ausziehkraft und somit steigender Anzahl und Länge der Sekundärrisse wird die Steifigkeit des Betons geringer. Außerdem wächst dadurch der Winkel zwischen Verbundkraft und der Stablängsachse und die Ringzugkraft nimmt zu. Bei wachsender Ringzugspannung und zu geringer Betondeckung kann es dann zu markanten Längsrissen im Beton und zu einem Spaltrissversagen, auch Sprengrissversagen genannt, kommen [Mai93].

Bild 4.26 verdeutlicht das zuvor beschriebene Phänomen der Druckkegel-Zugring-Bildung und die daraus folgende Mikrorissbildung um den Bewehrungsstab im umliegenden Beton.

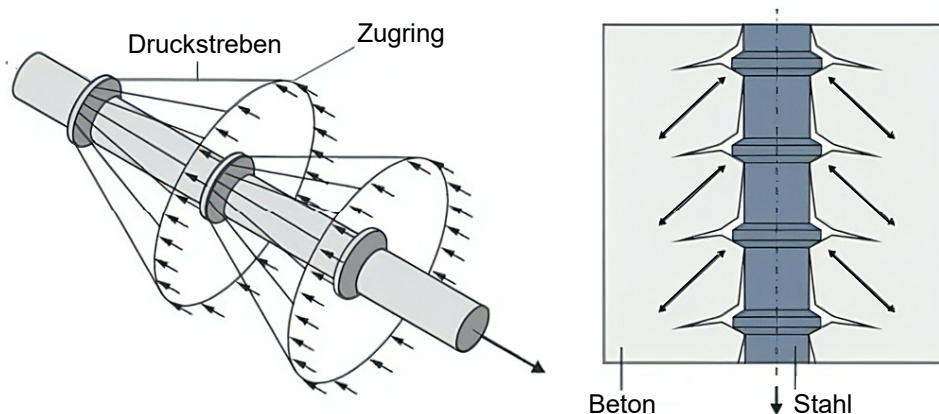


Bild 4.26: Druckkegel-Zugring-Modell und Bildung von inneren Mikrorissen [Heg14]

Entscheidend für die Wirksamkeit des Scherverbundes sind das Verformungsverhalten und das Schervermögen des Betons, vor allem im Bereich des Stahls bzw. der Rippen. Denn der Scherverbund versagt, wenn die Scherfestigkeit zwischen den Betonkonsolen erschöpft ist und folglich ein Gleiten des Bewehrungsstabes einsetzt oder es zu einem zuvor beschriebenen Spaltrissversagen kommt [Sch98]. Diese Arten von Verbundversagen werden in den folgenden Ausführungen erweitert beschrieben und erläutert.

Verbundversagen

Beim Verbundversagen werden grundsätzlich zwei Versagensarten unterschieden: Das Spaltrissversagen und das Scherbruchversagen.

Das Scherbruchversagen unterteilt sich wiederum in zwei Arten, abhängig vom Rippenabstand und der Rippenhöhe der Stahlbewehrung. Bei beiden Scherbruchvarianten versagen alle drei zuvor beschriebenen Verbundmechanismen nacheinander. Zuerst gibt der Haftverbund nach, danach wirken Reibungsverbund und Scherverbund. Ab einer Relativverschiebung des Rippenabstandes b sind die Betonkonsolen vollständig abgeschert, sodass spätestens dann die maximale Verbundtragfähigkeit erreicht wird und lediglich ein Reibungsverbund in der Scherfläche bestehen bleibt. Dieses Vorgehen läuft für beide Arten identisch ab, nur der Bruchverlauf bzw. der Schubrissverlauf und der Auslöser des Versagens unterscheiden sich. Zum einen kann der Beton bei einem sehr großen Abstand der Rippen im Bereich der Einzelrippe auf Druck plastizieren, sodass ein Bruch im Beton entsteht. Bei dieser Variante entstehen Schub-

risse, die an der Rippenstirn ansetzen und sich über einen Teilabschnitt des Bereiches zwischen den Rippen erstrecken. Zum anderen kann der Beton durch Abscheren der Mörtelkonsole zwischen zwei Rippen versagen. Dies geschieht, wenn Bewehrung mit kleinem Rippenabstand vorliegen. Die Verbund- bzw. Druckkraft kann sich somit besser verteilen und es kann damit nicht zum Plastizieren des Betons kommen. In beiden Fällen des Scherbruchversagens kommt es zu gleitenden Bruchflächen am Stahlstab bzw. an den abgescherten Betonkonsolen, sodass das Bauteil durch ein Herausziehen der Bewehrung mit allmählicher Lastreduzierung versagt. Eine bedeutende Voraussetzung für das Scherbruchversagen ist eine ausreichende Umschnürungswirkung, welche durch eine hohe Betondeckung oder eingelegte Querbewehrung erreicht werden kann [Alv98; Heg19; Let06]. Hierbei wird die maximal mögliche Verbundspannung bei beiden Scherbruchversagensformen erreicht (Bild 4.27) [Lut67].

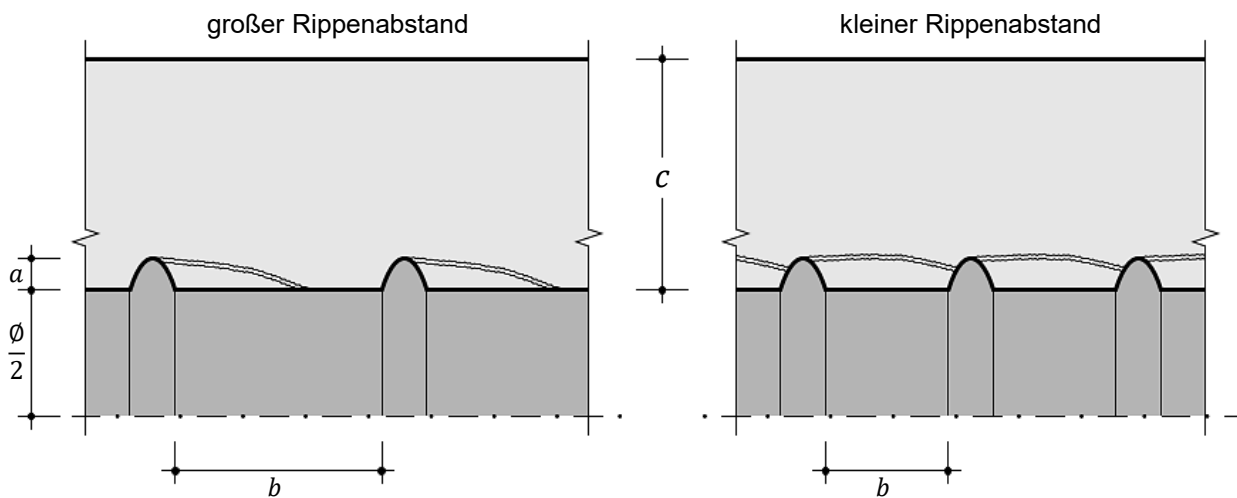


Bild 4.27: Scherbruchversagensfälle in Abhängigkeit vom Rippenabstand [Alv98]

Bei ungenügender Umschnürungswirkung kann es demgegenüber zum Spaltrissversagen kommen, welches durch ein Versagen durch Spalten des Betons mit einem plötzlichen Lastabfall gekennzeichnet ist. Hierbei können die Ringzugspannungen ab einer gewissen Last nicht mehr aufgenommen werden und eine Spaltung des Betons tritt ein. Der Versagensvorgang beginnt zunächst mit einem Längsriss am belasteten Stabende, der sich vom Stahlstab zur Betonoberfläche ausbildet und dann entlang der Betonoberfläche zum unbelasteten Stabende führt. Wenn sich die Längsrisse komplett ausgebildet haben, kommt es zu einem schlagartigen Verbundversagen. Dies liegt u. a. an dem geringfügigen Anteil des Reibungsverbunds, vor allem im Vergleich zum Scherbruchversagen [Let06].

In folgenden Bild 4.28 sind beide Verbundversagensfälle mit entstehender Rissbildung dargestellt. Zudem veranschaulicht das nebenstehende Verbundspannungs-Schlupf-Diagramm den Versagensverlauf der verschiedenen Verbundarten während des Spaltriss- und Scherbruchversagens.

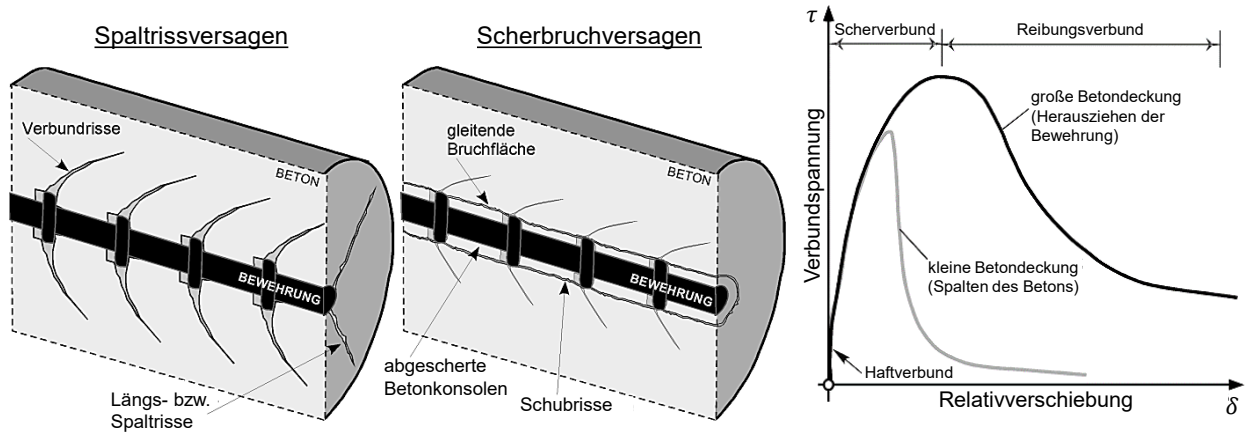


Bild 4.28: Zusammenspiel der Verbundmechanismen und der Versagensfälle [Let06]

Bei ausreichender Verankerung kann es alternativ zu einem Stahlversagen bzw. zum Reißen des Stabs kommen, wenn die Zugfestigkeit des Bewehrungsstabes überschritten wird.

Einflussfaktoren auf die Verbundtragfähigkeit

In der Literatur wurden einige Einflussfaktoren identifiziert, die den Verbund im Stahlbeton beeinflussen. Tabelle 4.7 zeigt eine Übersicht der bekannten Einflussfaktoren auf das Verbundverhalten [ACI03; Tep00; Zil10].

Tabelle 4.7: Einflussfaktoren auf das Verbundverhalten

Bewehrung	Beton	Belastung	Probekörper
Durchmesser	Betonfestigkeit	Längsspannung (Druck/Zug)	Probekörperform
Stabquerschnitt	Betontechnologie	Querdruck/ Querzug	Probekörpergröße
Rippengeometrie	Zusammensetzung	Schwelllast	Verbundlänge
Oberfläche	Materialverhalten	Wechselast	Betonierlage
Endausbildung	Verdichtung	Schwingbreite	Verbundzonenlage
Korrosion	E-Modul	Dauerbelastung	Querbewehrung/Umschnürung
Duktilität		Lastgeschichte	Betondeckung
Zugfestigkeit		Geschwindigkeit	Stabneigung
		Frequenz	Messpunktanordnung
		Temperatur	
		Strahlung	

Grundsätzlich lassen sich die zu erwartenden Verbundspannungen f_{bd} in einem Stahlbetonbauteil mit folgender Formel nach DIN EN 1992-1-1 [DINEN1992-1-1:2004+AC:2010; Heg19] vereinfacht berechnen:

$$f_{bd} = 2,25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \frac{f_{ctk;0,05}}{\gamma_c} \quad (4-1)$$

$\eta_1 = 1,0$ für gute Verbundbedingungen oder $\eta_1 = 0,7$ für mäßige Verbundbedingungen

$\eta_2 = 1,0$ für $\varnothing \leq 32$ mm oder $\eta_2 = \frac{132-\varnothing}{100}$ für $\varnothing > 32$ mm

Die vorhandene Verbundspannung τ , die bei Versuchen auftritt, kann im Allgemeinen mithilfe der aufgetragenen Kraft F bezogen auf die Verbundfläche A_b berechnet werden:

$$\tau = \frac{F}{A_b} = \frac{F}{U_b \cdot l_b} = \frac{F}{\pi \cdot d_s \cdot l_b} \quad (4-2)$$

Anhand der vorangegangenen Formeln lassen sich folgende Einflussfaktoren auf den Verbund ableiten: Der Stabdurchmesser, die Belastung, die Bewehrungslage bzw. Verbundbedingungen und die Verbundlänge bzw. -fläche [Heg14]. Ebenso hängt das Verbundverhalten und die Verbundversagen von der vorhandenen Betondeckung und der Betonfestigkeit ab (vgl. Kapitel *Verbundversagen*).

Wie bereits beschrieben, stellt der Haftverbund zudem den maßgeblichen Verbundmechanismus dar, sodass die Größe der aufnehmbaren Verbundspannungen zudem maßgeblich von der Oberfläche des Betonstahls abhängt. Die bezogene Rippenfläche f_R spielt dabei eine entscheidende Rolle, welche das Verhältnis von wirksamer Rippenfläche A_{Rippe} zu wirksamer Mörtelfläche $A_{Mörtel}$ bzw. Rippenhöhe a zu Rippenabstand a_R darstellt [Heg19].

$$f_R = \frac{A_{Rippe}}{A_{Mörtel}} = \frac{a \cdot (\varnothing + a) \cdot \pi}{a_R \cdot (\varnothing + a) \cdot \pi} \cong \frac{a}{a_R} \quad (4-3)$$

Bei zunehmender bezogener Rippenfläche können folglich größere Kräfte in den Beton übertragen und damit bessere Verbundeigenschaften erzielt werden [May01]. Weitere Einflüsse auf das allgemeine Verbundverhalten, wie beispielsweise der Korrosionsgrad, werden im Rahmen der vorliegenden Untersuchung nicht näher betrachtet.

Bezogen auf das Verbundverhalten in Bauteilen, wie z. B. in Stahlbetonbalken, spielen außerdem die Verankerungs- und die Übergreifungslänge von Längsstäben eine große Rolle. Der Nachweis der Verbundspannung bei Stahlbetonbauteilen wird indirekt über den Nachweis der Verankerung der Bewehrungsstäbe geführt, da im Verankerungsbereich die Zugkraft von der Bewehrung auf den Beton übertragen wird und die Verbundspannungen kurz hinter der Einspannstelle ihren Höchstwert erreichen [Alb18]. Die Verankerungslänge l_{bd} bestimmt sich nach [DINEN1992-1-1:2004+AC:2010] gemäß Gleichung (4-4):

$$l_{bd} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5 \cdot l_{b,rqd} \geq l_{b,min} \quad (4-4)$$

Mit $l_{b,min} = \max\{0,3 \cdot l_{b,rqd}; 10 \cdot \varnothing; 100 \text{ mm}\}$ für Zugstäbe

$l_{b,min} = \max\{0,6 \cdot l_{b,rqd}; 10 \cdot \varnothing; 100 \text{ mm}\}$ für Druckstäbe

Grundwert der Verankerungslänge $l_{b,rqd} = \frac{\varnothing}{4} \cdot \frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}$

Die Beiwerte α_i berücksichtigen weitere Einflussfaktoren wie bspw. die Verankerungsart (z. B. gerades Stabende oder Haken etc.), die vorhandene Querbewehrung und die Art der Lagerung des Bauteils (indirekte oder direkte Lagerung).

Verbundversuchsmethoden

In der Literatur werden unterschiedliche Versuchsmethoden beschrieben, die sich in ihrer Versuchsart, der Versuchsgeometrie, der Belastungsart, ihrer Art der Abstützung und der vorhandenen Bewehrung unterscheiden. Diese können bei gleichem Beton und Bewehrungsstahl zu unterschiedlichen Verbundspannung-Schlupf-Beziehungen führen [Wil13]. Zur Charakterisierung der Verbundwirkung werden in der Literatur vorwiegend Kleinkörperversuche durchgeführt, da hier der Einfluss der unterschiedlichen Tragmechanismen (Adhäsion, Reibung und

Verzahnung) besser bestimmt werden kann. Dies ist auf die bei kleinen Probekörpern einfacher zu bestimmenden Einflussgrößen (z. B. Flächenrauigkeit, Betonfestigkeit) zurückzuführen.

Zudem konnte gezeigt werden, dass aufgrund der nichtlinear verteilten Verbundspannungen die Größe der Verbundlänge einen wesentlichen Einfluss auf die ermittelten Festigkeiten besitzt. Dieser Effekt ist bei kurzen Verbundlängen jedoch gering und die Verbundverteilung kann annähernd konstant angenommen werden [Bac05; DAfStb288].

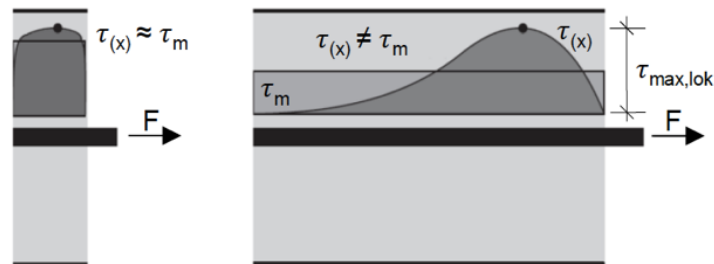


Bild 4.29: Verbundspannungsverteilung über eine kurze (links) und über eine lange Verbundlänge (rechts) [Rit13]

Die experimentellen Untersuchungen zum Verbundverhalten dienen im Wesentlichen der Bestimmung von Verbundspannungs-Schlupf-Beziehungen. Das Verbundverhalten wird in der Literatur vorwiegend durch Ausziehversuche (Pull-Out Test) und Balkenendversuche (Beam-End Test) geprüft. In den nachfolgenden Unterkapiteln werden diese Versuchsarten weiter erläutert, während Bild 4.30 eine Übersicht über übliche Versuchsaufbauten zeigt.

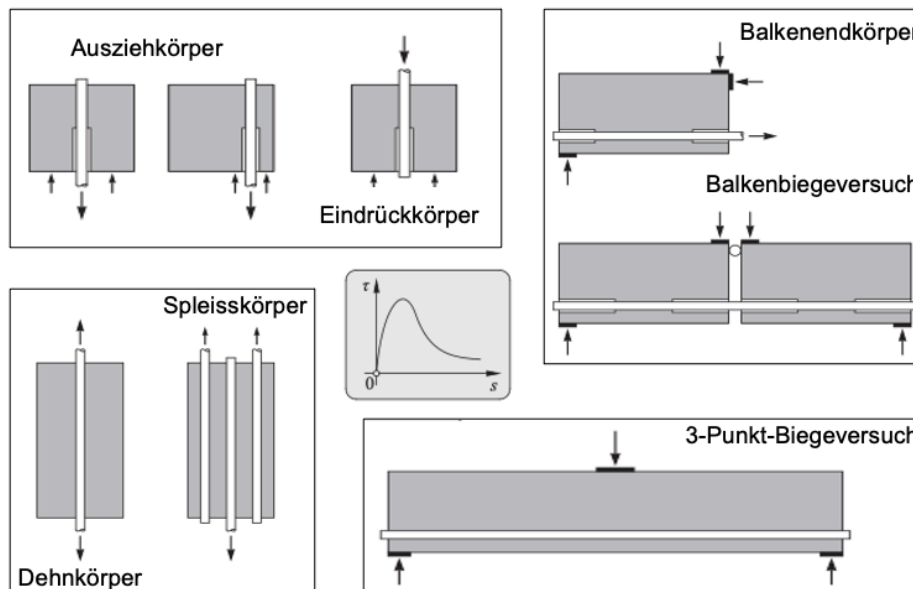


Bild 4.30: Versuchsaufbauten zur Untersuchung des Verbundverhaltens [Alv98]

Ausziehversuch (Pull-Out Test)

(1) Ausziehversuch nach RILEM RC6

Die am häufigsten verwendete Versuchsmethode, Verbundspannungen zu messen und zu testen, ist heutzutage der Ausziehversuch nach RILEM/CEB/FIP RC6 [RIL94], welcher in der

DIN EN 10080 (2005) [DIN05a] als offizieller Ausziehversuch für gerippten und profilierten Bewehrungsstahl beschrieben ist.

Die Regeln der Zusammenschlüsse RILEM/CEB/FIP für einen Ausziehversuch gelten für Probekörper mit nicht vorgespannten Stahlstäben mit einem Durchmesser von mindestens 10 mm. Der Testaufbau besteht aus einem Stahlstab, der in die Mittelachse eines Betonwürfels eingebettet ist. An einem Stabende wird eine Zugkraft aufgebracht, während das andere Ende des Stabes spannungsfrei bleibt. Sobald die Belastung startet, werden die Zugkraft und Relativverschiebung zwischen Stahl und Beton gemessen, bis der Verbund versagt und die Last sich wieder abbaut.

Die Verbundlänge l_b des Bewehrungsstabes entspricht dem fünffachen Stabdurchmesser. Im unteren Teil des Betonwürfels ist der Stab verbundfrei, was durch eine Plastikhülse realisiert werden kann. Der zu prüfende Stab ragt über beide Seiten des Würfels hinaus. Am längeren Ende wird die Spannung aufgebracht und am kürzeren Ende wird eine Vorrichtung zur Messung der Verschiebung zwischen Stahl und Beton befestigt. Dabei wird der Prüfkörper auf eine Gummimatte gestellt, um die Reibungswirkung zwischen der Stützstahlplatte und dem Betonprisma zu verringern. Weitere Maße und Details zum Versuchsaufbau sind Bild 4.31 zu entnehmen.

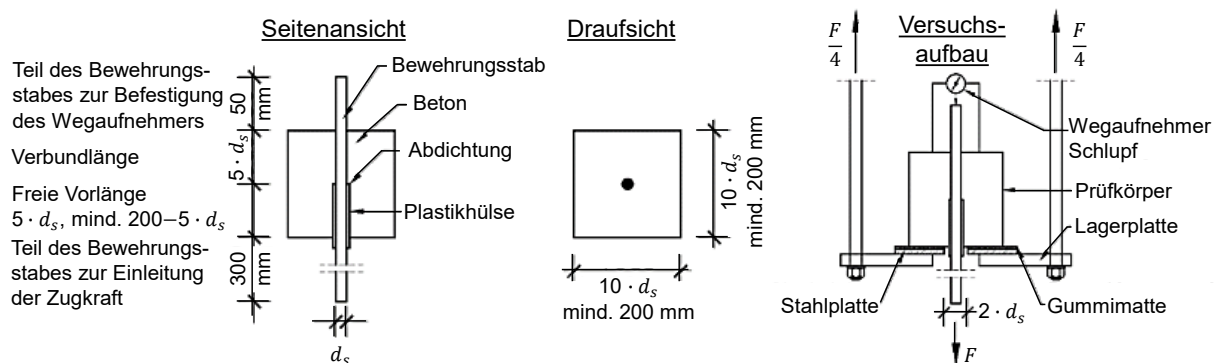


Bild 4.31: Versuchsaufbau und Geometrie des Prüfkörpers des Ausziehversuchs nach RILEM/CEB/FIP RC6 [RIL94]

Der Bewehrungsstab sollte in seinem normal hergestellten Zustand sein und nicht behandelt werden. Der Stab wird in eine Schalung mittig eingespannt, danach wird diese mit Frischbeton befüllt und verdichtet. Die Schalung sollte nach ca. drei Tagen entfernt werden, danach sollen die Probekörper mit feuchten Tüchern abgedeckt und die folgenden 25 Tage bei einer Raumtemperatur von ca. 20 ± 2 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von ca. 60 ± 5 % gelagert werden.

Nach den Ausziehversuchen können die aufgezeichneten Zugkräfte durch Formel (4-2) mit einer Verbundlänge von $5 \cdot d_s$ in Verbundspannungen τ umgerechnet werden. Dabei wird nach RILEM/CEB/FIP RC6 [RIL94] das Verhältnis von der gemessenen Betondruckfestigkeit f_c zur Betondruckfestigkeit nach Betonfestigkeitsklasse bzw. Herstellerangaben f_{cm} einbezogen.

$$\tau = \frac{F}{\pi d_s \cdot 5 d_s} \cdot \frac{f_{cm}}{f_c} = \frac{F}{5 \pi \cdot d_s^2} \cdot \frac{f_{cm}}{f_c} \quad (4-5)$$

Die zu erwartende Verbundversagenskraft F_b und die zu erwartende Stahlversagenskraft F_s können abgeschätzt werden zu

$$F_b = f_{bd} \cdot U_b \cdot l_b \quad (4-6)$$

$$F_s = A_s \cdot f_{yk} \quad (4-7)$$

Die kleinere Kraft ergibt folglich die zu erwartende Versagenslast.

(2) Ausziehversuch nach [Los79] und [Eli82]

Der Losberg- Ausziehversuch ähnelt dem Ausziehversuch nach RILEM. Beim Losberg-Ausziehversuch wird die Kontaktfläche zwischen Stab und Beton an beiden Enden durch Kunststoffhülsen unterbrochen, wie in Bild 4.32 dargestellt. Die Losberg-Ausziehversuche können sowohl als Würfel oder als Zylinder geprüft werden. Die Seitenlängen der Proben liegen zwischen 150 mm und 200 mm.

Bei 3D-gedruckten Probekörpern liegt der Vorteil dieses Versuchsaufbaus darin, dass die mittleren Schichten bei der Auswertung betrachtet werden würden. Die erste Schicht bei den 3D gedruckten Körpern ist meistens schlechter als die darauffolgenden. Nach [Leo73] und [Zil10] treten bei diesem Ausziehversuch jedoch mehr Fehlstellen durch Inhomogenität auf.

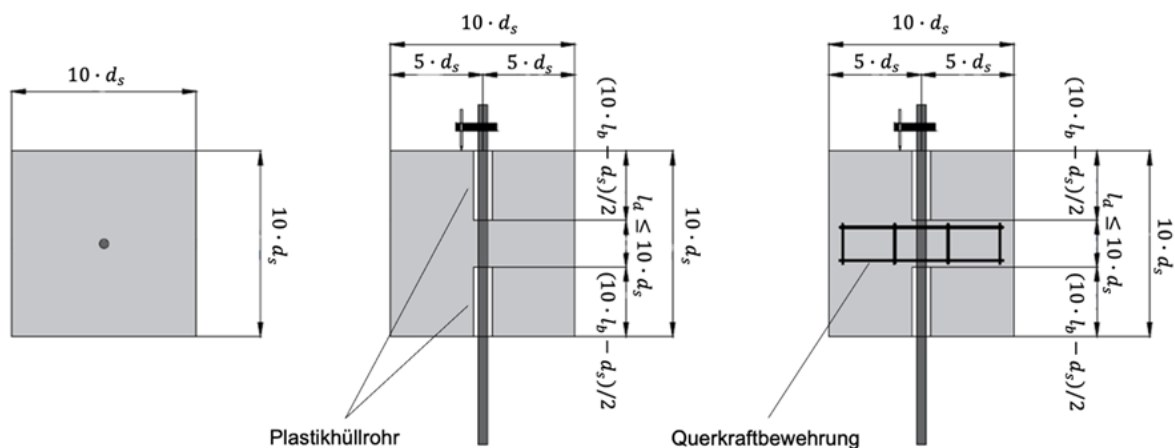


Bild 4.32: Abmessungen der Ausziehversuche nach [Los79] und [Eli82]

Beim Pullout-Versuch handelt es sich um einen Versuchsaufbau, der das Tragverhalten von Bauteilen vereinfacht darstellen soll. Durch diese Vereinfachung treten Nachteile dieses Versuchsaufbaus auf: [Röh18]

- Bei dem Ausziehversuch steht der Bewehrungsstahl nur einseitig unter Zugbeanspruchung; in der Realität wirkt die Beanspruchung beidseitig.
- Im Beton treten auch Spannungszustände auf, diese wurden bislang noch nicht ausreichend untersucht, um eine Aussage zu treffen, ob die experimentellen Untersuchungen auf reale Bauwerke übertragbar sind.
- Durch die kurze Verbundlänge kommt es an der Prüfstelle oftmals zu einer Inhomogenität der Materialbedingungen. Bereits kleine Streuungen machen sich bei der Auswertung stark bemerkbar. Beispiele von einer Inhomogenität sind Poren im Beton, Lage der Zusatzstoffe und Festigkeit der Bindemittel.
- Die Verbundlänge ist klein, wodurch sich hohe Verbundspannungen ergeben. Im realen Bauteil sind die Verbundlängen viel größer, wodurch sich geringere Verbundspannungen einstellen.
- Durch die hohe Betondeckung werden die dünneren Stahlstäbe herausgezogen, und die Spaltwirkung kann nicht ausreichend untersucht werden.

- Durch die kurze Spannweite ist das Momenten-Querkraft-Verhältnis kleiner als in einem realen Bauteil.

4.3.2 Stand der Technik – Verbund von Bewehrung in gedrucktem Beton

Das Verhalten von Bewehrung im gedruckten Beton wurde bisher nur rudimentär erforscht. In Studien von [Baz20] wurden Pull-Out-Versuche durchgeführt. Hierbei wurde der Beton zunächst gedruckt und später in einen größeren Probekörper einbetoniert. Hierbei ergaben die Versuche an gegossenen Versuchskörpern die höchsten Verbundfestigkeiten, gefolgt von Versuchen, in denen Bewehrung in u-Richtung eingelegt wurde. Im Gegensatz dazu zeigten Untersuchungen am IMB [Sch22], dass die Anordnung von Bewehrung in v-Richtung zu den besten Ergebnissen führte, gefolgt von gegossenen Versuchskörpern, der u-Richtung und schließlich der w-Richtung. Dies zeigt offene Fragestellungen, insbesondere hinsichtlich des Verhaltens von unterschiedlichen Bewehrungsdurchmessern.

4.3.3 Ausgangsmaterialien

Beton

Der hier verwendete Mörtel bzw. Beton ist eine Mischung mit der Bezeichnung Weber 3D 145-2. Die Eigenschaften des Materials sind in Kapitel 4.1 ausführlich erläutert. Für jeden Versuch wurden ergänzende Materialprüfungen an gegossenen Prüfkörpern durchgeführt, um die Qualität und die Eigenschaften des Betons zu bewerten. Neben Würfeln wurden Prismen getestet, da der verwendete Beton aufgrund des verwendeten Größtkorns kleiner als 4 mm in die Kategorie der Mörtel fällt. Die Druckfestigkeit der Betonwürfel wird nach der Norm DIN EN 12390-1 getestet [DINEN12390-1:2012-12]. Die Biegezugfestigkeit und die Druckfestigkeit werden mithilfe von Prismen nach DIN EN 12390-3 bestimmt [DINEN12390-3:2019-10].

Alle Würfel und Prismen wurden jeweils mit den gleichen Zusammensetzungen hergestellt, jedoch variierte der Wassergehalt bei den unterschiedlichen Druckterminen. Bei jedem Druckvorgang wurden jeweils 3 Würfel der genormten Kantenlänge $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$ und 3 Prismen der genormten Abmessungen $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ gegossen. Insgesamt wurden an den vier Druckterminen 12 Prismen und 12 Würfel hergestellt.

Die Würfel und die Prismen wurden während des Drucks mit dem Beton aus dem Druckkopf befüllt und mithilfe einer Rüttelplatte verdichtet. Die Probekörper wie auch die gedruckten Körper wurden mit Wasser befeuchtet und mithilfe einer Plastikfolie abgedeckt damit keine Schwindrisse entstehen. Nach 2 bis 3 Tagen wurden die Würfel und die Prismen aus ihrer Form genommen und weiterhin unter einer Folie gelagert. Die genormten Probekörper wurden bestmöglich jeweils an dem gleichen Tag geprüft als die gedruckten Betonkörper vom selbigen Drucktermin. Die Körper wurden in einem Zeitraum zwischen 25 und 55 Tagen nach dem Drucktermin getestet, diese Abweichung lag an der Verfügbarkeit des Prüfstandes. Nach der Norm sollen diese jedoch genau nach 28 Tagen getestet werden, so dass die Ergebnisse umgerechnet wurden. Nach dieser Zeitspanne von 28 Tagen wird angenommen, dass der Bezugspunkt für die endgültige Druckfestigkeit erreicht ist, um einen möglichst einheitlichen Vergleich der Betoneigenschaften zu garantieren. Der verwendete Weber-Mörtel soll folgende Druckfestigkeiten (EN 12390-3) besitzen [Sai19] :

- 24h > 18 N/mm²
- 7 Tage > 30 N/mm²

- 28 Tage >45 N/mm²

Die Betondruckfestigkeit im Alter t hängt vom Zementtyp, der Temperatur und den Lagerungsbedingungen ab. Bei einer mittleren Temperatur von 20 °C und bei einer Lagerung nach *DIN EN 12390* kann die Betondruckfestigkeit mit folgender Formel in *DIN EN 1992-1-1* auf ein Alter von 28 Tagen zurückgerechnet werden:

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_{cm} \quad (4-8)$$

$$\beta_{cc}(t) = e^{s \cdot (1 - \sqrt{28/t})} \quad (4-9)$$

Mit der Formel (3.3) und (3.4) ergibt sich folgende Umrechnung:

$$f_{cm}(28) = \frac{e^{s \cdot (1 - \sqrt{28/t})}}{f_{cm}(t)} \quad (4-10)$$

$f_{cm}(t)$: die mittlere Betondruckfestigkeit für ein Alter von t Tagen;

$\beta_{cc}(t)$: ein vom Alter des Betons t abhängiger Beiwert;

f_{cm} : die mittlere Druckfestigkeit nach 28 Tagen;

t : das Alter des Betons in Tagen;

s : ein vom verwendeten Zementtyp abhängiger Beiwert:

$s = 0,20$ für Zement der Festigkeitsklassen CEM 42.5 R, CEM 52.5 N und CEM 52.5 R (Klasse R),

$s = 0,25$ für Zement der Festigkeitsklassen CEM 32.5 R, CEM 42.5 N (Klasse N),

$s = 0,38$ für Zement der Festigkeitsklassen CEM 32.5 N (Klasse S).

Für hochfeste Betone gilt für alle Zemente $s = 0,20$.

Der richtige Zementtyp von *Weber 3D 145-2* ist nicht angegeben. Aber ausgegangen von der Betonfestigkeitsklasse kann ein Zementtyp von CEM 45.2N angenommen werden.

(1) Würfeldruckfestigkeit

Die Würfel werden mit einer Druckprüfmaschine der Firma *Toni Technik* mit einer Prüfungsgeschwindigkeit vom 0,6 N/mm² bis zum Versagen getestet, um somit die maximale Druckfestigkeit des Betons zu ermitteln. Die erreichte Kraft wird durch die Fläche des Würfels geteilt.

$$f_c = \frac{F}{A_c} \quad (4-11)$$

Mit $A_c = 150 \cdot 150 \text{ mm}^2$

Die ermittelten Würfeldruckfestigkeiten werden zu Beginn mit der Formel (4.3) umgerechnet auf ein Alter von 28 Tagen. Die Umrechnung der Druckfestigkeit der Würfel wird dann mit folgender Formel auf die charakteristische Zylinderdruckfestigkeit umgerechnet:

$$f_{c,kcyl,150/300} = f_{ck,cube,150} / 1,16 \quad (4-12)$$

Nach der *DIN EN 12390-3* soll eine Abweichung der Würfelfestigkeit größer als 13,2% nicht weiter berücksichtigt werden. Beim vierten Drucktermin ergab einer der gemessenen Würfel eine Abweichung von mehr als 13,2% und wird deshalb im weiteren Verlauf der Arbeit nicht weiter berücksichtigt. Folgende Mittelwerte haben sich bei der Prüfung der Würfel ergeben:

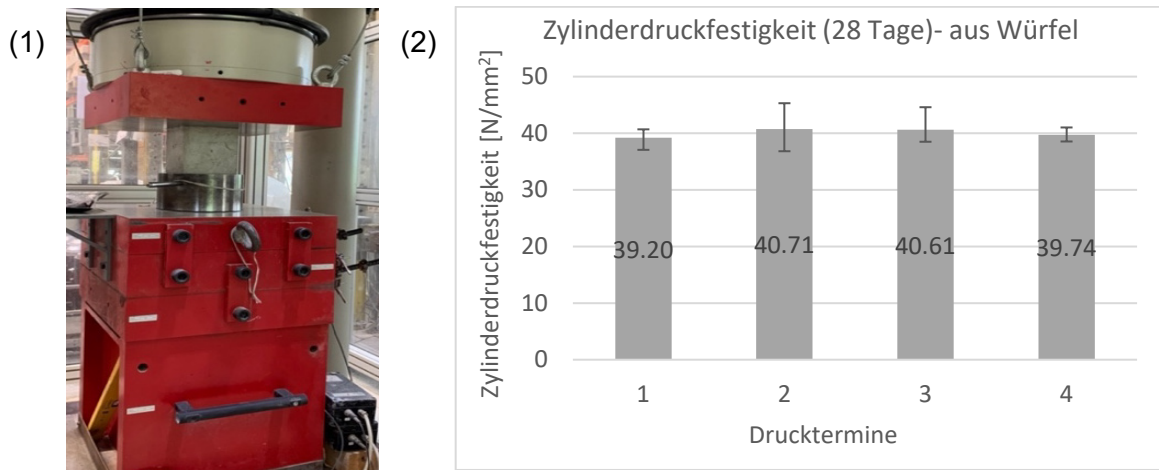


Bild 4.33: (1) Druckprüfmaschine; (2) Würfeldruckfestigkeit umgerechnet in die mittlere Zylinderdruckfestigkeit

Der Durchschnitt der getesteten Zylinderdruckfestigkeit beträgt $40,07\text{N/mm}^2$ und ist etwas höher als die angegebene Normfestigkeit nach Weber für den verwendeten Weber 3D 145-2 Mörtel mit einer Betonfestigkeitsklasse von C35/45, siehe Bild 4.33. Um die mittlere Zugfestigkeit zu bestimmen wird folgende Formel nach [DINEN1992-1-1:2004+AC:2010] verwendet:

$$f_{ck} = f_{ck,cyl,150/300} \quad (4-13)$$

$$f_{ctm} = 0,30 \cdot f_{ck}^{\frac{2}{3}} \quad (\text{für } \leq C50/60)$$

Der experimentell ermittelte Mittelwert der Zugfestigkeit beträgt $3,266\text{N/mm}^2$ und stimmt sehr gut mit der Zugfestigkeit nach Norm von $3,2\text{N/mm}^2$ überein. Die genormte Zugfestigkeit entspricht ungefähr 10% der Druckfestigkeit.

(2) Biegezug- und Druckfestigkeiten der Prismen

Die Prismen werden zuerst mit einem 3-Punkt-Biegeversuch an der *Instron* Maschine mit einem dafür geeigneten Aufsatz nach [DIN09] [DIN05b] geprüft. Dies wird mithilfe einer Hydraulikpumpe der Firma *Toni Technik* durchgeführt. Die Prismen werden mittig mit der vorgeschriebenen Kraft von $(50 \pm 10)\text{N/s}$ bis zum Versagen belastet. Mit der maximal aufgebrauchten Kraft F_{\max} kann die Biegezugfestigkeit $f_{f,Prisma}$ bestimmt werden, vgl. Bild 4.34.

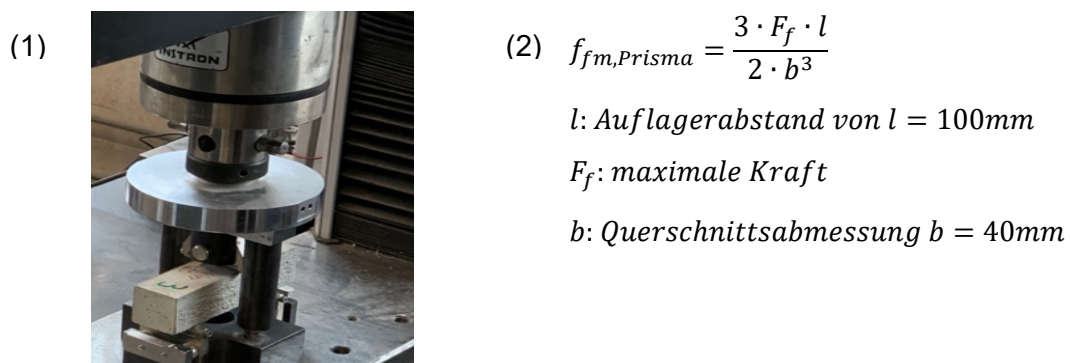


Bild 4.34: (1) 3-Punkt-Biegeversuch; (2) Formel zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit der Prismen

Mit den beiden Hälften der Prismen wird noch ein weiterer Druckversuch durchgeführt. Der Körper wird mit einer Druckkraft von $(2400 \pm 200)\text{N/s}$ bis zum Versagen belastet. Mit der maximal erreichten Kraft wird die Druckfestigkeit der halbierten Prismen $f_{c,pr}$ bestimmt.



$$f_{c,pr} = \frac{F_c}{A_c}$$

$$A_c = 40 \cdot 40 \text{ mm}^2$$

F_c : maximale Kraft

Bild 4.35: (1) Druckprüfmaschine; (2) Formel zur Bestimmung der Druckfestigkeit der halbierten Prismen

Die Festigkeit des Betons wird nach der [DINEN12390-1:2012-12] in Würfeldruckfestigkeit der Abmessungen $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$ und als Zylinderdruckfestigkeit mit einer Standardabmessung des Zylinders von $d=150 \text{ mm}$ und $h=300 \text{ mm}$ angegeben.

$$f_{ck,cyl} = (f_{c,pr} \cdot 0,9 - 8) \cdot 0,92 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (4-14)$$

$$f_{ck,cube} = (f_{c,pr} \cdot 1,06 - 8) \cdot 0,92 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (4-15)$$

Die Umrechnung der Druckfestigkeit der Prismenhälften erfolgt mit der nachfolgenden Formel für Normalbeton. Aufgrund der Lagerung der Proben muss noch ein Abminderungsfaktor von 0,92 nach DIN 1045-2 [DIN1045-2:2008-08] berechnet werden. Der Abminderungsfaktor berücksichtigt die Trockenlagerung anstelle der normgerechten Lagerung [Bie20] [DIN1045-2:2008-08].

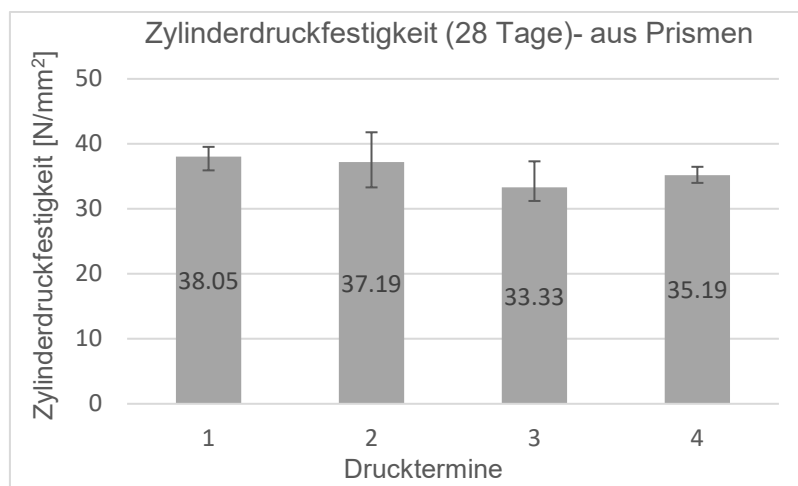


Bild 4.36: Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit

Zuerst wird die Festigkeit auf ein Testdatum von 28 Tagen umgerechnet, danach erfolgt die Umrechnung in Zylinderdruckfestigkeit, Formel (4-14). Der Mittelwert aller getesteten Proben ergibt sich zu $35,94 \text{ N/mm}^2$, siehe Bild 4.36. Dieser Wert entspricht mit der angegebenen Normfestigkeit nach Weber für den verwendeten Weber 3D 145-2 Mörtel mit einer Betonfestigkeitsklasse von C35/45.

Nach [Zil10] kann aus der Biegezugfestigkeit eine Annäherung der zentrischen Zugfestigkeit berechnet werden. Der Mittelwert der zentrischen Zugfestigkeit beträgt $3,05 \text{ N/mm}^2$.

$$f_{ct} = f_{ct,fl} \cdot \frac{1,5 \cdot \left(\frac{h_b}{h_0}\right)^{0,7}}{1 + 1,5 \cdot \left(\frac{h_b}{h_0}\right)^{0,7}} \quad (4-16)$$

mit h_b : 40 mm Balkenhöhe
 h_b : 100 mm Bezugswert
 $f_{ct,fl} = f_{m,Prisma}$ mittlere Biegezugfestigkeit vom Prisma

Bewehrung

Die Versuche wurden mit einem warmgewalzten Betonrippenstahl B500B durchgeführt. Es wurden drei Stahldurchmesser verwendet: 8 mm, 10 mm und 12 mm. Zusätzlich wurde unterschieden zwischen geschweißten und kontinuierlichen Bewehrungsstäben. Die Geometrie und die mechanischen Kennwerte sind in Tabelle 4.8 zusammengefasst.

Tabelle 4.8: Kennwerte des kontinuierlichen Bewehrungsstahl B500B

Durchmesser d_s [mm]	0.2%-Dehngrenze $R_{p0,2}$ [N/mm ²]	Zugfestigkeit R_m [N/mm ²]	Elastizitätsmodul [N/mm ²]
8	537	661	209180
10	592	676	198170
12	537	637	195877

Die Lage des Bewehrungsstabes ist ausschlaggebend für den Ausziehversuch. Bereits während des Einbetonierens steigen beim Verdichten überschüssiges Wasser und Luft nach oben. Diese sammeln sich auch unter horizontal liegenden Stahlstäben. Nach dem Erhärten befinden sich dann unmittelbar um den Stab Luftblasen, welche zu einer hohen Porosität und einem geringeren Verbund führen. Je weiter die Bewehrungsstange von der Unterkante der Schalung entfernt ist, desto mehr Luftblasen können sich an der Unterseite bilden und desto weniger Verbund zwischen dem Beton und der Bewehrung kann entstehen. Liegt die Bewehrung vertikal in der Schalung, so kann es auch hier zu porösen Stellen durch Luftblasen an der Unterseite der Stahlrippen kommen. Mithilfe einer Rüttelplatte wird der Beton bei den gegossenen Prüfkörpern verdichtet.

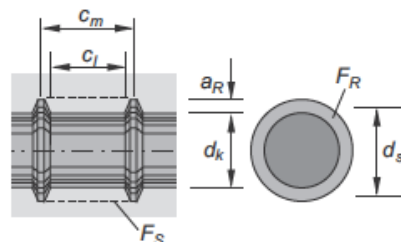


Bild 4.37: Definition der bezogenen Rippenfläche f_R

Die Geometrie der Bewehrung spielt auch eine Rolle bei der Verbundqualität. Der Scherwiderstand ist abhängig von der bezogenen Rippenfläche nach [DIN488-2:2009-08]. Die bezogene Rippenfläche f_R bildet das Verhältnis von der senkrecht zum Stahlstab projizierten Rippenfläche und der Mantelfläche zwischen zwei Rippen, siehe Bild 4.37.

$$f_R = \frac{F_R}{F_S} = \frac{[\pi \cdot (d_K + a_R) - \sum e] \cdot a_R}{[\pi \cdot (d_K + 2 \cdot a_R) - \sum e] \cdot c_l} \approx \frac{(\pi \cdot d_s - \sum e) \cdot a_R}{\pi \cdot d_s \cdot c_m} \approx \frac{a_R}{c_m} \cdot 0,6 \quad (4-17)$$

d_K : Kerndurchmesser des Stabes

d_S : Nenndurchmesser des Stabes

e : Abstand der Rippen in Stabumfangsrichtung

c_l : lichter Abstand der Rippen in Stablängsrichtung

c_m : mittlerer Abstand der Rippen in Stablängsrichtung

a_R : durchschnittliche Tiefe des Profils

Nach [Reh61] besitzt eine höhere bezogene Rippenfläche eine höhere Verbundsteifigkeit und -festigkeit. Jedoch als Nachteil entsteht bereits bei den kleinen Rippenabständen $f_r > 0,15$ bei einem kleinen Schlupf ein sprödes Versagen. Die Stahlstäbe mit einem größeren Rippenabstand $f_r < 0,1$ zeigen einen großen Schlupf auf, jedoch ist die Verbundfestigkeit hierbei geringer.

Die in diesem Projekt verwendeten Bewehrungsstäbe wurden händisch mit einer Schieblehre vermessen; die Werte können deshalb leicht von den tatsächlichen Abmessungen variieren. Mithilfe der Formel (4-17) ergeben sich folgende bezogene Rippenflächen:

$$\begin{aligned} f_r (d_s=8mm) &\approx 0,6 \cdot \frac{1,47}{4,66} = 0,189 \\ f_r (d_s=10mm) &\approx 0,6 \cdot \frac{0,49}{5,32} = 0,055 \\ f_r (d_s=12mm) &\approx 0,6 \cdot \frac{2,03}{5,83} = 0,209 \end{aligned} \quad (4-18)$$

Ein direkter Vergleich des Einflusses unterschiedlicher Stahldicken ist sehr schwierig. Dies liegt daran, dass die Verbundlänge immer $5 \cdot d_s$ entspricht und somit der Stabdurchmesser in Relation zur Verbundlänge steht. Nach [Reh61] und [Mar] ist der Einfluss des Stahldurchmessers auf das Verbundverhalten gering, so dass dieser näherungsweise vernachlässigt werden kann. Jedoch ist das Verhältnis von Stabumfang zu Stabquerschnitt bei dünneren Stäben günstiger als bei dickeren. Ebenfalls konnten [Eli82] und [Sor89] feststellen, dass bei einem dünneren Stabdurchmesser eine höhere maximale Verbundspannung erreicht werden kann.

4.3.4 Versuchsprogramm






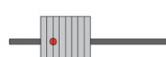


Ziel der durchgeführten Untersuchungen war die Untersuchung des Verbundverhaltens zwischen 3D-gedrucktem Beton und Bewehrungsstahl. Hierzu wurden in der Versuchsreihe unterschiedliche Parameter systematisch variiert. Der Bewehrungsstab wurde entweder als kontinuierlicher Stab oder als in der Mitte der gemessenen Verbundlänge geschweißter Stab eingelegt. Der Bewehrungsdurchmesser wurde zwischen 8 mm, 10 mm und 12 mm variiert. Zudem wurde der Einfluss der Druckrichtung in Bezug auf die Ausrichtung des Stahlstabes untersucht. Hierzu wurde der Stab entweder parallel (u-Richtung) oder lateral (v-Richtung) zur Druckrichtung eingelegt, bzw. in w-Richtung eingestellt. Zudem wurden 18 gegossene Versuchskörper als Referenz geprüft. Bei den Versuchen in w-Richtung wurde zudem der Einfluss unterschiedlicher Betonfördermengen analysiert. Weiterhin wurde der Abstand der beiden Zwillingsdüsen den verschiedenen Stabdurchmessern angepasst.

Tabelle 4.9: Versuchsmatrix der Verbundversuche

	Variable	Erklärung	Anzahl
Bewehrungsdurchmesser	Ø 8	3 unterschiedliche Bewehrungsdurchmesser	48
	Ø 10		30
	Ø 12		30
Bewehrungsstab	Geschweißt	kontinuierlicher Bewehrungsstab vs. mit dem Lichtbolzenschweißverfahren an einer Stelle im Prüfbereich geschweißter Stab	66
	Kontinuierlich		42
Druckrichtung	u-Richtung	Variation von Druck- bzw. Bewehrungsrichtung in 3 unterschiedlichen Achsen (u-Richtung = Bewehrungsstab parallel zur Extrusionsrichtung; v-Richtung= Stab lateral zur Extrusionsrichtung; w-Richtung = Düse umdrückt den vertikal stehenden Bewehrungsstab).	21
	v-Richtung		21
	w-Richtung		48
	Gegossen		18
Fördermenge	S9	Fördermenge variiert zwischen Stufe S7, S8 und S9 (360 – 420 l/h).	9
	S8		9
	S7		9
Düsenabstand	A34	Düsenabstand zwischen den beiden Zwillingsdüsen variiert zwischen 34 mm, 28 mm und 24 mm.	6
	A28		84
	A24		18









Insgesamt wurden 36 Versuchsreihen mit jeweils 3 identischen Versuchskörpern durchgeführt. Die Tests erfolgten nach den Vorgaben von *RILEM RC 6*. Anhand der aufgetragenen Kraft und der gemessenen Relativverschiebung wurden Verbundspannung-Schlupf-Beziehungen abgeleitet. Die Ergebnisse werden im nachfolgenden Kapitel 4.3.7 mithilfe von Diagrammen dargestellt, analysiert und bewertet.

Tabelle 4.10: Übersicht der Prüfkörper zum Verbundverhalten von Stäben mit Ø8 mm

Prüfkörper mit einem Bewehrungsdurchmesser von 8 mm						
Beschreibung	Skizze					
	Kontinuierliche Bewehrung	Anzahl	Abstand A[mm]	Geschweißte Bewehrung	Anzahl	Abstand A[mm]
Gegossene Prüfkörper		3	/		3	/
Gedruckte Prüfkörper mit Bewehrung in u-Richtung		6*	24		3	24
Gedruckte Prüfkörper mit Bewehrung in v-Richtung		6**	24 28		3	28
Gedruckte Prüfkörper mit Bewehrung in w-Richtung		3	28		21***	28 34



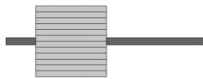
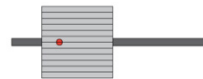
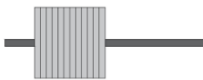
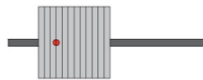
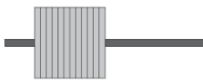
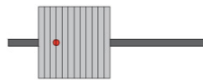
* Jeweils 3 gleiche Prüfkörper, die Bewehrung wird einmal in der Mitte der Schicht eingelegt (in der Mitte der beiden Filamente) und einmal in der Mitte eines Filaments (1/4 der Schicht)
 ** 6 gleiche Prüfkörper an zwei unterschiedlichen Tagen hergestellt
 *** Jeweils 3 gleiche Prüfkörper, das bedeutet 7 Parametervariationen: S7; S8; S9; A13/13; A9/17; A10/10; A6/14

Tabelle 4.11: Übersicht der Prüfkörper zum Verbundverhalten von Stäben mit Ø10 mm

Prüfkörper mit einem Bewehrungsdurchmesser von 10 mm						
Beschreibung	Skizze					
	Kontinuierliche Bewehrung	Anzahl	Abstand A[mm]	Geschweißte Bewehrung	Anzahl	Abstand A [mm]
Gegossene Prüfkörper		3	/		3	/
Gedruckte Prüfkörper mit Bewehrung in u-Richtung		3	28		3	28
Gedruckte Prüfkörper mit Bewehrung in v-Richtung		3	28		3	28
Gedruckte Prüfkörper mit Bewehrung in w-Richtung		3	28		9*	28

*Unterschiede in der Fördermengenstufe: S7; S8; S9

Tabelle 4.12: Übersicht der Prüfkörper zum Verbundverhalten von Stäben mit $\varnothing 12$ mm

Prüfkörper mit einem Bewehrungsdurchmesser von 12 mm						
Beschreibung	Skizze					
	Kontinuierliche Bewehrung	Anzahl	Abstand A[m m]	Geschweißte Bewehrung	Anzahl	Abstand A [mm]
Gegossene Prüfkörper		3	/		3	/
Gedruckte Prüfkörper mit Bewehrung in u-Richtung		3	28		3	28
Gedruckte Prüfkörper mit Bewehrung in v-Richtung		3	28		3	28
Gedruckte Prüfkörper mit Bewehrung in w-Richtung		3	28		9*	28

*Unterschiede in der Fördermengenstufe: S7; S8; S9

Es wurden je Parameter drei Ausziehversuche nach RILEM RC 6 [RIL94] durchgeführt, so dass sich insgesamt 108 Versuche ergaben. Untersucht wurde die Verbundfestigkeit zwischen dem Weber-Mörtel C35/45 und Bewehrungsstahl B500. Versuchsbegleitend wurde für jeden der Versuche eine einachsige Druckfestigkeitsprüfung durchgeführt. Die Beschriftung des Prüfkörpers leitet sich wie folgt ab, siehe Bild 4.38.

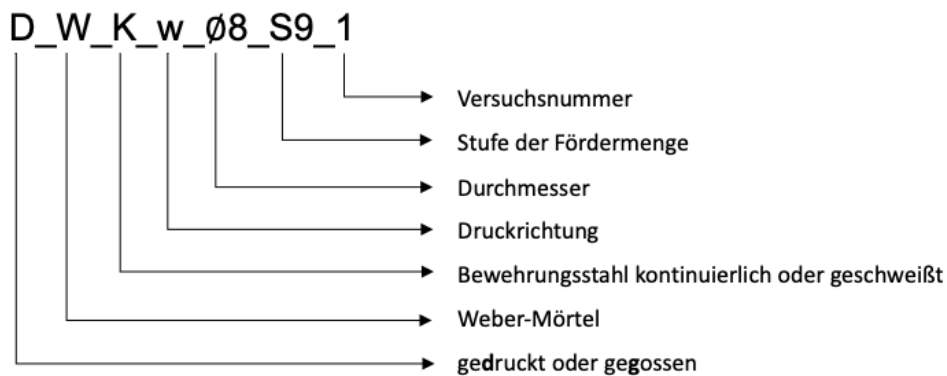


Bild 4.38: Beschriftung des Versuchskörpers zum Verbundverhalten

Zu Beginn wird präzisiert, ob der Körper gedruckt („D“) oder gegossen („G“) wird. An zweiter Stelle steht das „W“ für den verwendeten Weber-Mörtel. Der dritte Buchstabe „K“ oder „G“ präzisiert, ob es sich um einen geschweißten oder einen kontinuierlichen Bewehrungsstab handelt. An nächster Stelle steht die untersuchte Ausrichtung der Bewehrung in Bezug auf die Extrusionsrichtung, welche gekennzeichnet ist mit u-Richtung, v-Richtung und w-Richtung. Weiterhin wird der Durchmesser der Bewehrung angegeben, dieser ist entweder 8 mm, 10 mm oder 12 mm. Bei einigen Versuchen variiert zusätzlich die Fördermenge. Bei Versuchsreihen mit Bewehrung in u-Richtung wurde die Bewehrungslage berücksichtigt: „2Fil“ bedeutet hierbei, dass die Bewehrung mittig zwischen zwei aus der Zwillingdüse extrudierten horizontal

benachbarten Betonfilamenten angeordnet wurde. „1Fil“ sagt aus, dass die Bewehrung innerhalb eines Filaments eingelegt wurde (und damit nicht mittig zwischen zwei horizontal benachbarten Filamenten). Des Weiteren wurde bei vier Versuchsreihen der genaue Abstand der Düse zu den Bewehrungsstäben angegeben (z. B. bezeichnet A10/10, dass der Abstand links und rechts 10 mm betrug). Bei einem Bewehrungsstab von 8 mm ergibt dies ein Gesamtdüsenabstand von 28 mm.

4.3.5 Herstellung der Prüfkörper

Die Abmessungen der Prüfkörper sind nach RILEM definiert. Die Verbundlänge betrug jeweils $5 \cdot d_s$. Die gedruckten würfelförmigen Körper besaßen eine Abmessung von $10 \cdot d_s$ und wurden anschließend in einen größeren Würfel der Abmessungen von 200 mm einbetoniert. Die einbetonierte Bewehrungslänge von $200 - 5 \cdot d_s$ wurde zur Verhinderung des Verbunds mit einem Plastikrohr isoliert. Zudem wurde auf der Seite, auf der sich die Verbundlänge von $5 \cdot d_s$ befand, ein Bewehrungsüberstand von 50 mm vorgesehen, um dort den Wegaufnehmer zur Schlupfmessung befestigen zu können. Auf der anderen Seite wurden 200 mm Bewehrungslänge benötigt, um die Prüfkraft im Versuchsstand aufbringen zu können.

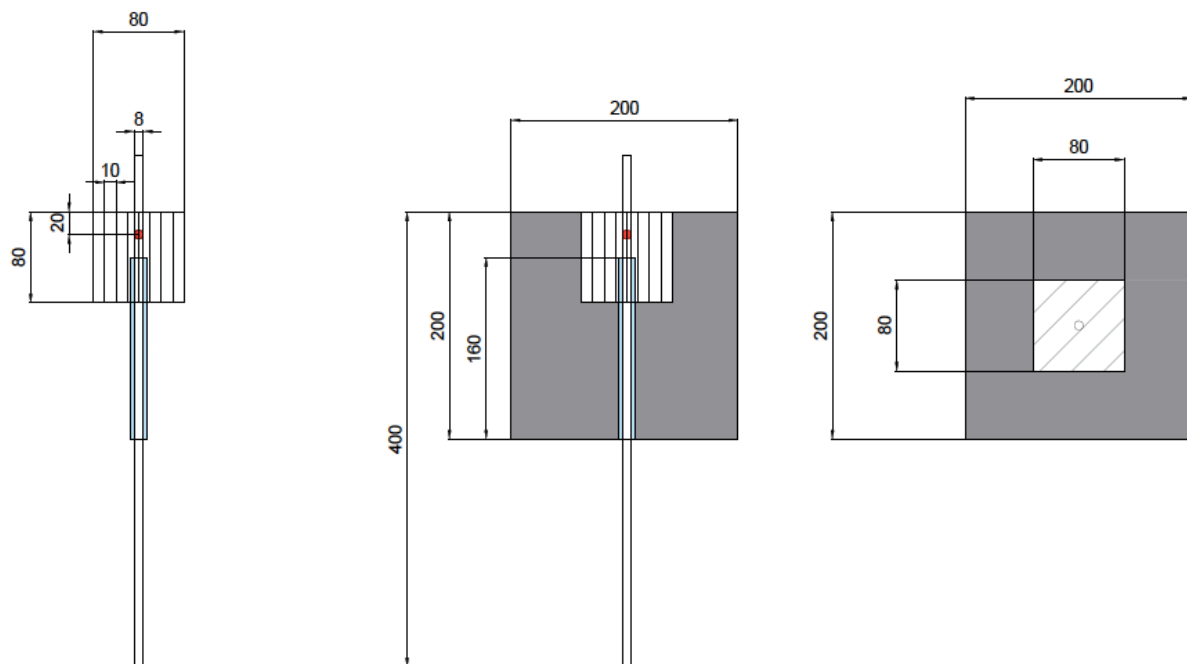


Bild 4.39: Pull-Out Versuchskörper mit einem Bewehrungsdurchmesser von 8 mm

Vorbereitung

Vor Druckbeginn wurden zunächst der Stahl und die Plastikrohre zugeschnitten. Die Plastikrohre wurden mithilfe von Acryl am Stabstahl befestigt, Bild 4.40 (2). Das Acryl verhinderte dabei, dass Beton in das Hüllrohr eindringen kann. Für die Druckrichtungen u und v wurden kleine Unterstütkonstruktionen aus Schalbrettern gefertigt, um die Bewehrung auf dem gewünschten Achsmaß von $5 \cdot d_s$ einlegen zu können, Bild 4.40 (3). Die Schalung für die w-Druckrichtung ist in Bild 4.40 (4) dargestellt. Da die Plastikrohre für diese Richtung zu dick waren, wurde dieses durch Folie und Klebeband ersetzt. Für die gegossenen Prüfkörper wurden die Schalungen angefertigt damit Würfel von 200 mm Kantenlänge gegossen werden können.

Der Bewehrungsstab wurde mittig im Würfel befestigt Bild 4.40 (5). Die horizontale Lage garantierte eine glatte Oberfläche für die Ausziehversuche und ermöglichte, dass der Stab präzise in der Mitte befestigt werden kann, Bild 4.40 (6).

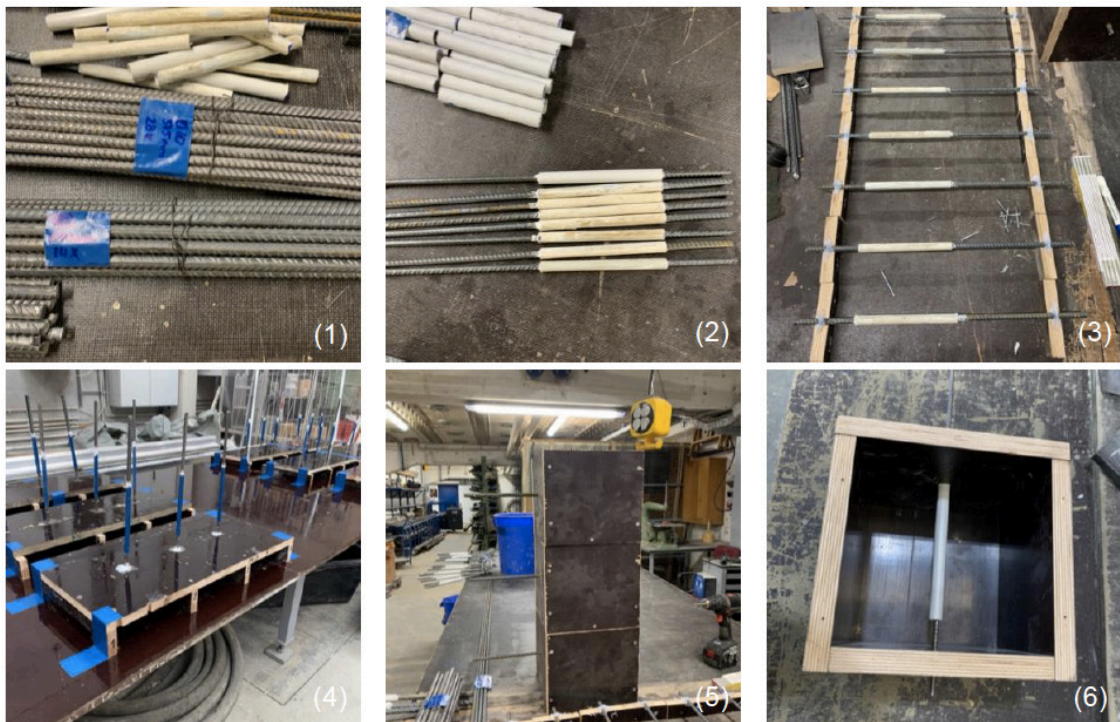


Bild 4.40: Herstellung der Pull-Out-Versuche

Schweißtechnik

Das Konzept des AMoRC-Verfahrens sieht vor, dass die Längs- und Querkraftbewehrungsstäbe mithilfe eines Roboters schrittweise zu einer Matte zusammengeschweißt werden. Die Fügung der Bewehrung wurde mit dem in Kapitel 3.3 entwickelten Lichtbogenpressschweißverfahren durchgeführt. Hierbei wurden beide Bewehrungsstabstücke in der Fügestelle angeschmolzen und anschließend unter geringem Anpressdruck zusammengefügt. Dieser Vorgang wurde mit der Schweißpistole GD 22 und der Stromquelle Pro I 2200 durchgeführt. Der Einbau der geschweißten Bewehrung erfolgte in dieser Versuchsserie manuell. Das Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik (ISF) der RWTH Aachen führte den Schweißvorgang durch.

Für das neuartige Verfahren wurden zunächst die Schweißparameter experimentell bestimmt. Der zutreffende Parameterbereich wurde durch Zug- und Biegeversuche an gefügten Bewehrungsstäben ausgewählt. Die gewählten Parameter sind folgende:

Tabelle 4.13: Lichtbogenpressschweißparameter

Parameter\Bolzen	8 mm	10 mm	12mm
Strom [A]	500	700	800
Schweißzeit [ms]	500	500	500
Überstand [mm]	5	5	5
Dämpfung	0	0	0
Abhub [mm]	4,5	4,5	4,5

Der Ablauf des Lichtbogenpressschweißverfahren ist wie folgt, siehe Bild 4.41:

- (1) *Vorbereitung:* Zu Beginn wurden die Bewehrungsstäbe vorbereitet. Die eine Hälfte wurde glattgeschliffen und das andere Stabende leicht angespitzt. Ein Bewehrungsstab wurde in die Pistolenseite eingesetzt und die Pistole ausgerichtet. Der zweite Stab wurde über dem Substratbolzen eingespannt.
- (2) *Schweißvorgang:* An den Werkstücken wurden Elektroden angebracht. Der Lichtbogen brennt zwischen Anode und Kathode. Die Art der verwendeten Zündung ist eine Hubzündung. Der elektrische Strom, der durch die Elektroden fließt, erzeugt extreme Hitze, wodurch beide Bolzenenden aufgeschmolzen werden. Durch die Bewegung der Pistole wurden die beiden Schmelzen zusammengepresst und es entstand eine stoffschlüssige Verbindung und eine stabile Schweißnaht. Während des Schweißvorgangs wurde Reinargon [DINENISO14175:2008-06] als Schutzgas verwendet. Dieses schützt vor Oxidation und Verunreinigungen, zusätzlich stabilisiert es den Lichtbogen.
- (3) *Qualitätskontrolle:* Die Schweißnaht wurde durch Zug-, Makroschliff- und weitere Härte- tests untersucht.

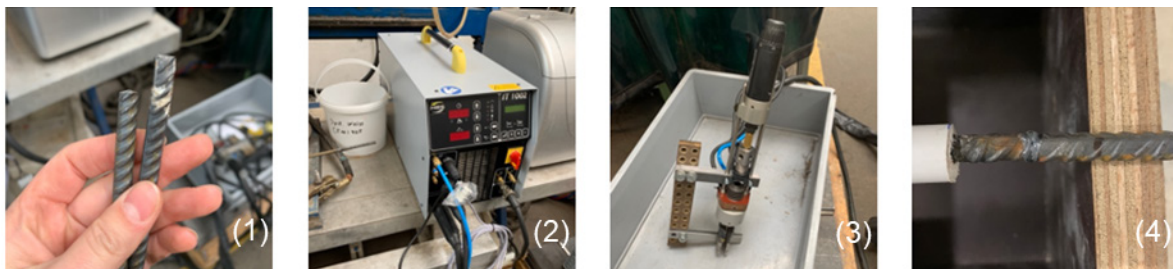


Bild 4.41: (1) Vorbereitete Bewehrungsstäbe; (2) Stromquelle Pro I 2200; (3) Schweißpistole GD 22; (4) Geschweißte Bewehrung

Insgesamt wurden hier 66 geschweißte Stahlstäbe hergestellt. Davon 30 mit einem Durchmesser von 8 mm, 18 Stück mit einem Durchmesser von 10 mm und 18 Stück mit einem Durchmesser von 12 mm. Die Längen der zwei Bolzenteile betragen vor dem Schmelzen je 100 mm und 375 mm.

Im Hinblick auf den AMoRC-Gesamtprozess stellt sich die Frage, inwiefern die Hitze der Schweißstelle den Verbund zwischen der Bewehrung und dem Beton beeinflusst und wie dieser Prozess gesteuert bzw. kontrolliert werden kann. Im Rahmen der abgeschlossenen Projektphase und der hierin durchgeführten Untersuchungen konnte diese Frage zunächst noch nicht beantwortet werden, da die Schweißnähte bei der Durchführung der Verbundversuche bereits abgekühlt waren.

Herstellung der Versuchskörper

Die Herstellung der Versuchskörper erfolgte durch extrusionsbasierten 3D-Druck mit der in Kapitel 3.2 entwickelten Gabeldüse. Hierbei wurde der Beton entweder um den stehenden Bewehrungsstab (w-Richtung) herumgedruckt, oder linienförmig bis zu der Höhe aufgetragen, auf der die Bewehrungselemente parallel (u-Richtung) oder lateral (v-Richtung) zur Extrusionsrichtung eingelegt wurden. Abschließend wurden die nachfolgenden Betonschichten ergänzt.

In den Versuchen mit vertikal stehender Bewehrung (w-Richtung) wurde die Betonfördermenge bei konstantem Düsenabstand von 28 mm variiert, was zu unterschiedlichen Einbindequalitäten des stehenden Bewehrungsstabes führte. Die unterschiedlichen Betonfördermengen wurden durch eine Variation der Drehzahl des Pumpenmotors realisiert. Die untersuchten Drehzahlen variierten zwischen den Stufen S7, S8 und S9. Tabelle 4.14 umfasst die Förderleistung der ® MAI Multimix-3D Pumpe aus dem Datenblatt des Herstellers, welches im Anhang zu finden ist.

Tabelle 4.14: Förderleistung der ® MAI MULTIMIX-3D Pumpe

Stufe	S10	S9	S8	S7	SS
Frequenz [Hz]	80	74	68	62	56
Förderleistung [l/min]	~7,5	~7	~6,5	~6	~5,4

Zudem spielte die Positionierung der Bewehrung für die Versuchskörper mit Bewehrung in u- und v-Richtung eine entscheidende Rolle. Gemäß [Gor18] erzielt die in Bild 4.42 (b) abgebildete Bewehrungslage die besten Verbundeigenschaften, da der Beton des unteren Filaments durch das Eindringen des Bewehrungsstabes verdichtet wird. Eine mittlere Verbundqualität wird in Position (a) erzielt, bei der sich die Bewehrung in der halben Schichthöhe befindet. Die Positionierung der Bewehrung auf der Schicht (ohne Eindringen der Bewehrung) weist hingegen die geringsten Verbundfestigkeiten auf [Geb22].

Bei der Herstellung der eigenen Versuchskörper wurde bei den Bewehrungsausrichtungen in u- und v-Achse ein Andrücken der Bewehrung bis zu einer Tiefe von ca. dem halben Stabdurchmesser vorgenommen, vgl. Bild 4.42(a).

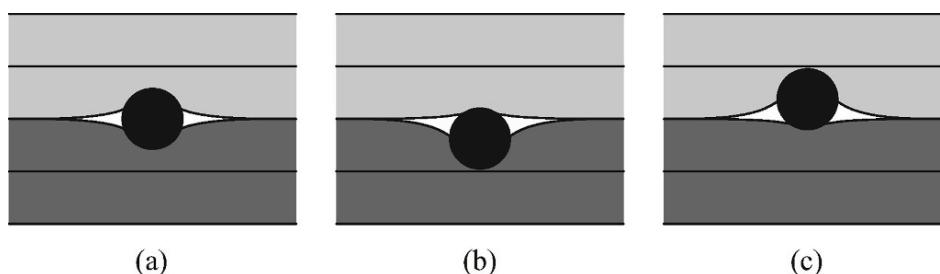


Bild 4.42: Schematische Darstellung der möglichen Lage des Bewehrungsstabes [Geb22]

Nach dem Druck des zunächst linienförmigen Betonkörpers wurde dieser in regelmäßigen Abständen so unterteilt, dass sich einzelne Versuchskörper ergaben. Bild 4.43 zeigt die Versuchskörper, die trotz Nachbehandlung durch Abdeckung mit PVC-Folie teils oberflächliche Schwindrisse aufwiesen. Hierzu wurden die 3D-gedruckten Betonkörper mit eingebettetem Bewehrungsstab nachträglich in eine Würfelschalung eingesetzt und mit Vergussmörtel der Fa. BETEC mit einer Festigkeitsklasse von C60/75 vergossen (siehe Bild 4.44).

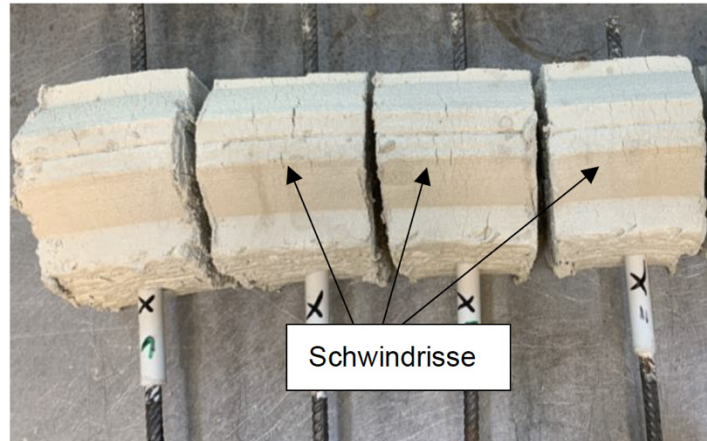


Bild 4.43: 3D-gedruckte, in Längsrichtung zerlegte Versuchskörper

Auf diese Weise wurden insgesamt 90 Prüfkörper mit unterschiedlichen Bewehrungsdurchmessern (siehe Bild 4.45) hergestellt. Zudem wurden 18 gegossene Referenzversuchskörper produziert.



Bild 4.44: Vergussvorgang der 3D-gedruckten Prüfkörper

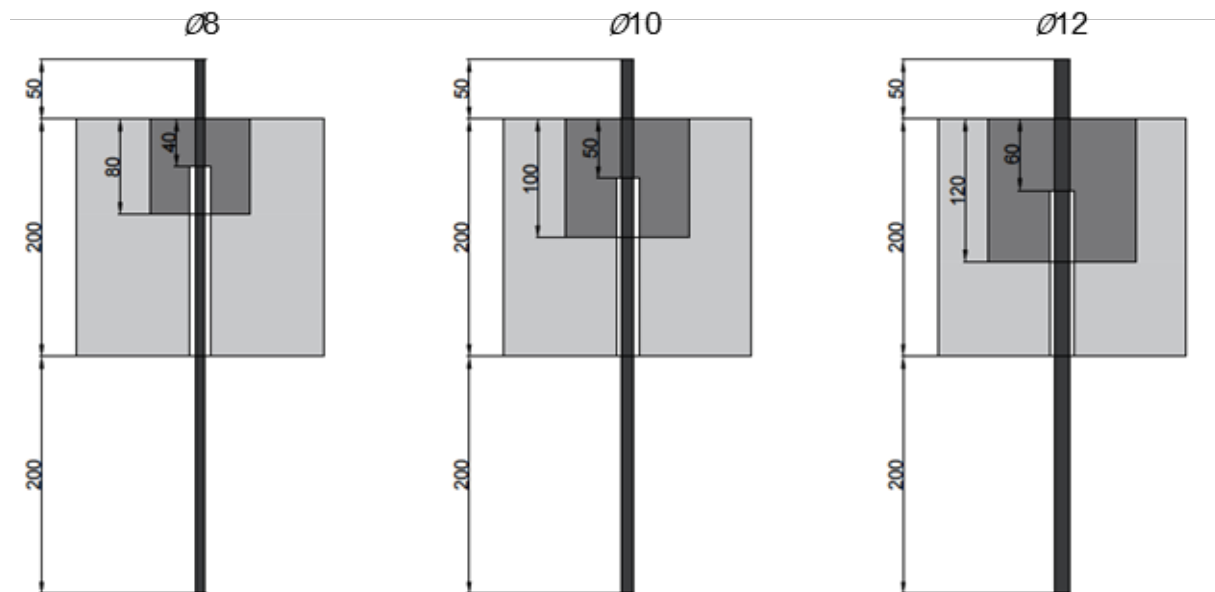


Bild 4.45: Schematische Skizze der Prüfkörper

4.3.6 Versuchsaufbau

In Bild 4.46 ist der Versuchsaufbau für die Ausziehversuche dargestellt. Durch ein mittig in der Lagerfläche angeordnetes Loch wurde der aus dem Prüfkörper herausstehenden Bewehrungsstab geführt und mittels Spannbacken an der Maschine kraftschlüssig befestigt. Eine Gummimatte zwischen dem Prüfkörper und der Ablagefläche der Schaukel sorgte für eine gleichmäßige Krafteinleitung. Der Versuch wurde mit einer Geschwindigkeit von 1 mm/min durchgeführt. Während des Versuchs wurde der Maschinenweg, die Zeit, die aufgebrachte Zugkraft sowie der Schlupf des Bewehrungsstabes aufgenommen. Dazu wurde ein Wegaufnehmer am kürzeren Bewehrungsstabende des Prüfkörpers befestigt.

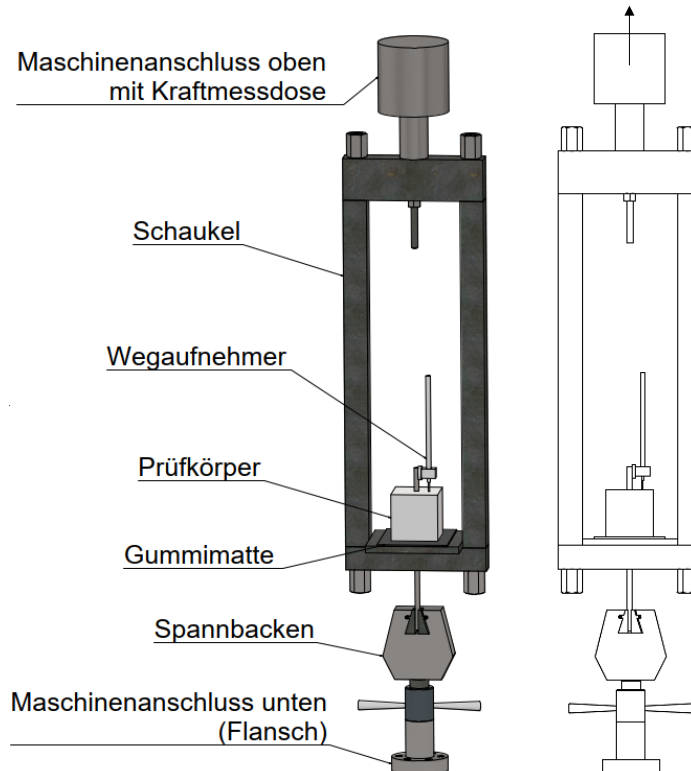


Bild 4.46: Schematische Darstellung des Pull-Out Versuchsaufbaus

4.3.7 Versuchsergebnisse

Überblick

Im nachfolgenden Kapitel erfolgten die Analyse und Auswertung der zuvor beschriebenen Untersuchungen. Zur Analyse wird die für kurze Verbundlängen zutreffende Annahme annähernd konstanter Verbundspannungen innerhalb der Verbundlänge getroffen. Auf dieser Grundlage wird die Verbundspannung anhand von Gleichung (4-5) bestimmt.

Zur Berücksichtigung unterschiedlicher Betonfestigkeiten wurde das Verhältnis zwischen der experimentell gemessenen Betonfestigkeit und der Festigkeitsklasse des Herstellers berücksichtigt. Die gemessenen Zylinderdruckfestigkeiten betragen am ersten Drucktermin 38,43 kN, am zweiten Drucktermin 38,37 kN, am dritten Drucktermin 35,76 kN und am vierten Drucktermin 36,32 kN. Das Verhältnis von f_{cm}/f_c , dient dazu, die Unterschiede in der gemessenen Betonfestigkeit zu berücksichtigen.

Nach RILEM [RIL94] können zur Bestimmung der Betonfestigkeit entweder die Würfelfestigkeit oder die Zylinderfestigkeit herangezogen werden. In diesem Vorhaben wird die Zylinderdruckfestigkeit verwendet. Die Ergebnisse werden so auf die im Datenblatt angegebene Zylinderdruckfestigkeit von 35 N/mm² normiert.

In den nachfolgenden Tabellen (Tabelle 4.15 & Tabelle 4.16) sind die Versagensarten, die maximalen Verbundkräfte (F_{max}), die maximalen Verbundspannungen ($\tau_{b,max}$), die Betonfestigkeit (f_c), der Schlupf bei der maximalen Verbundspannung ($s_{\tau_{max}}$), und die Verbundspannung bei einem Schlupf von 0,1 mm ($\tau_{b, s=0.1}$) für jede Versuchsreihe aufgeführt. Diese Werte dienen als Grundlage für die anschließenden Analysen. Die in der Tabelle enthaltenen Daten stellen jeweils die Mittelwerte für jede Versuchsreihe dar, die einzelnen Versuchswerte sind im Anhang verfügbar.

Tabelle 4.15: Übersicht der Versuchsergebnisse der Ausziehversuche – Teil I

Name	Versagensfall	F_{max} [kN]	f_c [N/mm ²]	$\tau_{b,max}$ [N/mm ²]	$s_{\tau_{max}}$ [mm]	$\tau_{b, s=0.1mm}$ [N/mm ²]
G_W_K_ø8	Scherbruchversagen	15,57	38,43	14,11	0,49	6,68
D_W_u_K_ø8_2Fil	Scherbruchversagen	24,51	38,43	22,34	0,51	17,44
D_W_u_K_ø8_1Fil	Scherbruchversagen	17,59	38,43	16,03	0,87	8,45
D_W_v_K_ø8_1.0	Scherbruchversagen	17,73	35,76	17,22	0,65	10,09
D_W_v_K_ø8_2.0	Scherbruchversagen	17,49	38,43	15,94	0,79	8,19
D_W_w_K_ø8_S9	Scherbruchversagen	3,44	36,33	3,34	0,24	2,36
G_W_G_ø8	Scherbruchversagen	18,83	38,43	17,08	1,55	7,38
D_W_u_G_ø8	Scherbruchversagen	22,62	38,43	20,69	0,49	16,53
D_W_v_G_ø8	Scherbruchversagen	19,31	35,76	18,78	1,26	8,87
D_W_w_G_ø8_S9	Scherbruchversagen	2,58	36,33	2,51	1,04	1,48
D_W_w_G_ø8_S8	Scherbruchversagen	2,40	36,33	1,16	1,67	0,93
D_W_w_G_ø8_S7	Scherbruchversagen	2,30	36,33	2,23	2,54	0,46
D_W_w_G_ø8_A13/13	Scherbruchversagen	3,71	38,37	3,37	0,86	1,76
D_W_w_G_ø8_A9/17	Scherbruchversagen	3,22	38,37	2,92	0,60	0,45
D_W_w_G_ø8_A10/10	Scherbruchversagen	8,76	35,76	8,53	0,79	5,33
D_W_W_G_ø8_A6/14	Scherbruchversagen	5,22	35,76	5,05	0,22	4,36
G_W_K_ø10	Scherbruchversagen	19,85	35,76	12,44	0,81	5,49
D_W_u_K_ø10	Scherbruchversagen	17,09	35,76	10,65	0,78	3,83
D_W_v_K_ø10	Scherbruchversagen	22,63	35,76	14,10	0,88	6,97
D_W_w_K_ø10_S9	Scherbruchversagen	8,41	36,33	5,23	0,64	2,78
G_W_G_ø10	Spaltrissversagen 2x Spaltriss/1x Scherbruch	25,86	35,76	16,12	1,33	4,35
D_W_u_G_ø10	Scherbruchversagen	20,26	35,76	17,73	1,97	6,22

Tabelle 4.16: Übersicht der Versuchsergebnisse der Ausziehversuche – Teil II

Name	Versagensfall	F_{max} [kN]	f_c [N/mm ²]	$\tau_{b,max}$ [N/mm ²]	$S_{\tau max}$ [mm]	$\tau_{b, s=0.1mm}$ [N/mm ²]
D_W_v_G_ø10	Scherbruchversagen 1x Spaltriss/2x Scherbruch	28,43	35,76	17,72	2,14	6,97
D_W_w_G_ø10_S9	Scherbruchversagen	12,67	36,33	7,88	1,33	4,62
D_W_w_G_ø10_S8	Scherbruchversagen	13,20	36,33	8,21	0,87	5,57
D_W_w_G_ø10_S7	Scherbruchversagen	7,38	36,33	4,59	1,05	2,20
G_W_K_ø12	Spaltrissversagen 2x Spaltriss/1x Scherbruch	44,32	35,76	19,18	0,82	8,96
D_W_u_K_ø12	Scherbruchversagen 1x Spaltriss/2x Scherbruch	30,55	35,76	13,76	0,81	7,54
D_W_v_K_ø12	Scherbruchversagen	30,04	35,76	13,00	0,57	8,85
D_W_w_K_ø12_S9	Scherbruchversagen	8,27	36,33	3,57	1,09	1,60
G_W_G_ø12	Spaltrissversagen	46,49	35,76	20,12	0,77	9,20
D_W_u_G_ø12	Spaltrissversagen 2x Spaltriss/1x Scherbruch	33,03	35,76	14,29	1,30	12,95
D_W_v_G_ø12	Scherbruchversagen	30,47	35,76	13,19	0,57	7,76
D_W_w_G_ø12_S9	Scherbruchversagen	17,12	36,33	7,39	0,46	4,87
D_W_w_G_ø12_S8	Scherbruchversagen	24,08	36,33	10,40	0,40	7,88
D_W_w_G_ø12_S7	Scherbruchversagen	19,49	36,33	8,41	0,63	5,41

Visuelle Untersuchung

Trotz Einhaltung der Betondeckungsanforderungen traten bei einigen Versuchen Spaltrisse nach dem Bruch auf (siehe Bild 4.47). Da es sich lediglich um Risse mit kleiner Breite handelte und nur in wenigen Fällen ein versagensrelevantes Spaltbruchversagen auftrat, konnten die Versuche teils in der Auswertung berücksichtigt werden.



Bild 4.47: Darstellung der Risse anhand der Prüfkörper D_W_w_G_ø10_S9_3 (1), D_W_w_G_ø12_S7_3 (2) und D_W_w_G_ø12_S9_1 (3)

Für jede Prüfkörperreihe wurde zudem ein geprüfter Versuchskörper rechtwinklig zum Bewehrungsstab halbiert, um im Sägeschnitt den Beton visuell zu untersuchen und die Bewehrungseinbettung zu überprüfen. Hierzu wurden die Prüfkörper jeweils in der Mitte der Verbundzone gesägt. Bei einigen Versuchskörpern wurden Luftporen oder Hohlräume aufgrund einer unzureichenden Verdichtung der nebeneinander abgelegten Betonfilamente festgestellt, was mutmaßlich den Verbund zwischen Beton und Stabstahl in einigen Versuchen beeinflusste. Die gesägten Prüfkörper mit einem Bewehrungsdurchmesser von 10 mm sind in Bild 4.48 dargestellt, die Körper mit einem Bewehrungsdurchmesser von 8 mm und von 12 mm sind im Anhang abgebildet.

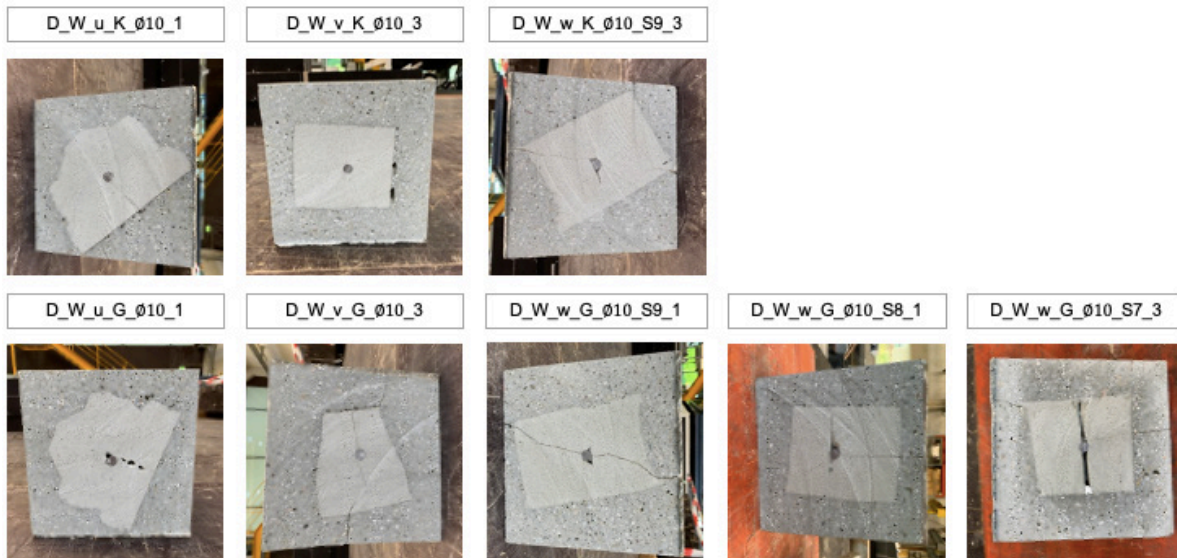


Bild 4.48: Dargestellte Verbundzone der Druckkörper mit einem Bewehrungsdurchmesser von 10 mm

Zudem wurde anhand der Sägeschnitte festgestellt, dass sich die nach dem Erreichen der Verbundfestigkeiten (im Nachbruchbereich der Verbundspannung-Schlupf-Beziehung) detektierten Spaltrisse teilweise aus bereits kurz nach dem 3D-Druckprozess dokumentierten Schwindrissen entwickelten.

Verbundspannung-Schlupf-Beziehung

Während der Versuche wurde sowohl die aufgebrachte Prüfkraft, der Maschinenweg sowie der Schlupf zwischen Bewehrungsstab und Beton kontinuierlich gemessen. Aufbauend auf diesen Messungen wurden für alle durchgeführten Versuche die Verbundspannung-Maschinenweg-Beziehungen und die Verbundspannung-Schlupf-Beziehungen ausgewertet (siehe Anhang). Bild 4.49 zeigt exemplarisch den Verlauf der Verbundspannung-Maschinenweg-Beziehung und Verbundspannung-Schlupf-Beziehung des Prüfkörpers D_W_v_K_ø8 einschließlich einer interpolierten Mittelwertlinie der drei identischen Ausziehversuche.

Die Verbundspannung-Schlupf-Beziehung liefert wesentliche Informationen zur phänomenologischen Bewertung der Verbundkraftübertragung zwischen Bewehrung und Beton [Zil10]. Grundsätzlich zeigte sich in allen Versuchen ein ähnliches Verhalten. Zunächst wurde stets ein steil ansteigender Kurvenast mit hoher Steifigkeit beobachtet. Es kann angenommen werden, dass hier die Verbundspannungsübertragung überwiegend durch Haftverbund erfolgt. Mit Auftreten von Relativverschiebungen (Schlupf) werden dann sowohl der Scherverbund, die mechanische Verzahnung der Stahlrippen des Bewehrungsstahls mit dem Beton, sowie der

von der Oberflächenrauheit der Bewehrung abhängige Reibungsverbund zwischen Beton und Stahl aktiviert. Bis zum Erreichen der Verbundfestigkeit (maximale Spannung im Verbundspannung-Schlupf-Diagramm) zeigte sich in allen Versuchen lediglich ein geringer Schlupf. Danach fiel die Verbundspannung mit zunehmendem Schlupf ab, sodass der Scherverbund bereits überschritten war und lediglich der Reibverbund wirkte. Dieses Verbundverhalten ähnelt dem Ausziehverhalten von konventionell gegossenem Stahlbeton [Geb22] [FIB00].

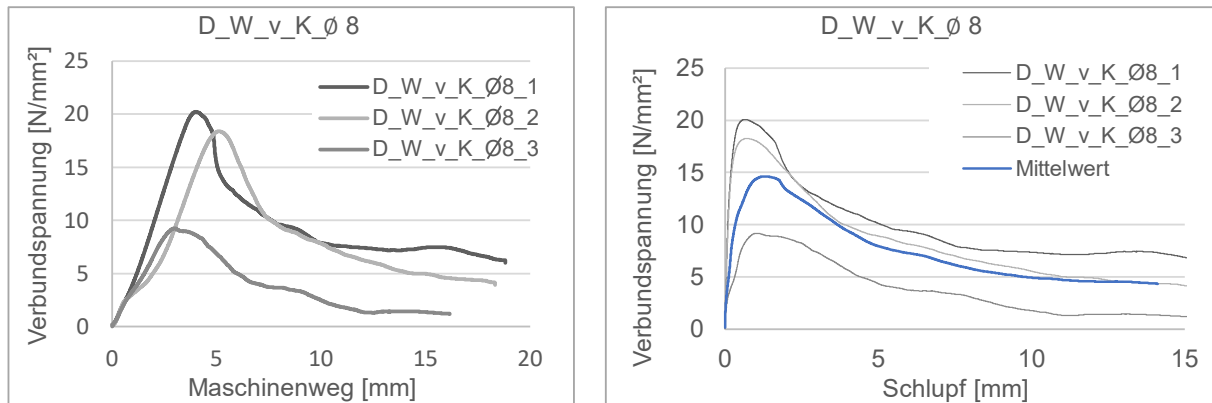


Bild 4.49: Verbundspannungs-Beziehungen

Verbundsteifigkeit und Verbundfestigkeit

Die Steigung der Verbundspannung-Schlupf-Beziehung entspricht der sog. Verbundsteifigkeit zwischen Bewehrungsstahl und Beton. Zur Ermittlung dieses Werts wird standardmäßig die Verbundspannung bei einem Schlupf von 0,1 mm betrachtet, bis zu dem ein annähernd elastisches Kraft-Schlupfverhalten angenommen wird [Vos82]. Ein steiler Anstieg im Verbundspannung-Schlupf-Diagramm weist auf eine hohe Verbundsteifigkeit hin. Diese Steifigkeit wird von verschiedenen Einflussgrößen beeinflusst, darunter die Oberflächenbeschaffenheit des Bewehrungsstahls, die Dicke der Betondeckung und die Eigenschaften der Betonmatrix [Fis12] sowie weitere vom 3D-Druckprozess abhängige Kenngrößen (z.B. Bewehrungsrichtung, Betonfördermenge).

Die höchste Steifigkeit wurde in den Versuchskörpern der Konfiguration D_W_u_K_Ø8_2Fil mit einer Verbundspannung von 17,44 N/mm² bei Erreichen der 0,1 mm Schlupfgrenze festgestellt, siehe Bild 4.50. Diese Versuchsreihe zeigt auch den höchsten gemessenen Durchschnittswert der Verbundfestigkeit mit 22,34 N/mm² auf. Die Auswertung der Versuchsreihen D_W_w_G_Ø8_S9, D_W_w_G_Ø8_S8 und D_W_w_G_Ø8_A9/17 zeigt eindeutig, dass diese Konfigurationen einen vergleichsweise flacheren Anstieg in der Verbundspannung-Schlupf-Kurve aufwiesen. Die Verbundspannung beim Schlupf von 0,1 mm lag lediglich im Bereich zwischen 0,45 bis 0,93 N/mm². Zusätzlich wiesen diese drei Konfigurationen auch die niedrigsten Verbundfestigkeiten zwischen 1,14 N/mm² und 2,92 N/mm² auf.

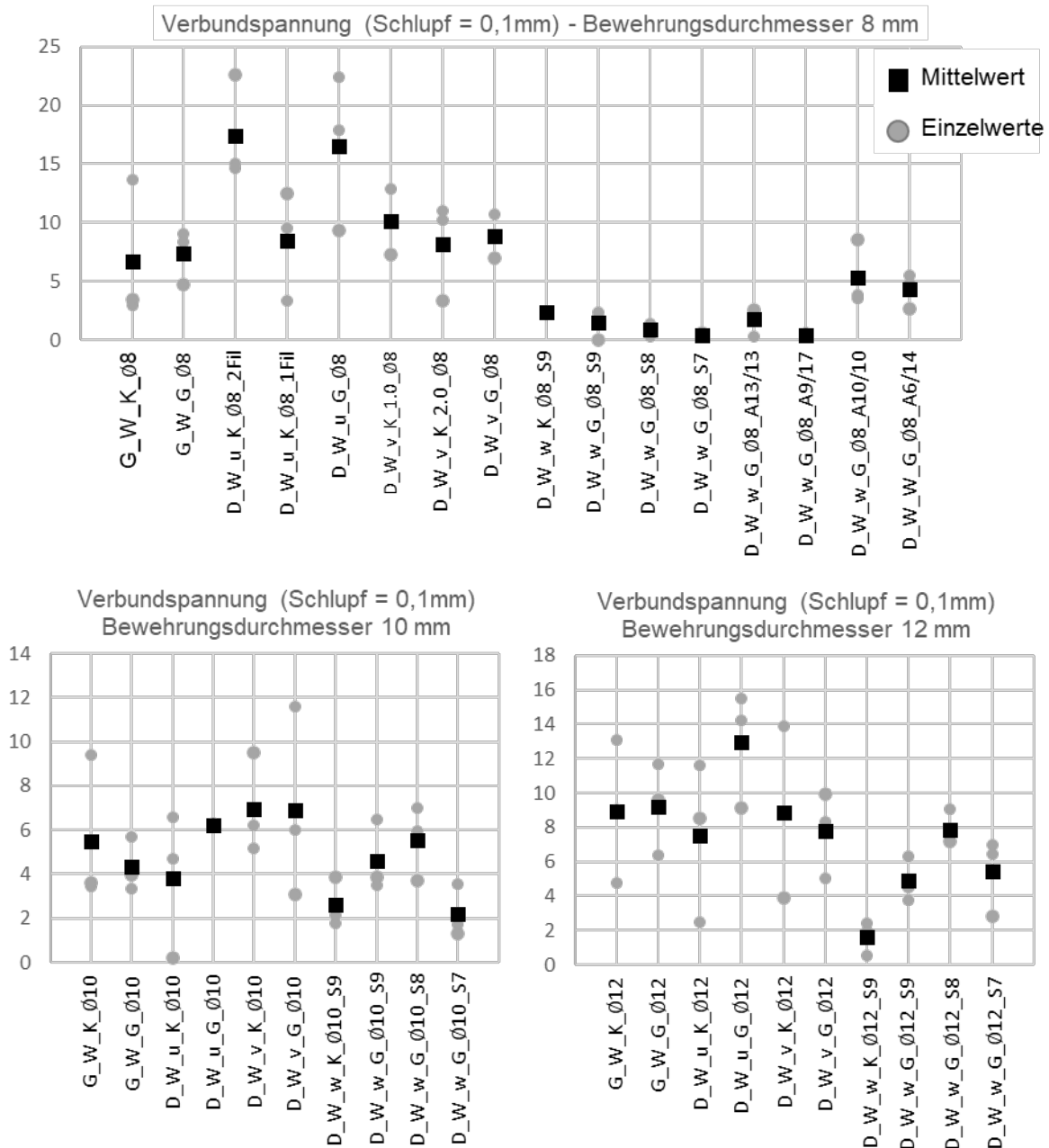


Bild 4.50: Darstellung der Verbundspannung bei einem Schlupf von 0,1 mm

Um eine Analyse des Verbundverhaltens vornehmen zu können und Vergleiche zwischen verschiedenen Versuchen anzustellen, werden die untersuchten Körper in verschiedene Gruppen unterteilt. Diese Gruppierung erfolgte zunächst nach der Ausrichtung der Bewehrungslage, dann nach dem unterschiedlichen Bewehrungsdurchmesser und schließlich nach der Fördermenge. Es ist jedoch anzumerken, dass die Vergleiche der Fördermengen ausschließlich für die Prüfkörper mit Bewehrung in der w-Richtung durchgeführt werden. Diese Gruppierung ermöglicht eine gezieltere und aussagekräftigere Untersuchung der Verbundfestigkeit und erleichtert den Vergleich der Ergebnisse zwischen den verschiedenen Versuchsreihen.

Einfluss von Bewehrungsstabdurchmesser und Düsenabstand

In diesem Unterkapitel werden die Einflüsse des Bewehrungsdurchmessers und des Düsenabstandes analysiert. Hierzu erfolgt eine Unterteilung der Versuche in die in Bild 4.51 dargestellten Gruppen gegossen u-Richtung (Bewehrungsstab parallel zur Druckrichtung), v-Richtung (Bewehrung quer/lateral zur Druckrichtung) und w-Richtung (Bewehrung vertikal zur Druckrichtung).

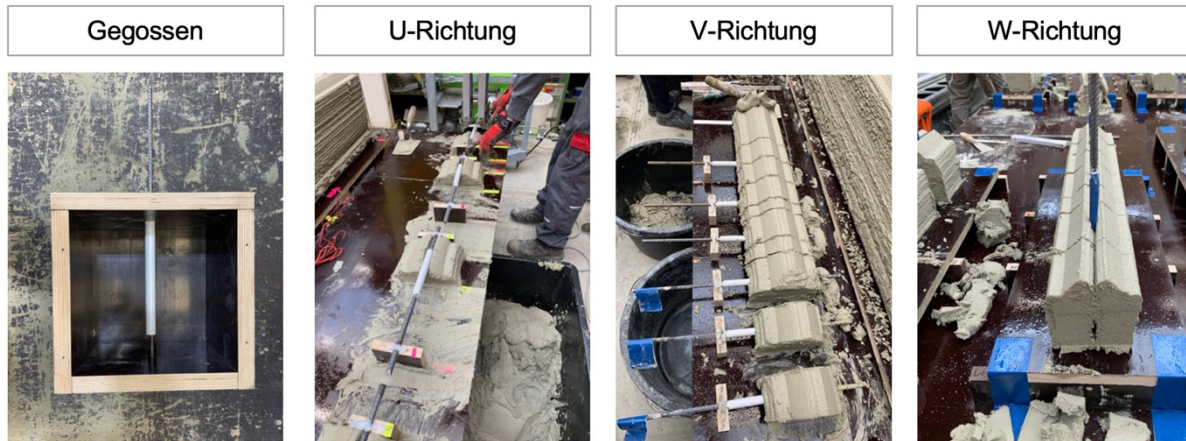


Bild 4.51: Darstellung der unterschiedlichen Bewehrungsrichtungen

(1) Gegossen

Die Ergebnisse der gegossenen Versuchskörper zeigen, dass die maximalen Verbundfestigkeiten bei Verwendung von geschweißter Bewehrung höher ausfallen als für kontinuierlichen Betonstahl (Bild 4.52).

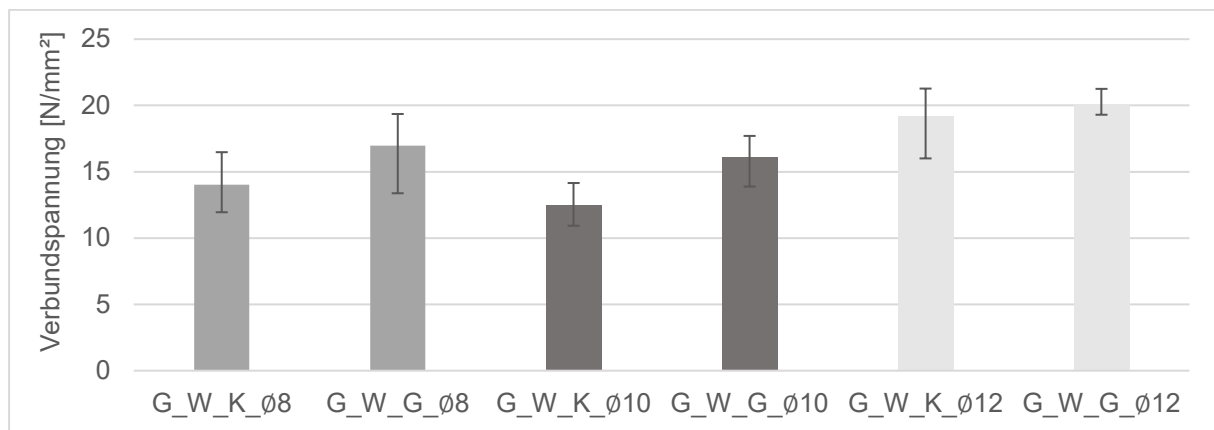


Bild 4.52: Verbundspannungen der gegossenen Prüfkörper

Als Grund hierfür wird eine zusätzliche Scherkraftübertragung von der Bewehrung auf den Beton über den entstandenen Schweißwulst an der Fugestelle angenommen. Der Mittelwert aller gegossenen Körper beträgt $16,47 \text{ N/mm}^2$.

Die Prüfkörper mit einem Durchmesser von 10 mm wiesen die geringste Verbundfestigkeit auf, gefolgt von den Körpern mit einem Durchmesser von 8 mm. Die höchsten Verbundfestigkeiten erzielten die Probekörper mit einem Durchmesser von 12 mm. Dies kann auf den Rippenabstand f_r zurückzuführen sein. Gemäß DAfStb Heft 138 besitzt eine höhere bezogene Rippenfläche, die durch einen kleineren Rippenabstand erreicht wird, eine höhere Verbundfestigkeit

und Verbundsteifigkeit. So ist bei einem bezogenem Rippenabstand $f_r > 0,15$ eine höhere Verbundfestigkeit zu erwarten als bei einem Rippenabstand von $f_r < 0,1$. Der bezogene Rippenabstand bei dem Stabdurchmesser von 10 mm war kleiner als 0,1, was die beobachtete geringere Verbundfestigkeit in diesen Proben erklären könnte. Im Gegensatz dazu ist der bezogene Rippenabstand bei den Durchmessern von 8 mm und 12 mm größer ($\text{Ø}8$ mm: $f_r = 0,189$, $\text{Ø}12$ mm: $f_r = 0,209$).

Damit lässt sich feststellen, dass die vorliegenden Ergebnisse die Bedeutung des Rippenabstands und der Rippendicke bei der Bewertung der Verbundfestigkeit zwischen Stahl und Beton bestätigen. Aus der Literatur ist zudem bekannt, dass der Wert der bezogenen Rippenfläche zudem das Schlupfverhalten beeinflusst, wobei eine niedrigere bezogene Rippenfläche zu größerem Schlupf führt. Auch dies wird anhand der eigenen experimentellen Untersuchungen bestätigt. Der größte Schlupf entsteht bei den Körpern mit einem Durchmesser von 10 mm, darauf folgen die Probekörper mit dem Durchmesser von 8 mm und der geringste Schlupf entsteht bei dem Durchmesser von 12 mm.

(2) U-Richtung

Auch in den 3D-gedruckten Probekörpern, bei denen der Bewehrungsstahl in Druckrichtung angeordnet wurde, übertrugen die Körper mit geschweißter Bewehrung höhere Verbundkräfte. Der Mittelwert der erzielten Verbundfestigkeiten in u-Richtung beträgt $16,48 \text{ kN/mm}^2$.

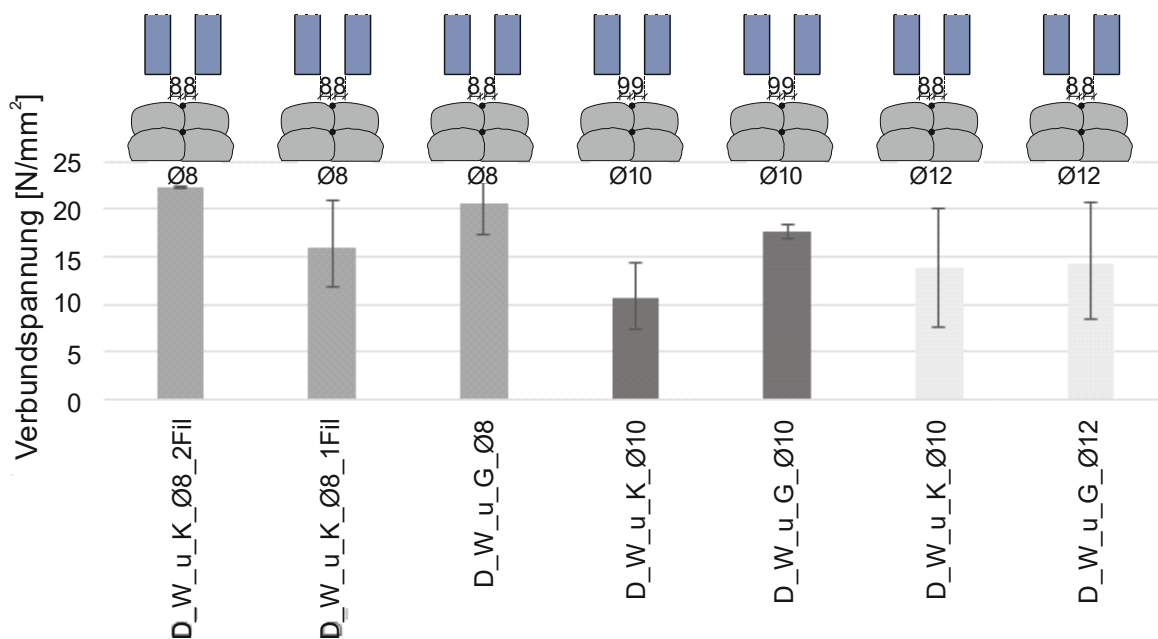


Bild 4.53: Verbundspannungen der gedruckten Prüfkörper mit Bewehrung in u-Richtung

Die Versuchskörper mit einem Bewehrungsdurchmesser von 8 mm erreichten die höchsten Verbundspannungen, gefolgt von denen mit einem Durchmesser von 10 mm und 12 mm. Im Vergleich zu den gegossenen Referenzversuchen zeigte sich somit ein grundlegend anderes Verhalten. Daher ist davon auszugehen, dass neben dem Bewehrungsdurchmesser auch der Abstand der Düsen zueinander sowie der Bewehrungsstab-Düsenabstand die Verbundfestigkeit in u-Richtung maßgeblich beeinflusste. Dieses Ergebnis überrascht, da im Vorfeld davon ausgegangen wurde, dass der Düsenabstand in u-Richtung eine untergeordnete Rolle spielt, solange die Lücke zwischen den Zwillingsdüsen durch den gedruckten Beton nur ausreichend gefüllt ist.

Zur Bewertung des Einflusses des Abstandes der beiden Zwillingsdüsen auf die Verbundeigenschaften kann ein direkter Vergleich zwischen den Versuchskörpern mit $\varnothing 8$ und $\varnothing 12$ durchgeführt werden, bei denen der Abstand der Düsen 24 mm bzw. 28 mm betrug, der Abstand zwischen Düse und Stab aber mit 8 mm konstant gehalten wurde ($8+8+8=24$ mm und $8+12+8=28$ mm). Die Versuche mit kleinerem Düsenabstand (24 mm) nahmen hierbei durchweg höhere Verbundspannungen auf. Für die Verbundsteifigkeiten ergaben sich analoge Ergebnisse. Die Probekörper mit einem kleinerem Düsenabstand (24 mm und Stabdurchmesser von 8 mm) wiesen mit einer Verbundspannung von $\tau_{b,s=0,1mm} = 14,14 \text{ kN/mm}^2$ bei Erreichen des 0,1 mm Schlupfkriteriums die höchste Steifigkeit auf. Mit größerem Düsenabstand (28 mm und Bewehrungsdurchmesser von 12 mm) fiel die Steifigkeit im Mittel auf $\tau_{b,s=0,1mm} = 10,25 \text{ kN/mm}^2$.

Der Vergleich der Versuche mit Durchmessern von 10 mm und 12 mm und identischem Düsenabstand (28 mm) zeigt Verbundfestigkeitskennwerte, die in einer vergleichbaren Größenordnung liegen. Allerdings war die Verbundsteifigkeit in den Versuchen mit 10 mm Durchmesser ($\tau_{b,s=0,1mm} = 5,03 \text{ kN/mm}^2$) nur ca. halb so groß, wie für die 12 mm Stäbe ($\tau_{b,s=0,1mm} = 10,25 \text{ kN/mm}^2$). Dies kann zum einen auf die kleinere bezogene Rippenfläche, zum anderen auf den leicht vergrößerten Düsen- Stababstand von 9 mm (gegenüber 8 mm) zurückgeführt werden.

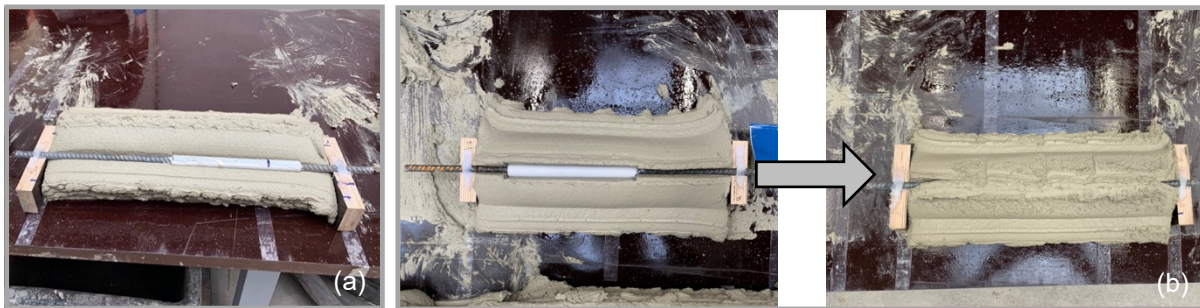


Bild 4.54: (a) Bewehrungslage in der Mitte eines Filaments (1Fil); (b) Bewehrungslage in der Mitte der Schicht (2Fil)

Weiterhin haben die Versuche gezeigt, dass in u-Richtung bewehrte Versuchskörper, bei denen der Bewehrungsstab in der Mitte zwischen zwei (horizontal) benachbarten Filamenten eingelegt und anschließend von weiteren zwei benachbarten Filamenten überdeckt wurde (2Fil), höhere Verbundfestigkeiten erzielten als Versuchskörper, bei denen der Bewehrungsstab mittig in ein Filament (1Fil) eingelegt und dann überdeckt wurde.

(3) V-Richtung

In den Versuchsreihen mit quer (lateral) zur Druckrichtung angeordneten Bewehrungsstäben wurden im Mittel ähnlich hohe Verbundfestigkeiten beobachtet wie in den Versuchsreihen mit Bewehrung in u-Richtung (mittlere Verbundspannung $15,44 \text{ kN/mm}^2$). Zudem führte auch hier die Verwendung von geschweißter Bewehrung zu einer höheren Verbundfestigkeit.

Der Einfluss des Düsenabstands kann durch Vergleich der Reihe D_W_v_K_Ø8_1.0 mit Düsenabstand 24 mm mit einem baugleichen Versuch und 28 mm Düsenabstand (D_W_v_K_Ø8_2.0) beurteilt werden. Die Gegenüberstellung der Verbundfestigkeiten zeigt, dass die Größe des Düsenabstands einen geringen Einfluss auf die Ergebnisse in v-Richtung ausübt. Auch der Düsen-Bewehrungsstababstand hat bei Versuchen in v-Richtung keinen nennenswerten Einfluss. Dies belegen die Versuche mit einheitlichem Düsenabstand von 28 mm, bei denen unterschiedliche Düsen-Stababstände (bei den $\varnothing 8$ -Versuchen 10 mm, bei

den Ø10 -Versuchen Ø9 mm und bei den Ø12-Versuchen 8 mm) keine wesentlichen Unterschiede in den erzielten Verbundfestigkeiten hervorbrachten.

Die höchste Steifigkeit wiesen die Versuche mit einem Durchmesser von 8 mm auf, gefolgt von den Versuchen mit einem Durchmesser von 10 mm und den Versuchen mit einem Durchmesser von 12 mm.

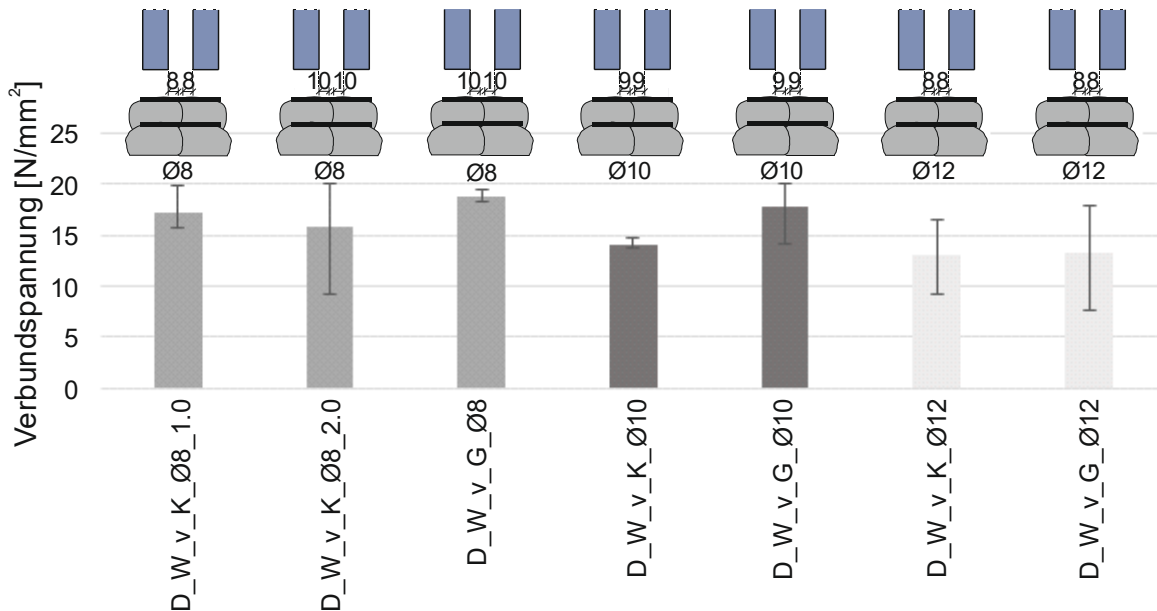


Bild 4.55: Verbundspannungen der gedruckten Prüfkörper mit Bewehrung in v-Richtung

(4) W-Richtung

Die Versuche in w-Richtung zeigten mit lediglich 5,24 kN/mm² im Mittel signifikant niedrigere Verbundfestigkeiten im Vergleich zu den anderen untersuchten Richtungen. Dies ist auf eine mitunter unvollständige Einbettung der vertikalen Bewehrungsstäbe zurückzuführen, die je nach Düsenabstand und Betonfördermenge aus Fehlstellen in der Nähe der Bewehrung resultierte.

Zunächst wurde der Einfluss unterschiedlicher Betonfördermengen bei konstantem Düsenabstand von 28 mm und beiderseits symmetrischem Düsen-Stababstand bei den verschiedenen Stabdurchmessern untersucht. Hierbei wurde zwischen den Pumpenförderstufen S7, S8, S9, S10 (vgl. Tabelle 4.14) variiert.

Wenn nur die Durchmesser 10 mm und 12 mm verglichen werden, wird deutlich, dass im Bereich einer Fördermenge von S8 die besten Verbundfestigkeiten erzielt werden konnten (Bild 4.56). Bei Versuchen mit einer Fördermenge der Stufe S9 wurde mutmaßlich zu viel Beton abgelegt, während bei einer Fördermenge der Stufe S7 zu wenig Beton vorhanden war, um eine gute Einbettung sicherzustellen. Die Versuche mit einem Bewehrungsdurchmesser von 8 mm zeigten keinen signifikanten Einfluss der Fördermenge auf die Verbundfestigkeit. Insgesamt erscheint der konstante Düsenabstand von 28 mm zu groß gewählt, um bei Ø8 eine ausreichende Einbettungsqualität zu erzielen.

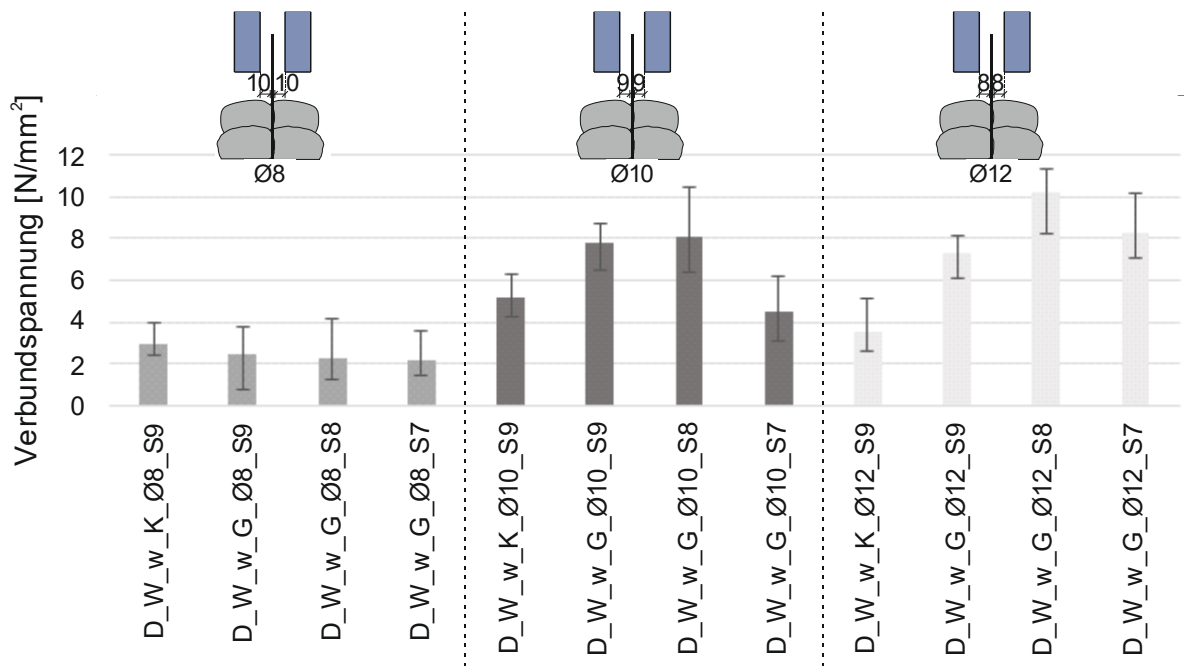


Bild 4.56: Verbundspannungen der gedruckten Prüfkörper in w-Richtung mit gleichem Düsenabstand von 28 mm für Bewehrung Ø8, Ø10 und Ø12

Neben symmetrischen Düsen-Stababständen wurden an den Ø8-Versuchen auch asymmetrische Anordnungen untersucht. In den meisten untersuchten Konstellationen in w-Richtung erfolgte der Druck der Probekörper mit einem Düsenabstand von 28 mm. Zudem wurden die Kombinationen D_W_w_G_Ø8_A13/13 und D_W_w_G_Ø8_A9/17 untersucht, die einen vergrößerten Düsenabstand von 34 mm aufwiesen.

Die höchsten Verbundspannungen wurden bei den Probekörpern mit einem symmetrischen Abstand zwischen Düse und Stab von 10 mm erzielt ($D_W_w_G_Ø8_A10/10 > D_W_w_G_Ø8_A6/14 > D_W_w_G_Ø8_A13/13 > D_W_w_G_Ø8_A9/17$). Darüber hinaus zeigte der Düsenabstand einen signifikanten Einfluss auf die Verbundspannung in w-Richtung. Die Verbundfestigkeit bei einem Düsenabstand von 34 mm betrug 3,37 N/mm² und damit lediglich 40% der Verbundfestigkeit (8,53 N/mm²) bei einem Düsenabstand von 28 mm.

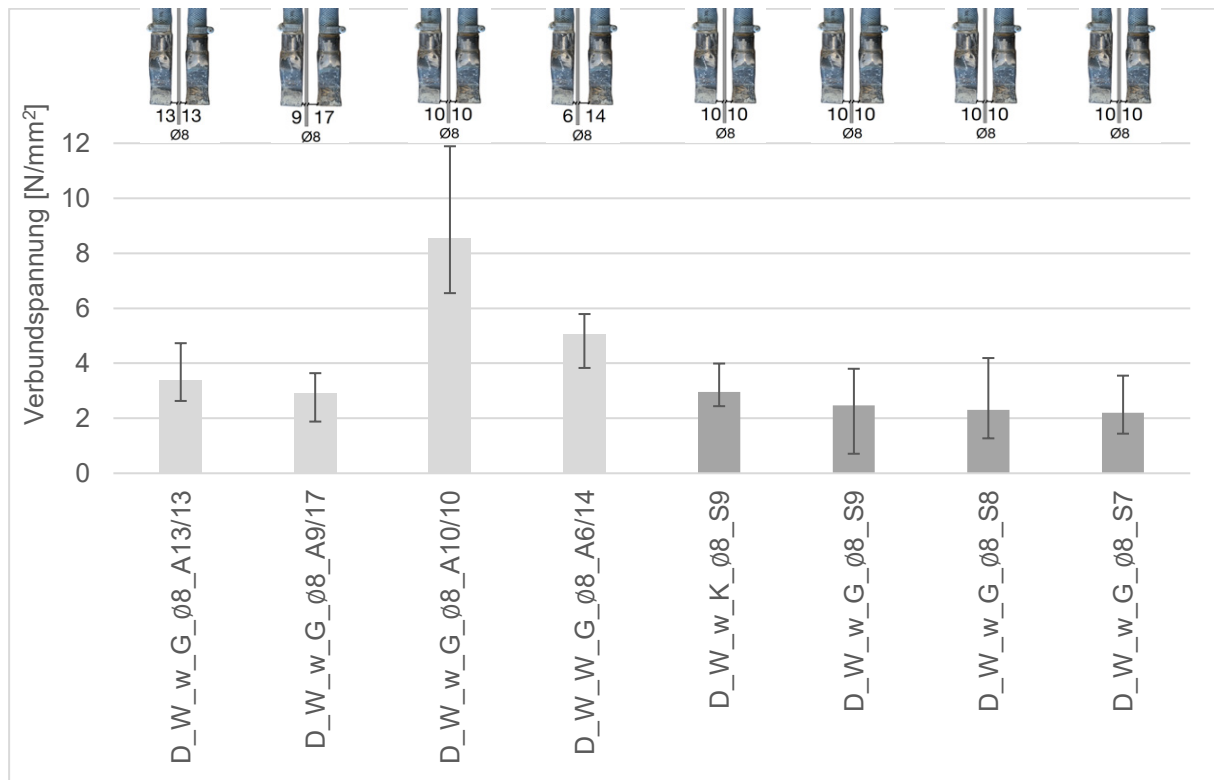


Bild 4.57: Verbundspannungen der gedruckten Prüfkörper mit Bewehrung $\varnothing 8$ in w-Richtung

Einfluss der Bewehrungsrichtung (u, v, w-Richtung)

Zur Einordnung des Einflusses der Bewehrungsrichtung sind die Ergebnisse nachfolgend für die einzelnen Bewehrungsdurchmesser (8 mm, 10 mm und 12 mm) dargestellt.

(1) Bewehrungsdurchmesser von 8 mm

Die geringsten Verbundfestigkeiten lagen in w-Richtung vor. Die Versuche in u-Richtung und v-Richtung zeigten deutlich höhere Verbundfestigkeiten, die auf einem vergleichbaren Niveau wie die gegossenen Referenzversuche lagen (Bild 4.58).

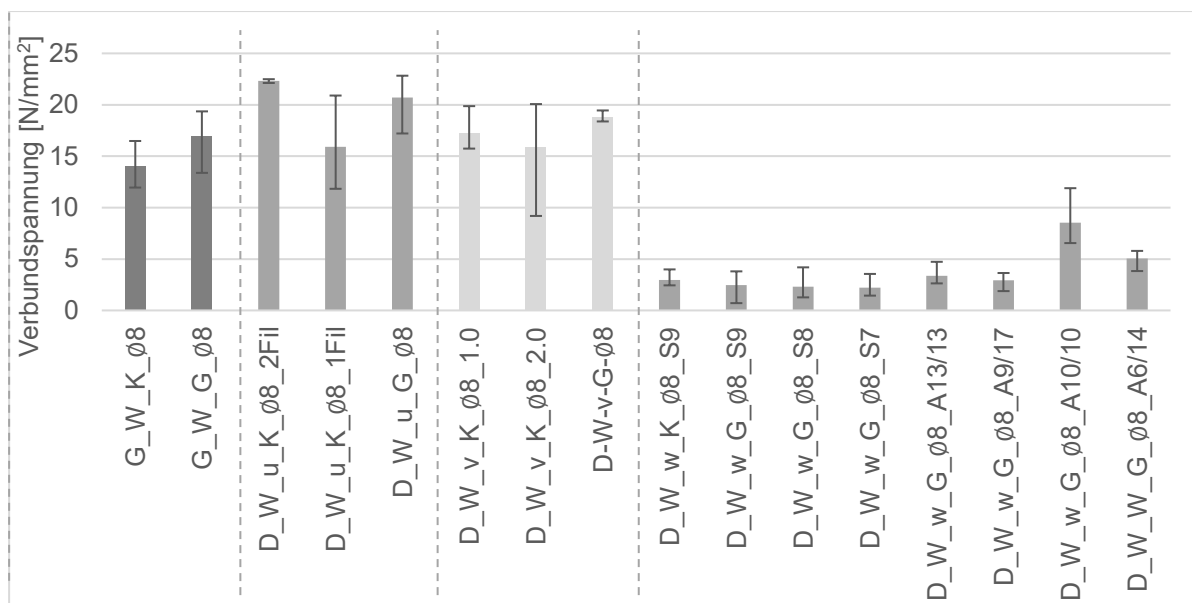


Bild 4.58: Verbundspannungen der Prüfkörper mit Bewehrung $\varnothing 8$

(2) Bewehrungsdurchmesser von 10 mm

Auch bei einem Bewehrungsdurchmesser von 10 mm zeigte sich ein ähnliches Verhalten. Versuche mit Bewehrung in u- und v-Richtung wiesen Verbundfestigkeiten wie im gegossenen Beton auf, während die Verbundfestigkeit in w-Richtung lediglich halb so große Werte erreichten (Bild 4.59). Darüber hinaus verdeutlicht das Diagramm nochmals, dass die geschweißten Stäbe einen besseren Verbund als kontinuierliche Stäbe aufwiesen.

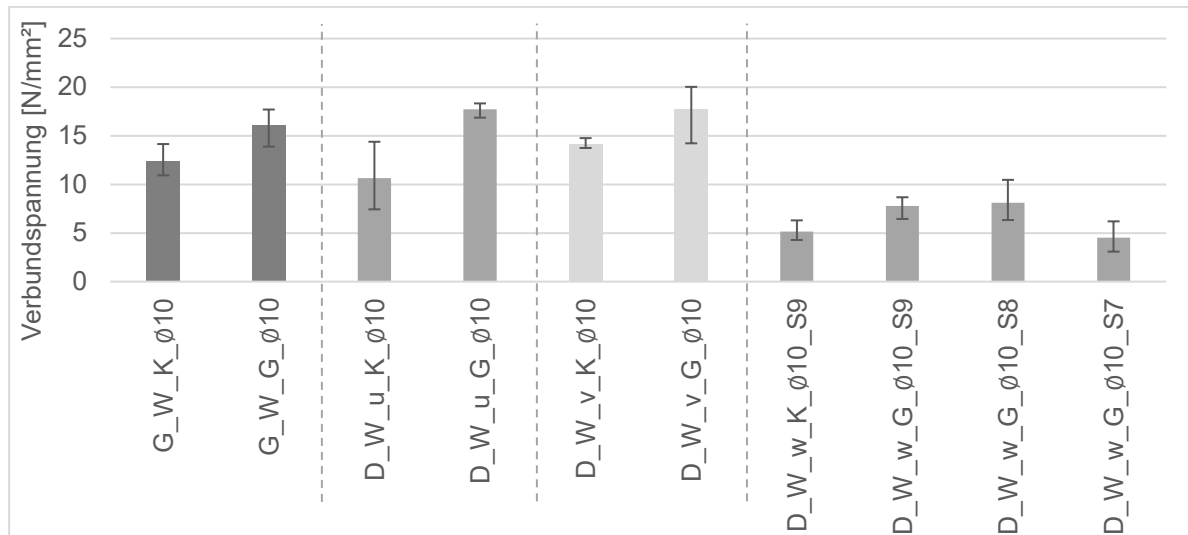


Bild 4.59: Verbundspannungen der Prüfkörper mit Bewehrung $\phi 10$

(3) Bewehrungsdurchmesser von 12 mm

Anhand von Bild 4.60 kann festgestellt werden, dass die Versuche mit einem Bewehrungsdurchmesser von 12 mm bei den gegossenen Körpern die höchste Verbundfestigkeit erreichten. Die gedruckten Versuche zeigten geringere Verbundfestigkeiten im Vergleich zu den gegossenen Referenzversuchen. Grundsätzlich stimmen die Ergebnisse mit den anderen Durchmessern überein, sodass auch hier deutlich reduzierte Verbundfestigkeiten in w-Richtung festgestellt wurden.

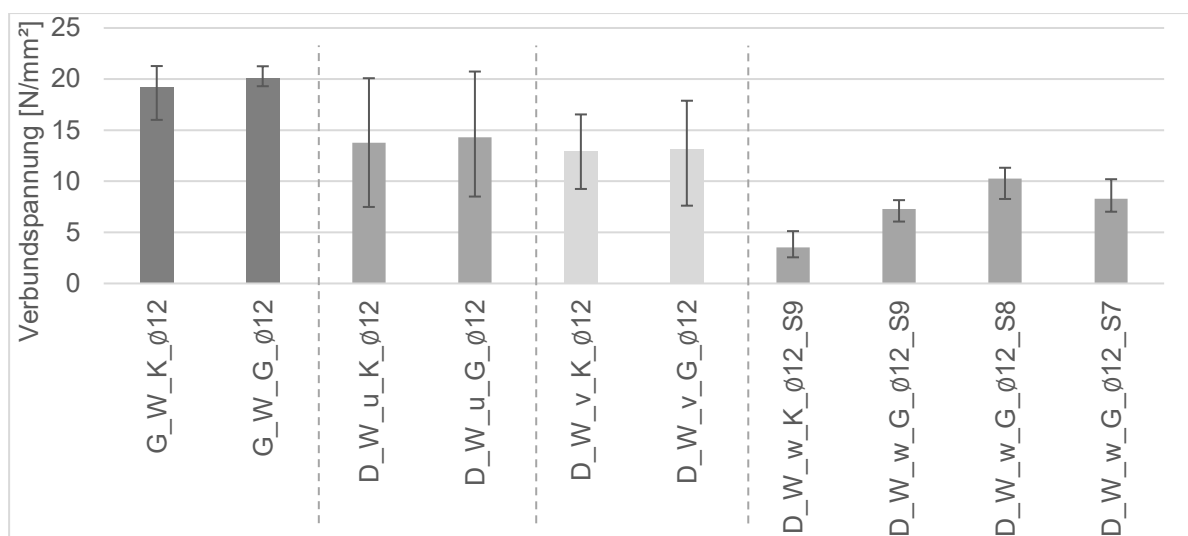


Bild 4.60: Verbundspannungen der Prüfkörper mit Bewehrung $\phi 12$

Einfluss der Betonfördermenge

Die durch die Drehzahl der Betonpumpe einstellbare Betonfördermenge hat einen Einfluss auf die optische Sauberkeit der Schichten. Die Korrelation zwischen Drehzahlstufe (S7 - S10) und Fördermenge in l/h ist in Tabelle 4.14 angegeben. Eine zu hohe Fördermenge führte zu einem Betonüberangebot bei der Herstellung, woraus eine unsaubere Schichtung der Betonoberflächen und eine seitliche Ausbauchung der Prüfkörper resultierten (Bild 4.61, oben).



Bild 4.61: Übersicht der gedruckten Prüfkörper mit Bewehrung in w-Richtung bei unterschiedlichen Betonfördermengen

Gleichzeitig hat die Fördermenge auch einen wesentlichen Einfluss auf die Verbundfestigkeit der in w-Richtung eingestellten Bewehrungsstäbe. Dieser ist in den nachfolgenden Diagrammen (Bild 4.62 und Bild 4.63) dargestellt. Es zeigt sich deutlich, dass die Versuchskörperherstellung mit S8 und S9 zu hohen Verbundfestigkeiten in w-Richtung führte, während zu niedrige (S7) Betonfördermengen in reduzierten Verbundfestigkeiten resultierten.

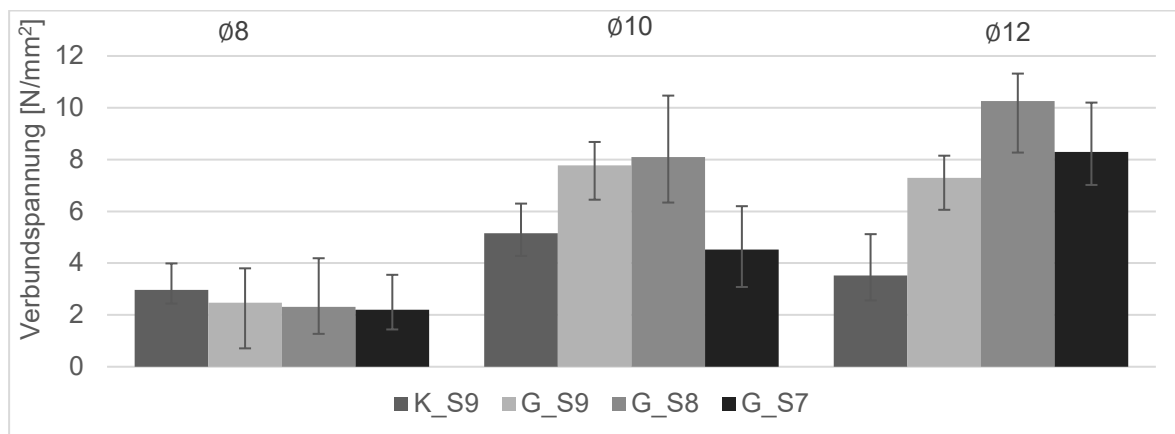


Bild 4.62: Verbundspannungen der gedruckten Prüfkörper bei unterschiedlicher Betonfördermengen in w-Richtung

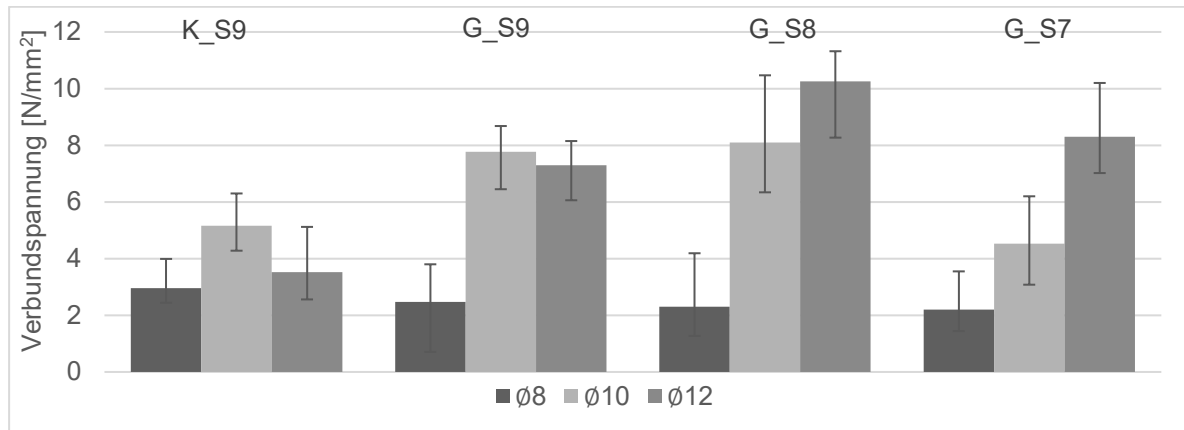


Bild 4.63: Verbundspannungen der gedruckten Prüfkörper bei unterschiedlicher Betonfördermengen in w-Richtung

Zurückzuführen ist dies u.a. auf die Verbundbedingungen im Bereich zwischen den benachbarten Betonfilamenten. Der Schnitt durch den Prüfkörper (Bild 4.61, unten) verdeutlicht, dass die von der Zwillingdüse nebeneinander abgelegten Filamente bei einer Förderstufe von S7 teilweise nicht verbunden wurden, sodass sich bei einer w-Ausrichtung des Stabes hier keine adäquate Einbettung ergab. Bei einer Drehzahlstufe von S8 entstanden hingegen zusammenhängende Betonfilamente, was auf bessere Verbundbedingungen hindeutet. Der dritte dargestellte Körper wurde mit einer Drehzahlstufe von S9 gedruckt. Auch hier ergaben sich gute Verbundbedingungen infolge des Zusammenschluss der einzelnen Filamente, jedoch führte das Betonüberangebot zu einer unsauberen Schichtbildung und Ausbauchung des Versuchskörpers.

Einfluss des Düsentyps

In den Vorarbeiten des Projekts [Sch22] wurden erste Untersuchungen zur Verbundfestigkeit von 3D-gedrucktem Beton und Bewehrungsstäben durchgeführt. Hierbei wurde eine einzelne, rechteckige Düse verwendet (Bild 4.64 (a)).

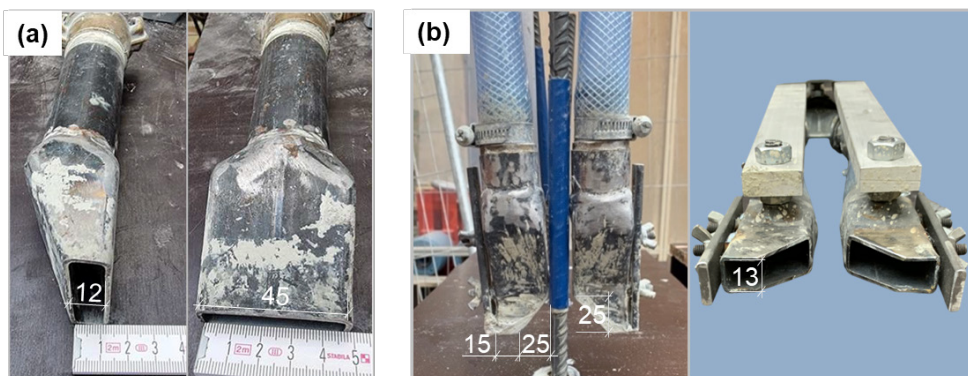


Bild 4.64: Untersuchte Düsentypen

Tabelle 4.17 fasst die Verbundfestigkeiten bzw. den Schlupf bei Erreichen der maximalen Kraft der Versuchsergebnisse mit einzelner rechteckiger Düse (gekennzeichnet mit „D“) und optimierter Gabeldüse („GD“) zusammen. Die Materialparameter waren in beiden Fällen gleich (gleicher Weber-Mörtel und Betonbewehrung Ø10 mm). Während die Gabeldüse den Bewehrungsstab bei Anordnung in w-Richtung umdrückte, erfolgte die händische Bewehrungsintegration bei den Voruntersuchungen nachträglich, was einen direkten Vergleich verhindert.

Tabelle 4.17: Einfluss unterschiedlicher Düsen auf den Verbund

		Maximalkraft [kN]		max. Verbundspannung [N/mm ²]		Schlupf bei Maximalkraft [mm]	
		D	GD	D	GD	D	GD
Gegossen*	1	22,54	22,54	14,35	14,15	1,08	0,69
	2	14,76	17,54	9,4	10,93	1,29	0,64
	3	19,68	19,46	12,53	12,25	0,99	1,11
	MW	18,99	19,85	12,09	12,44	1,12	0,81
u-Richtung	1	7,08	11,93	4,51	7,43	1,21	0,5
	2	9,18	23,09	5,84	14,39	1,42	0,75
	3	17,89	16,24	11,39	10,12	0,76	1,11
	MW	11,38	17,09	7,25	10,65	1,13	0,79
v-Richtung	1	21,37	22,14	13,6	13,8	0,63	0,91
	2	24,67	23,69	15,71	14,76	0,62	0,92
	3	23,3	16,24	14,83	13,75	0,63	0,82
	MW	23,11	20,69	14,71	14,10	0,63	0,88

* Verbundwerte entsprechen den Ergebnissen an den zugehörigen, gegossenen Referenzbalken der Untersuchungen der Düsen „D“ und „GD“.

Der Vergleich zeigt, dass der Bewehrungsverbund in u-Richtung bei Extrusion mit der Gabeldüse besser war als bei Verwendung der Einzeldüse. In Versuchen mit Bewehrung in v-Richtung ergaben sich hingegen leicht höhere Verbundfestigkeiten bei Verwendung der Einzeldüse. Zusätzlich ist zu erkennen, dass bei beiden Düsen die v-Richtung die höchste Verbundfestigkeit aufwies, gefolgt von den gegossenen Körpern und den Körpern mit Bewehrung in u-Richtung.

4.3.8 Fazit

In dieser Studie wurden Ausziehversuche zur Untersuchung unterschiedlicher Einflussfaktoren auf das Verbundverhalten von Bewehrungsstahl in gegossenen und 3D-gedrucktem Beton durchgeführt. Das Verbundverhalten ist hier abhängig vom Bewehrungsdurchmesser, dem Düsenabstand, der Bewehrungsrichtung in Bezug auf die Extrusionsrichtung, die Betonfördermenge und Düsengeometrie. Dieser Abschnitt fasst die wichtigsten erlangten Erkenntnisse zusammen.

Bei ca. 90% der Versuche (97 Prüfkörper) trat ein Scherbruchversagen auf, während 11 Körper ein Spaltrissversagen zeigten. In den Ergebnissen ist zu erkennen, dass bei Verwendung von geschweißtem Betonstahl höhere maximale Verbundspannungen übertragen werden konnten. Dies ist auf eine bessere Verzahnung des Betonstahls mit der Betonmatrix aufgrund des Schweißwulstes an der Fugestelle zurückzuführen. Die Schweißnaht ist bei einem Bewehrungsdurchmesser von 12 mm weniger relevant als bei den Bewehrungsdurchmesser von 8 mm oder 10 mm, da das Verhältnis der herausragenden Schweißnaht zu den Stahlrippen kleiner ist.

Im Allgemeinen wurde festgestellt, dass kein wesentlicher Unterschied hinsichtlich des Verbunds zwischen gedrucktem und gegossenen Querschnitt für in u- und v-Richtung eingelegter Bewehrung besteht. Der Verbund in w-Richtung ist jedoch mit Abstand geringer. Hinsichtlich

des untersuchten Düsenabstands wurde für den Verbund in u- und v-Richtung eine untergeordnete Rolle festgestellt, solange die Lücke zwischen den Zwillingsdüsen durch den gedruckten Beton ausreichend gefüllt ist. Im Gegensatz dazu ist der Abstand entscheidend für die übertragbaren Verbundspannungen in w-Richtung. Darüber hinaus verbessert sich die Verbundfestigkeit unter den gleichen Bedingungen, z.B. Düsenabstand, bei Erhöhung der Materialfördermenge in w-Richtung. Tabelle 4.18 fasst die wesentlichen Einflüsse abschließend zusammen.

Tabelle 4.18: Einfluss der untersuchten Parameter auf den Verbund


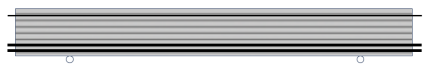






Bewehrungslage	gegossen	u-Richtung	v-Richtung	w-Richtung
Verbundfestigkeit	$\varnothing 12 > \varnothing 8 > \varnothing 10$	$\varnothing 8 > \varnothing 12 > \varnothing 10$	$\varnothing 8 > \varnothing 10 > \varnothing 12$	$\varnothing 12 > \varnothing 10 > \varnothing 8$
Bewehrungsdurchmesser	$\varnothing 8$	$\varnothing 10$	$\varnothing 12$	
Verbundfestigkeit	$u > v > G > w$	$v > u > G > w$	$G > u > v > w$	

4.4 Querkraftverhalten von 3D-gedruckten Stahlbetonbalken

4.4.1 Versuchsprogramm

Im Rahmen des Projektes wurden umfassende Untersuchungen zum Querkrafttragverhalten von 3D-gedruckten Stahlbetonbalken mit und ohne Querkraftbewehrung („QKB“) durchgeführt. Die Längsbewehrung wurde stets kontinuierlich ausgeführt. Eine Übersicht des Versuchsprogramms gibt Tabelle 4.19.

Tabelle 4.19 Versuchsübersicht zum Querkrafttragverhalten

Beschreibung	Skizze	Anzahl	Prüfkörperbezeichnung
Querkraftbalken $\rho_w=0$, $\lambda = \frac{a\lambda}{d} = 3,3$			
Gegossene Referenzbalken		2	C_S_cTR_nSR
Gedruckte Prüfkörper		2	P_S_cTR_nSR
Querkraftbalken $\rho_w=1,02$ $\rho_{w,min}$, $\lambda = 3,3$			
Gegossene Referenzbalken		2	C_S_cTR_cSR400
Gedruckte Prüfkörper, kontinuierliche QKB		2	P_S_cTR_cSR400
Gedruckte Prüfkörper, geschweißte QKB		2	P_S_cTR_wSR400
Querkraftbalken $\rho_w=2,54$ $\rho_{w,min}$, $\lambda = 3,3$ und $\lambda = 4,0$			
Gegossene Referenzbalken		2	C_S_cTR_cSR160
Gedruckte Prüfkörper, kontinuierliche QKB		2	P_S_cTR_cSR160
Gedruckte Prüfkörper, geschweißte QKB		2	P_S_cTR_wSR160

Die Bezeichnung der Balken ergibt sich aus dem Prinzip in Tabelle 4.20. Es wurden zunächst Balken ohne QKB hergestellt, danach Balken mit einem Querkraftbewehrungsgrad in Höhe der Mindestquerkraftbewehrung und der 2,5-fachen Mindestquerkraftbewehrung. Zur Steuerung des Versagensort wurde das andere Schubfeld mit zusätzlicher QKB ausgeführt. Es wurden jeweils zwei gegossene Referenzbalken hergestellt. Während ohne QKB zwei weitere gedruckte Versuchskörper hergestellt wurden, wurden bei den Bauteilen mit QKB vier gedruckte Balken hergestellt, da zusätzlich zwischen kontinuierlicher und geschweißter QKB unterschieden wurde.

Tabelle 4.20: Systematik zur Bezeichnung der Querkraftversuche

A_B_cTR_dSR00	
A: Herstellungsverfahren:	C=Gegossen (casted) P=Gedruckt (Printed)
B: Versagensart:	B=Biegeversagen (bending failure) S=Querkraftversagen (shear failure)
c:	c=Kontinuierliche (continuous) w=Geschweißt (welded)
TR: Längsbewehrung (tensile reinforcement)	
d:	c=Kontinuierliche QKB (continuous) w=Geschweißte QKB (welded) n=ohne QKB (no)
SR: Querkraftbewehrung (shear reinforcement)	
00: Querkraftbewehrungsabstand	160=Abstand von 160mm zwischen QKB 400=Abstand von 400mm zwischen QKB
z. B.: P_S_cTR_wSR160	gedruckte Stahlbetonbalken zum Querkraftverhalten mit kontinuierlicher Längsbewehrung und geschweißter Querkraftbewehrungsstäbe mit Abstand von 160 mm.

4.4.2 Herstellung der Prüfkörper

Abmessungen und konstruktive Durchbildung

Die Balken der drei unterschiedlichen Versuchsserien wurden jeweils mit identischen Abmessungen ($L \times B \times H = 2400 \text{ mm} \times 110 \text{ mm} \times 270 \text{ mm}$) hergestellt (Bild 4.65 und Tabelle 4.21). Neben den Abmessungen sind auch die Spannweiten und Schubfeldlängen in Bild 4.65 angegeben. Die additive Fertigung der gedruckten Balken führte zu Ausbauchungen der noch nicht ausgehärteten unteren Betonlagen der Prüfkörper während des Herstellprozesses. Infolge dieser Frischbetonverformungen ergaben sich Abweichungen in den endgültigen Abmessungen der gedruckten Bauteile. Diese wurden messtechnisch erfasst und bei der Auswertung der Versuchsergebnisse berücksichtigt.

Alle hergestellten Balken wurden mit vier Längsbewehrungsstäben $\varnothing 14$ in der Zugzone bewehrt. Zur leiterartigen Befestigung der QKB waren zudem je ein $\varnothing 8$ in der Zug- und in der Druckzone angeordnet. Die QKB wurde an diese Stäbe $\varnothing 8$ zur Verankerung in der Zug- und in der Druckzone angeschweißt. Die Querkraftbewehrung wurde mit einem $\varnothing 8$ mm ausgeführt. Zur Realisierung der unterschiedlichen Querkraftbewehrungsgrade wurden die Längsabstände variiert. Der Einfluss geschweißter Querkraftbewehrung wurde ebenfalls untersucht.

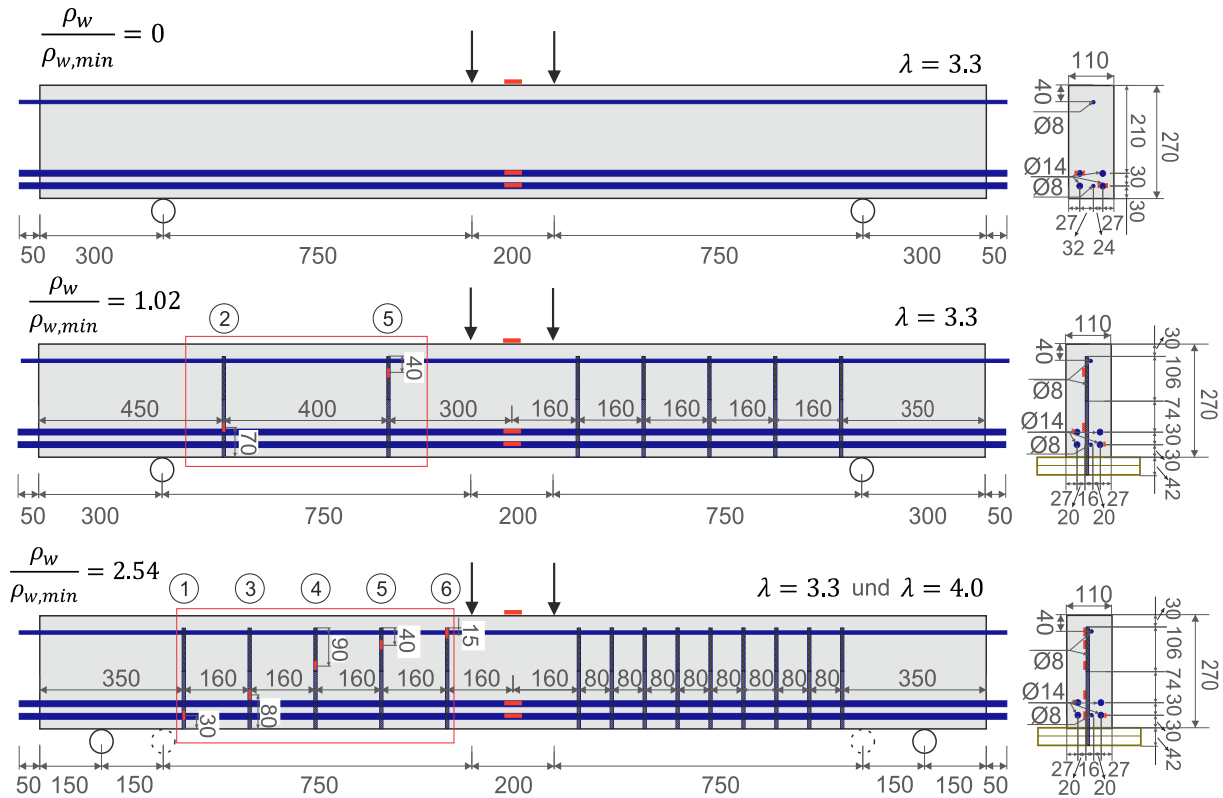


Bild 4.65: Abmessung der Querkraftversuche

Tabelle 4.21: Versuchsparameter der Querkraftversuche

Beschreibung	Anzahl	Längsbewehrung Zug- / Druckzone	Querkraftbewehrung (maßgebendes Schubfeld)		$\frac{\rho_w}{\rho_{w,min}}$	Herstellungsmethode
			Anzahl	Art		
C_S_cTR_nSR	2	1Ø8+4Ø14 / 1Ø8	/	/	0	gegossen
P_S_cTR_nSR	2	1Ø8+4Ø14 / 1Ø8	/	/	0	gedruckt
C_S_cTR_cSR400	2	1Ø8+4Ø14 / 1Ø8	2Ø8	kontinuierlich	1.02	gegossen
P_S_cTR_cSR400	2	1Ø8+4Ø14 / 1Ø8	2Ø8	kontinuierlich	1.02	gedruckt
P_S_cTR_wSR400	2	1Ø8+4Ø14 / 1Ø8	2Ø8	geschweißt	1.02	gedruckt
C_S_cTR_cSR160	2	1Ø8+4Ø14 / 1Ø8	5Ø8	kontinuierlich	2.54	gegossen
P_S_cTR_cSR160	2	1Ø8+4Ø14 / 1Ø8	5Ø8	kontinuierlich	2.54	gedruckt
P_S_cTR_wSR160	2	1Ø8+4Ø14 / 1Ø8	5Ø8	geschweißt	2.54	gedruckt

Ausgangsmaterialien

Die verwendeten Materialien der Querkraftversuche stimmten mit denen der Verbunduntersuchung überein (Weber 3D 145-2 und Betonrippenstahl B500B). Die Ergebnisse der Betonprüfung befinden sich in Anhang.

Schweißtechnische Herstellung und Integration der Bewehrung

Schweißprozess: Das im Rahmen dieses Projektes umzusetzende AMoRC-Verfahren sieht das seitliche Umdrücken einer vertikalen Bewehrung (z.B. Querkraftbewehrung) mit einer gabelförmigen Düse vor [Cla20a]. Aufgrund des Einsatzes dieser Gabeldüse können lediglich parallel zur Gabel ausgerichtete ein- oder zweidimensionale Bewehrungen (u- und w-Ausrichtung) zum Einsatz kommen, während senkrecht zur u-w-Ebene angeordnete Bewehrungselemente (z.B. horizontale Bügelschenkel in v-Richtung) nicht umdrückt werden können. Die Querkraftbewehrung wird daher mithilfe von leiterartigen Schubzulagen realisiert, die in der u-w-Ebene, mittig zwischen zwei extrudierten Betonfilamenten angeordnet werden. Hierbei werden vertikal ausgerichtete Bewehrungsstäbe (w-Richtung) verwendet, die entweder aus kontinuierlichen oder mithilfe des im Rahmen des Projektes entwickelten Bewehrungsbolzenschweißverfahrens erstellt wurden. Abweichend von der prototypischen Umsetzung des vollständig automatisierten AMoRC-Prozesses in Kapitel 5 wurde die schweißtechnische Herstellung in den Querkraftversuchen vorab durchgeführt.

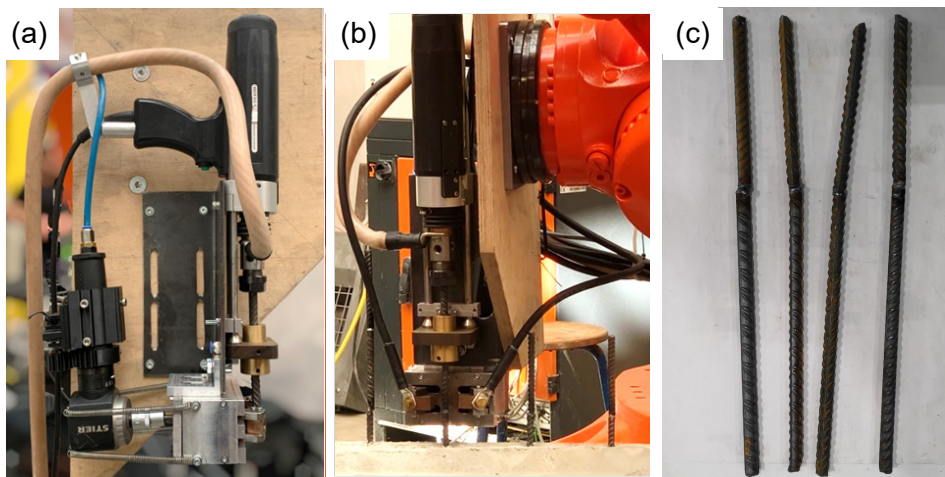


Bild 4.66: Schweißprozess der Querkraftbewehrung

Das für die Herstellung der geschweißten vertikalen Bewehrung verwendete modifizierte Lichtbogenbolzenschweißverfahren ist in Bild 4.66 dargestellt. Die erforderlichen Schweißparameter der Stromquelle und der entwickelten Schweißpistole wurden durch zahlreiche Schweißversuche und Bewertung der Schweißqualität anhand von Bruchprüfungen bestimmt. Um den Lichtbogen zu konzentrieren, wurde Reinargon ([DINENISO14175:2008-06]) als Schutzgas mit einer Vorströmzeit von 3 s verwendet. Nach Auslösung des Schweißprozesses, wurde das Material beider Bewehrungssegmente vom Lichtbogen angeschmolzen und das in der Pistole eingespannte Segment nach der voreingestellten Zeit (Vorströmzeit = 3 s + Schweißzeit = 160 ms = 3,16 s) mit dem eingestellten Eintauchmaß von 4 mm in die Schmelze eingetaucht [Bol22]. Mit der entwickelten Schweißpistole wurden die Bewehrungselemente (jeweils 176mm und 106mm lang) durch einen hohen Stromimpuls gefügt, siehe Bild 4.66 (c). Anschließend wurden die gefügten Querkraftbewehrungsstäbe händisch auf jeweils zwei Längsstäbe $\varnothing 8$ aufgeschweißt, um die leiterartige Schubzulage zu erzeugen.

Positionierung der Querkraft- und Längsbewehrung: Die leiterartigen Schubzulagen wurden vor Beginn des Druckvorgangs von einem Roboter mit Greifwerkzeug stehend auf der Druckunterlage positioniert. Hierzu wurden einige der vertikalen Bewehrungsstäbe in 42 mm tiefe Bohrlöcher in der Unterlage eingestellt, siehe Bild 4.65 rechts und Bild 4.66. Zur einfachen Positionierung der Längsbewehrung wurde diese vor dem Einlegen mit Abstandhaltern zur

Realisierung einer Betondeckung von 30mm ausgerüstet (Bild 4.68). Dies erleichtert den Einbau der Bewehrung mit einem Roboter mit Greifwerkzeug.



Bild 4.67: Holzplatten zur Positionierung der Querkraftbewehrung

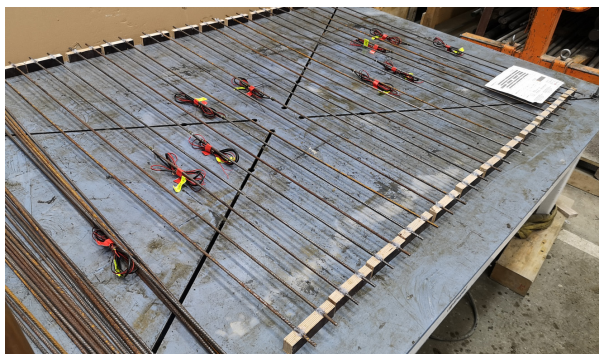


Bild 4.68: Längsbewehrung mit Abstandhalter

Betonextrusion

Im Anschluss an Herstellung und Einbau der leiterartigen Schubbewehrung wurde die Bewehrung durch die in Kapitel 3.2 entwickelte Gabeldüse umdrückt. Dazu wurde die Betonmischpumpe von Mai und ein Kuka-Roboter auf einer Lineareinheit genutzt. Die Filamenthöhe (Schichtdicke) betrug 10 mm. Der Düsenabstand wurde auf ein Lichtes Maß von 24 mm eingestellt, um eine Querschnittsbreite von 110 mm zu erzeugen. In einigen Versuchen war aufgrund gewisser Maßabweichungen der leiterartigen Schubzulage eine Vergrößerung des lichten Düsenabstandes auf 25 mm erforderlich, um Kollisionen mit der eingelegten Bewehrung zu vermeiden. Die gewählte Betonfördermenge der Pumpe betrug 6,5 l/min (Stufe S8). Die für den Extrusionsprozess erforderlichen Vorbereitungsschritte sind in Kapitel 3.1.1 dargestellt. Das Umdrücken der Querkraftbewehrung mit der Gabeldüse ist in Bild 4.69 (a) veranschaulicht. Nach Aufbringen der drei unteren Filamente wurde der Extrusionsprozess zum Einbau vorbereiteten Längsbewehrung pausiert. Zur Minimierung von Druckpausen wurden jeweils zwei Versuchskörper gleichzeitig hergestellt (Bild 4.69 (b)). Nach Abschluss des Extrusionsprozesses wurden die Versuchskörper durch Entfernen des überschüssigen Frischbetons zwischen den beiden Bewehrungskörben fertiggestellt.

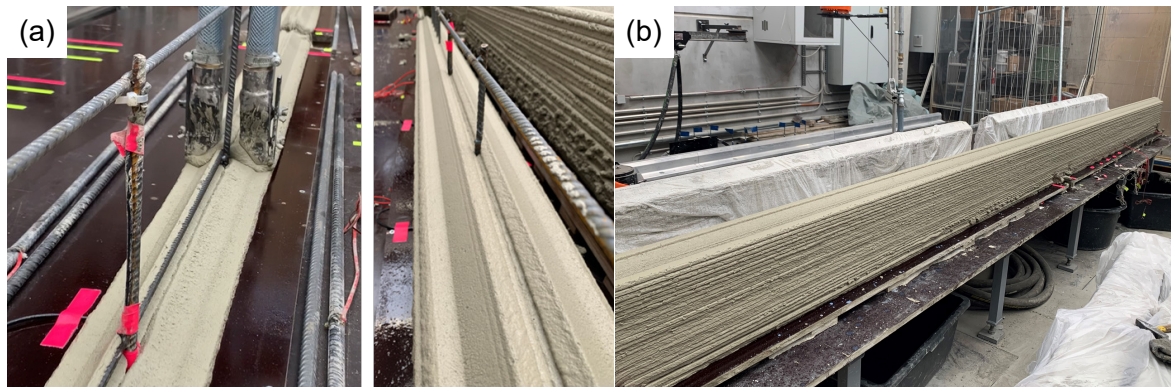


Bild 4.69: Extrusionsprozess der Querkraftbalken mit Umdrücken der Bewehrung

Neben den Balken wurden pro Drucktermin jeweils 3 Würfel und 3 Prismen zur Prüfung der Materialeigenschaften hergestellt. Die Prüfung der Betoneigenschaften erfolgte nach DIN EN 12390-3 (Würfel) respektive DIN EN 196-1:2016-11 (Prismen). Die Auswertung der Materialeigenschaften ist im Anhang zu finden. Die Festigkeit des Betons kann zur Bestimmung der 28-Tage Festigkeit zurückgerechnet werden. Zur besseren Vergleichbarkeit wurden die Versuchsergebnisse normiert.

Das überschüssige Material in der Mitte der beiden Balken (vgl. Bild 4.69) wurde zur zeitgleich durchgeführten Herstellung der gegossenen Referenzbalken verwendet. Nach dem Drucktermin wurden die Prüfkörper zur Nachbehandlung mit einer Plane überdeckt und angefeuchtet (Bild 4.69 (b)).

4.4.3 Versuchsaufbau und Messtechnik

Die Querkraftversuche wurden im Vierpunktbiegeversuch mit einer Spannweite von 1700 mm getestet. Zur Krafteinleitung in die nicht vollständig ebene Oberseite der Versuchskörper wurde ein Mörtelbett unterhalb der Lasteinleitungsplatten angebracht.

Zur Messung der Durchbiegung in Balkenmitte und eines potenziellen Schlupfes am Ende der Längsbewehrung wurden induktive Wegaufnehmer (IWA) verwendet (Bild 4.71). Um die Dehnung der Querkraftbewehrung zu messen, wurden Dehnungsmessstreifen (DMS) auf sechs unterschiedlichen Höhen auf der Querkraftbewehrung platziert, an denen jeweils der kritische Schubriss erwartet wurde (Bild 4.70). Zudem wurden zwei DMS in der Mitte der zwei Längsbewehrungsstäbe ($\varnothing 14$) angebracht (Bild 4.65). Die DMS wurden vor der additiven Herstellung (Betonextrusion) und nach Abschluss aller notwendigen Schweißarbeiten auf die Bewehrung geklebt, um mögliche Beschädigungen der Messtechnik zu vermeiden.

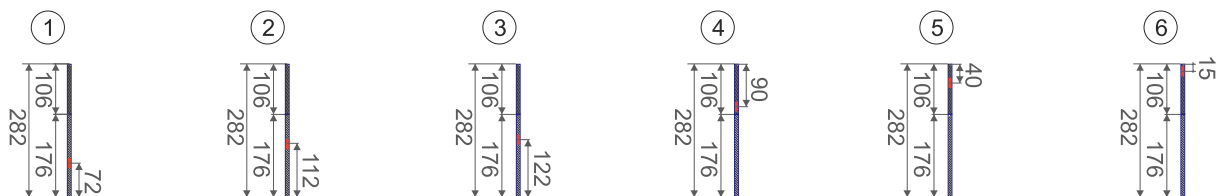


Bild 4.70: Layout der DMS auf Querkraftbewehrung

Die Rissentwicklung wurde zudem mithilfe digitaler Bildkorrelation (DIC) ausgewertet.

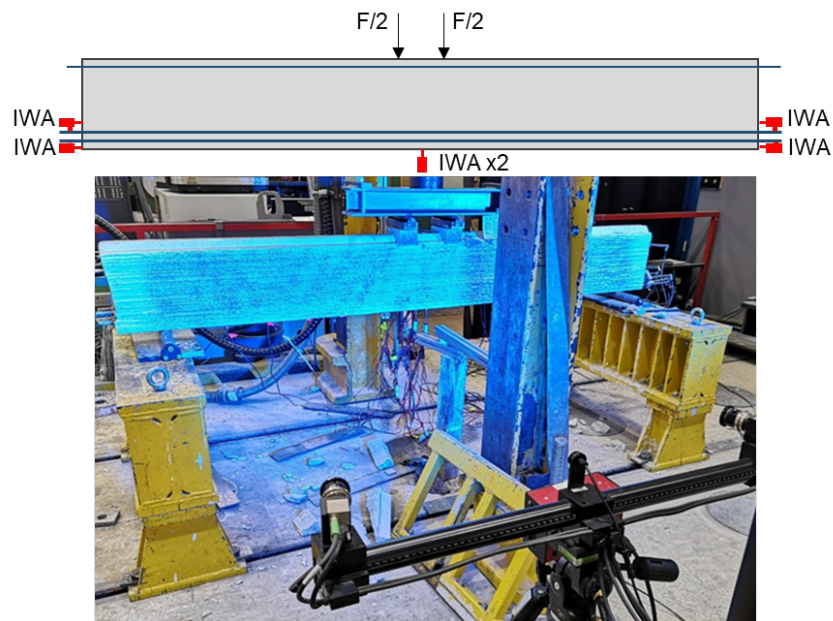


Bild 4.71: Ansicht von Versuchsaufbau und Messtechnik der Querkraftversuche

4.4.4 Versuchsergebnisse

Im Folgenden werden das Tragverhalten und die Rissentwicklung der Querkraftversuche vorgestellt. Neben einem Überblick über die Rissbilder wird jeweils ein Prüfkörper pro Serie genauer analysiert. Anschließend erfolgt der Vergleich der Versuche.

Bauteile ohne Querkraftbewehrung ($\rho_w = 0$)

(1) Überblick

Tabelle 4.22: Eigenschaften der Querkraftbalken ohne QKB

Balken	Abmessungen [mm]				Längsbewehrung [mm]	Wassergehalt [l/h]	Alter [Tage]
	h	b	l _s	d			
C_S_cTR_nSR (1) & (2)	270	110	1700	225	1×Ø8+4×Ø14+1×Ø8	370	41
P_S_cTR_nSR (1) & (2)	270-294	120-165	1700	240	1×Ø8+4×Ø14+1×Ø8	370	41

(2) Rissentwicklung

Die in Bild 4.72 dargestellten Rissbilder zeigen die erwartete Schubrissbildung für Stahlbetonbalken mit einer Schubschlankheit zwischen 3 und 4.

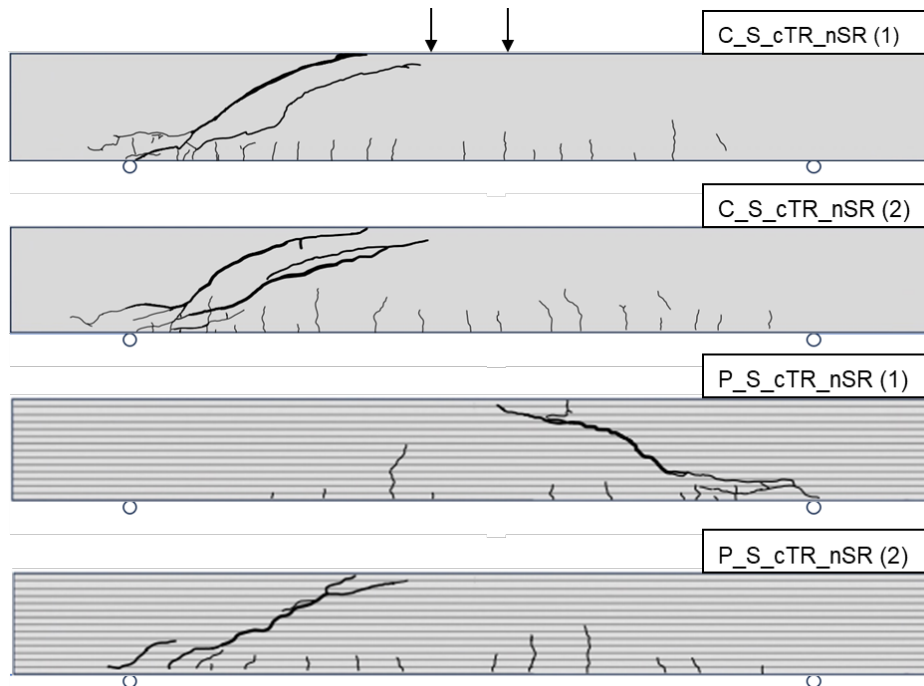


Bild 4.72: Rissbilder der Querkraftbalken ohne Querkraftbewehrung ($\rho_w = 0$)

C S cTR nSR (1) und C S cTR nSR (2)

Zunächst bildeten sich Biegerisse in Feldmitte aus. Die Entstehung des kritischen Schubrisses trat bei 52 kN bzw. 56 kN auf. Der kritische Schubriss entwickelte sich hierbei aus dem letzten Biegeriss vor dem Auflager und wuchs schlagartig in die Druckzone hinein. Die Schubrissbildung ging mit einem signifikanten Kraftabfall von 24 kN bzw. 10 kN einher. Anschließend bildete sich ein in Richtung des Auflagers wachsender Dübelriss aus. Die Prüfkraft konnte hierbei in beiden Versuchen noch einmal deutlich gesteigert werden, was auf die Delamination der Längsbewehrung und Ausbildung einer Druckbogen-Zugband-Tragwirkung zurückzuführen ist [Cla20b; Sch21; See23]. Während der Laststeigerung bildete sich unterhalb des jeweils zuerst entstandenen kritischen Schubrisses ein weiterer flacher geneigter sekundärer Schubriss aus.

P S cTR nSR (1)

Zunächst kam es auch bei diesem Versuch zur Entstehung von Biegerissen in Balkenmitte, die sich weiter in Richtung der Auflager verteilten. Bei einer Last von 63 kN entwickelte sich der kritische Schubriss ausgehend von einem Biegeriss (Bild 4.73 (a)). Hierbei verlief der Rissfortschritt vergleichbar zu dem gegossenen Balken mit geneigtem und stetig abflachendem Verlauf. Lediglich auf einem wenige Millimeter langen Stück (bei ca. 2/3 der Balkenhöhe) wuchs der Riss horizontal entlang der Grenzschicht zweier Filamente parallel zur Extrusionsrichtung. Dieses Verhalten ist mutmaßlich auf eine reduzierte Verbundfestigkeit zwischen den beiden extrudierten Betonschichten zurückzuführen. Der Kraftabfall bei Schubrissentstehung betrug 19 kN und es war unmittelbar ein stark ausgeprägter Dübelriss entlang der Längsbewehrung zu erkennen. Dieses gegenüber gegossenen Balken deutlich stärker ausgeprägte Dübelrissverhalten ist ebenfalls auf die reduzierte Festigkeit der Grenzschicht, in die die Längsbewehrung eingelegt ist, zurückzuführen. Durch weiteres Belasten (im Nachbruchbereich) stieg die Last erneut auf 64 kN, wobei der Dübelriss sich weiterentwickelte und es schließlich zu einer Abplatzung der Betondruckzone kam. Zudem bildete sich zeitgleich ein horizontaler Riss annähernd entlang der Längsbewehrung (in der gedruckten Fuge) aus, der

sich schlagartig von der Trägermitte zu den Auflagern fortsetzte. Der Riss verlief nicht vollständig entlang der horizontalen Fuge, dennoch deutet er auf ein mögliches Verbundversagen (im Nachbruchbereich des Trägers) zwischen den beiden gedruckten Filamenten hin.

Der genaue Versagensvorgang wird in Bild 4.73 erläutert.

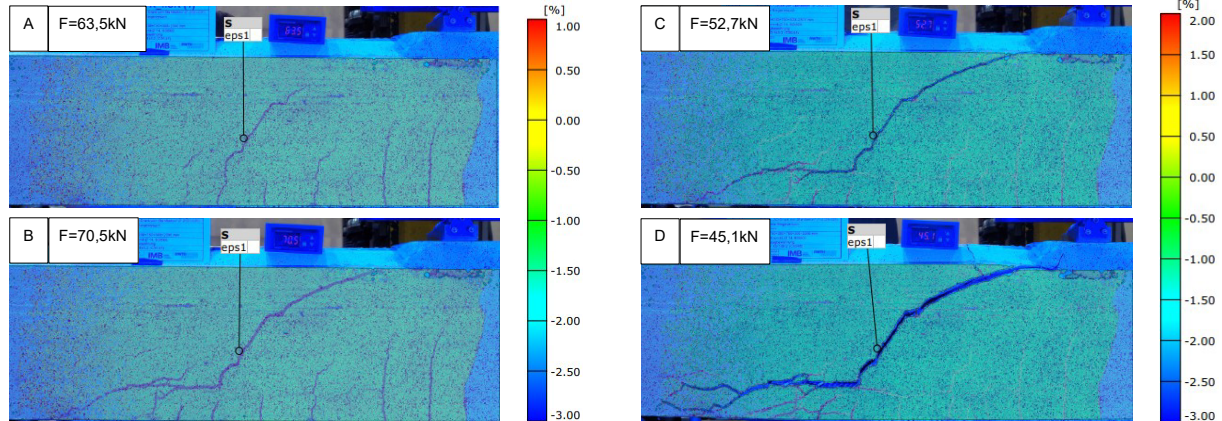


Bild 4.73: Rissentwicklung des Prüfkörpers P_S_cTR_nSR (1) mithilfe digitaler Bildkorrelation

Die Rissentwicklung wurde mithilfe digitaler Bildkorrelation analysiert und ist mit Prüfkörper P_S_cTR_nSR (1) beispielhaft für einen Querkraftbalken ohne Querkraftbewehrung in Bild 4.73 dargestellt. Zudem sind die jeweiligen Last- Durchbiegungszustände in Bild 4.74 dargestellt. Der maßgebende, kritische Schubriss entstand aus einem Biegeriss (A) und wuchs schlagartig in die Betondruckzone (Oberseite des Balkens). Gleichzeitig bildete sich der horizontale Dübelriss entlang der Längsbewehrung (B). Die Vertikalkräfte wurden mithilfe der Dübelwirkung abgetragen, wobei die Druckzone bei fortschreitendem Dübelriss immer kleiner wurde (C). Das Versagen des Prüfkörpers wurde durch ein Abplatzen der Druckzone verursacht (D).

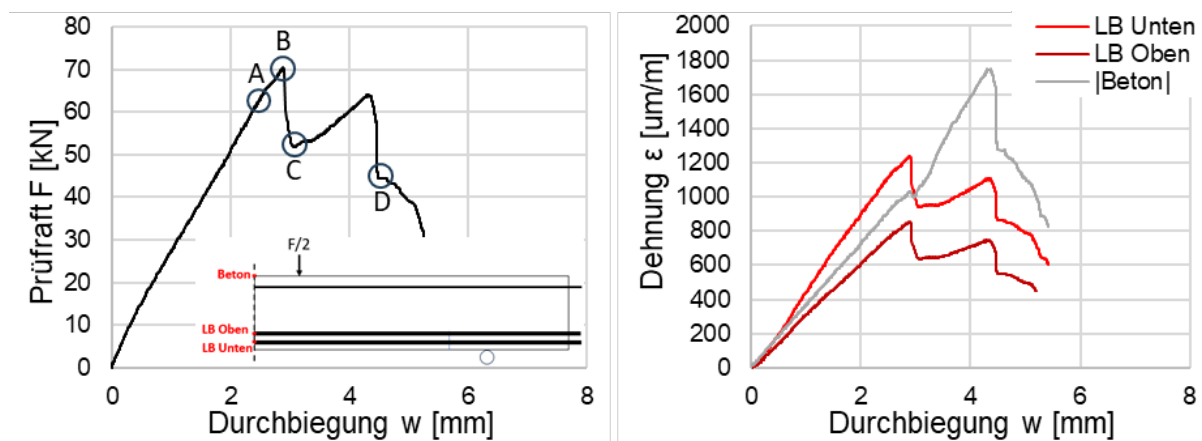


Bild 4.74: Kraft/Dehnung-Durchbiegung-Beziehung des Prüfkörpers P_S_cTR_nSR (1)

Das Dehnungs-Durchbiegungsdiagramm (Bild 4.74 rechts) zeigt die Dehnung der Bewehrung. Die mittig gemessene Stahldehnung sinkt nach der Bildung des Schubrisses, da es zu einer Lastkonzentration im Auflagerbereich Druckbogen-Zugbandwirkung kommt und sich durch die Rissbildung die Lastverteilung anpasst. Die Stahldehnung ist zu jedem Zeitpunkt noch weit von der Fließgrenze entfernt.

P_S_cTR_nSR (2)

Bis zu einer Belastung von 83 kN kam es ähnlich wie beim zuvor beschriebenen Balken dieser Serie zu Biegerissen an der Unterseite. Bei 83 kN bildete sich aus dem äußersten Biegeriss ein schmaler Schubriss, der sich in Balkenmitte verzweigte. Nach Schubrissbildung konnte die Last erneut von 66 kN auf 80 kN gesteigert werden, wobei es zur schlagartigen Entstehung eines Dübelrisses entlang der Längsbewehrung sowie eines vertikal verlaufenden Risses an der Oberseite des Balkens kam. Der Winkel des Schubrisses war flacher als beim ersten gedruckten Prüfkörper, zudem verzweigte sich der Schubriss nahe der Balkenmitte in zwei parallel verlaufende Risse, die sich nahe der Balkenoberseite wieder verbanden. Auch hier entstand ein Riss in Balkenlängsrichtung, diesmal jedoch in einer schmaleren und kürzeren Ausprägung als bei P_S_cTR_nSR (1).

(3) Last-Verformungsverhalten

In Tabelle 4.23 sind die Versuchsergebnisse der Querkraftversuche ohne QKB zusammengefasst. Die Mittelwerte der Druckfestigkeit (f_{cm}) wurden aus Materialprüfungen nach DIN EN 196-1 [DIN05b] bei jeweiligem Drucktermin bestimmt. Die Flächen der unregelmäßigen Querschnitte der gedruckten Balken wurden mit Hilfe der Software GOM ermittelt.

Bild 4.75 (links) bestätigt anhand der gemessenen Kraft-Durchbiegungsverläufe ein phänomenologisch ähnliches Verhalten der verschiedenen Balkenversuche. Alle Versuche zeigten nach Entstehung eines abgeschlossenen Biegerissbildes (Zustand II) eine annähernd konstante Biegesteifigkeit. Die Ausbildung des kritischen Schubrisses führte in allen Versuchen zu einem Lastabfall. Nur beim Referenzbalken C_S_cTR_nSR (2) konnte die Last nach Entstehung dieses Risses noch einmal auf das Schubrisslastniveau gesteigert werden. Durch die anwachsende Dübelbeanspruchung entstand ein Horizontalriss entlang der Längsbewehrung. Bei beiden gegossenen Balken kam es nach dem Dübelriss zu einem zweiten Schubriss, der aus einem bereits vorhandenen Biegeriss entstand. Bei den gedruckten Balken vergrößerte sich hingegen der Schubriss, bis schließlich eine Betonabplatzung an der Oberkante entstand. Bei allen Balken blieb die Längsbewehrung intakt. An verschiedenen Stellen stellte sich eine Umlenkung des gekrümmten Schubrissverlaufes entlang der horizontalen Druckschichten ein, was auf einen reduzierten Verbund in der Fuge hindeutet.

Tabelle 4.23: Zusammenfassung der Versuchsergebnisse der Querkraftbalken ohne QKB

Balken	Material f_{cm} [N/mm ²]	Abmessungen			Prüfkraft F_{max} [N]	Normierte Prüfkraft $\frac{F_{max}}{A \cdot \sqrt[3]{f_{cm}}}$
		b [mm]	d [mm]	A [mm ²]		
C_S_cTR_nSR (1)	42,23	110	225	29700	52004	0,503
C_S_cTR_nSR (2)	42,23	110	225	29700	62872	0,608
P_S_cTR_nSR (1)	42,23	130	240	41500	70387	0,487
P_S_cTR_nSR (2)	42,23	130	240	41500	83133	0,575

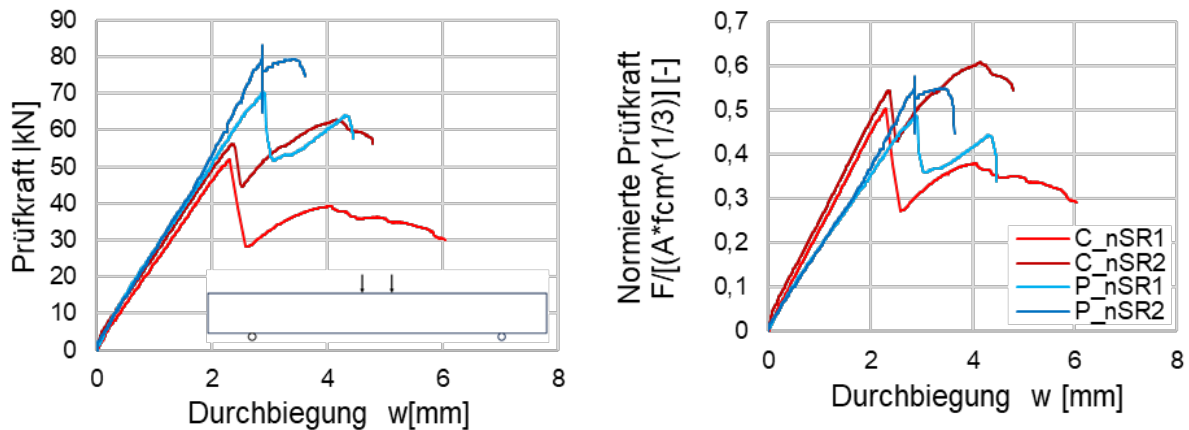


Bild 4.75: Kraft-Durchbiegungs-Beziehung der Querkraftbalken ohne QKB

Vor Normierung wiesen die gedruckten Balken höhere Bruchlasten als die gegossenen Versuchskörper auf, was auf die größere Querschnittsfläche zurückzuführen ist. Nach Normierung der Prüfkörper liegen die Ergebnisse in einer vergleichbaren Größenordnung. Im Durchschnitt weisen die gegossenen Balken eine 4,56% höhere normierte Prüfkraft auf als die gedruckten Balken auf. Zudem deuten die bezogenen Verläufe im Bild 4.75 (rechts) auf eine im gewissen Maße reduzierte Biegesteifigkeit der additiv gefertigten Bauteile hin. Dies ist auf eine gegenüber monolithischen Bauteilen weichere Ausführung der Grenzschichten zwischen verschiedenen Filamenten zurückzuführen. Allerdings ist eine detaillierte Auswertung durch die Normierung auf die gesamte Querschnittsfläche nicht direkt möglich, da für die Auswertung der Biegesteifigkeit im gerissenen Beton nur die Fläche der sich über den Belastungsverlauf verändernden Druckzone relevant ist.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die gedruckten Stahlbetonbalken dieser Serie, sowohl in der normierten Prüfkraft als auch im Hinblick auf den Versagensprozess, keine signifikanten Abweichungen zu regulär gegossenen Stahlbetonbalken aufwiesen.

Bauteile mit Mindestquerkraftbewehrung ($\rho_w = 1,02\rho_{w,min}$)

(1) Überblick

In Tabelle 4.24 sind die Eigenschaften der Querkraftversuche mit Mindestquerkraftbewehrung zusammengefasst.

Tabelle 4.24: Eigenschaften der Querkraftbalken mit Mindestquerkraftbewehrung

Balken	Abmessungen [mm]				Querkraftbewehrung (maßgebende Seite)	Wassergehalt	Alter
	h	b	l _s	d	[mm]	[l/h]	[Tage]
C_S_cTR_cSR400 (1)	270	110	1700	225	2×Ø8	370	24
C_S_cTR_cSR400 (2)							
P_S_cTR_cSR400 (1)	270-293	130-140	1700	240	2×Ø8	370	24
P_S_cTR_wSR400 (1)							
P_S_cTR_cSR400 (2)	270-293	140-150	1700	240	2×Ø8	370-350	17
P_S_cTR_wSR400 (2)							

Da jeweils ein Balken mit kontinuierlicher Querkraftbewehrung und ein Balken mit geschweißter Querkraftbewehrung gleichzeitig hergestellt wurden, haben P_S_cTR_cSR400 (1) und P_S_cTR_wSR400 (1) sowie P_S_cTR_cSR400 (2) und P_S_cTR_wSR400 (2) identische Materialeigenschaften.

(2) Rissentwicklung

Die Rissbilder der Querkraftbalken mit Mindestquerkraftbewehrung sind in Bild 4.76 dargestellt.

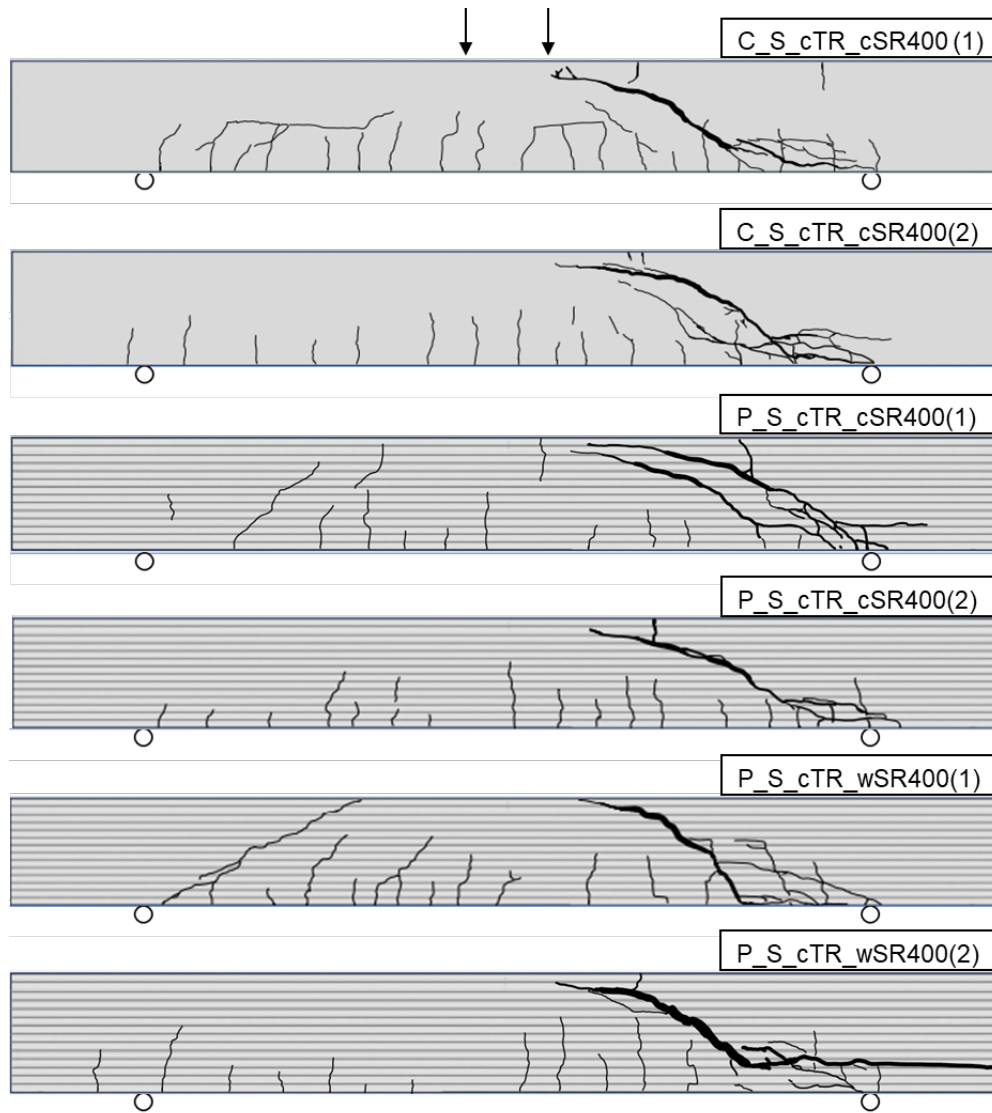


Bild 4.76: Rissbilder der Querkraftbalken mit Mindestquerkraftbewehrung ($\rho_w = 1,02\rho_{w,min}$)

C S cTR cSR400 (1) und C S cTR cSR400 (2)

Zunächst bildeten sich bei beiden gegossenen Referenzversuchskörpern Biegerisse in Feldmitte aus. Die Entstehung des kritischen Schubriss trat bei 65 kN bzw. 64 kN auf. Der kritische Schubriss entwickelte sich hierbei aus dem letzten Biegeriss vor dem Auflager und wuchs schlagartig in die Druckzone hinein. Die Schubrissbildung ging mit einem Kraftabfall von 6 kN bzw. 15 kN einher. Anschließend bildete sich ein in Richtung des Auflagers wachsender Dübelriss aus. Die Prüfkraft konnte hierbei in beiden Versuchen noch einmal deutlich gesteigert werden, was auf die Wirkung der Mindestquerkraftbewehrung zurückzuführen ist. Während

der Laststeigerung bildete sich unterhalb des jeweils zuerst entstandenen kritischen Schubrisses ein weiterer flacher geneigter sekundärer Schubriss aus, zudem nahm die Rissöffnung der Biegerisse deutlich zu.

P S cTR cSR400 (1) und P S cTR cSR400 (2)

Das grundsätzliche Rissverhalten des gedruckten Versuchskörpers P_S_cTR_cSR400 (1) mit kontinuierlicher Querkraftbewehrung war gut mit dem Verhalten der gegossenen Bauteile vergleichbar, wobei nach der Entstehung des kritischen Schubrisses bei 63 kN die Belastung noch einmal erheblich auf 93 kN gesteigert werden konnte, bevor es zum Druckzonenversagen kam. Nach Abschluss des Versuches wurde der Versuchskörper zersägt. Dabei zeigten sich Fehlstellen in der Mitte des Balkenquerschnitts zwischen den beiden extrudierten Betonschichten. In der Versuchskörperhälfte, in der der kritische Schubriss auftrat, bildete sich zudem im Bereich der Fehlstellen ein Delaminationsriss entlang der vertikalen Querkraftbewehrung aus, der zum Spalten des Betonquerschnitts führte, siehe Bild 4.77 rechts.



Bild 4.77: Verbundversagen beider Filamente des Prüfkörpers P_S_cTR_cSR400 (1): Schubfeld ohne Schubriss (links); Maßgebendes Schubfeld mit Schubriss (rechts)

In Bild 4.79 ist die Rissentwicklung des Versuchskörpers P_S_cTR_cSR400 (2) bei verschiedenen Laststufen (A, B, C in Bild 4.78 links) mithilfe der digitalen Bildkorrelation analysiert dargestellt. Zu Beginn der Belastung kam es zu mehreren Biegerissen an der Unterseite des Balkens.

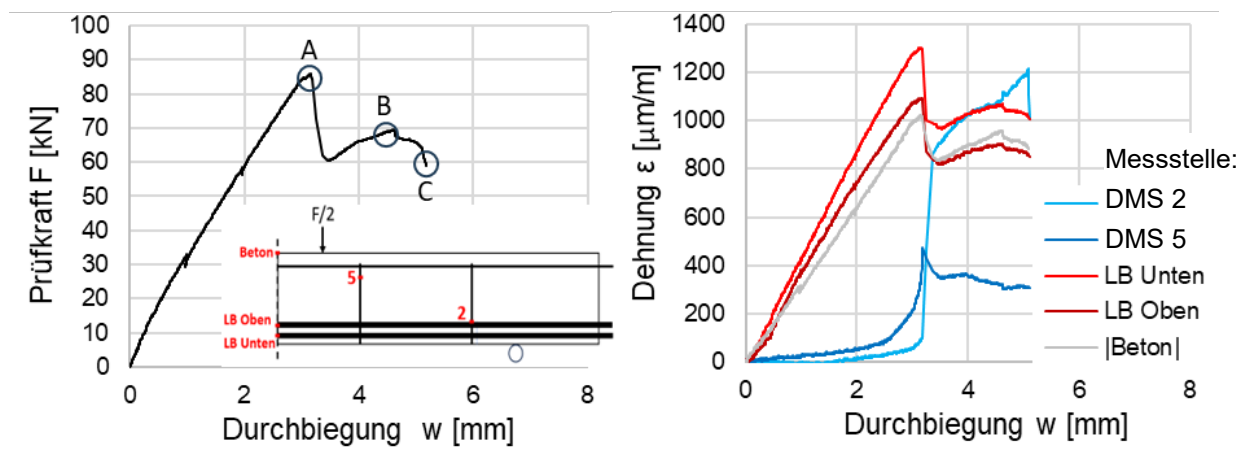


Bild 4.78: Kraft/ Dehnung-Durchbiegung-Beziehung des Prüfkörpers P_S_cTR_cSR400 (2) mit kontinuierlicher QKB

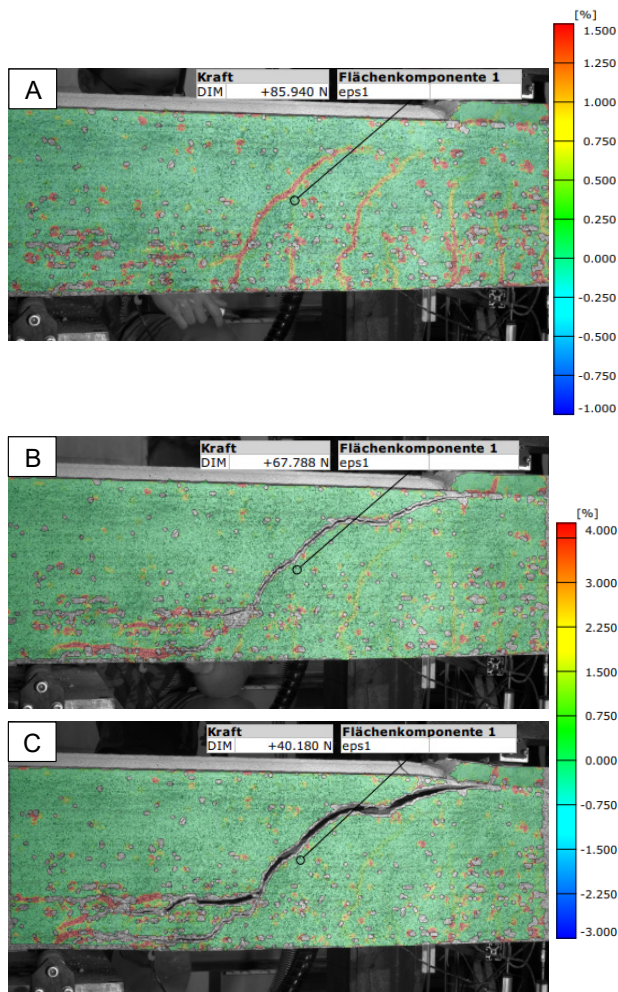


Bild 4.79: Rissentwicklung des Prüfkörpers P_S_cTR_cSR400 (2) mithilfe digitaler Bildkorrelation

Bis zu einer Last von 86 kN entwickelten sich aus den Biegerissen zwei Schubrisse in Richtung Lasteinleitungsbereich (A). Die Laststeigerung verlief zu Beginn linear (Bild 4.78). Die Entstehung des äußeren Schubrisses (A) führte zu einem Querkraftabfall von 26 kN. In Bild 4.78 (rechts) ist die Aktivierung der Querkraftbewehrung deutlich zu erkennen. Für beide Querkraftbewehrungselemente blieb die gemessene Stahldehnung unterhalb der Fließdehnung, was auf die Position der Querkraftbewehrungsstäbe in Auflagernähe bzw. Lastnähe zurückgeführt werden kann. Bei 69 kN kam es zum Versagen der Druckzone gekennzeichnet durch eine Betonabplatzung. Ähnlich wie bei P_S_cTR_cSR400 (1) kam es zum Verbundversagen der beiden gedruckten Betonfilamente.

P S cTR wSR400 (1) und (2)

In den gedruckten Versuchen mit geschweißter Querkraftbewehrung zeigte sich ein ähnliches Verhalten wie in den Versuchen mit kontinuierlicher Querkraftbewehrung, wobei im Mittel etwas höhere Tragfähigkeiten erreicht wurden. Die Schubrissbildung und anschließende Kraftaufnahme erfolgten auf etwas höherem Niveau

(Bild 4.78). Auch der im Betonquerschnitt beobachtete Delaminationsriss wurde beobachtet.

(3) Last-Verformungsverhalten

Anhand von Bild 4.80 und Tabelle 4.28 ist zu erkennen, dass sich die Balken bei geringer Beanspruchung kaum von Balken ohne Querkraftbewehrung unterscheiden.

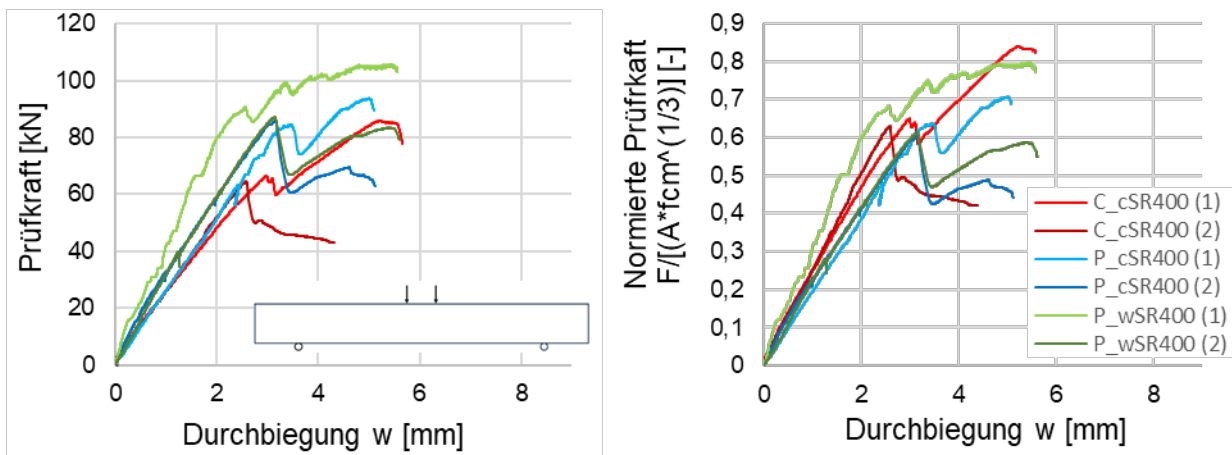


Bild 4.80: Kraft-Durchbiegungs-Beziehung der Querkraftbalken mit ($\rho_w = 1,02\rho_{w,min}$)

Der Einfluss der Querkraftbewehrung wurde erwartungsgemäß erst wirksam, sobald sie durch den Riss gekreuzt wurde. Die Rissöffnung erzeugte dann eine Dehnung in der Querkraftbewehrung, die der weiteren Rissöffnung entgegenwirkte. Der Biegeschubriss drang hierdurch langsamer in die Druckzone vor, wodurch die Maximallast der Balken mit Mindestquerkraftbewehrung gegenüber unbewehrten Balken gesteigert werden konnte. Die Maximallast wurde hierbei in der Regel erst nach Entstehung des Schubrisses erreicht. Bei allen Balken blieb die Längsbewehrung intakt.

Nur bei dem gegossenen Balken C_S_cTR_cSR400 (2) kam es nach der Entstehung des Schubrisses zu keinem erneuten Lastanstieg. Offenbar konnte die Querkraftbewehrung den Rissfortschritt in die Druckzone hier nicht ausreichend verhindern, sodass ein erneuter Lastanstieg nicht möglich war. Alle anderen Balken mit Mindest-QKB wiesen hingegen einen höheren Lastanstieg nach der Bildung des ersten Schubrisses auf. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das Einlegen der Mindestquerkraftbewehrung einem schlagartigen Versagen der Prüfkörper entgegenwirkt und zusätzliche Tragkapazitäten nach Bildung des ersten Schubrisses generiert. Abgesehen vom gedruckten Balken P_S_cTR_wSR400 (1), bei dem eine andere Form der Lasteinleitung (Gipsbett) gewählt wurde, wiesen alle gedruckten Balken eine ähnliche Last-Verformungskurve auf. Auch in dieser Versuchsserie wurden an verschiedenen Stellen der gedruckten Bauteile eine Umlenkung des gekrümmten Schubrissverlaufes entlang der horizontalen Druckschichten beobachtet, was auf einen verminderten Verbund in der Fuge hindeutet.

Tabelle 4.25: Versuchsergebnisse der Querkraftbalken mit Mindest-QKB ($\rho_w = 1,02\rho_{w,min}$)

Balken	Material f_{cm} [N/mm ²]	Abmessungen			Prüfkraft F_{max} [N]	Normierte Prüfkraft $\frac{F_{max}}{A \cdot \sqrt[3]{f_{cm}}}$
		b [mm]	d [mm]	A [mm ²]		
C_S_cTR_cSR400 (1)	40,81	110	225	29700	85921	0,840
C_S_cTR_cSR400 (2)	40,81	110	225	29700	64444	0,630
P_S_cTR_cSR400 (1)	40,81	130	240	38500	93787	0,708
P_S_cTR_cSR400 (2)	41,95	145	240	40900	85840	0,604
P_S_cTR_wSR400 (1)	40,81	130	240	38500	105811	0,798
P_S_cTR_wSR400 (2)	41,95	145	240	40900	87116	0,613

Durch eine Normierung der Prüfkraft fallen die unterschiedlichen Kraft/Durchbiegungslinien näher zusammen, weil hierdurch geometrische Abweichungen der 3D-gedruckten Bauteile teilweise herausgerechnet werden können. Nach Normierung weisen die gegossenen Balken im Durchschnitt eine 8,01% höhere Tragfähigkeit auf als die gedruckten Balken. Nach Normierung wiesen die Balken mit geschweißter Querkraftbewehrung eine 7,6% höhere Maximalkraft auf als die Balken mit kontinuierlicher Bewehrung, was auf einen besseren Verbund der geschweißten Querkraftbewehrung hindeutet.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die gedruckten Balken dieser Serie lediglich kleine Abweichungen im Tragverhalten zu regulär gegossenen Stahlbetonbalken zeigten. Dies be-

trifft sowohl die normierte Prüfkraft als auch den Versagensvorgang. Unterschiede in der Ausführung der Schubzulagen (geschweißt oder kontinuierlich) hatten lediglich einen moderaten Einfluss auf die Tragfähigkeit der Balken.

Bauteile mit 2,5-facher Mindestquerkraftbewehrung ($\rho_w = 2,54 \rho_{w,min}$)

(1) Überblick

In Tabelle 4.26 sind die Eigenschaften der Querkraftversuche mit 2,5-facher Mindestquerkraftbewehrung zusammengefasst. Da auf jeder Bahn gleichzeitig ein Balken mit kontinuierlicher Querkraftbewehrung und ein Balken mit geschweißter Querkraftbewehrung gedruckt wurden, haben P_S_cTR_cSR160 (1) und P_S_cTR_wSR160 (1) sowie P_S_cTR_cSR160 (2) und P_S_cTR_wSR160 (2) identische Materialeigenschaften. Neben den Querschnittsabmessungen sind auch die Spannweiten der verschiedenen Versuche angegeben, die im Laufe der Versuchsserie variiert wurden.

Tabelle 4.26: Eigenschaften der Querkraftbalken mit 2,5-facher Mindest-QKB

Balken	Abmessungen [mm]				Querkraftbewehrung (maßgebende Seite)	Wassergehalt	Alter
	h	b	l _s	d	[mm]	[l/h]	[Tage]
C_S_cTR_cSR160 (1)	270	110	1700	225	5×Ø8	370	24
C_S_cTR_cSR160 (2)	270	110	2100	225	5×Ø8	370	24
P_S_cTR_cSR160 (1) P_S_cTR_wSR160 (1)	270-293	130-140	2000	240	5×Ø8	370-360	20
P_S_cTR_cSR160 (2) P_S_cTR_wSR160 (2)	270-293	132-145	2000	240	5×Ø8	370-360	20

(2) Rissentwicklung

Die Rissbilder der Querkraftversuche mit 2,5-facher Mindestquerkraftbewehrung befinden sich in Bild 4.81.

C S cTR cSR160 (1) und C S cTR cSR160 (2)

Bei diesen Versuchen handelte es sich um gegossene Referenzversuche mit 2,5-fachem Mindestbewehrungsgrad. Bis zu einer Last von 75 kN kam es zur Bildung von mehreren Biegerissen entlang der Unterkante des Balkens. Bei einer Last von 155 kN entstanden jeweils 3 Schubrisse. Der Rissfortschritt des Dübelrisses in Richtung Auflager und des kritischen Schubrisses in Richtung Betondruckzone verliefen langsam, da die Rissöffnung durch die Querkraftbewehrung kontrolliert wurde. Die vollständige Auswertung beider Balken ist allerdings leider nur bedingt möglich, da es bei der Versuchsdurchführung zu Komplikationen kam. Im ersten Teilversuch wurde eine Maximallast von 155 kN erreicht, ohne dass ein Bruch auftrat. Hier schaltete sich der auf 160 kN ausgelegte Prüfzylinder aus Sicherheitsgründen ab, wobei nicht alle Messwerte vollständig dokumentiert werden konnten. In einer anschließenden Wiederbelastung des Prüfkörpers versagte dieser bei einer Prüfkraft von 152 kN. Obwohl es eine sehr hohe Anzahl an Biegerissen gab, versagte der Prüfkörper durch das Vordringen des Schubrisses in die Druckzone. Gleichzeitig kam es zu einer Betonabplatzung entlang der Längsbewehrung kurz vor dem Auflager, was auf eine Dübelwirkung hinwies.

Um im zweiten Referenzversuch C_S_cTR_cSR160 (2) und der restlichen Versuchsserie ein erneutes Erreichen der Prüfzylinderkapazität zu verhindern, wurde die Spannweite auf 2,1 m erhöht. Die Verankerungslänge betrug dadurch nur 0,1 m pro Seite (bei den vorherigen Prüfkörpern 0,3 m pro Seite). Bei einer Last von 84 kN kam es zu einem ersten Schubriss, der sich ausgehend von einem Biegeriss in Richtung Kraftereinleitungspunkt entwickelte. Bei einer Last von 122 kN kam es auf der Balkenseite mit erhöhter Querkraftbewehrung zu einem schlagartigen Verankerungsversagen der Biegezugbewehrung. Der Riss verlief oberhalb der Querkraftbewehrung und folgte dann einem bogenartigen Verlauf in Richtung Auflager, was zu Betonabplatzungen führte. Die Verankerungslänge wurde für die weiteren Untersuchungen daher auf 0,15 m erhöht.

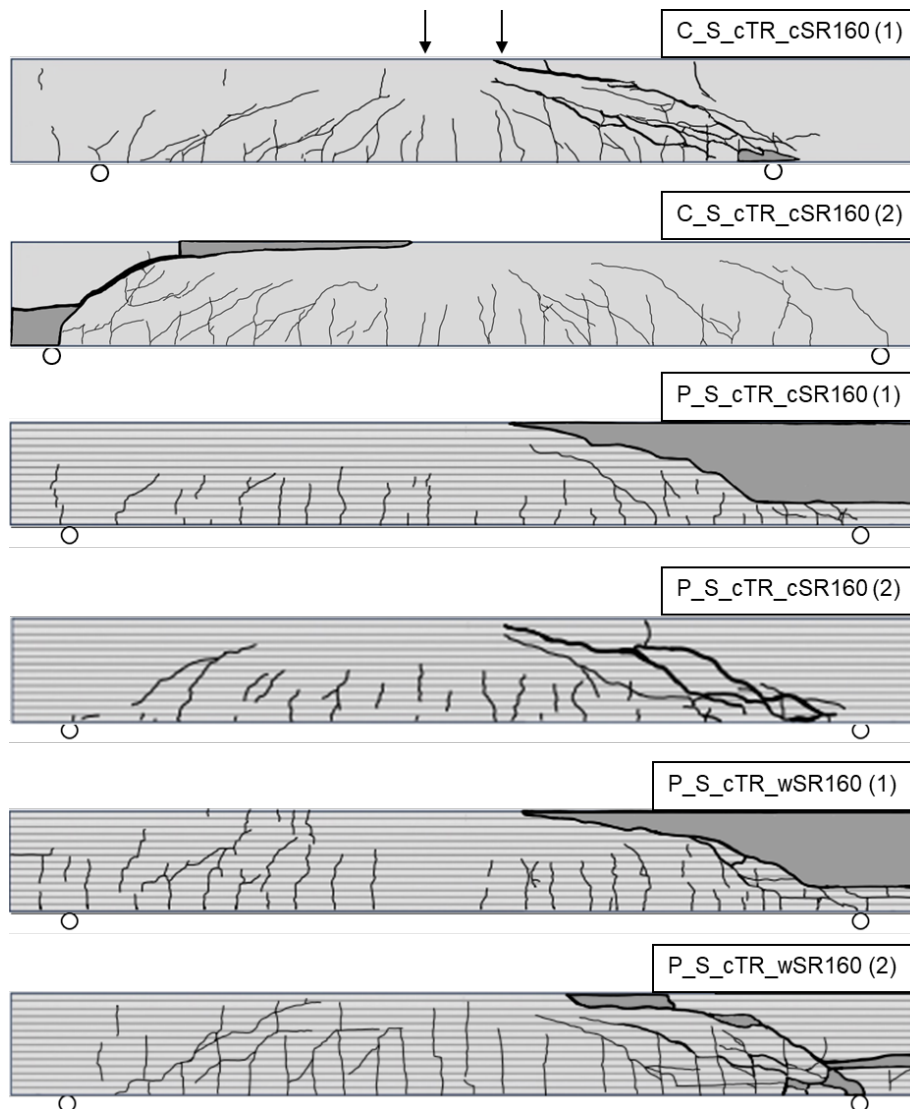


Bild 4.81: Rissbilder der Querkraftbalken mit 2,5-fach Mindest-QKB ($\rho_w = 2,54\rho_{w,min}$)

P_S_cTR_cSR160 (1) und P_S_cTR_cSR160 (2)

Die gedruckten Balken mit 2,5-facher Mindest-QKB wurden abweichend von den anderen Querkraftversuchen mit einer Spannweite von 2,0 m (anstelle von 1,7 m) getestet, so dass eine direkte Vergleichbarkeit nicht mehr gegeben ist. Bei 90 kN bzw. 92 kN bildeten sich in beiden Versuchskörpern mehrere geneigte Schubrisse aus. Die Querkraftbewehrung war hierbei in der Lage, die Rissbreite zunächst wirksam zu begrenzen. Die Dehnungen der Querkraftbewehrung nahmen über den Belastungsverlauf erwartungsgemäß zu.

Bei einer Last von 99 kN kam es im Versuch P_S_cTR_cSR160 (1) zu einer deutlichen Aufweitung des kritischen Schubrisses und seinem Vordringen in die Druckzone. Hierbei trat gleichzeitig ein Aufspalten des Versuchskörpers in seiner Mittelachse auf, dass durch einen Delaminationsriss entlang der Querkraftbewehrung verursacht wurde. Die Entstehung dieses Delaminationsrisses ist auf Fehlstellen im oberen Bereich des Versuchskörpers zurückzuführen, siehe Bild 4.82. Diese Fehlstellen sind herstellbedingt und durch eine Reduzierung der Pumpendrehzahl im oberen Teil des Versuchskörpers zu erklären. Durch die Reduzierung der Fördermenge wurde im oberen Teil des Versuchskörpers zu wenig Beton extrudiert, um ausreichenden Verbund zwischen den benachbarten Filamenten und der in der Mitte liegenden Querkraftbewehrung zu erreichen.

Im Versuch P_S_cTR_cSR160 (2) wurde hingegen keine Reduzierung der Fördermenge vorgenommen. Die nachträgliche Auswertung des Querschnittes zeigte, dass es auf der ungerissenen Balkenseite kaum Fehlstellen zwischen benachbarten Filamenten gab. Lediglich im Bereich einzelner vertikaler Querkraftbewehrungsstäbe wurden kleinere Fehlstellen detektiert. Diese waren jedoch nicht signifikant genug um eine vollständige Sprengung des Versuchskörpers (wie bei P_S_cTR_cSR160 (1)) zu verursachen. Aus diesem Grund konnte im Versuch P_S_cTR_cSR160 (2) eine deutliche höhere Maximallast von 126 kN erreicht werden. Hierbei bildeten sich drei geneigte Schubrisse aus. Das Versagen des Prüfkörpers wurde durch ein Vordringen der Risse in die Druckzone verursacht. Im Nachbruchbereich kam es zudem erneut zum Auftreten des mittig verlaufenden Delaminationsrisses, allerdings ohne ein vollständiges Zerfallen des Versuchskörpers in zwei Hälften (wie bei P_S_cTR_cSR160 (1)).

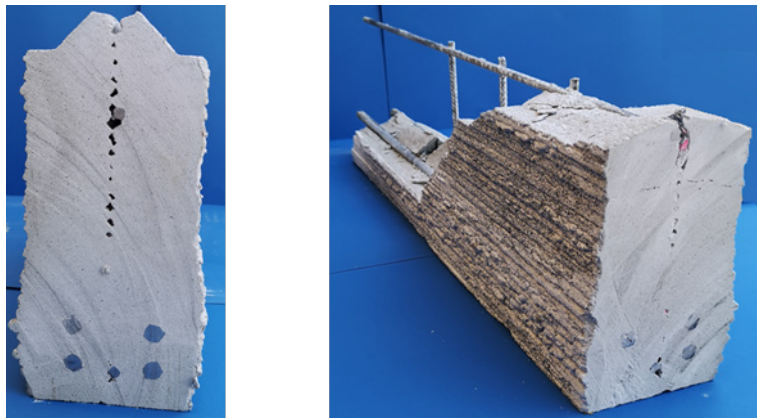


Bild 4.82: Fehlstellen im Querschnitt an der nicht maßgebenden Seite (links) und Betonabplatzung an der maßgebenden Seite (rechts) des Prüfkörpers P_S_cTR_cSR160 (1)

P_S_cTR_wSR160 (1) und P_S_cTR_wSR160 (2)

Bei diesen Versuchen handelte es sich um gedruckte Bauteile mit geschweißter Querkraftbewehrung. Der Balken P_S_cTR_wSR160 (1) wurde gemeinsam mit P_S_cTR_cSR160 (1) hergestellt, so dass auch dieser Balken Fehlstellen infolge der Betonfördermengenreduzierung aufwies. Der kritische Schubriss entstand bei P_S_cTR_wSR160 (1) mit geschweißter Querkraftbewehrung ebenfalls bei 90 kN und es kam beim Prüfkörperversagen (104 kN) zur vollständigen Sprengung des Versuchskörpers entlang des innenliegenden Delaminationsrisses. Nach Auswertung des zersägten Querschnitts wurden identische Fehlstellen wie in P_S_cTR_cSR160 (1) festgestellt. Die geschweißte Querkraftbewehrung führte zu einer leicht höheren Bruchlast als im Versuch mit kontinuierlicher Querkraftbewehrung. Im Versuch P_S_cTR_wSR160 (2) kam es bis zu einer Belastung von 100 kN zur Entstehung zahlreicher

Biegerisse, die sich teilweise zu Schubrisse entwickelten. Vereinzelt zeigten sich Verbundbrüche zwischen einzelnen gedruckten Schichten, die anhand der kurzen, horizontal verlaufenden Risse zu erkennen waren (A), siehe Bild 4.83 und Bild 4.84.

Nach einer kurzen Abnahme der Kraft auf 97 kN infolge der Entstehung und Aufweitung des mittleren Schubrisses, stieg die Prüfkraft auf 116 kN. Durch die Entstehung des Schubrisses

wurde die Querkraftbewehrung aktiviert (B). Hierbei erreichten einige Bewehrungselemente die Fließgrenze. Anders als die Querkraftbewehrungsstäbe in der Mitte des Schubfeldes erfuhren die Bewehrungsstäbe 1 und 6 in der Nähe der Lasteinleitung bzw. des Auflagers kaum Dehnungen und wurden teilweise sogar gestaucht. Stab 1 lag unter dem Kräfteinleitungspunktes und wurde deswegen nicht durch geneigte Schubrisse gekreuzt.

Die Steifigkeit des Balkens nahm aufgrund der Rissbildung immer weiter ab, was an der sinkenden Steigung der Kraft-Durchbiegungs-Kurve erkennbar war. Bei Erreichen der Maximallast von 136 kN kam es zur Entstehung horizontal entlang der Längsbewehrung verlaufender Dübelrisse (C). Gleichzeitig wuchsen die Schubrisse in die Druckzone hinein und schnürten diese ein. Im Nachbruchbereich bildete sich auch hier der bereits bei den zuvor beschriebenen Versuchen beobachtete vertikale Delaminationsriss entlang der Querkraftbewehrung.

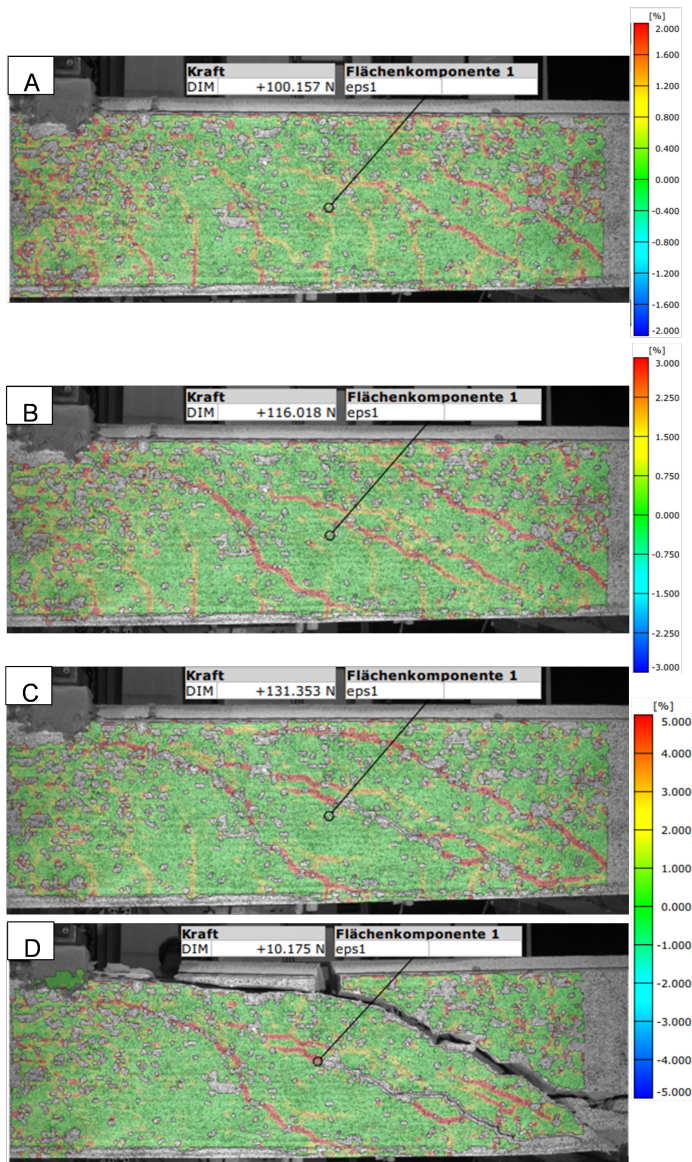


Bild 4.83: Rissentwicklung des Prüfkörpers P_S_cTR_wSR160 (2)

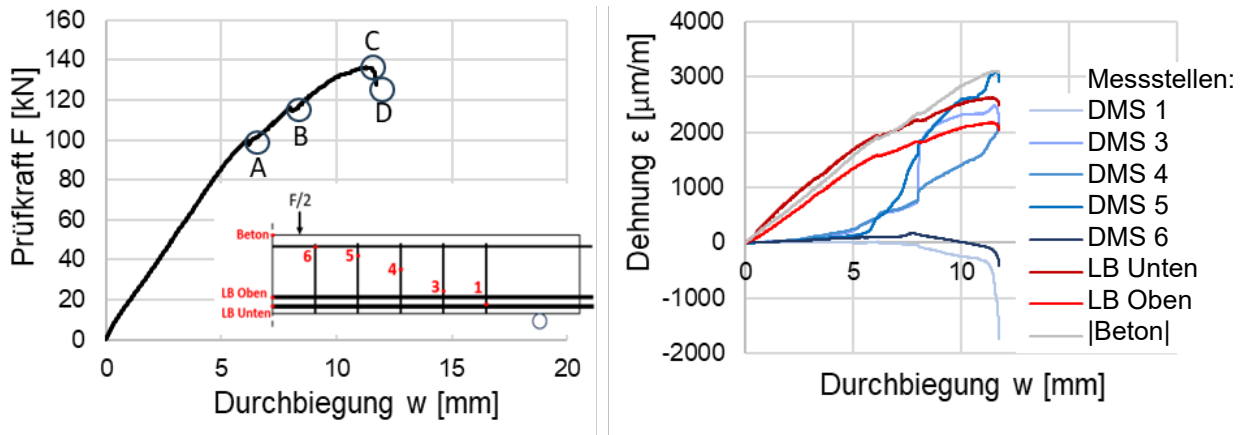


Bild 4.84: Kraft/ Dehnung-Durchbiegung-Beziehung des Prüfkörpers P_S_cTR_wSR160 (2) mit geschweißter QKB

Einfluss der Ausführung der QKB (kontinuierlich vs. geschweißt)

In den Versuchen mit geschweißter Querkraftbewehrung wurden im Mittel leicht erhöhte Tragfähigkeiten erreicht. Dies kann auf den besseren Verbund der geschweißten Stäbe zurückgeführt werden. Der an der Fugestelle entstehende Schweißwulst wirkte wie eine besonders ausgeprägte Betonstahlrippe, was zu einer besseren Aktivierung der geschweißten Bewehrungsstäbe beitrug. Grundsätzlich war der Effekt in den vorliegenden Versuchen aber von eher untergeordneter Bedeutung. Die beiden Bewehrungsvariationen unterschieden sich hinsichtlich der Endfestigkeit und Rissbildung kaum.

(3) Last-Verformungsverhalten

Die Erhöhung des Querkraftbewehrungsgrades führte erwartungsgemäß zu einer Steigerung des Querkraftwiderstandes der Balken, siehe Tabelle 4.27 und Bild 4.85. Da die beiden Referenzbalken leider unplanmäßige Versagensbilder aufwiesen, wurden Sie für die folgende Auswertung nur bedingt berücksichtigt.

Tabelle 4.27: Versuchsergebnisse der Querkraftbalken mit 2,5-facher Mindest-QKB ($\rho_w = 2.54\rho_{w,min}$)

Balken	Material f_{cm} [N/mm ²]	Abmessungen			Prüfkraft F_{max} [N]	Normierte Prüfkraft $\frac{F_{max}}{A \cdot \sqrt[3]{f_{cm}}}$
		b [mm]	d [mm]	A [mm ²]		
P_S_cTR_cSR160 (1)	42,43	135	240	37930	99168	0,750
P_S_cTR_cSR160 (2)	39,96	145	240	40089	126100	0,920
P_S_cTR_wSR160 (1)	42,43	135	240	37930	104078	0,787
P_S_cTR_wSR160 (2)	39,96	145	240	40089	136390	0,995

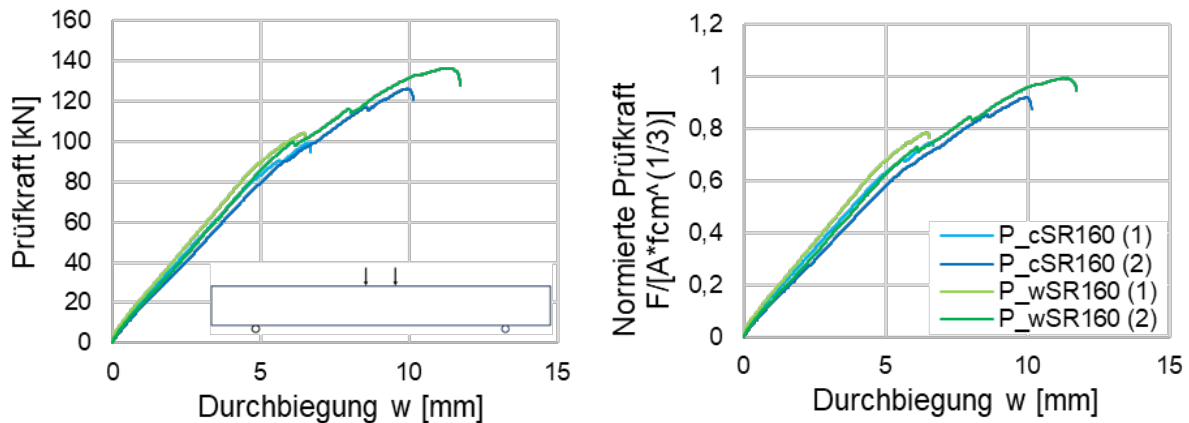


Bild 4.85: Kraft-Durchbiegungs-Beziehung der Querkraftbalken mit 2,5-fach Mindest-QKB ($\rho_w = 2,54\rho_{w,min}$)

Nach Normierung der Prüfkraft verschieben sich die Kraft-Durchbiegungs-Kurven in Bild 4.85 nur minimal, da es hier nur einen geringen Unterschied zwischen den unterschiedlichen Querschnitten und Druckfestigkeiten gab. Da die Referenzbalken leider nicht mit den gedruckten Balken verglichen werden können, entfällt hier eine direkte Gegenüberstellung. Die Balken mit geschweißter QKB wiesen eine 6,7% höhere normierte Tragfähigkeit auf als die Balken mit kontinuierlicher QKB.

4.4.5 Fazit

Nach Abschluss aller Versuchsreihen lässt sich zusammenfassen, dass die gedruckten Balken und die Referenzbalken ein ähnliches Versagensmuster aufwiesen. Hierbei konnten die gedruckten Balken eine vergleichbare, teilweise sogar höhere Belastung aufnehmen als die konventionell gegossenen Referenzbalken.

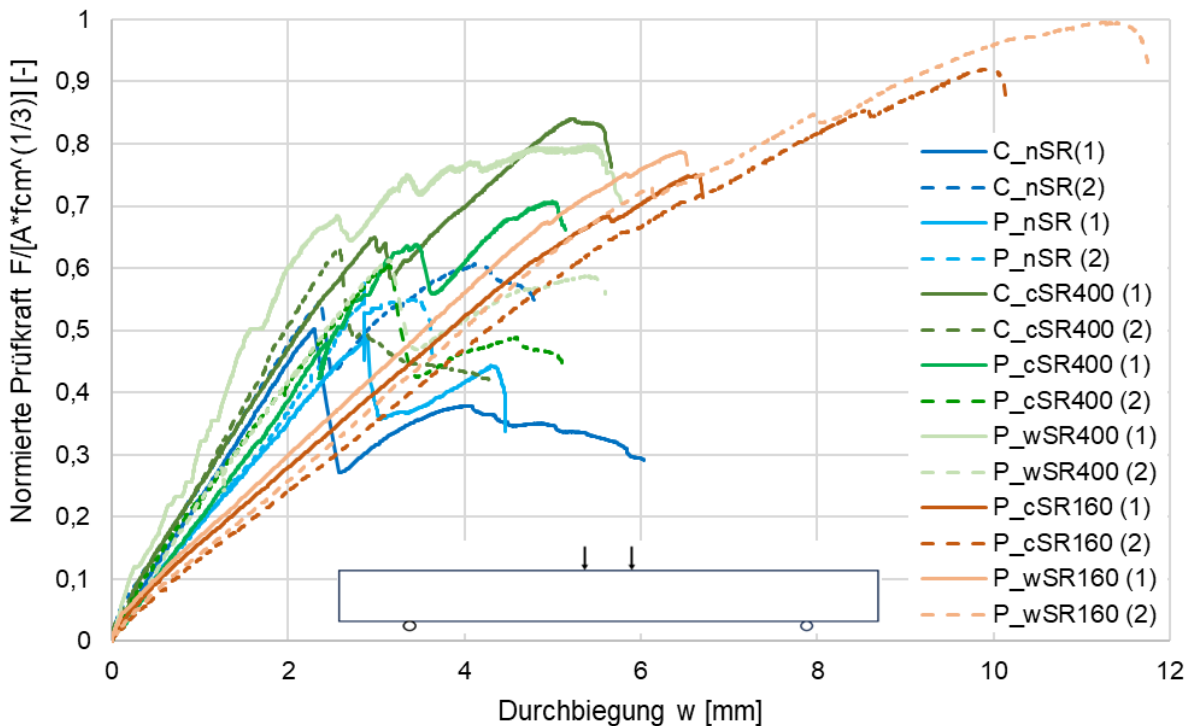


Bild 4.86: Normierte Kraft-Durchbiegungs-Beziehung aller Querkraftbalken

Anhand von Bild 4.86 ist zu erkennen, dass Balken mit Querkraftbewehrung erwartungsgemäß eine höhere normierte Prüfkraft aufnahmen als Balken ohne Querkraftbewehrung. Zur Vergleichbarkeit sind in Tabelle 4.28 die normierten Bruchlasten der Querkraftbalken dargestellt. Mit Mindestquerkraftbewehrung wurde nicht nur die Tragfähigkeit der Balken um 29% gesteigert, sondern auch deren Duktilität im Vergleich zu Balken ohne Querkraftbewehrung verbessert. Die höchste normierte Prüflast sowie maximale Durchbiegung wiesen die Balken mit einem Querkraftbewehrungsgrad von $\rho_w=2,54 \cdot \rho_{w,min}$ mit einer Steigerung der Tragfähigkeit von 59% im Vergleich zu Balken ohne Querkraftbewehrung auf, obwohl diese mit einer leicht erhöhten Schubschlankheit (λ) geprüft wurden. Nach Öffnung des Querkraftrisses war bei fast allen Balken mit Querkraftbewehrung eine weitere Laststeigerung möglich.

Tabelle 4.28: Zusammenfassung der Versuchsergebnisse der Querkraftbalken

Prüfkörper	$\frac{\rho_w}{\rho_{w,min}}$	λ	Herstellmethode	Querkraftbewehrungsart	max. normierte Kraft			
					$\frac{F_{max}}{A \cdot \sqrt[3]{f_{cm}}}$			
C_S_cTR_nSR	0	3,33	gegossen	/	0,503	0,608	0,543	
						0,555		
P_S_cTR_nSR	0	3,33	gedruckt	/	0,487	0,572	0,531	
						0,531		
C_S_cTR_cSR_400	1,02	3,33	gegossen	kontinuierlich	0,840	0,630	0,699	
						0,735		
P_S_cTR_cSR_400			gedruckt	kontinuierlich	0,708	0,604		0,656
P_S_cTR_wSR_400	gedruckt	geschweißt	0,798	0,613				
				0,706				
P_S_cTR_cSR_160	2,54	4	gedruckt	kontinuierlich	0,750	0,920	0,863	
						0,835		
P_S_cTR_wSR_160	2,54	4	gedruckt	geschweißt	0,787	0,995	0,888	
						0,888		

4.5 Biegeverhalten von 3D-gedruckten Stahlbetonbalken

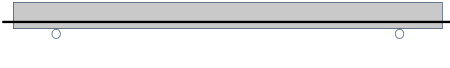

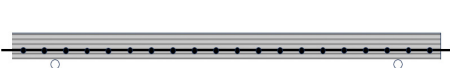
4.5.1 Ausgangsmaterialien

Die verwendeten Materialien für die Biegeversuchen sind analog zu den Verbund- und Querkraftuntersuchungen: Weber 3D 145-2 und Betonrippenstahl B500B. Die Ergebnisse der Materialprüfungen (Beton) befinden sich in Anhang.

4.5.2 Versuchsprogramm

Die Übersicht des Versuchsprogramms befindet sich in Tabelle 4.29. Es wurden zwei konventionell gegossene und vier additiv gefertigte Versuchskörper hergestellt. Um den Einfluss der geschweißten Bewehrung zu untersuchen, wurden zwei der gedruckten Balken mit kontinuierlicher Längsbewehrung und zwei mit geschweißter Längsbewehrung ausgeführt.

Tabelle 4.29: Übersicht des Versuchsprogramms zum Biegeverhalten

Beschreibung	Skizze	Anzahl	Bezeichnung
Biegebalken $\lambda=7,78$			
Gegossene Referenzbalken		2	C_B_cTR_nSR
Gedruckte Prüfkörper, kontinuierliche Längsbewehrung		2	P_B_cTR_nSR
Gedruckte Prüfkörper, geschweißte Längsbewehrung		2	P_B_wTR_nSR

Das Prinzip der Bezeichnung der Prüfkörper ist in Tabelle 4.20 zu finden.

4.5.3 Herstellung der Prüfkörper

Insgesamt entsprach das Verfahren zur Herstellung der Biegebalken dem Herstellprozess der Querkraftversuche.

Abmessungen der Prüfkörper

Tabelle 4.30: Kennwerte der Prüfkörper zur Biegeuntersuchung

Beschreibung	Anzahl der Prüfkörper	Zugbewehrung		Mischpumpensystem	Herstellungsmethode
		Menge	Type		
C_B_cTR_nSR	2	2 x Ø8	kontinuierlich	m-tec	gegossen
P_B_cTR_nSR	2	2 x Ø8	kontinuierlich	m-tec	gedruckt
P_B_wTR_nSR	2	2 x Ø8	geschweißt	Mai	gedruckt

Die Balkenabmessungen sind in Bild 4.87 dargestellt. Die Kennwerte der Prüfkörper sind in Tabelle 4.30 zusammengefasst.

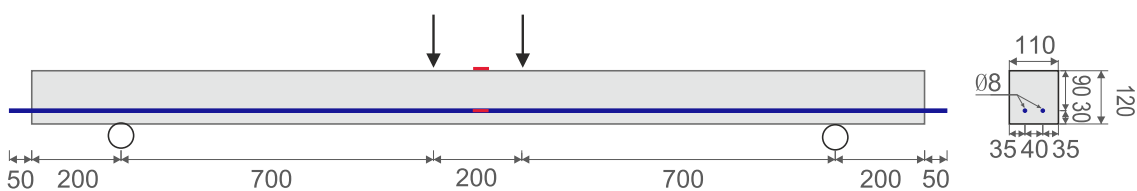


Bild 4.87: Abmessung der Prüfkörper zur Biegeuntersuchung

Schweißen der Längsbewehrung



Die geschweißte Längsbewehrung wurde aus 21 Bewehrungsstücken mit einer Länge von jeweils 100 mm gefügt, woraus sich eine Bewehrungsstablänge von 2,1 m ergab (Bild 4.88). Hierzu wurde das im Rahmen des Projektes entwickelte modifizierte Bolzenschweißverfahren eingesetzt. Die Applikation von DMS und die Positionierung der Längsbewehrung erfolgten analog zu den bereits beschriebenen Querkraftversuchen.

4.5.4 Versuchsaufbau und Messtechnik

Die Balken wurden im Vierpunktbiegeversuch mit einer Spannweite von 1,6 m (Abstand der Lasten entsprach 20 cm) getestet. Hierbei wurden IWA zur Durchbiegungsmessung sowie zur Messung des Schlupfes der Bewehrung verwendet. Zudem wurden die Dehnungen des Betons und des Stahls mit DMS in Balkenmitte aufgezeichnet.

Bild 4.88: geschweißte Längsbewehrung

4.5.5 Versuchsergebnisse

Überblick

Die ersten vier Biegebalken mit kontinuierlicher Längsbewehrung wurden mit der m-tec Mischpumpe hergestellt. Die Prüfkörper mit geschweißter Längsbewehrung wurden nach der Umrüstung des Mischsystems auf die Mai Multimix 3D Mischpumpe hergestellt.

Tabelle 4.31: Überblick der Eigenschaften der Biegebalken

Balken	Anzahl	Abmessungen [mm]				Längsbewehrung [mm]	Wassergehalt [l/h]	Alter [Tage]
		h	b	l _s	d			
C_B_cTR_nSR	2	120	110	1600	90	2×Ø8	225	42
P_B_cTR_nSR	2	120-140	130-145	1600	105	2×Ø8	225	42
P_B_wTR_nSR	2	110-135	136-150	1600	95	2×Ø8	360	20

Rissbilder

C_B_cTR_nSR (1) und C_B_cTR_nSR (2)

In beiden Versuchen waren ab einer Belastung von 0,5 kN bereits erste Biegerisse zu erkennen. Diese stellten sich in einem regelmäßigen Abstand von ca. 8 cm an der Balkenunterseite ein. Die Biegerisse drangen senkrecht zur Richtung der Hauptzugspannungen in den Querschnitt vor. Im Versuch C_B_cTR_nSR (1) wurde bei 11 kN die Fließgrenze der Bewehrung

erreicht und die Kraft konnte nicht weiter gesteigert werden. Nachdem die Bewehrung die Dehnung bei Erreichen der Streckgrenze überschritten hatte, wurde die Druckzone durch große Verformungen eingeschnürt und schließlich zerstört. Im Versuch C_B_cTR_nSR (2) blieb die Kraft ab 9,5 kN annähernd konstant, während die Rissbreite und Durchbiegung stark zunahmen. Die Biegetragfähigkeit wurde bei einer Last von 10,5 kN erreicht.

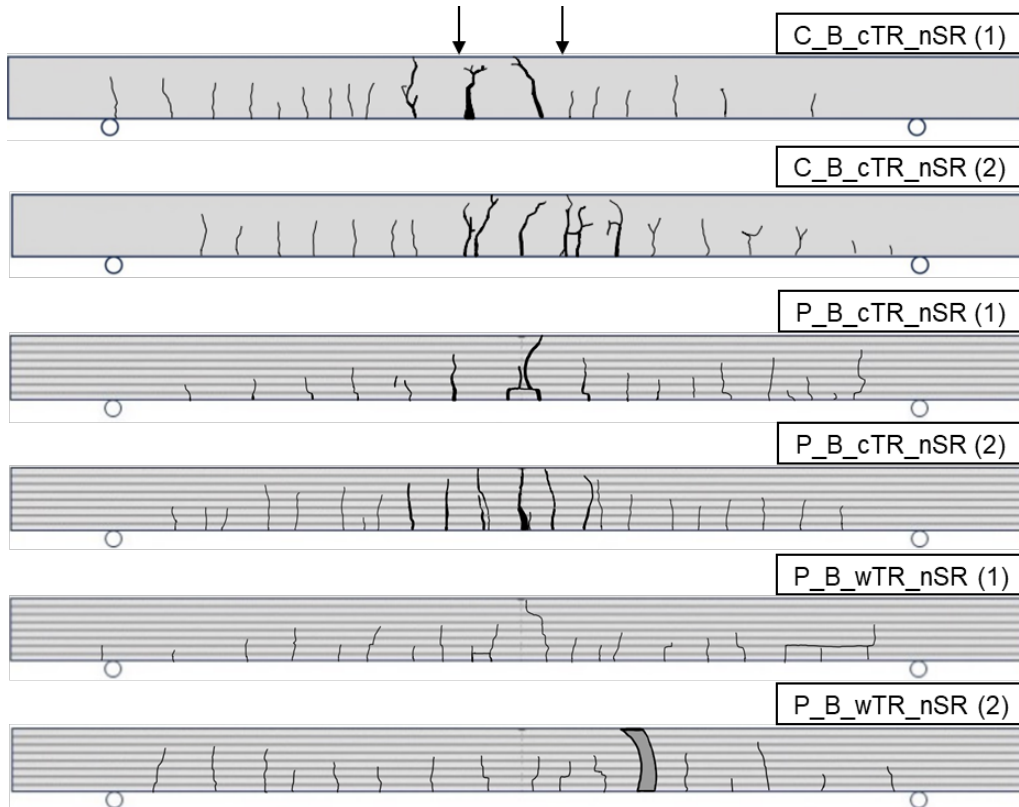


Bild 4.89: Rissbilder der Biegebalken

P_B_cTR_nSR (1) und P_B_cTR_nSR (2)

Bei den gedruckten Versuchen mit kontinuierlicher Längsbewehrung waren ab einer Belastung von 1 kN bereits mehrere Biegerisse erkennbar. Die Risse entwickeln sich vertikal in Richtung der Bauteiloberkante. Bei 14,05 kN kam es im Versuch P_B_cTR_nSR (1) zu einem Kraftabfall und anschließend zu einer erneuten Kraftsteigerung. Der Kraftabfall war auf die Entstehung eines horizontalen Verbundrisses zwischen der dritten und vierten Schicht in Balkenmitte zurückzuführen. Der Grund für das Verbundversagen ist wahrscheinlich eine kalte Fuge zwischen diesen Schichten, in denen die Längsbewehrung platziert wurde. Die Bruchlast wurde bei ca. 16 kN erreicht. Im Versuch P_B_cTR_nSR (2) entstand der Verbundriss bei 9,88 kN. Bei einer Last von 13,6 kN wurde die Fließgrenze erreicht und der Balken versagte.

P_B_wTR_nSR (1) und P_B_wTR_nSR (2)

Bei den gedruckten Versuchen mit geschweißter Längsbewehrung traten erste Biegerisse bei einer Belastung von 0,5 kN im Abstand von ca. 8 cm auf. Bei steigender Belastung setzten sich diese Risse senkrecht zur Richtung der Hauptzugspannungen in den Querschnitt fort, bis es im Versuch P_B_wTR_nSR (1) bei einer Belastung von 10,64 kN zu einem schlagartigem Kraftabfall kam. In Balkenmitte bildete sich ein Verbundriss zwischen der vierten und fünften Schicht aus. Gleichzeitig waren anhand der Dehnungsmessungen im Bewehrungsstahl unterschiedliche Dehnungssprünge zu erkennen – während ein Stab entlastet wurde, erhielt der

andere einen sprunghaften Dehnungszuwachs. Dies deutet auf einen Bruch eines Bewehrungsstabes in einer Schweißnaht hin. Die Kombination der bereits vorhandenen Biegerisse mit dem Verbundriss führten zu Betonabplatzungen an der Unterseite des Balkens. Im Bereich des linken Auflagers kam es zudem zu einem Verbundversagen in den gleichen Schichten.

Im Versuch P_B_wTR_nSR (2) kam es zu einem spröden Versagen des Prüfkörpers bei 10 kN und einer Dehnung der Längsbewehrung von 3‰. Eine Schweißnaht eines Bewehrungsstabes versagte und führte zum unmittelbaren Versagen einer Schweißnaht im anderen Stab. Ähnlich wie bei P_B_wTR_nSR (1) zeigten sich Verbundrisse auf der Höhe der Längsbewehrung, hervorgerufen durch die Druckpause während der Bewehrungsplatzierung.

Last-Verformungsverhalten

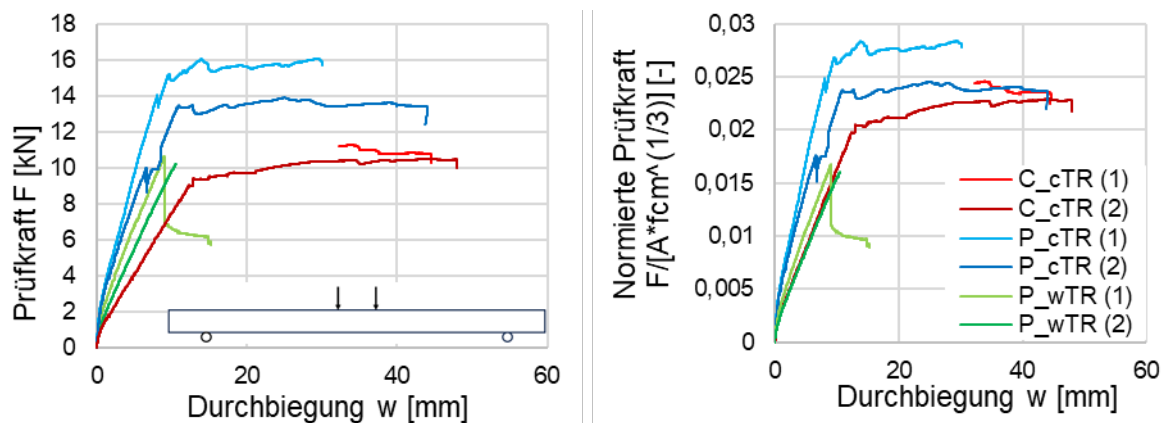


Bild 4.90: Kraft-Durchbiegungs-Beziehung der Biegebalken

Anhand von Bild 4.90 ist das linear elastische Tragverhalten bis zu einer Last von ca. 0,5 kN erkennbar. In Folge erster Biegerisse ging der Querschnitt von Zustand I (ungerissen) zu Zustand II (gerissen) über. Bei den gegossenen Referenzbalken und den gedruckten Prüfkörpern mit kontinuierlicher Längsbewehrung trat ein sekundäres Biegedruckversagen auf, bei dem infolge fließender Längsbewehrung die Druckzone eingeschnürt und schließlich zerstört wird. Es ist auffällig, dass die gedruckten Balken bis zum Erreichen der Fließgrenze ein steiferes Last-Verformungsverhalten aufwiesen, was vermutlich aus der versuchstechnisch notwendigen Ausgleichsschicht an den Lasteinleitungspunkten resultierte.

Bei den Prüfkörpern mit geschweißter Bewehrung zeigte sich ein spröder Bruch der Längsbewehrung in der Schweißnaht, nachdem der Stahl die Fließdehnung erreicht hatte. Zudem wurde ein Verbundriss zwischen den gedruckten Schichten beobachtet.

Nach Normierung der Versuchsergebnisse wiesen die gedruckten Balken mit kontinuierlicher Längsbewehrung im Durchschnitt eine 11,46% höhere normierte Prüfkraft als die gegossenen Referenzkörper auf. Dies ist unerwartet und steht im Widerspruch zu früheren Untersuchungen [Eng22], die eine um 15% geringere Tragfähigkeit aufzeigten. Wie bereits erwähnt, ist dies vermutlich auf die Verwendung der Mörtel- Ausgleichsschicht im Bereich der Lasteinleitung zurückzuführen. In zukünftigen Untersuchungen ist dies entsprechend anzupassen.

Die Prüfkörper mit geschweißter Bewehrung wiesen im Vergleich zu den gegossenen Referenzversuchen eine um ca. 45% geringere Tragfähigkeit auf. Das Risiko des spröden Versagens durch den Riss einer Schweißnaht wurde im Laufe des Projektes durch Optimierungen im Schweißprozess reduziert. Zukünftig kann dies durch weitere Anpassungen im Schweißprozess vermutlich vollständig vermieden werden (Stromstärke, Spannung etc.).

5 Prototypische Implementierung des AMoRC-Verfahrens

5.1 Allgemeines

Das vorliegende Projekt basiert auf einem neuartigen Konzept eines 3D-Druckverfahrens für Stahlbeton, dem sog. Additive Manufacturing of Reinforced Concrete (AMoRC). Das AMoRC-Verfahren wurde erstmals in [Cla20a] vorgeschlagen. Der ursprünglich konzipierte Prozess sah einen kombinierten Druckkopf zur schalungsfreien Ablage von Betonschichten vor, der gleichzeitig eine schweißtechnische Fertigungseinheit für die Bewehrung umfasste. Ein Ziel dieses Projektes war die Umsetzbarkeit des AMoRC-Verfahrens durch die Entwicklung geeigneter Extrusions- und Schweißwerkzeuge (siehe Kapitel 3) zu erforschen und prototypisch aufzuzeigen. Zur Implementierung von AMoRC wurden abweichend vom ursprünglich vorgeschlagenen Konzept zwei Roboterarme mit getrennten Funktionen eingesetzt: ein Roboter für die Betonextrusion und ein Roboter zum Einbringen und Schweißen der Bewehrung (Bild 5.1). Die gesamte Infrastruktur für den 3D-Druck bestand somit aus 2 Robotern auf Lineareinheiten, einer Betonmischpumpe, einer SPS und einem Schweißgerät (Bild 3.1). Die Prozesse wurden abwechselnd durchgeführt.

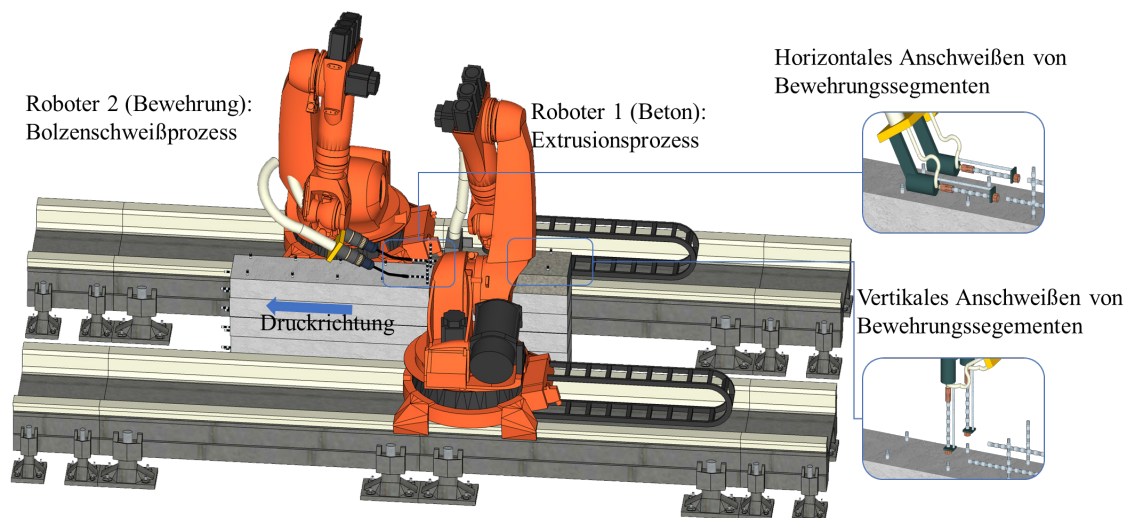


Bild 5.1: AMoRC-Verfahren mit zwei Robotern [Zha23]

5.2 Digitale Planung eines Demonstrators und Programmierung

Das Mockup des Gesamtprozesses sollte durch die Herstellung eines Stahlbetonbauteiles mit komplexer Wandgeometrie demonstriert werden. Für die Programmierung wurde Grasshopper benutzt, die in der CAD-Software Rhinoceros 3D ausgeführt wurde (Bild 5.2). Bei der Grasshopper-Programmierung wurde zuerst ein Startpunkt zur Objektgenerierung auf der Druckunterlage definiert. Die S-förmige Kurve wurde durch 5 punktsymmetrische Koordinaten (inkl. Startpunkt) definiert und die Form der S-Kurve durch den Krümmungsgrad der Funktion „*Interpolate*“ in Grasshopper angegeben. Die Wandhöhe wurde durch die Funktion „*Extrude*“ festgelegt. Nach der Definition der Größe des Modells wurde das Objekt im nächsten Schritt durch „*Contour*“ vernetzt und die Schichthöhe (10 mm) festgelegt. Bei offenen Kurven werden „*Dispatch*“ und „*Flip Curve*“ verwendet, um die Druckrichtung zwischen benachbarten Druckschichten zu wechseln. Außerdem musste die Ausrichtung des Druckkopfs aufgrund der rechteckigen Düsen mit der Kurve angepasst werden, um eine senkrechte Ausrichtung der Düse

zur Druckrichtung sicherzustellen. Hierzu wurde die Funktion „Construction Plane“ verwendet. Das Grasshopper-Programm zur Herstellung des Demonstrators ist in Bild 5.3 zu sehen.

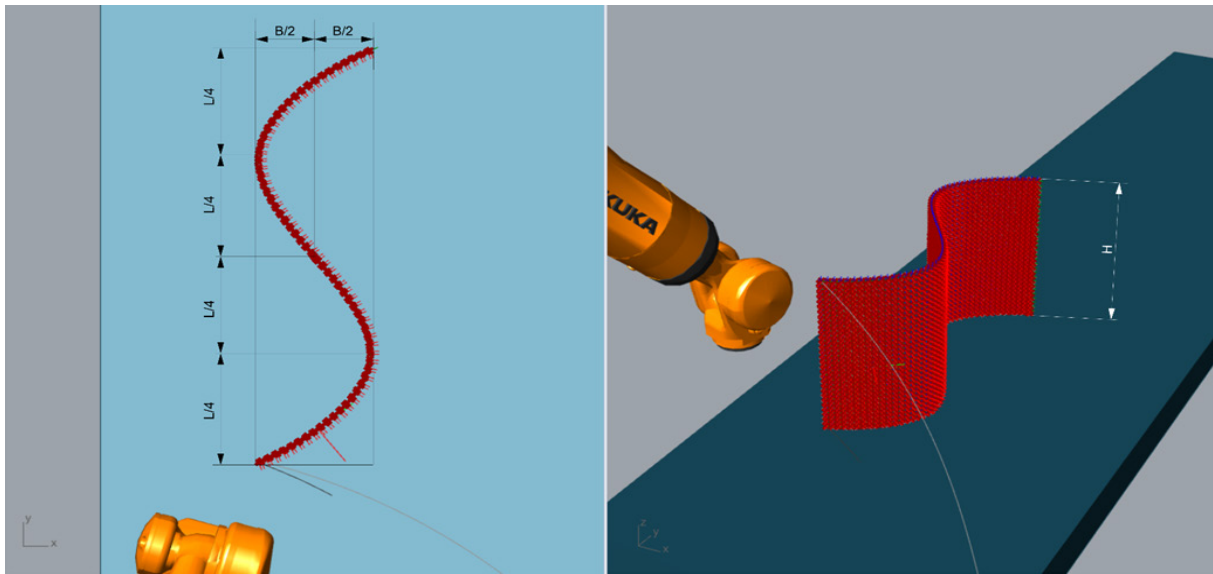


Bild 5.2: Modellierung des Demonstrators

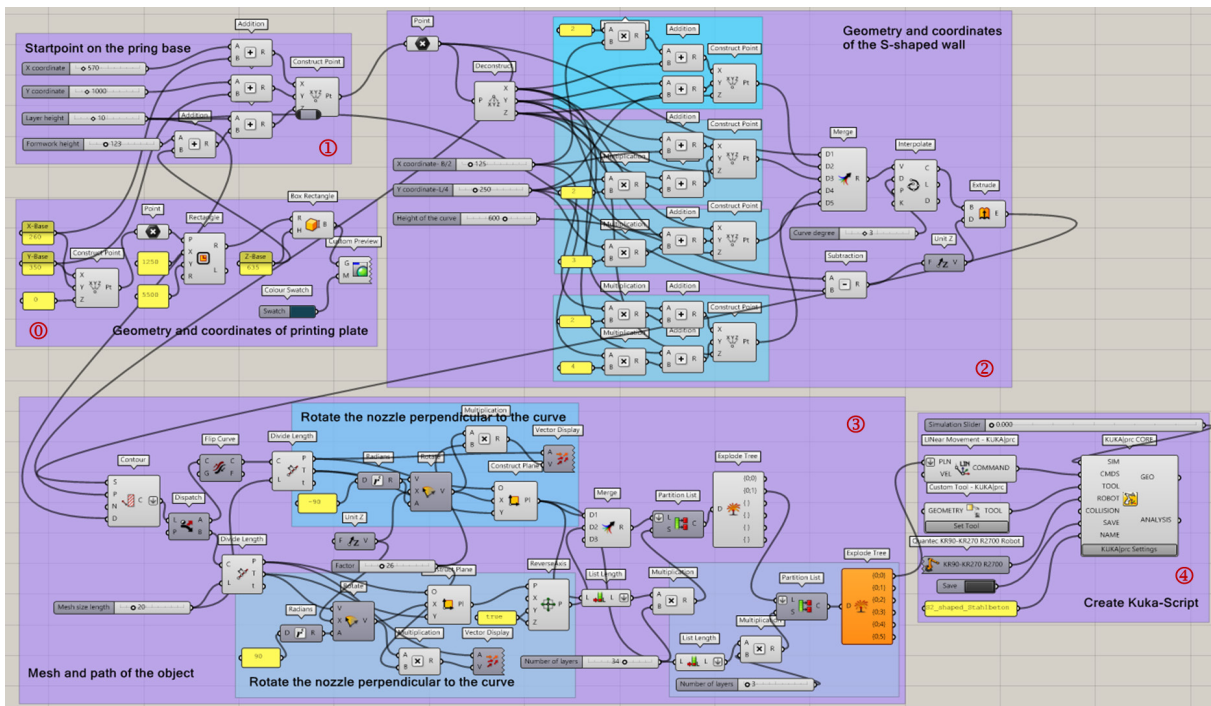


Bild 5.3: Grasshopper-Programmierung des Demonstrators

5.3 Abmessungen und Aufbau des Demonstrators

Die Größe des parametrisierten Demonstrator-Modells (Bild 5.3) kann beliebig angepasst werden. Die folgenden Abmessungen wurden für den Demonstrator festgelegt:

- Breite: $B=250$ mm
- Länge: $L=1000$ mm
- Höhe: $H=500$ mm

Für den Demonstrator wurde Bewehrung mit einem Durchmesser von 8 mm verwendet. Die Längsbewehrung wurde entlang des Druckpfades gebogen, während die vertikale

Bewehrungen abschnittsweise aus 100 mm langen Segmenten gefügt wurde. Vor dem Druck wurden entsprechende Bewehrungsstäbe als Längsbewehrung S-förmig gebogen. Zudem wurden 11 vertikale Bewehrungsstücke vorbereitet, an die in den entsprechenden Schichten sukzessive Vertikal- und Längsbewehrungsstäbe angeschweißt wurden. Die Planung der Bewehrungsführung und der Fügestellen ist in Bild 5.4 dargestellt. Insgesamt gab es 4 S-förmige Längsbewehrungsstäbe, von denen drei während des Mockups jeweils einmal durch Schweißen verlängert wurden, sowie 11 vertikale Bewehrungsstäbe, die jeweils viermal verlängert wurden.

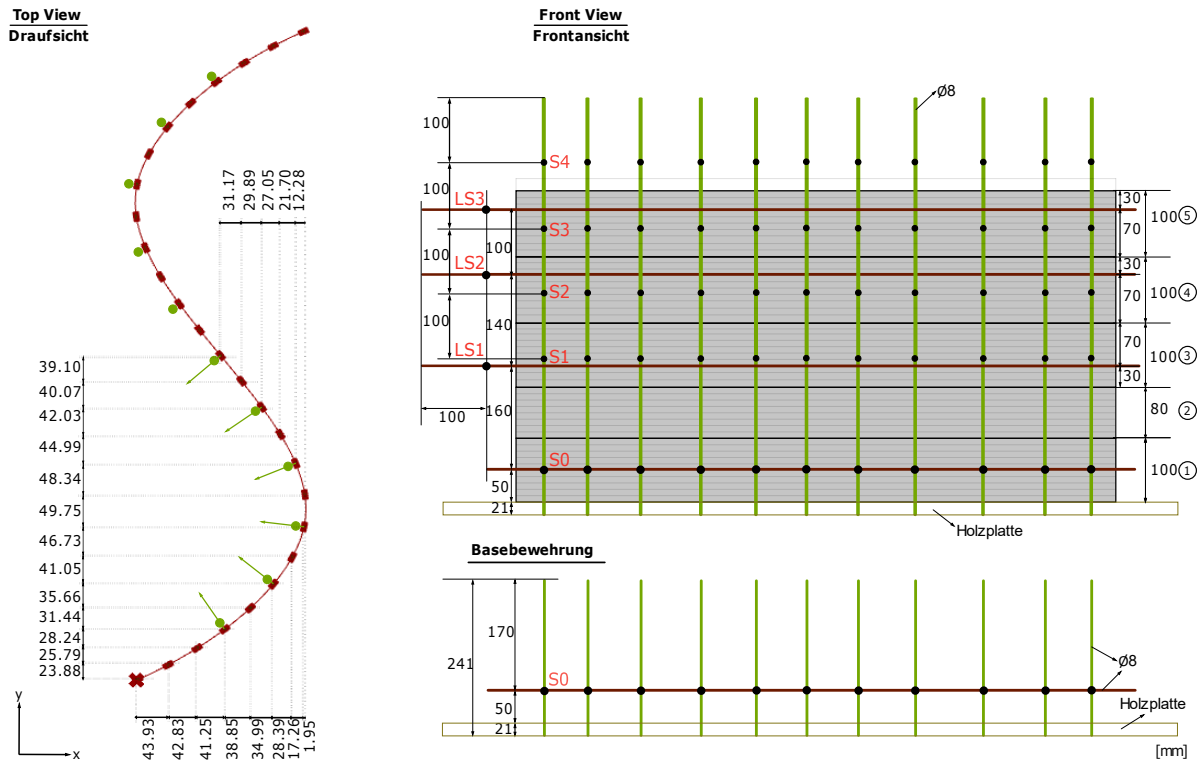


Bild 5.4: Anordnung der Bewehrung des Demonstrators

5.4 Mockup und prototypische Prozessimplementierung

Die Herstellung des Demonstrators bildet das grundlegende Proof-of-concept für den mit zwei Robotern ausgeführten AMoRC-Prozess. In Bild 5.1 sind die wesentlichen Tätigkeiten der beiden Roboter auf Lineareinheiten dargestellt. Hierbei läuft der Roboter mit Schweißeinheit dem Betonextrusionsprozess voraus und stellt ein räumliches Bewehrungsnetz aus vorkonfektionierten Bewehrungsstabsegmenten her. Das Fügen zweier Stabsegmente mit dem neuartigen Lichtbogenbolzenschweißprozess erfolgt innerhalb weniger Sekunden. Gegenüber alternativen Formen der Bewehrungsintegration (z.B. dem formgebenden Schweißen [Mec18b]) verkürzt sich die Zeit zur Herstellung der Bewehrungselemente signifikant. Zudem wird der Energieverbrauch reduziert und erheblich bessere Materialeigenschaften des Bewehrungsstahls durch den geringeren Wärmeeintrag erzielt. Zudem können Übergreifungsstöße der Bewehrung, die mögliche Schwachstellen im Bauwerk darstellen, durch die schweißtechnische Fügung vollständig vermieden werden. Die Länge der angeschweißten Stabsegmente wird dabei an die gewünschte Betonschichtdicke und Betonextrusionsgeschwindigkeit angepasst.

Bei der Herstellung des Demonstrators kamen, wie in Bild 5.5 dargestellt, die selbst entwickelte Schweißpistole für das Einbringen und Lichtbogenbolzenschweißen der Bewehrungssegmente und die variable Gabeldüse für Betondruck zum Einsatz. Der Beton wird im AMoRC-Prozess um die Bewehrungsstäbe abgelegt, sodass diese wenige Zentimeter aus dem gedruckten Beton hervorragen. Hier kann das Schweißgut in der nächsten Lage des Druckvorgangs unmittelbar angebunden werden. Während die Ablage der Betonfilamente parallel zu darunterliegenden Schichten erfolgt, können die Bewehrungsstücke an den aus dem Beton hervorstehenden Stabenden sowohl in horizontaler als auch vertikaler Richtung gefügt werden. Mit diesem Prozess lassen sich kraftschlüssig verbundene 2- bzw. 3-dimensionale Bewehrungsstrukturen über einzelne Betonlagen hinaus erzeugen und mit Beton umdrucken.

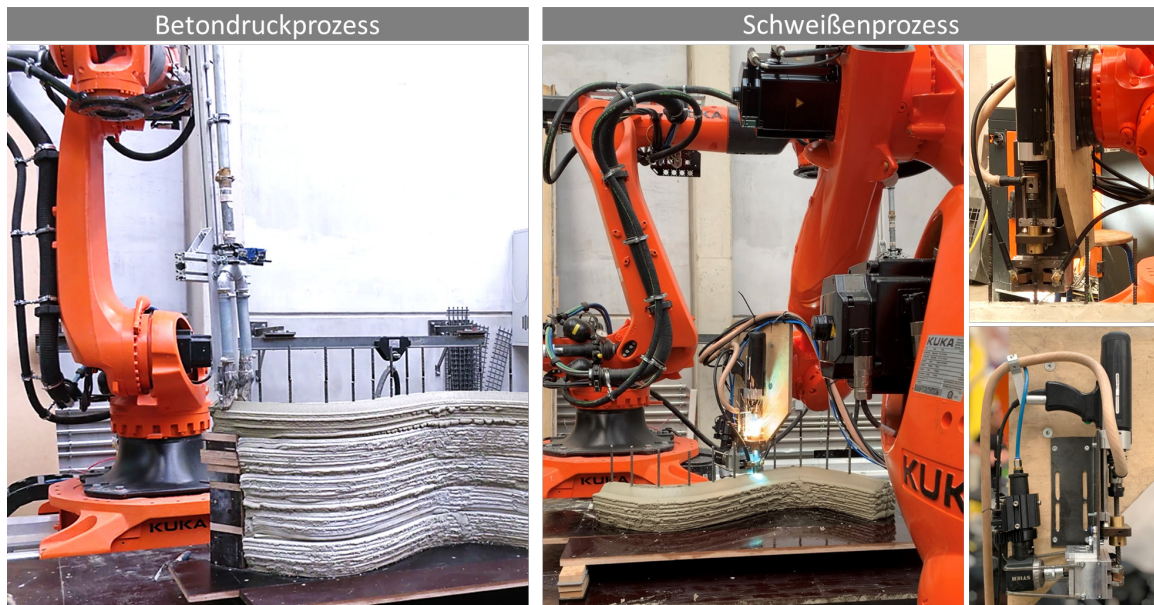


Bild 5.5: Umsetzung des AMoRC-Verfahrens

Neben den zuvor beschriebenen Funktionen des Schweißens und des Betonauftrags umfasst der vollständige Prozess auch logistische Elemente der Bewehrungszuführung, die anders als die Betonförderung in der derzeitigen Prozessumsetzung nicht kontinuierlich erfolgte. Insgesamt ergeben sich damit die folgenden in Bild 5.6 visualisierten Prozessschritte:

- (1) 3D-Betondruck mit Programmierung des Roboterpfades (ca. 30 Sekunden pro Lage)
- (2) Robotische Bolzenladung (ca. 20 Sekunden pro Stab)
- (3) Robotisches Schweißen der vertikalen Bewehrungen (ca. 20 Sekunden pro Schweißpunkt)
- (4) Robotisches Verlegen der Längsbewehrungen (ca. 30 Sekunden pro Längsstab)
- (5) Robotisches Schweißen der Längsbewehrungen (ca. 20 Sekunden pro Schweißpunkt)

In der aktuellen Phase wurden die einzelnen Schritte separat ausgeführt. Zudem wurden der Roboter und die Pumpe beim 3D-Betondruck getrennt gesteuert, wobei der Roboterpfad im Voraus durch Grasshopper programmiert wurde. Die Bolzenladung sowie das Verlegen und Schweißen der Bewehrung erfolgten mittels der Teach-in-Programmierung des Roboters. In Tabelle 5.1 sind die spezifischen Aufgaben für jeden Schritt des 3D-Drucks des Stahlbeton-Demonstrators aufgeführt.

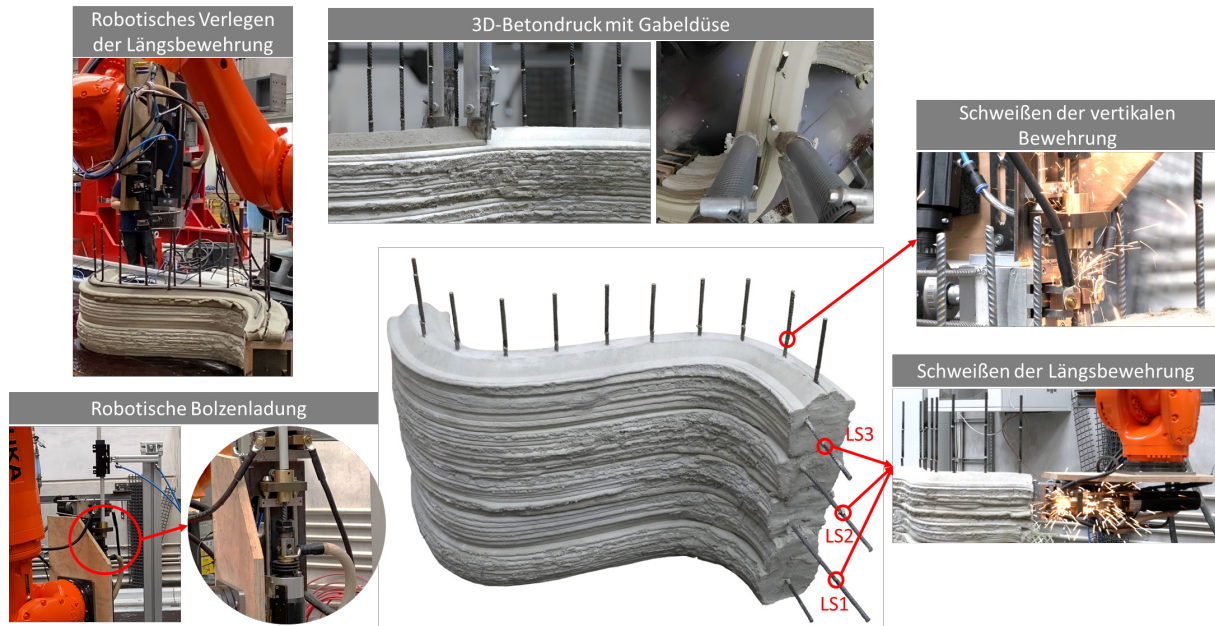


Bild 5.6: Technische Schritte zur vollautomatischen Umsetzung des AMoRC Verfahrens

Bild 5.7 zeigt die Unterteilung des grundlegenden, digitalen Vorgangs in insgesamt 10 Schritte, die sich in Sequenzen des „Betondrucks“ und des „Schweißens“ unterteilen. Beim Schweißen der Bewehrung benötigte die entwickelte Schweißpistole eine freie Länge der herausstehenden Bewehrung (Stick-out) von mindestens 100 mm, um den darunterliegenden Bewehrungsstab greifen zu können. Dies wurde beim Auftrag der Betonschichten mit der Gabeldüse berücksichtigt. Anschließend konnte die Bewehrung durch erneutes Schweißen verlängert werden. Die mehrfache Wiederholung der beschriebenen Sequenzen führt zur additiven Fertigung des bewehrten Demonstartorbauteils.

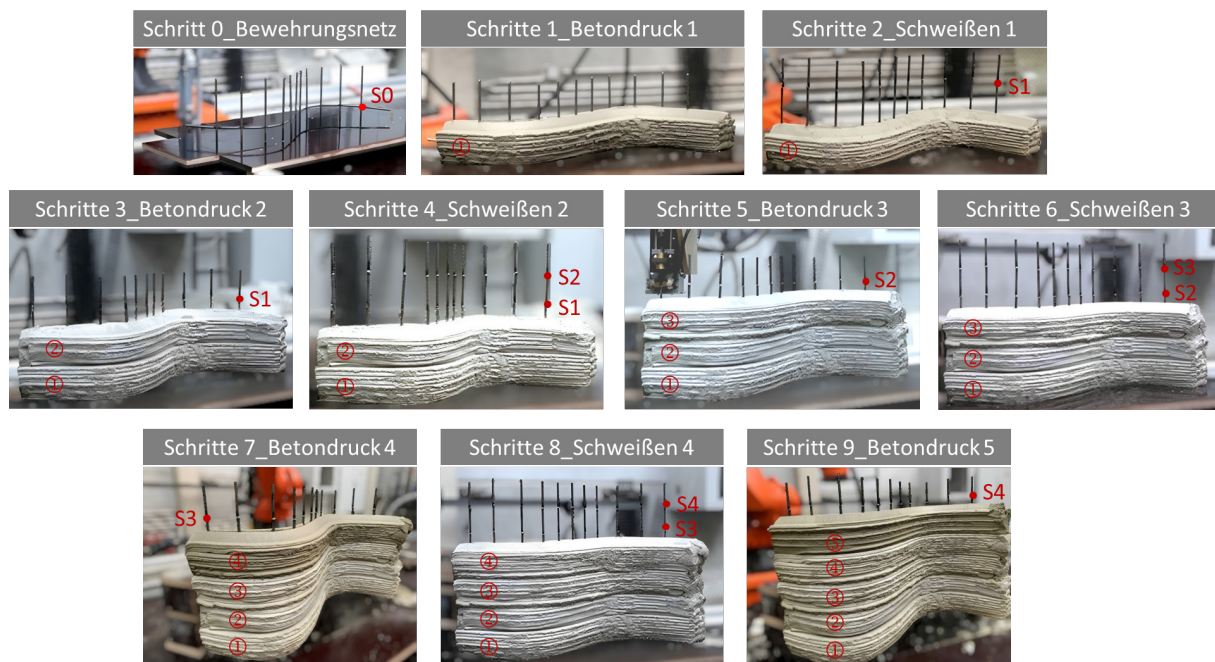


Bild 5.7: Darstellung der Arbeitsschritte zur Herstellung des Demonstrators

Neben der zuvor beschriebenen Programmierung der Roboterpfades mit Grasshopper, der Vorbereitung der erforderlichen Bewehrung (S0), den abwechselnden Prozessen des Betondrucks (①-⑤) und des vertikalen Bewehrungsschweißens (S1-S4) wurde die Längsbewehrung

in den Schritten ③-⑤ mit dem Roboter verlegt. Die drei eingebrachten Längsbewehrungen wurden dann am Ende des S3 und S4 Durchgangs des Schweißverfahrens bzw. des ⑤ Durchgangs des Betondrucks einmalig durch Schweißen verlängert. Die Funktionalität konnte damit gezeigt werden, sodass die kontinuierliche Umsetzung zukünftig umgesetzt wird.

Tabelle 5.1: Zusammenfassung der Arbeitsschritte zur Herstellung des Demonstrators

Schritt Nr.	Schritt Name	Aufgaben
0	Anfangsphase	<ul style="list-style-type: none"> • Roboterpfad mit Grasshopper Programmierung • Basisbewehrungsnetz Vorbereitung: 1 S-förmige Längsbewehrung verschweißt mit 11 geraden vertikalen Bewehrungen (S0) • Einlegung der Basisbewehrung in Holzplatten
1	Betondruck 1	<ul style="list-style-type: none"> • Betonroboter: ① Betondruck mit 10 Schichten
2	Schweißen 1	<ul style="list-style-type: none"> • Schweißroboter: 1. Verlängern der 11 vertikalen Bewehrungen durch Schweißen (S1)
3	Betondruck 2	<ul style="list-style-type: none"> • Betonroboter: ② Betondruck mit 8 Schichten
4	Schweißen 2	<ul style="list-style-type: none"> • Schweißroboter: 2. Verlängern der 11 vertikalen Bewehrungen durch Schweißen (S2)
5	Betondruck 3	<ul style="list-style-type: none"> • Betonroboter: ③ Betondruck mit zuerst 3 Schichten und dann Pause • Schweißroboter: Robotisches Verlegung der 2. Längsbewehrung • Betonroboter: ③ Betondruck nach Verlegung der Längsbewehrung mit 7 Schichten
6	Schweißen 3	<ul style="list-style-type: none"> • Schweißroboter: 3. Verlängern der 11 vertikalen Bewehrungen durch Schweißen (S3) • Schweißroboter: 1. Schweißen der Längsbewehrung (LS1)
7	Betondruck 4	<ul style="list-style-type: none"> • Betonroboter: ④ Betondruck mit zuerst 7 Schichten und dann Pause • Schweißroboter: Robotisches Verlegung der 3. Längsbewehrung • Betonroboter: ④ Betondruck nach Verlegung der Längsbewehrung mit 3 Schichten
8	Schweißen 4	<ul style="list-style-type: none"> • Schweißroboter: 4. Verlängern der 11 vertikalen Bewehrungen durch Schweißen (S4) • Schweißroboter: 2. Schweißen der Längsbewehrung (LS2)
9	Betondruck 5	<ul style="list-style-type: none"> • Betonroboter: ⑤ Betondruck mit zuerst 7 Schichten und dann Pause • Schweißroboter: Robotisches Verlegung der 4. Längsbewehrung • Betonroboter: ⑤ Betondruck nach Verlegung der Längsbewehrung mit 3 Schichten • Schweißroboter: 3. Schweißen der Längsbewehrung (LS3)

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Resultate dieses Forschungsprojektes stellen einen wesentlichen Erkenntnisgewinn im Bereich der digitalen Baufabrikation dar.

So wurde das von den Antragstellern entwickelte Additive Manufacturing of Reinforced Concrete (AMORC)-Verfahren für den 3D-Druck von Stahlbeton erstmals prototypisch umgesetzt. Der neuartige Fertigungsprozess verwendet hierbei die im Rahmen des Projektes entwickelten 3D-Druck-Werkzeuge (Extrusionsdüsen für den Beton und Schweißwerkzeuge für die Bewehrung), die geführt an zwei Roboterarmen die schalungsfreie Ablage von Betonschichten und die schweißtechnische Fügung der Bewehrung ermöglichen. Hierbei läuft die Schweißeinheit zur Umsetzung des neuartigen Bolzenschweißprozesses der Betonextrusion voraus und stellt das räumliche Bewehrungsnetz aus vorkonfektionierten Bewehrungsstabsegmenten her. Der Beton wird mittels einer Gabeldüse so um die Bewehrungsstäbe abgelegt, dass diese wenige Zentimeter aus dem gedruckten Beton hervorragen. Hieran kann das Schweißgut in der nächsten Lage des Druckvorgangs unmittelbar angebunden werden. So lassen sich kraftschlüssig verbundene 2-dimensionale Bewehrungsstrukturen über einzelne Betonlagen hinaus erzeugen und simultan mit Beton umdrucken. Die Projektergebnisse zeigen eindrucksvoll, dass sich heute bekannte Schweiß- und Betonextrusionsprozesse zu einem hybriden Gesamtprozess weiterentwickeln lassen. Das im Projekt implementierte Verfahren stellt einen Meilenstein dar und belegt, dass eine schalungsfreie automatisierte Fertigung des Verbundwerkstoffs Stahlbeton grundsätzlich möglich ist. Hierbei können flächendeckend verfügbare, etablierte Ausgangskomponenten (Beton und Betonstahl) zum Einsatz gebracht werden.

Die Erforschung des Material- und Strukturverhaltens 3D-gedruckter Betonbauteile mit integrierter geschweißter Bewehrung verdeutlichte, dass der neuartige additive Herstellprozess die Trageigenschaften unter verschiedenen Belastungsszenarien gegenüber gegossenen Referenzbauteilen lediglich moderat beeinflusst. Diese Ergebnisse unterstreichen das große Anwendungspotenzial der entwickelten Technologie. Die Untersuchungen zum Tragverhalten zeigten, dass die eingesetzten Versuchsaufbauten grundsätzlich gut geeignet waren das richtungsabhängige Druck-, Biegezug- und Schubverhalten unbewehrter 3D gedruckter Betonproben und den Einfluss verschiedener Intervallzeiten im Herstellprozess zu charakterisieren. Die Charakterisierung des Verbundes ergab einen großen Einfluss des Gabeldüsenabstandes auf die Verbundqualität. Durch eine systematische Abstimmung von Betonpumpendruck und Düsenabstand lassen sich Fehlstellen und Hohlräume in der gedruckten Struktur minimieren. Um die Düsenabstände im Herstellprozess einerseits möglichst klein zu halten, andererseits potenzielle Kollisionen von Düse und herausstehender Bewehrung zu vermeiden, bedarf es weiterer Forschung und Entwicklung. Auch durch die Weiterentwicklung der Düsengeometrie kann zukünftig eine verbesserte Anbindungsqualität benachbarter Schichten und vertikalverlaufender Bewehrung erreicht werden. Die umfassenden Versuchsserien zum Querkrafttragverhalten von 3D-gedruckten Balken mit und ohne Querkraftbewehrung belegen, dass die additive Herstellung anhand des entwickelten Prozesses grundsätzlich gut geeignet ist und vergleichbare Tragfähigkeiten wie bei gegossenen Bauteilen erzielt werden können. Die Variation des Querkraftbewehrungsgrades führte erwartungsgemäß zum Anstieg des Tragwiderstandes mit zunehmendem Querkraftbewehrungsgrad sowie zu einer Veränderung der Schubrissausbildung. Allerdings besteht auch hier weiteres Optimierungspotenzial im Hinblick auf die Reduzierung von Fehlstellen im Bereich der Querkraftbewehrungselemente sowie die automati-

sierte Herstellung der Schubzulagen. Das Biegetragverhalten der additiv gefertigten Stahlbetonbauteile mit geschweißter Längsbewehrung war im Allgemeinen weniger duktil als in Referenzbauteilen mit kontinuierlicher Bewehrung. Folglich gibt es auch im Bereich der Schweißtechnik weiteren Forschungsbedarf, um die Qualität der Fügung im Hinblick auf die Duktilität und Verformungskapazität weiter zu verbessern. Die Verwendung kostengünstiger und flächendeckend verfügbarer Baustoffe stellt hierbei eine hohe Wirtschaftlichkeit sicher. Da zudem auf formgebendes Schweißen verzichtet wird, ist der Energieverbrauch gering, was die sowohl die Wirtschaftlichkeit als auch die Nachhaltigkeit erhöht. Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen lassen sich weiterführende, grundlegende Forschungsfragen aus den Bereichen experimentelle Erforschung von Prozess und Tragverhalten, Upscaling und Modellentwicklung ableiten:

- Wie lassen sich die im Labormaßstab gewonnenen Erkenntnisse auf den Realmaßstab übertragen?
- Wie können die Vorschubgeschwindigkeiten der Bewehrungsherstellung und der Betonextrusion systematisch aufeinander abgestimmt werden, um einen möglichst schnellen hybriden Gesamtprozess zu erreichen? Welche weiteren Entwicklungsschritte sind zur vollständigen Automatisierung erforderlich?
- Welche Sensorik wird benötigt, um den Herstellprozess zu monitoren und eine Echtzeit-Prozessoptimierung zu implementieren?
- Inwiefern lässt sich (z.B. durch eine veränderte Düsengeometrie, oder durch Nachverdichtung des extrudierten Betons) einerseits die Auftragsdicke der Betonschicht maximieren und gleichzeitig auch bei wenig fließfähigen Betonen eine gute Umschließung der Bewehrung sicherstellen? Inwiefern kann durch geeignete Maßnahmen (z.B. Glättung am Druckkopf) zusätzlich eine hohe Oberflächenqualität erzielt werden? Wie können die Erkenntnisse auf mehrlagige Bewehrungsanordnungen übertragen werden?
- Wie lassen sich Bewehrungsstäbe unterschiedlichen Durchmessers fügen und wie kann ein Anschweißen von Stäben unter Winkeln zur Erzeugung gekrümmter Wand- und Schalenstrukturen entwickelt werden? Inwiefern kann dies auch bei mehrlagigen Bewehrungsanordnungen gelingen?
- Welche Weiterentwicklungen machen die Herstellung überhängender und stark geneigter Stahlbetonflächentragwerke möglich. Inwiefern kann das geschweißte Bewehrungsnetz eine stützende Funktion im Herstellprozess übernehmen?
- Wie lassen sich die Trageigenschaften additiv gefertigter Stahlbetonbauteile unter Zug-, Druck-, Biegung- oder Schubbeanspruchung sowie der Bewehrungsverbund rechnerisch beschreiben?
- Welche systematischen Versuchsserien unter Einsatz neuartiger Messtechniken werden zur Modellableitung benötigt?

- Wie können aufbauend auf den experimentellen Ergebnissen Ingenieurmodelle entwickelt und in Bemessungsansätze überführt werden, die die notwendige Voraussetzung für eine flächendeckende Anwendung des 3D-Drucks von Stahlbeton in der Baupraxis darstellen?
- Wie kann anhand der entwickelten Bemessungsansätze eine größtmögliche Materialminimierung und Einsparung von CO₂ (z.B. anhand lastangepasster Bewehrungsanordnungen, minimaler Betonabmessungen) im Herstellprozess erreicht werden?

Aufbauend auf den im Projekt gewonnenen wesentlichen Erkenntnissen ist bei Klärung der neu aufgeworfenen Fragen im Rahmen eines Nachfolgeprojektes eine Weiterentwicklung des neuartigen Herstellprozesses bis an die Schwelle der Praxisreife in den nächsten 3-5 Jahren möglich.

7 Literaturverzeichnis

- [ACI03] ACI Committee 408: Bond and development of straight reinforcing bars in tension. American Concrete Institute,(2003).
- [Alb18] Albert, A.: Massivbau I, Bemessung im Stahlbetonbau. Skript. Hochschule Bochum, Bochum,(2018).
- [Alv98] Alvarez, M.: Einfluss des Verbundverhaltens auf das Verformungsvermögen von Stahlbeton. Dissertation, Institut für Baustatik und Konstruktion. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Zürich,(1998).
- [Api22] Apis Cor Inc.: Vorstellung eines 3D-gedrucktem Gebäude in Amerika auf der Firmenwebsite von Apis Cor, , <https://apis-cor.com/2022/11/10/first-round-of-3d-printed-houses-in-2023-2/>, Stand: 24.11.2023,(2022).
- [Asp18] Asprone, D.; Menna, C.; Bos, F. P.; Salet, T. A.; Mata-Falcón, J.; Kaufmann, W.: Rethinking reinforcement for digital fabrication with concrete, in: Cement and Concrete Research 112,(2018), S. 111–121.
- [Ass20] Assaad, J. J.; Abou Yassin, A.; Alsakka, F.; Hamzeh, F.: A Modular Approach for Steel Reinforcing of 3D Printed Concrete—Preliminary Study, in: Sustainability 12 (10),(2020), S. 4062.
- [Bab21] Babafemi, A. J.; Kolawole, J. T.; Miah, M. J.; Paul, S. C.; Panda, B.: A Concise Review on Interlayer Bond Strength in 3D Concrete Printing, in: Sustainability 13 (13),(2021), S. 7137.
- [Bac05] Bach, C.: Versuche über den Gleitwiderstand einbetonierten Eisens, Springer Verlag, Berlin,(1905).
- [Baz20] Baz, B.; Aouad, G.; Leblond, P.; Al-Mansouri, O.; D'hondt, M.; Remond, S.: Mechanical assessment of concrete – Steel bonding in 3D printed elements,(2020).
- [Ber19] Bertschek, I.; Niebel, T.; Ohnemus, J.: Beitrag der Digitalisierung zur Produktivität in der Baubranche. BBSR-Online-Publikation, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), Bonn,(2019).
- [Bie20] Bielak, J.; Becks, H.; Hegger, J.: Effect of Tension Forces on Shear Capacity of Thin Slab Segments, in: Tudalit e.V. und C³ - Carbon Concrete Composite e.V (Hrsg.): Proceedings of 12th Carbon and Textile Reinforced Concrete Days, Dresden,(2020), S. 76–80.
- [Bol22] Bolte GmbH: Pro-I: Inverter-Bolzenschweißgeräte für das Bolzenschweißen mit Hubzündung und Kurzzeithubzündung. , <https://www.bolte.gmbh/index.php/de/produkte-und-services/bolzenschweissgeraete/hubzuendung-inverter/581-pro-i-2200>, Stand: 03.01.2024,(2022).
- [Bos18] Bos, F. P.; Ahmed, Z. Y.; Wolfs, R. J. M.; Salet, T. A. M.: 3D Printing Concrete with Reinforcement, in: Hordijk, D. A.; Luković, M. (Hrsg.): High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet, Springer International Publishing, Cham,(2018), S. 2484–2493.
- [Bos23] Bosbach, S.; Kalthoff, M.; Morales Cruz, C.; Adam, V.; Matschei, T.; Classen, M.: Digital Prefabrication of Lightweight Building Elements for Circular Economy: Material-Minimised Ribbed Floor Slabs Made of Extruded Carbon Reinforced Concrete (ExCRC), in: Buildings 13 (12),(2023), S. 2928.

- [Bre17] Brell-Cokcan, S.; Lublasser, E.; Haarhoff, D.; Kuhnhenne, M.; Feldmann, M.; Pyschny, D.: Zukunft Robotik - Automatisierungspotentiale im Stahl- und Metallleichtbau, in: Stahlbau 86 (3),(2017), S. 225–233.
- [Bül08] Bülte, S.: Zum Verbundverhalten von Spannstahl mit sofortigem Verbund unter Betriebsbeanspruchungen. Dissertation, Lehrstuhl und Institut für Massivbau. RWTH Aachen, Aachen, Germany,(2008).
- [Bun18] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (Hrsg.): Digitale Bauwelt: Zukunft Bauen: Das Magazin der Forschungsinitiative Zukunft Bau 2018,(2018).
- [Bus18] Buswell, R. A.; Leal de Silva, W. R.; Jones, S. Z.; Dirrenberger, J.: 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research, in: Cement and Concrete Research 112,(2018), S. 37–49.
- [Che20] Chen, Y.; Jansen, K.; Zhang, H.; Romero Rodriguez, C.; Gan, Y.; Çopuroğlu, O.; Schlangen, E.: Effect of printing parameters on interlayer bond strength of 3D printed limestone-calcined clay-based cementitious materials: An experimental and numerical study, in: Construction and Building Materials 262,(2020), S. 120094.
- [Che22] Chen, Y.; He, S.; Gan, Y.; Çopuroğlu, O.; Veer, F.; Schlangen, E.: A review of printing strategies, sustainable cementitious materials and characterization methods in the context of extrusion-based 3D concrete printing, in: Journal of Building Engineering 45,(2022), S. 103599.
- [Cla15] Classen, M.; Gallwoszus, J.; Kopp, M.; Schäfer, J.: Kleinskalige Pin-Verbundmittel für den Stahl-Beton-Verbundbau/Small-scale pin shear connectors for steel-concrete composites, in: Bauingenieur 90 (05),(2015), S. 200–208.
- [Cla20a] Claßen, M.; Claßen, J.; Sharma, R.: Konzeptionierung eines praxisorientierten 3D - Druckverfahrens für den Verbundwerkstoff Stahlbeton (AMoRC), in: Beton- und Stahlbetonbau 115 (12),(2020), S. 934 - 942.
- [Cla20b] Classen, M.: Shear Crack Propagation Theory (SCPT) – The mechanical solution to the riddle of shear in RC members without shear reinforcement, in: Engineering Structures 210,(2020).
- [Cla20c] Classen, M.; Ungermann, J.; Sharma, R.: Additive Manufacturing of Reinforced Concrete—Development of a 3D Printing Technology for Cementitious Composites with Metallic Reinforcement, in: Applied Sciences 10 (11),(2020), S. 3791.
- [CyB] CyBe: Information of CyBe RC (Robot Crawler). , <https://cybe.eu/3d-concrete-printing/printers/cybe-robot-crawler/>, Stand: 03.01.2024.
- [DAfStb288] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.): DAfStb-Heft 288, Ernst & Sohn,(1977).
- [Di13] Di Carlo, T.; Khoshnevis, B.; Carlson, A.: Experimental and Numerical Techniques to Characterize Structural Properties of Fresh Concrete, in: Volume 9: Mechanics of Solids, Structures and Fluids. ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, San Diego, California, USA,(2013).
- [DIN EN 12350-5:2019-09] DIN EN 12350-5:2019-09: Prüfung von Frischbeton - Teil 5: Ausbreitmaß. Deutsche Fassung EN 12350-5:2019, Beuth, Berlin,(2019).
- [DIN05a] Stahl für die Bewehrung von Beton - Schweißgeeigneter Betonstahl - Allgemeines. DIN EN 10080 | 2005-08, Beuth, Berlin.
- [DIN05b] DIN EN 196-1:2005-05: Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festigkeit. Deutsche Fassung EN 196-1:2005, Beuth, Berlin,(2005).

- [DIN09] DIN EN 196-3:2009-02: Prüfverfahren für Zement - Teil 3: Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit. Deutsche Fassung EN 196-3:2005+A1:2008, Beuth, Berlin,(2009).
- [DIN1045-2:2008-08] DIN 1045-2:2008-08: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1, Beuth, Berlin,(2008).
- [DIN17] DIN EN ISO 14555:2017-10: Schweißen - Lichtbogenschweißen von metallischen Werkstoffen. Deutsche Fassung EN ISO 14555:2017, Beuth, Berlin,(2017).
- [DIN18136:2003-11] DIN 18136:2003-11: Baugrund - Untersuchung von Bodenproben - Einaxialer Druckversuch, Beuth, Berlin,(2003).
- [Din23] Ding, T.; Xiao, J.; Mechtcherine, V.: Microstructure and mechanical properties of interlayer regions in extrusion-based 3D printed concrete: A critical review, in: Cement and Concrete Composites 141,(2023), S. 105154.
- [DIN488-2:2009-08] DIN 488-2:2009-08: Betonstahl - Betonstabstahl, Beuth, Berlin,(2009).
- [DIN8580:2003-09] DIN 8580:2003-09: Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung, Beuth Verlag GmbH, Berlin,(2003).
- [DINEN12390-1:2012-12] DIN EN 12390-1:2012-12: Prüfung von Festbeton - Teil 1: Form, Maße und andere Anforderungen für Probekörper und Formen. Deutsche Fassung EN 12390-1:2012, Beuth, Berlin,(2012).
- [DINEN12390-3:2019-10] DIN EN 12390-3:2019-10: Prüfung von Festbeton- Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern. Deutsche Fassung EN 12390-3:2019, Beuth, Berlin,(2019).
- [DINEN12504-4:2021-10] DIN EN 12504-4:2021-10: Prüfung von Beton in Bauwerken - Teil 4: Bestimmung der Ultraschall-Impulsgeschwindigkeit. Deutsche Fassung EN 12504-4:2021, Beuth, Berlin,(2021).
- [DINEN1992-1-1:2004+AC:2010] DIN EN 1992-1-1:2004 + AC:2010: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken. Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, Beuth Verlag GmbH, Berlin,(2011).
- [DINEN480-2:2006-11] DIN EN 480-2:2006-11: Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel - Prüfverfahren - Teil 2: Bestimmung der Erstarrungszeit. Deutsche Fassung EN 480-2:2006, Beuth, Berlin,(2006).
- [DINENISO14175:2008-06] DIN EN ISO 14175:2008-06: DIN EN ISO 14175:2008-06, Schweißzusätze_ - Gase und Mischgase für das Lichtbogenschweißen und verwandte Prozesse (ISO_14175:2008); Deutsche Fassung EN_ISO_14175:2008, Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [Dre20] Dressler, I.; Freund, N.; Lowke, D.: The Effect of Accelerator Dosage on Fresh Concrete Properties and on Interlayer Strength in Shotcrete 3D Printing, in: Materials (Basel, Switzerland) 13 (2),(2020).
- [Dru22] Druckkopf Vertico: Datenblatt 1. ,(2022).
- [Eli82] Eligehausen, R.; Popov, E. P.; Bertero, V. V.: Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations. Universität Stuttgart,(1983).
- [Eng22] Engel, S.: Prototypische Umsetzung eines 3D-Betondruckprozesses und Tragfähigkeitsuntersuchungen von Bauteilen. Masterarbeit, IMB. RWTH Aachen University,(2022).

- [Fen15] Feng, P.; Meng, X.; Chen, J.-F.; Ye, L.: Mechanical properties of structures 3D printed with cementitious powders, in: Construction and Building Materials 93,(2015), S. 486–497.
- [Fey16] Feys, D.; Schutter, G. de; Khayat, K. H.; Verhoeven, R.: Changes in rheology of self-consolidating concrete induced by pumping, in: Materials and Structures 49 (11),(2016), S. 4657–4677.
- [Fir22] Firma Vertico: Katalog der Firma Vertico. ,(2022).
- [Fis12] Fischer, C.: Auswirkungen der Bewehrungskorrosion auf den Verbund zwischen Stahl und Beton. Dissertation. Universität Stuttgart,(2012).
- [Geb22] Gebhard, L.; Esposito, L.; Menna, C.; Mata-Falcón, J.: Inter-laboratory study on the influence of 3D concrete printing set-ups on the bond behaviour of various re-inforcements, in: Cement and Concrete Composites 133,(2022), S. 104660.
- [Gil05] Giles, H. F.; Wagner, J. R.; Mount, E. M.: Extrusion: The definitive processing guide and handbook. PDL handbook series, William Andrew Pub, Norwich NY,(2005).
- [Gor18] Goris, G.: Traditional reinforcement in 3D concrete printed structures,(2018).
- [Gor21] Gornig, M.; Michelsen, C.; Pagenhardt, L.: Bauwirtschaft trotz der Corona-Krise – dennoch ruhigeres Geschäft im Jahr 2021,(2021).
- [Hac14] Hack, N.; Lauer, W. V.: Mesh - Mould: Robotically Fabricated Spatial Meshes as Reinforced Concrete Formwork, in: Architectural Design 84 (3),(2014), S. 44 - 53.
- [Hau21] Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V.: Bauwirtschaft im Zahlenbild. , <https://www.bauindustrie.de/zahlen-fakten/bauwirtschaft-im-zahlenbild>, Stand: 10.05.2022,(2021).
- [Heg14] Hegger, J.; Empelmann, M.; Schnell, J.: Weiterentwicklung von Bemessungs- und Konstruktionsregeln bei großen Stabdurchmessern ($> d = 32 \text{ mm}$, B500): Schlussbericht zu dem IGF-Vorhaben,(2014).
- [Heg19] Hegger, J.: Massivbau I: Grundlagen der Bemessung. Vorlesungsumdruck, Lehrstuhl und Institut für Massivbau. RWTH Aachen University, Aachen,(2019).
- [Hel15] Held, T.; Waltersbacher, M.: Wohnungsmarktprognose 2030. BBSR-Analysen kompakt, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Bonn,(2015).
- [Hoj22] Hojati, M.; Memari, A. M.; Zahabi, M.; Wu, Z.; Li, Z.; Park, K.; Nazarian, S.; Duarte, J. P.: Barbed-wire reinforcement for 3D concrete printing, in: Automation in Construction 141,(2022), S. 104438.
- [Jan18] Jang, K. P.; Kwon, S. H.; Choi, M. S.; Kim, Y. J.; Park, C. K.; Shah, S. P.: Experimental Observation on Variation of Rheological Properties during Concrete Pumping, in: International Journal of Concrete Structures and Materials 12 (1),(2018).
- [Kal16] Kalipcilar, I.; Mardani-Aghabaglou, A.; Sezer, G. I.; Altun, S.; Sezer, A.: Assessment of the effect of sulfate attack on cement stabilized montmorillonite, in: GEO-MECHANICS AND ENGINEERING 10 (6),(2016), S. 807–826.
- [Kal23] Kalthoff, M.; Bosbach, S.; Backes, J. G.; Morales Cruz, C.; Claßen, M.; Traverso, M.; Raupach, M.; Matschei, T.: Fabrication of lightweight, carbon textile reinforced concrete components with internally nested lattice structure using 2-layer extrusion by LabMorTex, in: Construction and Building Materials 395,(2023), S. 132334.

- [Kaz19] Kazemian, A.; Yuan, X.; Davtalab, O.; Khoshnevis, B.: Computer vision for real-time extrusion quality monitoring and control in robotic construction, in: Automation in Construction 101,(2019), S. 92–98.
- [Kho04] Khoshnevis, B.: Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies, in: Automation in Construction 13 (1),(2004), S. 5–19.
- [Klo19] Kloft, H.; Hack, N.; Mainka, J.; Brohmann, L.; Herrmann, E.; Ledderose, L.; Lowke, D.: Additive Fertigung im Bauwesen: erste 3 - D - gedruckte und bewehrte Betonbauteile im Shotcrete - 3 - D - Printing - Verfahren (SC3DP), in: Bautechnik 96 (12),(2019), S. 929–938.
- [Klo20] Kloft, H.; Empelmann, M.; Hack, N.; Herrmann, E.; Lowke, D.: Bewehrungsstrategien für den Beton - 3D - Druck, in: Beton- und Stahlbetonbau 115 (8),(2020), S. 607 – 616.
- [Kra21] Krause, M. (Hrsg.): Baubetriebliche Optimierung des vollwandigen Beton-3D-Drucks. Baubetriebswesen und Bauverfahrenstechnik, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden,(2021).
- [Kri21] Kristombu Baduge, S.; Navaratnam, S.; Abu-Zidan, Y.; McCormack, T.; Nguyen, K.; Mendis, P.; Zhang, G.; Aye, L.: Improving performance of additive manufactured (3D printed) concrete: A review on material mix design, processing, inter-layer bonding, and reinforcing methods, in: Structures 29,(2021), S. 1597–1609.
- [KUK21] KUKA AG: Datenblatt, Industrieroboter Kuka KR 300 R2700-2. , <https://www.kuka.com/event/media?itemId=787EFBD37567489580A5653021FD64C8>,(2021).
- [KUK24] KUKA AG: Datenblatt, Industrieroboter Kuka KR 300 R2500. , <https://www.kuka.com/event/media?itemId=96755663FB9D4D33A80C9A5FF86CC740>, Stand: 27.02.2024,(2021).
- [Kwo16] Kwon, S. H.; Jang, K. P.; Kim, J. H.; Shah, S. P.: State of the Art on Prediction of Concrete Pumping, in: International Journal of Concrete Structures and Materials 10 (S3),(2016), S. 75–85.
- [Le12] Le, T. T.; Austin, S. A.; Lim, S.; Buswell, R. A.; Law, R.; Gibb, A. G. .; Thorpe, T.: Hardened properties of high-performance printing concrete, in: Cement and Concrete Research 42 (3),(2012), S. 558–566.
- [Leo57] Leonhardt, F.: On the need to consider the influence of lateral stresses on bond, in: Symposium on Bond and Crack Formation in Reinforced concrete 1957, Stockholm,(1957), S. 29–34.
- [Leo73] Leonhardt, F.; Mönning, E.: Vorlesungen über Massivbau: Erster Teil Grundlagen zur Bemessung im Stahlbetonbau, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg,(1973).
- [Let06] Lettow, S.: Ein Verbundelement für nichtlineare Finite Elemente Analysen - Anwendung auf Übergreifungsstöße. Dissertation, Institut für Werkstoffe im Bauwesen. Universität Stuttgart, Stuttgart,(2006).
- [Lin19] Lindemann, H.; Gerbers, R.; Ibrahim, S.; Dietrich, F.; Herrmann, E.; Dröder, K.; Raatz, A.; Kloft, H.: Development of a Shotcrete 3D-Printing (SC3DP) Technology for Additive Manufacturing of Reinforced Freeform Concrete Structures, in:

- Wangler, T.; Flatt, R. J. (Hrsg.): Proceedings of First RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication - Digital Concrete 2018,(2019), S. 287–298.
- [Liu22] Liu, H.; Liu, C.; Wu, Y.; Bai, G.; He, C.; Zhang, R.; Wang, Y.: Hardened properties of 3D printed concrete with recycled coarse aggregate, in: Cement and Concrete Research 159,(2022), S. 106868.
- [Llo20] Lloret-Fritschi, E.; Wangler, T.; Gebhard, L.; Mata-Falcón, J.; Mantellato, S.; Scotto, F.; Burger, J.; Szabo, A.; Ruffray, N.; Reiter, L.; Boscaro, F.; Kaufmann, W.; Kohler, M.; Gramazio, F.; Flatt, R.: From Smart Dynamic Casting to a growing family of Digital Casting Systems, in: Cement and Concrete Research 134,(2020).
- [Los79] Losberg, A.; Olsson, P. A.: Bond Failure of Deformed Reinforcing Bars Based on the Longitudinal Splitting Effect of the Bars, in: ACI Journal Proceedings 76 (1),(1979).
- [Luo23] Luo, S.; Lin, Q.; Xu, W.; Wang, D.: Effects of interval time and interfacial agents on the mechanical characteristics of ultra-high toughness cementitious composites under 3D-printed technology, in: Construction and Building Materials 374,(2023), S. 130936.
- [Lut67] Lutz, L. A.; Gerdely, P.: Mechanics of Bond and Slip of Deformed Bars in Concrete, in: ACI Journal Proceedings 64 (11),(1967), S. 711–721.
- [Ma19] Ma, G.; Li, Z.; Wang, L.; Wang, F.; Sanjayan, J.: Mechanical anisotropy of aligned fiber reinforced composite for extrusion-based 3D printing, in: Construction and Building Materials 202,(2019), S. 770–783.
- [MAI23] MAI: Betriebsanleitung, Mischpumpe MAI Multimix-3D. , <https://www.mai.at/de/3d-druck/mairmultimix-3d/>,(2023).
- [Mai93] Mainz, J.: Modellierung des Verbundtragverhaltens von Betonrippenstahl. Dissertation. Technische Universität München, München,(1993).
- [Mar] Martin, H.; Noakowski, P.: Verbundverhalten von Betonstählen: Untersuchungen auf der Grundlage von Ausziehversuchen, in: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.): DAfStb-Heft 319, Ernst & Sohn,(1981), S. 99–175.
- [Mar19] Marchment, T.; Sanjayan, J.; Xia, M.: Method of enhancing interlayer bond strength in construction scale 3D printing with mortar by effective bond area amplification, in: Materials & Design 169,(2019), S. 107684.
- [May01] Mayer, U.: Zum Einfluß der Oberflächengestalt von Rippenstählen auf das Trag- und Verformungsverhalten von Stahlbetonbauteilen, Institut für Werkstoffe im Bauwesen. Universität Stuttgart, Stuttgart,(2001).
- [Mec18a] Mechtcherine, V.; Nerella, V. N.: 3-D-Druck mit Beton: Sachstand, Entwicklungstendenzen, Herausforderungen, in: Bautechnik 95 (4),(2018), S. 275–287.
- [Mec18b] Mechtcherine, V.; Nerella, V. N.: Integration der Bewehrung beim 3D-Druck mit Beton, in: Beton- und Stahlbetonbau 113 (7),(2018), S. 496–504.
- [Mec19] Mechtcherine, V.; Nerella, V. N.; Will, F.; Näther, M.; Otto, J.; Krause, M.: Large-scale digital concrete construction – CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D-printing, in: Automation in Construction 107,(2019).
- [Mec20] Mechtcherine, V.; Michel, A.; Liebscher, M.; Schmeier, T.: Extrusion-Based Additive Manufacturing with Carbon Reinforced Concrete: Concept and Feasibility Study, in: Materials (Basel, Switzerland) 13 (11),(2020).

- [Mec21] Mechtcherine, V.; Dreßler, I.; Empelmann, M.; Gehlen, C.; Glock, C.; Kuhn, A.; Lanwer, J. P.; Lowke, D.; Müller, S.; Neef, T.; Nerella, V. N.; Stephan, D.; Vasilic, K.; Weger, D.; Wiens, U.: Digitaler Betonbau durch additive Verfahren – Sachstand und Forschungsbedarf, in: Beton- und Stahlbetonbau 116 (11),(2021), S. 881–900.
- [Mec22] Mechtcherine, V.; van Tittelboom, K.; Kazemian, A.; Kreiger, E.; Nematollahi, B.; Nerella, V. N.; Santhanam, M.; Schutter, G. de; van Zijl, G.; Lowke, D.; Ivaniuk, E.; Taubert, M.; Bos, F.: A roadmap for quality control of hardening and hardened printed concrete, in: Cement and Concrete Research 157,(2022), S. 106800.
- [Meu21] Meurer, M.; Classen, M.: Mechanical Properties of Hardened 3D Printed Concretes and Mortars-Development of a Consistent Experimental Characterization Strategy, in: Materials 14 (4),(2021), S. 752.
- [Moh21] Mohan, M. K.; Rahul, A. V.; Schutter, G. de; van Tittelboom, K.: Extrusion-based concrete 3D printing from a material perspective: A state-of-the-art review, in: Cement and Concrete Composites 115,(2021), S. 103855.
- [Nem18] Nematollahi, B.; Vijay, P.; Sanjayan, J.; Nazari, A.; Xia, M.; Naidu Nerella, V.; Mechtcherine, V.: Effect of Polypropylene Fibre Addition on Properties of Geopolymers Made by 3D Printing for Digital Construction, in: Materials (Basel, Switzerland) 11 (12),(2018).
- [Ner19] Nerella, V. N.; Hempel, S.; Mechtcherine, V.: Effects of layer-interface properties on mechanical performance of concrete elements produced by extrusion-based 3D-printing, in: Construction and Building Materials 205,(2019), S. 586–601.
- [Ner20] Nerella, V. N.; Krause, M.; Mechtcherine, V.: Direct printing test for buildability of 3D-printable concrete considering economic viability, in: Automation in Construction 109,(2020), S. 102986.
- [Oom22] Ooms, T.; Vantghem, G.; Tao, Y.; Bekaert, M.; Schutter, G. de; van Tittelboom, K.; Corte, W. De (Hrsg.): The Production of a Topology-Optimized 3D-Printed Concrete Bridge. Third RILEM International Conference on Concrete and Digital, Loughborough,(2022).
- [Pan17] Panda, B.; Chandra Paul, S.; Jen Tan, M.: Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material, in: Materials Letters 209,(2017), S. 146–149.
- [Pan18] Panda, B.; Paul, S. C.; Mohamed, N. A. N.; Tay, Y. W. D.; Tan, M. J.: Measurement of tensile bond strength of 3D printed geopolymer mortar, in: Measurement 113,(2018), S. 108–116.
- [Pau18] Paul, S. C.; Tay, Y. W. D.; Panda, B.; Tan, M. J.: Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building and construction, in: Archives of Civil and Mechanical Engineering 18 (1),(2018), S. 311–319.
- [Per16] Perrot, A.; Rangeard, D.; Pierre, A.: Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques, in: Materials and Structures 49 (4),(2016), S. 1213–1220.
- [Per24] Peri GmbH: PERI 3D Construction: Pionier für 3D-Drucklösungen im Bauwesen. , <https://www.peri.de/aktuelles/veroeffentlichungen-presse/peri-3d-construction-pionier-fuer-3d-druckloesungen-im-bauwesen.html#download>, Stand: 26.02.2024,(2024).

- [Pla22] Placzek, G.; Schwerdtner, P.: Vorüberlegungen bei der Anwendung robotischer Systeme – eine baubetriebliche Untersuchung für den Beton-3D-Druck, in: Bauingenieur 97 (12),(2022), S. 423–433.
- [Rah19] Rahul, A. V.; Santhanam, M.; Meena, H.; Ghani, Z.: Mechanical characterization of 3D printable concrete, in: Construction and Building Materials 227,(2019).
- [Reh61] Rehm, G.: Über die Grundlagen des Verbundes zwischen Stahl und Beton: DAfStb-Heft 138, Ernst & Sohn,(1961).
- [Rei19] Rein, S.: Bericht zur Lage und Perspektive der Bauwirtschaft. BBSR-Analysen kompakt, BBSR, Bonn,(2019).
- [Rei22] Reinold, J.; Nerella, V. N.; Mechtcherine, V.; Meschke, G.: Extrusion process simulation and layer shape prediction during 3D-concrete-printing using the Particle Finite Element Method, in: Automation in Construction 136,(2022), S. 104173.
- [RIL94] RILEM: RILEM technical recommendations for the testing and use of construction materials, E & FN Spon, London,(1994).
- [Rit13] Ritter, L.: Der Einfluss von Querkzug auf den Verbund zwischen Beton und Betonstahl. Dissertation. Technischen Universität Dresden,(2013).
- [Röh18] Röhling, S.; Meichsner, H.: Rissbildungen im Stahlbetonbau: Ursachen - Auswirkungen - Maßnahmen, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart,(2018).
- [Şah23] Şahin, H. G.; Mardani, A.: Mechanical properties, durability performance and interlayer adhesion of 3DPC mixtures: A state - of - the - art review, in: Structural Concrete 24 (4),(2023), S. 5481–5505.
- [Sai19] Saint-Gobain Weber Beamix: Product datasheet: Weber 3D 145-2. ,(2019).
- [San18] Sanjayan, J. G.; Nematollahi, B.; Xia, M.; Marchment, T.: Effect of surface moisture on inter-layer strength of 3D printed concrete, in: Construction and Building Materials 172,(2018), S. 468–475.
- [Sch21] Schmidt, M.; Schmidt, P.; Wanka, S.; Classen, M.: Shear Response of Members without Shear Reinforcement—Experiments and Analysis Using Shear Crack Propagation Theory (SCPT), in: Applied Sciences 11 (7),(2021), S. 1–16.
- [Sch22] Schüffler, A.: Untersuchungen zum Verbundverhalten von gedrucktem Beton und Stahlbewehrung. Bachelorarbeit. RWTH Aachen University,(2022).
- [Sch98] Schenkel, M.: Zum Verbundverhalten von Bewehrung bei kleiner Betondeckung,(1998).
- [Sco16b] Scott, C.: Chinese Construction Company 3D Prints an Entire Two-Story House On-Site in 45 Days. , <https://3dprint.com/138664/huashang-tengda-3d-print-house/>, Stand: 11.12.2021,(2016).
- [See23] Seemab, F.; Schmidt, M.; Baktheer, A.; Classen, M.; Chudoba, R.: Automated detection of propagating cracks in RC beams without shear reinforcement based on DIC-controlled modeling of damage localization, in: Engineering Structures 286,(2023), S. 116118.
- [Sor89] Soroushian, P.; Choi, K.-B.: Local Bond of Deformed Bars With Different Diameters in Confined Concrete,(1989).
- [Tay19] Tay, Y. W. D.; Li, M. Y.; Tan, M. J.: Effect of printing parameters in 3D concrete printing: Printing region and support structures, in: JOURNAL OF MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY 271,(2019), S. 261–270.

- [Tep00] Tepfers, R.; Achillides, Z.; Azizinamini, A.; Balázs, G.; Bigaj-van-Vliet, A.; Cabrera, J.; Cairns, J.; Cosenza, E.; Uijl, J. d.; Elgehausen, R.; Engström, B.; Erdélyi, L.; Gambarova, P.; Jirsa, J.; Lane, S.; Leon, R.; Magnusson, J.; Mayer, U.; McCabe, S.; Modena, C.; Modniks, J.; Mottram, T. J.; Noghabai, K.; Otsuka, K.; Ozbolt, J.; Pantazopoulou, S. J.; Pilakoutas, K.; Plizzari, G.; Realfonzo, R.; Rodriguez, J.; Rosati, G. P.; Russo, G.; Russo, S.; Shima, H.; Schumm, C.; Taerwe, L.; Tamuzs, V.; Ueda, T.; Vandewalle, L.; Vintzileou, I.: fib Bulletin 10. Bond of reinforcement in concrete, fib. The International Federation for Structural Concrete,(2000).
- [Tri14] Trillmich, R.; Welz, W.: Bolzenschweißen: Grundlagen und anwendung. Fachbuchreihe Schweißtechnik, DVS media GmbH, Dusseldorf,(2014).
- [van19a] van der Meijde, G. Y. G.: Accelerating early strength and stiffness development of a Portland cement-based mortar for 3D printing. Master, Built Environment. Eindhoven University of Technology,(2019).
- [van19b] van der Putten, J.; Deprez, M.; Cnudde, V.; Schutter, G. de; van Tittelboom, K.: Microstructural Characterization of 3D Printed Cementitious Materials, in: Materials (Basel, Switzerland) 12 (18),(2019).
- [Vos82] Vos, E.; Reinhardt, H.-W.: Influence of loading rate on bond behaviour of reinforcing steel and prestressing strands, in: Materials and Structures 15 (1),(1982), S. 3–10.
- [Wan19] Wangler, T.; Flatt, R. J. (Hrsg.): First RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication – Digital Concrete 2018. RILEM bookseries, Springer International Publishing, Cham,(2019).
- [WAS]: Produktbeschreibung der Crane WASP Fertigungsanlage. , <https://www.3dwasp.com/en/3d-printer-house-crane-wasp/>, Stand: 25.11.2023.
- [Wil13] Wildermuth, A.: Untersuchungen zum Verbundverhalten von Bewehrungsstäben mittels vereinfachter Versuchskörper: DAfStb-Heft 609, Beuth,(2013).
- [Wol18a] Wolfs, R. J. M.; Bos, F. P.; van Strien, E. C. F.; Salet, T. A. M.: A Real-Time Height Measurement and Feedback System for 3D Concrete Printing, in: Hordijk, D. A.; Luković, M. (Hrsg.): High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet, Springer International Publishing, Cham,(2018), S. 2474–2483.
- [Wol18b] Wolfs, R.; Bos, F. P.; Salet, T.: Correlation between destructive compression tests and non-destructive ultrasonic measurements on early age 3D printed concrete, in: Construction and Building Materials 181,(2018), S. 447–454.
- [Wol19] Wolfs, R.; Bos, F. P.; Salet, T.: Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion, in: Cement and Concrete Research 119,(2019), S. 132–140.
- [Zha22] Zhang, K.; Chermprayong, P.; Xiao, F.; Tzoumanikas, D.; Dams, B.; Kay, S.; Kocer, B. B.; Burns, A.; Orr, L.; Choi, C.; Darekar, D. D.; Li, W.; Hirschmann, S.; Soana, V.; Ngah, S. A.; Sareh, S.; Choubey, A.; Margheri, L.; Pawar, V. M.; Ball, R. J.; Williams, C.; Shepherd, P.; Leutenegger, S.; Stuart-Smith, R.; Kovac, M.: Aerial additive manufacturing with multiple autonomous robots, in: Nature 609 (7928),(2022), S. 709–717.
- [Zha23] Zhang, S.; Kalus, M.; Engel, S.; Hegger, J.; Claßen, M.: Development of an Innovative 3D-Printing Process for Reinforced Concrete – AMoRC Method, in: Jędrzejewska, A.; Kanavaris, F.; Azenha, M.; Benboudjema, F.; Schlicke, D.

- (Hrsg.): International RILEM Conference on Synergising Expertise towards Sustainability and Robustness of Cement-based Materials and Concrete Structures. SynerCrete23, Milos Island, Greece,(2023), S. 641–652.
- [Zil10] Zilch, K.; Zehetmaier, G.: Bemessung im konstruktiven Betonbau: Nach DIN 1045-1 (Fassung 2008) und EN 1992-1-1 (Eurocode 2), Springer, Berlin, Heidelberg,(2010).

8 Abbildungsverzeichnis

Bild 2.1:	Automatisierte und robotische Systeme [Pla22].....	5
Bild 2.2:	Filamentabmessung in Abhängigkeit des Düsenradius [Rei22]	7
Bild 2.3:	Darstellung unterschiedlicher Methoden zur Filamentablage [Che22]	8
Bild 2.4:	Down-flow-Düse (a) ohne, und (b) mit Scheren [Wol19]	8
Bild 2.5:	Druckkopf mit Schließmechanismus [Mec19]	9
Bild 2.6:	Druck auf unebene Drückfläche mithilfe eines Distanzsensors [Wol18a]	10
Bild 2.7:	Druckkopf mit Beschleunigerzufuhr von dynamischem Mixer (a) [van19a]; (b) [Fir22]	11
Bild 2.8:	Funktionsweise eines statischen Mischelementes (Querschnitt links ohne Mischelement, rechts nach Einbau des Elementes) [van19a]	11
Bild 2.9:	Druckkopf mit integriertem verstellbarem Spachtel [Kho04]	12
Bild 2.10:	Schematische Funktionsweise des Lichtbogenbolzenschweißens mit Hubzündung beim Schweißen von Bolzen auf Bolzen	15
Bild 2.11:	Beispiel für Biegeprüfung [DIN17]– Bild 2	16
Bild 2.12:	Beispiel für Zugversuch [DIN17]– Bild 4]	17
Bild 2.14:	Visualisierung des AMoRC-Verfahrens [Cla20a]	25
Bild 3.1:	3D-Stahlbeton-Druckeinrichtungen am Institut für Massivbau der RWTH Aachen	26
Bild 3.2:	®MAI Multimix-3D Pumpe [MAI23]	27
Bild 3.3:	Schweißpistole GD-22 und Inverter-Stromquelle Pro-I-2200 der Fa. Bolte [Quelle: www.bolte.gmbh , November 2023]	28
Bild 3.4:	Rechteckige und runde Düse zur Bewehrungsintegration	29
Bild 3.5:	Darstellung des Düsenkonzepts für Längsbewehrungsintegration während des Betondrucks	29
Bild 3.6:	Darstellung des Gabeldüsenkonzepts zur Integration der Vertikal- und Längsbewehrung im 3D-Betondruck	30
Bild 3.7:	Prototype der variablen Gabeldüse mit optimierten Öffnungen	31
Bild 3.8:	Stahlbetondruck mit variabler Gabeldüse: a) erste Betonschicht; b) zweite Betonschicht; c) stabiler Raum zwischen Zwillingsdüse und unterer Betonschicht	32
Bild 3.9:	Präzise Abstandsregelung mithilfe der Lineareinheit und Sensorik: a) -b): Übersicht des Düsenkonzepts mit Kameras und Sensoren; c) Detaildarstellung der Schlitten der Lineareinheit; d) -e): Regelung des Düsenabstands	32
Bild 3.10:	Druckkopf mit doppelten Gabelungen als Beispiel für die Düsenenerweiterung	33
Bild 3.11:	Erster Prototyp für das Schweißen von Bolzen auf Bolzen	34
Bild 3.12:	V-Spannbacke zum Schweißen von Bolzen auf Bolzen	35
Bild 3.13:	Beschaffenheit der Bolzen vor und nach der Bearbeitung	35
Bild 3.14:	ER-32 Spannzange hier am Beispiel 12 bis 14 mm (oben rechts) und pistolenseitiges Spannelement (unten)	36
Bild 3.15:	Mechanisierbare Greifmechanik an Lichtbogenbolzenschweißpistole (oben) und Detailansicht (unten)	37
Bild 3.16:	Aufbau des Magazins	38
Bild 3.17:	Lichtbogenbolzenschweißpistole mit finalem Aufbau zum Schweißen von Bolzen auf Bolzen	38
Bild 3.18:	Übersicht der durchgeführten Schweißungen	39

Bild 4.1:	Belastungsrichtungen von 3D-gedruckten Proben [Sah23].....	41
Bild 4.2:	Definition der Orientierung und Belastungsrichtung der 3D-gedruckten Proben von RILEM TC ADC [Mec22].....	42
Bild 4.3:	Einflussfaktoren auf die Verbundfestigkeit der 3D-gedruckten Betonfugen in Anlehnung [Liu22]	43
Bild 4.4:	Probe mit gesprühtem Phenolphthalein-Indikator [Kal16]	44
Bild 4.5:	Herstellung der bewehrten Betonbauteile zur Materialcharakterisierung.....	48
Bild 4.6:	Schematische Darstellung zur Herstellung der Proben für die Scherversuche.....	48
Bild 4.7:	Übersicht der Versuchsaufbauten zur Charakterisierung des 3D-gedruckten Betons mit Biegezug-, Druck-, Zug- und Scherversuche	49
Bild 4.8:	Versuchsaufbau des Zugversuchs der Betonfugen.....	50
Bild 4.9:	Aufbau des Scherversuchs.....	51
Bild 4.10:	Biegezugfestigkeit der 3D-gedruckten Betonbauteile.....	52
Bild 4.11:	Druckfestigkeit der 3D-gedruckten Betonbauteile	53
Bild 4.12:	Zug- und Scherfestigkeiten der 3D-gedruckten Betonbauteile	54
Bild 4.13:	Gefügebild des Betonstahls B500B	57
Bild 4.14:	Gefügebild des Baustahls S235.....	57
Bild 4.15:	ZTU-Diagramm eines B500B Stahls erstellt mit JMatPro®	58
Bild 4.16:	Temperaturverlauf im Bolzen bei einer Schweißung (links), Positionierung der Thermolemente (rechts)	59
Bild 4.17:	Härteprüfung nach Vickers für einen geschweißten 10 mm Bolzen, Übersicht (links), Ergebnisse (rechts).....	59
Bild 4.18:	Typische Fehlerbilder für das Schweißen von Bolzen auf Bolzen mit dem Lichtbogenbolzenschweißverfahren	60
Bild 4.19:	Gefügebilder der Schweißzone (links und rechts) mit Übersicht (Mitte) für einen 8 mm Bolzen	62
Bild 4.20:	Gefügebilder der Schweißzone (links und rechts) mit Übersicht (Mitte) für einen 10 mm Bolzen.....	62
Bild 4.21:	Gefügebilder der Schweißzone (links und rechts) mit Übersicht (Mitte) für einen 12 mm Bolzen.....	63
Bild 4.22:	Zugversuche für verschweißte 8 mm Bolzen	64
Bild 4.23:	Zugversuche für verschweißte 10 mm Bolzen	64
Bild 4.24:	Zugversuche für verschweißte 12 mm Bolzen	65
Bild 4.25:	Schematische Darstellung der Kraftübertragung zwischen gerippter Bewehrung und Beton [Let06]	66
Bild 4.26:	Druckkegel-Zugring-Modell und Bildung von inneren Mikrorissen [Heg14]	67
Bild 4.27:	Scherbruchversagensfälle in Abhängigkeit vom Rippenabstand [Alv98]	68
Bild 4.28:	Zusammenspiel der Verbundmechanismen und der Versagensfälle [Let06].....	69
Bild 4.29:	Verbundspannungsverteilung über eine kurze (links) und über eine lange Verbundlänge (rechts) [Rit13].....	71
Bild 4.30:	Versuchsaufbauten zur Untersuchung des Verbundverhaltens [Alv98].....	71
Bild 4.31:	Versuchsaufbau und Geometrie des Prüfkörpers des Ausziehversuchs nach RILEM/CEB/FIP RC6 [RIL94].....	72
Bild 4.32:	Abmessungen der Ausziehversuche nach [Los79] und [Eli82].....	73
Bild 4.33:	(1) Druckprüfmaschine; (2) Würfeldruckfestigkeit umgerechnet in die mittlere Zylinderdruckfestigkeit.....	76

Bild 4.34:	(1) 3-Punkt-Biegeversuch; (2) Formel zur Bestimmung der Biegezugfestigkeit der Prismen	76
Bild 4.35:	(1) Druckprüfmaschine; (2) Formel zur Bestimmung der Druckfestigkeit der halbierten Prismen.....	77
Bild 4.36:	Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit.....	77
Bild 4.37:	Definition der bezogenen Rippenfläche \bar{A}_R	78
Bild 4.38:	Beschriftung des Versuchskörpers zum Verbundverhalten.....	82
Bild 4.39:	Pull-Out Versuchskörper mit einem Bewehrungsdurchmesser von 8 mm.....	83
Bild 4.40:	Herstellung der Pull-Out-Versuche	84
Bild 4.41:	(1) Vorbereitete Bewehrungsstäbe; (2) Stromquelle Pro I 2200; (3) Schweißpistole GD 22; (4) Geschweißte Bewehrung	85
Bild 4.42:	Schematische Darstellung der möglichen Lage des Bewehrungsstabes [Geb22]	86
Bild 4.43:	3D-gedruckte, in Längsrichtung zerlegte Versuchskörper.....	87
Bild 4.44:	Vergussvorgang der 3D-gedruckten Prüfkörper.....	87
Bild 4.45:	Schematische Skizze der Prüfkörper	87
Bild 4.46:	Schematische Darstellung des Pull-Out Versuchsaufbaus	88
Bild 4.47:	Darstellung der Risse anhand der Prüfkörper D_W_w_G_ø10_S9_3 (1), D_W_w_G_ø12_S7_3 (2) und D_W_w_G_ø12_S9_1 (3).....	90
Bild 4.48:	Dargestellte Verbundzone der Druckkörper mit einem Bewehrungsdurchmesser von 10 mm	91
Bild 4.49:	Verbundspannungs-Beziehungen.....	92
Bild 4.50:	Darstellung der Verbundspannung bei einem Schlupf von 0,1 mm.....	93
Bild 4.51:	Darstellung der unterschiedlichen Bewehrungsrichtungen.....	94
Bild 4.52:	Verbundspannungen der gegossenen Prüfkörper	94
Bild 4.53:	Verbundspannungen der gedruckten Prüfkörper mit Bewehrung in u-Richtung	95
Bild 4.54:	(a) Bewehrungslage in der Mitte eines Filaments (1Fil); (b) Bewehrungslage in der Mitte der Schicht (2Fil).....	96
Bild 4.55:	Verbundspannungen der gedruckten Prüfkörper mit Bewehrung in v-Richtung	97
Bild 4.57:	Verbundspannungen der gedruckten Prüfkörper mit Bewehrung ø8 in w-Richtung	99
Bild 4.59:	Verbundspannungen der Prüfkörper mit Bewehrung ø10.....	100
Bild 4.60:	Verbundspannungen der Prüfkörper mit Bewehrung ø12.....	100
Bild 4.61:	Übersicht der gedruckten Prüfkörper mit Bewehrung in w-Richtung bei unterschiedlichen Betonfördermengen	101
Bild 4.62:	Verbundspannungen der gedruckten Prüfkörper bei unterschiedlicher Betonfördermengen in w-Richtung	101
Bild 4.63:	Verbundspannungen der gedruckten Prüfkörper bei unterschiedlicher Betonfördermengen in w-Richtung	102
Bild 4.64:	Untersuchte Düsentypen	102
Bild 4.65:	Abmessung der Querkraftversuche	107
Bild 4.66:	Schweißprozess der Querkraftbewehrung.....	108
Bild 4.67:	Holzplatten zur Positionierung der Querkraftbewehrung.....	109
Bild 4.68:	Längsbewehrung mit Abstandhalter	109
Bild 4.69:	Extrusionsprozess der Querkraftbalken mit Umdrucken der Bewehrung	110

Bild 4.71:	Ansicht von Versuchsaufbau und Messtechnik der Querkraftversuche.....	111
Bild 4.72:	Rissbilder der Querkraftbalken ohne Querkraftbewehrung ($\rho_w = 0$).....	112
Bild 4.73:	Rissentwicklung des Prüfkörpers P_S_cTR_nSR (1) mithilfe digitaler Bildkorrelation.....	113
Bild 4.74:	Kraft/Dehnung-Durchbiegung-Beziehung des Prüfkörpers P_S_cTR_nSR (1)	113
Bild 4.75:	Kraft-Durchbiegungs-Beziehung der Querkraftbalken ohne QKB	115
Bild 4.76:	Rissbilder der Querkraftbalken mit Mindestquerkraftbewehrung ($\rho_w = 1,02\rho_{w,min}$).....	116
Bild 4.77:	Verbundversagen beider Filamente des Prüfkörpers P_S_cTR_cSR400 (1): Schubfeld ohne Schubriss (links); Maßgebendes Schubfeld mit Schubriss (rechts).....	117
Bild 4.78:	Kraft/ Dehnung-Durchbiegung-Beziehung des Prüfkörpers P_S_cTR_cSR400 (2) mit kontinuierlicher QKB	117
Bild 4.79:	Rissentwicklung des Prüfkörpers P_S_cTR_cSR400 (2) mithilfe digitaler Bildkorrelation.....	118
Bild 4.80:	Kraft-Durchbiegungs-Beziehung der Querkraftbalken mit ($\rho_w = 1,02\rho_{w,min}$)	119
Bild 4.81:	Rissbilder der Querkraftbalken mit 2,5-fach Mindest-QKB ($\rho_w = 2,54\rho_{w,min}$)	121
Bild 4.82:	Fehlstellen im Querschnitt an der nicht maßgebenden Seite (links) und Betonabplatzung an der maßgebenden Seite (rechts) des Prüfkörpers P_S_cTR_cSR160 (1).....	122
Bild 4.83:	Rissentwicklung des Prüfkörpers P_S_cTR_wSR160 (2).....	123
Bild 4.85:	Kraft-Durchbiegungs-Beziehung der Querkraftbalken mit 2,5-fach Mindest-QKB ($\rho_w = 2,54\rho_{w,min}$).....	125
Bild 4.86:	Normierte Kraft-Durchbiegungs-Beziehung aller Querkraftbalken.....	125
Bild 4.87:	Abmessung der Prüfkörper zur Biegeuntersuchung.....	127
Bild 4.88:	geschweißte Längsbewehrung	128
Bild 4.89:	Rissbilder der Biegebalken	129
Bild 4.90:	Kraft-Durchbiegungs-Beziehung der Biegebalken	130
Bild 5.1:	AMoRC-Verfahren mit zwei Robotern [Zha23].....	131
Bild 5.2:	Modellierung des Demonstrators	132
Bild 5.3:	Grasshopper-Programmierung des Demonstrators	132
Bild 5.4:	Anordnung der Bewehrung des Demonstrators	133
Bild 5.5:	Umsetzung des AMoRC-Verfahrens.....	134
Bild 5.6:	Technische Schritte zur vollautomatischen Umsetzung des AMoRC Verfahrens	135
Bild 5.7:	Darstellung der Arbeitsschritte zur Herstellung des Demonstrators	135

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Unterteilung additiver Fertigungsverfahren [Kra21].....	4
Tabelle 2.2: Filamentkategorien [Pla22].....	4
Tabelle 2.3: Unterschiedliche Charakterisierungsmöglichkeiten für Frischbeton	12
Tabelle 2.4: Unterschiedliche Prüfverfahren zur Messung der rheologischen Eigenschaften	13
Tabelle 2.5: Beeinflussung der Schweißfehler durch Einstellparameter	14
Tabelle 2.6: Anforderungen und Zielgrößen des 3D-Druckverfahrens von Stahlbeton	23
Tabelle 3.1: Parameter mit erfolgreicher Schweißung.....	40
Tabelle 4.1: Ausgewählte Biegezug- und Druckfestigkeit der 3D-gedruckten Bauteile in der Literatur	43
Tabelle 4.2: Auswirkungen des Druckzeitintervalls auf die mechanischen Eigenschaften ...	45
Tabelle 4.3: Zusammensetzung des selbst entwickelten Betons (OWN) (in kg/m ³).....	46
Tabelle 4.4: Technische Daten des Weber 3D 145-2 (SGW) [Sai19]	46
Tabelle 4.5: Versuchsmatrix zur Charakterisierung des 3D-gedruckten Beton	47
Tabelle 4.6: Chemische Zusammensetzung des verwendeten Materials (Probe) und Vergleichswerte für B500B und S235 in %	56
Tabelle 4.7: Einflussfaktoren auf das Verbundverhalten	69
Tabelle 4.8: Kennwerte des kontinuierlichen Bewehrungsstahl B500B	78
Tabelle 4.9: Versuchsmatrix der Verbundversuche	80
Tabelle 4.10: Übersicht der Prüfkörper zum Verbundverhalten von Stäben mit Ø8 mm	81
Tabelle 4.11: Übersicht der Prüfkörper zum Verbundverhalten von Stäben mit Ø10 mm	81
Tabelle 4.12: Übersicht der Prüfkörper zum Verbundverhalten von Stäben mit Ø12 mm	82
Tabelle 4.13: Lichtbogenpressschweißparameter	85
Tabelle 4.14: Förderleistung der ® MAI MULTIMIX-3D Pumpe.....	86
Tabelle 4.15: Übersicht der Versuchsergebnisse der Ausziehversuche – Teil I.....	89
Tabelle 4.16: Übersicht der Versuchsergebnisse der Ausziehversuche – Teil II.....	90
Tabelle 4.17: Einfluss unterschiedlicher Düsen auf den Verbund.....	103
Tabelle 4.18: Einfluss der untersuchten Parameter auf den Verbund.....	104
Tabelle 4.19: Versuchsübersicht zum Querkrafttragverhalten	105
Tabelle 4.20: Systematik zur Bezeichnung der Querkraftversuche	106
Tabelle 4.21: Versuchsparameter der Querkraftversuche	107
Tabelle 4.22: Eigenschaften der Querkraftbalken ohne QKB	111
Tabelle 4.23: Zusammenfassung der Versuchsergebnisse der Querkraftbalken ohne QKB.....	114
Tabelle 4.24: Eigenschaften der Querkraftbalken mit Mindestquerkraftbewehrung	115
Tabelle 4.25: Versuchsergebnisse der Querkraftbalken mit Mindest-QKB ($\rho_w = 1,02\rho_{w, min}$)	119
Tabelle 4.26: Eigenschaften der Querkraftbalken mit 2,5-facher Mindest-QKB	120
Tabelle 4.27: Versuchsergebnisse der Querkraftbalken mit 2,5-facher Mindest-QKB ($\rho_w = 2,54\rho_{w, min}$)	124
Tabelle 4.28: Zusammenfassung der Versuchsergebnisse der Querkraftbalken.....	126
Tabelle 4.29: Übersicht des Versuchsprogramms zum Biegeverhalten.....	127
Tabelle 4.30: Kennwerte der Prüfkörper zur Biegeuntersuchung	127
Tabelle 4.31: Überblick der Eigenschaften der Biegebalken	128
Tabelle 5.1: Zusammenfassung der Arbeitsschritte zur Herstellung des Demonstrators ...	136

Anhang

Der Anhang ist in digitaler Version am Institut für Massivbau der RWTH Aachen vorhanden und wird auf Anfrage zur Verfügung gestellt. Wenden Sie sich bitte hierzu an imb@imb.rwth-aachen.de.